

**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 darbs**

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. – 116 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05(Enerģētika) 2022. gada 14. jūnija lēmumu, sēdes protokols Nr. 61/22.

Šis darbs izstrādāts “RTU doktorantūras grantu” ietvaros.

Šo pētījumu finansē Valsts pētījumu programma 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.

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 3. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.sc.ing. Laila Zemīte (RTU EVIF asoc.profesore)

Dr.sc.ing. Deniss Bezrukovs (Banku uzraudzības eksperts, Vācija, Frankfurte pie Mainas)

Dr.sc.ing. Arturas Klementavičius (Lietuvas enerģētikas institūta vadošais pētnieks, Kauņa, 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, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 56 attēli, 32 tabulas, kopā 116 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 63 nosaukumi.

# PATEICĪBAS

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

Autors izsaka pateicību promocijas darba vadītājiem: Rīgas Tehniskās universitātes Energosistēmu vadības un optimizācijas katedras docētājam *Jevgeņijam KOZADAJEVAM* un Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas institūta direktoram *Antanam SAUHATAM*, kā arī konsultantei asociētajai profesorei *Ļubovai PETRIČENKO*.

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

# ANOTĀCIJA

Globālā, pasaules mēroga klimata izmaiņu mazināšanas problēma ietver sevī daudzveidīgas energoefektivitātes paaugstināšanas apakšproblēmas. No tām var izdalīt daudzējādus industriālas ražošanas energoefektivitātes palielināšanas uzdevumus, jo industriālie uzņēmumi patērē ap 40 % no saražojamās enerģijas un rada ap 30 % Eiropas Savienības (ES) siltumnīcefekta gāzu emisiju. Tāpēc, lai sasniegtu 2030. gadam nospraustos klimata izmaiņu apturēšanas mērķus un īstenotu ES ilgtermiņa stratēģiju, kas paredz līdz 2050. gadam panākt klimatneitralitāti, ir ļoti svarīgi dekarbonizēt ES energosistēmu un to enerģijas galalietotājus, jo īpaši industriālos uzņēmumus.

Šajā 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 CO<sub>2</sub> izmešus atmosfērā. Piedāvātā kompleksā pieeja ietver tādas 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 uzskaitītajiem optimizācijas pasākumiem. Visi šie piedāvājumi un pasākumi ir virtuāli aprobēti vienā no Rīgas uzņēmumiem, kas ieinteresējās par šo pētījumu un sniedza izpētei nepieciešamo informāciju.

# ABSTRACT

The global, world-scale problem of diminishing climate change encompasses varied sub-problems related to the increasing of energy efficiency. From these sub-problems, various tasks of increasing the energy efficiency of industrial production can be singled out, since industrial enterprises consume about 40 % of the overall amount of energy produced and cause about 30 % of the greenhouse gas emissions of the European Union (EU). Therefore, in order to achieve the goals set as regards stopping climate change and to implement the long-term EU strategy aimed at climate neutrality, it is very important to decarbonise the EU power system and its energy end users, particularly industrial enterprises

In this thesis, the author analyses the globally amassed experience regarding the issues of energy efficiency and demand response. Using this experience along with modern technologies, the author have developed a methodology that makes it possible to use the increasing of energy efficiency as well as demand response for large producers with the aim to diminish electricity costs and the amount of CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. The complex approach includes such issues as optimisation of equipment use at the plant; optimisation of production cycles based on electricity prices; use of electricity storage in order to shift consumption in time, in conjunction with the above optimisation measures; integration of the plant's own "green" generation in conjunction with the above optimisation measures. All of these suggestions and measures have been virtually approbated at an enterprise in Riga, which took an interest in this study and furnished the information necessary for our research.

# SATURS

PROMOCIJAS DARBĀ IZMANTOTO SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS.....	9
PROMOCIJAS DARBA TABULU SARAKSTS .....	10
PROMOCIJAS DARBA ZĪMĒJUMU SARAKSTS .....	12
IEVADS .....	15
1. PROBLĒMAS NOSTĀDNE UN LITERATŪRAS ANALĪZE .....	23
1.1. Literatūras analīze .....	24
1.2. Nodaļas secinājumi .....	32
2. UZŅĒMUMA ELEKTROENERĢIJAS PATĒRIŅA OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMS	34
2.1. Uzdevuma matemātiskais formulējums .....	36
2.2. Elektroenerģijas slodzes sadalījuma uzdevuma nostādne gadījumam, ja akumulācija netiek izmantota .....	40
2.3. Tehnoloģisko un organizatorisko ierobežojumu varianti .....	41
2.4. Ražošanas modeļi.....	41
2.5. Paralēlā ražošana.....	43
2.6. Jauktā ražošana .....	43
2.7. Secīga ražošana .....	43
2.8. Optimizācijas uzdevumu dekompozīcija .....	44
2.9. Šķirošana (ražošana pēc prioritātes) .....	44
2.10. Minimizēšanas procedūras.....	45
2.11. Ieejas datu apstrāde .....	45
2.12. Īpatnējo slodžu aprēķina piemērs, izmantojot gadījuma pārlasi.....	51
2.13. Slodzes optimālā sadalījuma piemēri. Lineārā programmēšana ar pārlasi .....	54
2.14. Rezultāti .....	57
2.15. Pārlases metodes pielietojuma piemērs .....	66
2.16. Rezultāti .....	68

2.17.	Gadījuma pārļases metodes pielietojuma piemēri .....	69
2.18.	Piemērs: lineārās programmēšanas un gadījuma pārļases metožu salīdzinājums .....	76
2.19.	Nodaļas secinājumi .....	78
3.	RAŽOŠANAS UZŅĒMUMA ENERGOAPGĀDES OPTIMIZĀCIJAS PIEMĒRS	80
3.1.	Uzņēmuma produkcija un ražošanas struktūra .....	80
3.2.	Energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas .....	89
3.3.	Stikla apstrādes ražotnes enerģijas patēriņa optimizācija .....	94
3.4.	Nodaļas secinājumi .....	96
4.	ELEKTROENERĢIJAS AKUMULATORI UN PAŠĢENERĀCIJA .....	97
4.1.	Akumulatoru bateriju ekonomiskā efektivitāte, NPV kritērijs .....	103
4.2.	Pašu atjaunīgās ģenerācijas uzstādīšana .....	106
	SECINĀJUMI .....	110
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA .....	112



# PROMOCIJAS DARBĀ IZMANTOTO SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS

EE	Energoefektīvs
RP	Ražošanas plānošana
PR	Pieprasījumsreakcija
DR	Demand response
EERP	Energoefektīva ražošanas plānošana
AE	Atjaunīgie energoresursi
NPV	Neto pašreizējā vērtība
FI	Fotoelektriskā iekārta
SEG	Siltumnīcefekta gāze
RDG	Renewable distributed generation
RTP	Real time pricing, Reālā laika cenas
LFC	Load frequency control, Frekvenču regulēšana
ERC	Enerģijas saistītas izmaksas
EPF	Elektroenerģijas pieprasījuma funkcija
OMCH	Operating mode changes, Vadības režīma izmaiņas
ILC	Atslēdzamās slodzes līgums
BESS	Battery Energy Storage System, Bateriju tipa enerģijas uzkrāšanas sistēmas
OS	Operāciju secības
MKM	Mazāko kvadrātu metode
DoD	Izlādes dziļums
SoC	Akumulatora uzlādes līmenis
CPP	Reāllaika tarifi
TOU	Laikā diferencētie tarifi

# PROMOCIJAS DARBA TABULU SARAKSTS

2.1. tabula. Patēriņa ievadīšana katram produktam katrai stundai.....	46
2.2. tabula Plānotā saražotā daudzuma ievadīšana katram produktam katrai stundai .....	47
2.3. tabula Vēsturisko datu ievades forma .....	48
2.4. tabula. Ieejas dati .....	50
2.5. tabula. 1. varianta rezultāti (pie $\sigma=0$ ).....	50
2.6. tabula. 2. varianta rezultāti.....	50
2.7. tabula. Modelēto vēsturisko datu piemērs (parādīta tikai neliela daļa) .....	51
2.8. tabula. Īpatnējā elektroenerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti (gadījuma pārlasses metode) .....	52
2.9. tabula. Īpatnējā elektroenerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti (mazāko kvadrātu metode) .....	53
2.10. tabula. Sākotnējie uzdotie īpatnējie elektroenerģijas patēriņi.....	54
2.11. tabula. Produkta veidu daudzums (gab.).....	56
2.12. tabula. Produkta veida īpatnējais patēriņš (kWh/gab.) .....	56
2.13. tabula. Produkta veida maksimālā atļautā slodze (kWh/h).....	56
2.14. tabula. Kopējo izmaksu novērtēšanas rezultāti dažādiem scenārijiem .....	65
2.15. tabula. Produkta ievades tabula.....	66
2.16. tabula. Patēriņa ievades tabula .....	67
2.17. tabula. Piemērs.....	68
2.18. tabula. Modelētais operatora 1. uzdevums.....	70
2.19. tabula. Ievaddati dienai, kurā tiek veikta optimizācija .....	71
2.20. tabula. 2. uzdevuma dati .....	72
2.21. tabula. 3. uzdevuma dati .....	73
2.22. tabula. 3. uzdevuma dati .....	75
2.23. tabula. Ievaddati dienai, kurā tiek veikta optimizācija .....	75
2.24. tabula. Piemēra ieejas dati.....	77
2.25. tabula. Rezultāti .....	78
3.1. tabula. Optimālais saražojamās produkcijas daudzums.....	88
3.2. tabula. Ražotnes faktiskā noslodze 1 mēneša laikā .....	89
3.3. tabula. Pamatpieņēmumi.....	90

3.4. tabula. Elektroenerģijas patēriņš katram atsevišķajam tehnoloģiskajam procesam/ražošanas ķēdei .....	92
4.1. tabula. Kompaktie akumulatori.....	97
4.2. tabula. Baterijas ieejas dati .....	102
4.3. tabula. Ievaddati NPV aprēķinam .....	105

# PROMOCIJAS DARBA ZĪMĒJUMU SARAKSTS

1.1. att. Vienkāršots elektroenerģijas tirgus attēlojums ar pieprasījumu reakciju un bez tās [15]	26
1.2. att. Energoefektivitātes paaugstināšanas pamatvirzieni	31
1.3. att. Ražošanas uzņēmuma energoefektivitātes realizācijas struktūra	32
2.1. att. Pieslēguma vienkāršota elektriskā shēma	35
2.2. att. Rūpnieciskā uzņēmuma slodzes plānošanas algoritma struktūra [43]	36
2.3. att. Paralēlas ražošanas shēma	42
2.4. att. Secīgas ražošanas shēma	42
2.5. att. Īpatnējā enerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti	51
2.7. att. Noteiktie produktu īpatnējie elektroenerģijas patēriņi	53
2.8. att. Elektroenerģijas cenas izmaiņas diviem gadījumiem	56
2.9. att. 1. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	57
2.10. att. 2. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	58
2.11. att. 3. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	59
2.12. att. 4. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	59
2.13. att. 5. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	60
2.14. att. 6. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	61
2.15. att. 7. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	62
2.16. att. 8. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	62
2.17. att. 9. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	63
2.18. att. 10. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	64
2.19. att. 11. scenārija slodzes sadalījums pa stundām	65
2.20. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar pārlases metodi	68
2.21. att. Optimizācijas rezultāti ar dažādu pielietoto iterāciju skaitu, izmantojot Montekarlo metodi	69
2.22. att. Laiks, ko aizņem iterācijas Montekarlo ciklā	70
2.23. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi	71
2.24. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai (2. uzdevums)	72

2.25. 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 .....	73
2.26. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai, darba laiks no 6 līdz 18 (3. uzdevums) .....	74
2.27. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai, darba laiks no plkst. 8 līdz 20, P2 un P5 slodzes tiek saistītas (3. uzdevums) .....	74
2.28. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus. Salīdzinājums starp Montekarlo un mazāko kvadrātu metodēm īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai (4. uzdevums) .....	76
2.29. att. Gadījuma pārlases tuvošanās lineārās programmēšanas rezultātam .....	77
3.1. att. Vienkāršots stikla apstrādes ražotnes ražošanas plūsmu attēlojums .....	83
3.2. att. PU1 – struktūrstiklojums, 50 m <sup>2</sup> struktūrstiklojuma izgatavošanai nepieciešamas 30 minūtes .....	84
3.3. att. PU2 – stikla pakete, 50 m <sup>2</sup> stikla paketes izgatavošanai nepieciešamas 80 minūtes ..	84
3.4. att. PU3 – rūdīts stikls, 50 m <sup>2</sup> rūdīta stikla izgatavošanai nepieciešama 41 minūte .....	84
3.5. att. PU4 – laminēts rūdīts stikls, 50 m <sup>2</sup> laminēta rūdīta stikla izgatavošanai nepieciešamas 2296 minūtes .....	84
3.6. att. PU5 – stikla pakete ar rūdītiem stikliem, 50 m <sup>2</sup> stikla paketes izgatavošanai ar rūdītiem stikliem nepieciešamas 120 minūtes. ....	85
3.7. att. PU6 – stikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu, 50 m <sup>2</sup> stikla paketes izgatavošanai ar nokrāsotu rūdīto stiklu nepieciešamas 150 minūtes .....	85
3.8. att. PU7 – dubultstikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu, 50 m <sup>2</sup> dubultstikla paketes izgatavošanai ar nokrāsotu rūdīto stiklu nepieciešamas 145 minūtes .....	85
3.9. att. Visi 7 produkti kopā pa 50 m <sup>2</sup> , pēdējais produkts būs gatavs pēc 2296 minūtēm .....	86
3.10. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums, oktobris .....	90
3.11. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums, janvāris .....	91
3.12. att. Elektroenerģijas cenas veidošanās diennakts laikā .....	91
3.13. att. Produkcijas kopējās izmaksas .....	92
3.14. att. Sadalījums, oktobris .....	93
3.15. att. Sadalījums, janvāris .....	93

3.16. att. Stikla izstrādājumu ražošanas uzņēmuma kopējās ražošanas izmaksas pēc jaunas krāsns ieviešanas .....	94
3.17. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš .....	94
3.18. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš ar rūdišanas procesu .....	95
3.19. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš bez rūdišanas procesa .....	96
4.1. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš, izmantojot akumulatoru baterijas .....	102
4.2. att. NPV aprēķins 4 gadījumiem .....	106
4.3. att. Elektroenerģijas ražošana ar fotoelektrisko iekārtu .....	107
4.4. att. Saražotā enerģija un gūtā peļņa no fotoelektriskajām iekārtām pa mēnešiem .....	108
4.5. att. Fotoelektrisko iekārtu saražotā enerģija un ražotnes konkrētas līnijas enerģijas patēriņš mājā .....	109

# IEVADS

## PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Globālā, pasaules mēroga klimata izmaiņu mazināšanas problēma ietver sevī daudzveidīgas energoefektivitātes paaugstināšanas apakšproblēmas. No tām var izdalīt daudzējādus 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 2030. gadam nospraustos klimata izmaiņu apturēšanas mērķus un īstenotu ES ilgtermiņa stratēģiju, kas paredz līdz 2050. gadam panākt klimatneitralitāti, ir ļoti svarīgi dekarbonizēt ES energosistēmu un tās enerģijas galalietotājus, jo īpaši industriālos uzņēmumus [1]. Dekarbonizācijas sasniegšana notiks uz atjaunīgo energoresursu (AER) izmantošanas pamata. AER plaša un efektīva izmantošana būs iespējama tikai, ievērojami uzlabojot energosistēmas patērētāju elastību.

Neraugoties uz daudzās valstīs pašreiz notiekošo pāreju no ražošanas ekonomikas uz pakalpojumu ekonomiku, paredzams, ka līdz 2040. gadam šī daļa samazināsies tikai nenožīmīgi – līdz 37,4 % [2]. Industriālā sektora enerģijas patēriņš lielā mērā rodas no apstrādes rūpniecības. 2010. gadā ķīmiskā rūpniecība vien veidoja 19%, melnā metalurģija – 15% un nemetālisko minerālu rūpniecība – 7% no enerģijas patēriņa industriālajā sektorā [2]. No uzskaitītajiem datiem ir acīmredzams, ka pasākumiem, kas vērsti uz energoefektivitātes uzlabošanu ražošanā, ir liels potenciāls samazināt enerģijas patēriņu un ar enerģiju saistītās CO<sub>2</sub> emisijas un ka šī pieeja nezaudēs aktualitāti arī turpmākajās desmitgadēs.

Arvien vairāk pētnieku pievērš uzmanību energoefektīvai (EE) ražošanas plānošanai (RP). Šī pētījumu virziena pieaugošā popularitāte iet roku rokā ar enerģijas patēriņa pieaugumu pasaulē, kurš, ievērojot 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, kura ar mazāku patērētās enerģijas apjomu nodrošina tādu pašu vai labāku uzdotā produkcijas apjoma ražošanu ekonomiski efektīvā veidā.
2. Energoefektīva ražotne ir tāda, kura nodrošina uzdotā produkcijas apjoma ražošanu ar zemākām enerģijas izmaksām.

Abas nosauktās pieejas tiek izmantotas industriālos uzņēmumos. Taču kopā ar AER plašu izmantošanu un pieaugot elektrības cenu svārstībām, tieši otrā pieeja kļūst par dominējošo un tiks izmantota šajā darbā. Tieši šī pieeja ļauj izmantot mazāk enerģijas elektrības cenu pīķu periodos. Energoefektivitātes problēmas atrisināšanai var palīdzēt enerģijas pieprasījuma ziņā elastīgie lietotāji. Energosistēmas elastība ir tās spēja pielāgoties slodzes – ģenerācijas bilances mainīgumam un nenoteiktībai. Eiropas Komisijas Viedo tīklu darba grupa ir definējusi pieprasījuma puses elastību kā „izmaiņas galalietotāju (mājsaimniecību un rūpniecības uzņēmumu) enerģijas lietojumā salīdzinājumā ar to pašreizējiem/parastajiem patēriņa paradumiem, reaģējot uz tirgus signāliem”.

Pieprasījumreakcijas rezultātā klienti maina savu parasto patēriņu, reaģējot uz enerģijas cenas izmaiņām laikā vai uz stimulējošiem maksājumiem, kas veidoti, lai atbalstītu mazāku elektroenerģijas izmantošanu, kad cenas ir augstas vai ir apdraudēts sistēmas drošums. Tā kā vairums pieprasījumreakcijas programmu, kas darbojas pašlaik, ir uz notikumiem balstītas, tad klienti parasti pieņem, ka pieprasījumreakcijas notikumi ilgst limitētus laika periodus, kurus nosauc tīkla operators; taču pieaug kritisko pīķa tarifu (angļu val. – *critical peak pricing* (CPP)) un reāllaika tarifu (angļu val. – *real-time pricing* (RTP)) izplatība un ietekme. Daudzas pieprasījumreakcijas programmas ir veidotas galvenokārt, lai mazinātu vai pārbīdītu slodzi īsos laika periodos; taču tajās programmās, kas izglīto klientus par enerģijas izmantošanu ar laikā diferencētiem (angļu val. – *time of use* (TOU)) tarifiem, dinamiskiem tarifiem un enerģijas izmantošanas atgriezenisko saiti, arī iespējams iegūt izmērāmus samazinājumus klientu kopējā enerģijas izmantojumā un izmaksās [3].

Labāka koordinācija starp energoefektivitātes un pieprasījumreakcijas programmām piegādātāja līmenī varētu radīt rentabilitātes ieguvumus un racionālāku resursu sadali gan programmu nodrošinātājiem, gan klientiem. Koordinācija varētu palīdzēt klientiem, ņemot vērā, ka vairums klientu neizprot atšķirību starp energoefektivitāti un pieprasījumreakciju vai tā viņiem nerūp, un tie labvēlīgi uzņemtu integrētu, apkopotu pieeju enerģijas izmantošanas pārvaldībai. Lielāka klientu gatavība varētu arī palielināt pieprasījumreakcijas izplatību tirgū un ļaut izmantot enerģijas ietaupījumus un klientu rēķinu samazināšanas iespējas, kas citos gadījumos varētu iet zudumā.

Tehnoloģijas, kurās īstenoti efektivitātes pasākumi, kopumā ir ilgmūžīgas un ļauj ietaupīt enerģiju vienmēr, kad tiek darbinātas galalietotāja iekārtas. Atkarībā no laika, kad tiek lietotas iekārtas, energoefektivitātes pasākumi arī var ievērojami samazināt pīķa slodzi.



Jāsecina, ka energoefektivitāte ietekmē to, cik liela slodžu pārbīde ir pieejama pie konkrēta klienta, kas savukārt ietekmē pieprasījumsreakcijas potenciālu un tā rezultātā – visu tīklu jeb energosistēmu.

Šajā darbā autors analizē pasaulē uzkrāto pieredzi energoefektivitātes un pieprasījumsreakcijas jautājumos. Izmantojot šo pieredzi un mūsdienu tehnoloģijas, izstrādāta metodika, kas ļauj izmantot energoefektivitātes paaugstināšanu un pieprasījumsreakciju lieliem ražotājiem ar mērķi samazināt elektroenerģijas izmaksas, kā arī samazināt CO<sub>2</sub> 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 uzskaitītajiem 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 darbā izmantota **hipotēze**:

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, kura nodrošina iespēju paaugstināt energoefektivitāti un pieprasījumsreakciju industriāliem produkcijas ražotājiem, samazinot elektroenerģijas izmaksas un CO<sub>2</sub> izmešus atmosfērā.

Šī mērķa sasniegšanai atrisināti šādi galvenie **uzdevumi**:

1. Izmantojot konkrētas ražotnes piemēru un savāktos datus, veikta uzņēmuma enerģijas patēriņa analīze par ražošanas iekārtu un ražošanas ķēžu optimizācijas uzdevumu formulēšanas un atrisināšanas iespējām;
2. Vadoties pēc konkrētas ražotnes piemēra, 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, kuru var izmantot kopā ar iepriekš uzskaitītajiem optimizācijas pasākumiem;

4. Izmantojot konkrētas ražotnes piemēru, izstrādāta metodika pašu zaļās ģenerācijas izmantošanas efektivitātes novērtēšanai (kopā ar iepriekš uzskaitītajiem optimizācijas pasākumiem);
5. Izmantojot izstrādāto energoefektivitātes paaugstināšanas un pieprasījumreakcijas 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 matemātiskais modelis ražošanas ciklu optimizācijai, lai samazinātu elektroenerģijas izmaksas, ņemot vērā elektroenerģijas cenas Latvijā. Izmantoti divu veidu modeļi, pierādīta modeļu efektivitāte.
3. Sintezēts matemātiskais modelis elektroenerģijas akumulācijas sistēmas izvēlei un tās ekonomiskās efektivitātes aprēķināšanai. Modelis aprobēts konkrētā ražotnē.
4. Izveidots matemātiskais modelis pašu zaļās ģenerācijas jaudas (saules paneli) izvēlei ražotnē, kā arī šīs ģenerācijas ekonomiskās efektivitātes aprēķināšanai. Modelis aprobēts konkrētā ražotnē.
5. Izstrādāta kompleksa pieeja energoefektivitātes paaugstināšanas un pieprasījumreakcijas izmantošanas nodrošināšanai lieliem rūpnieciskiem ražotājiem, sniegtas rekomendācijas pieejas izmantošanai Latvijā.

#### IZMANTOTĀS METODEDES 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 un ražošanas struktūras modelēšana.
6. Programmēšanas valodas *C#* un *Python*.

## PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Promocijas darba praktiskā nozīme izpaužas šādi:

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 CO<sub>2</sub> izmešus atmosfērā.

## AUTORA PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS VEIKTAJOS PĒTĪJUMOS

Aizstāvamo pamattēžu fundamentu veido idejas, kuras radītas ciešā sadarbībā ar profesoru Antanu Sauhatu un docētājiem Jevgeņiju Kozadajevu un Ļubovu Petričenko. Ideju pārbaude, modeļi, sintezētās programmatūras, skaitliskie eksperimenti un to analīze, rekomendācijas efektīvai pielietošanai pieder personiski promocijas darba autoram.

## PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darbs prezentēts un apspriests dažādu līmeņu starptautiskos semināros un konferencēs:

1. 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvija, Rīga, 12.–14. oktobris, 2017.
2. 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Latvija, Rīga, 24.–25. novembris, 2017.
3. 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018), Latvija, Rīga, 12.–14. novembris, 2018.
4. 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.
5. 16th European Energy Market Conference (EEM 2019), Slovēnija, Ļubļana, 18.–20. septembris, 2019.

6. 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Conference Materials, Latvija, Rīga, 7.–9. oktobris, 2019.
7. 7th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2019): Proceedings, Latvija, Liepāja, 15.–16. novembris, 2019.
8. 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020): Conference Proceedings, Latvija, Rīga, 5.–6. novembris, 2020.

## PUBLIKĀCIJAS

*Publicēti šādi raksti par pētāmo disertācijas 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, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas turpmākam darbam, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 115 lappuses, kurās ietverti 46 attēli un 65 formulas. Literatūras sarakstā norādīti 63 izmantotās literatūras avoti.

*Ievadā* tiek pamatota promocijas darba aktualitāte un formulēti darba mērķi. Tiek aplūkoti darbā atrisinātie uzdevumi, ir minētas konferences un publikācijas, kurās apbēti darba rezultāti, kā arī izvirzītas tēzes promocijas darba aizstāvēšanai.

*Pirmā nodaļa* satur zinātniskās literatūras apkopojumu, kura veltīta dažādu rūpniecisko ražotņu energoefektivitātes paaugstināšanai un dažādiem pieprasījumu reakcijas veidiem, kā arī tās analīzi un nodaļas secinājumus, kur centrālo vietu aizņem pētījumu virzienu un metožu izvēle.

Tieši šīs izvēles rezultātā tālākai darbībai izvēlēti šādi virzieni:

1. Ražošanas adaptācija mainīgām elektrības tirgus cenām ar mērķi samazināt izmantotās enerģijas izmaksas;
2. Elektrisko bateriju (akumulatoru) izmantošana enerģijas glabāšanai un izdevīgai izmantošanai dārgo elektrības cenu periodos;
3. Atjaunīgo enerģijas avotu izmantošana daļējai energopatēriņa segšanai.

*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, dots ražojamo produktu un nepieciešamās enerģijas izmantošanas apraksts.

*Ceturtajā nodaļā* aprakstīta elektrisko akumulatoru un saules paneļu izmantošanas ekonomiskā pamatojuma metodika, doti detalizēti izmantošanas piemēri.

# 1. PROBLĒMAS NOSTĀDNE UN LITERATŪRAS ANALĪZE

2017. gada aprīlī 145 pasaules valstis (ieskaitot Baltijas valstis) [4] ir ratificējušas Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām (Parīzes nolīgums). Bez tam Eiropas Komisija 2016. gada 30. novembrī publicēja „Tīras enerģijas paketi” [5]. Nosauktie dokumenti pierāda, ka globālie politikas veidotāji pilnā sparā virza pasauli uz atjaunojamu enerģijas avotu plašu izmantošanu un uzlabotu energoefektivitāti. Šī globālā tendence ir vēl vairāk nostiprināta jaunākajās Eiropas Komisijas politikas iniciatīvās Eiropas Zaļā kursa ietvaros, kura mērķis ir līdz 2050. gadam padarīt Eiropu klimatneitrālu.

Eiropas Zaļais kurss ir balstīts uz trim pamatprincipiem, kas, pārkārtojoties uz tīru enerģētiku, palīdzēs samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas un uzlabot cilvēku dzīves kvalitāti:

- nodrošināt ES ar enerģiju par pieņemamu cenu;
- izveidot pilnībā integrētu, savstarpēji savienotu un digitalizētu ES enerģijas tirgu;
- elektroenerģijas nozares attīstīšana, kurā pamatā izmanto atjaunīgos resursus [4].

Lai sasniegtu uzdotos mērķus, ir nepieciešams ievērojami uzlabot energosistēmas elastību.

Energosistēmas elastība ir tās spēja pielāgoties slodzes – ģenerācijas bilances mainīgumam un nenoteiktībai. Elastību ir iespējams iegūt arī no pieprasījuma puses resursiem, kuru potenciāls ir atzīts, taču joprojām netiek pilnā mērā izmantots.

Eiropas Komisijas Viedo tīklu darba grupa ir definējusi elastību kā „izmaiņas galalietotāju (mājsaimniecību un rūpniecības uzņēmumu) enerģijas lietojumā salīdzinājumā ar to pašreizējiem/parastajiem patēriņa paradumiem, reaģējot uz tirgus signāliem, piemēram, laikā mainīgām elektroenerģijas cenām vai stimulējošiem maksājumiem, vai reaģējot uz patērētāja piedāvājuma pieņemšanu, kas izteikts vienpersoniski vai agregācijā, piedāvājot pārdot pieprasījuma samazinājumu/palielinājumu par noteiktu cenu organizētos elektroenerģijas tirgos” [6]. Līdzīgā veidā pieprasījuma reakcija (PR) tiek definēta kā

„apzinātas izmaiņas, ko veic galapatērētāji vai ražotāji, vai krātuves, mainot to parastos elektroenerģijas/gāzes plūsmas rādītājus” [7].

No vienas puses, šīs elastības avots ir vai nu rūpnieciskie, komerciālie, vai mājsaimniecību patērētāji [8], kuri var izmantot savu patēriņa elastību.

Visi šie izaicinājumi ir tieši sasaistāmi arī ar Latvijas energosistēmu, kur pieprasījumreakcija, ja tā tiek pienācīgi īstenota un integrēta sistēmā, varētu kalpot par vērtīgu resursu, nodrošinot nepieciešamo papildu elastību.

Šajā promocijas darbā autors koncentrēsies uz elastību rūpniecībā, citiem vārdiem, uz pieprasījumreakcijas attīstīšanu uzņēmumiem. Turklāt ir svarīgi atzīmēt, ka pieprasījumreakciju uzņēmumiem nav iespējams apspriest, nepieminot energoefektivitāti.

### 1.1. Literatūras analīze

Pieprasījumreakcijas un energoefektivitātes jēdziens rūpniecības uzņēmumiem ir aplūkots lielā skaitā zinātnisko darbu, kas veltīti vispārējiem ieguvumiem, izaicinājumiem, šķēršļiem un veicinātājfaktoriem.

Sākumā aplūkosim energoefektivitātes paaugstināšanas uzdevumu. Pastāv dažādi starptautiski un valstu standarti, kas reglamentē energoefektivitātes paaugstināšanas jautājumu. Tā kā šī darba ietvaros veiktais pētījums aprobežojas ar Latviju, apskatīsim Latvijā spēkā esošo standartu **ISO 50001** un tālāk aplūkosim enerģijas patēriņa analīzes metodiku, vadoties pēc konkrēta uzņēmuma piemēra, un novērtēsim energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu efektivitāti. Šim nolūkam detalizēti apskatīsim izvēlēta uzņēmuma ražošanas un enerģijas patēriņa struktūru.

Starptautiskais standarts ISO 50001 un tam atbilstošais Latvijas standarts ir ieviests un tiek pielietots, lai izveidotu energopārvaldības sistēmas, noteiktu prasības un lietošanas norādījumus. Standarta galvenais mērķis ir izveidot uzņēmumos sistēmas un procesus, kas nepieciešami energoefektivitātes uzlabošanai un energopatēriņa pārvaldīšanai [9].

Enerģijas pārvaldības sistēma var palīdzēt uzņēmumiem uzlabot enerģijas izmantošanu, tādējādi uzlabojot ražošanas rentabilitāti un ražotāju konkurētspēju, jo daudzos gadījumos, izvēloties preču piegādātāju, tiek stādītas prasības ražotājiem attiecībā uz atbilstību apskatāmajam standartam. Enerģijas pārvaldības sistēma ietver: sasniedzamu mērķu noteikšanu enerģijas izmantošanā, enerģijas patēriņa politikas izstrādi un īstenošanu, rīcības plānu izstrādi, sasniegto rezultātu un progresu monitoringu. Sistēma var ietvert jaunu



energoefektīvu tehnoloģiju ieviešanu, enerģijas zudumu samazināšanu vai pašreizējo procesu uzlabošanu, lai samazinātu enerģijas izmaksas.

ISO 50001 apraksta atzītu sistēmu efektīvas enerģijas pārvaldības sistēmas izstrādei. Tāpat kā citi ISO vadības sistēmas standarti, tas seko procesam “Plānojiet, pārbaudiet, rīkojieties”, lai veiktu pastāvīgus uzlabojumus. ISO 50001 nodrošina prasību kopumu, kas organizācijām ļauj atrisināt šādus galvenos uzdevumus:

- izstrādāt efektīvākas enerģijas izmantošanas politiku;
- noteikt mērķus un uzdevumus, lai sasniegtu šo politiku;
- apkopot datus, lai labāk izprastu un pieņemtu lēmumus par enerģijas izmantošanu;
- novērtēt izvēlētas politikas efektivitāti;
- pastāvīgi uzlabot enerģijas pārvaldību.

Veidojot energopārvaldības sistēmas, jāņem vērā konkrētā uzņēmuma energoapgādes specifika. Sistēmā jāietver šādi galvenie realizēšanas soļi:

1. Enerģijas ietaupījumu mērķis vai mērķi atsevišķos sektoros (piemēram, elektrības patēriņš produkcijas ražošanā, ēku apsildīšana, apgaismojums);
2. Pasākumu plāns nepārtrauktai energoefektivitātes uzlabošanai;
3. Finanšu resursu plāns pieņemto mērķu sasniegšanai;
4. Enerģijas patēriņa datu vākšana, to apstrāde un noteikto mērķu sasniegšanas rezultātu novērtējums [10].

Kopumā pētījumus par energoefektīvu ražošanu var iedalīt divos virzienos: (I) pētījumi ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu, izmantojot ražošanas procesu tehnoloģiskus uzlabojumus [11, 12, 13] un (II) pētījumi, kas cenšas samazināt enerģijas patēriņu, pielāgojot ražošanas procesa organizatoriskos parametrus, ko mēs saucam par energoefektīvu ražošanas plānošanu (EERP).

Pirmā pētījumu grupa pamatā saistīta ar iekārtu analīzi un to nomaiņu ar energoefektīvākām iekārtām. Šajā darbā šāda analīze sniegta 3. nodaļā konkrētas ražotnes piemēram. No zinātniskā viedokļa otrā pētījumu grupa šķiet interesantāka, jo tā ietver matemātiskus modeļus ražošanas ķēžu optimizācijai.

Visumā EERP modeļu mērķis ir izveidot ražošanas plānus, kuros ņemti vērā ne tikai tradicionālie ražošanas plānošanas mērķi, piemēram, krājumu uzturēšanas izmaksu, ieregulēšanas izmaksu vai kopējā izpildes laika minimizēšana, bet arī ar enerģiju saistīti

mērķi, piemēram, enerģijas patēriņa minimizēšana, enerģijas izmaksu vai ar enerģiju saistītu siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju minimizēšana, kā arī ar enerģiju saistīti ierobežojumi.

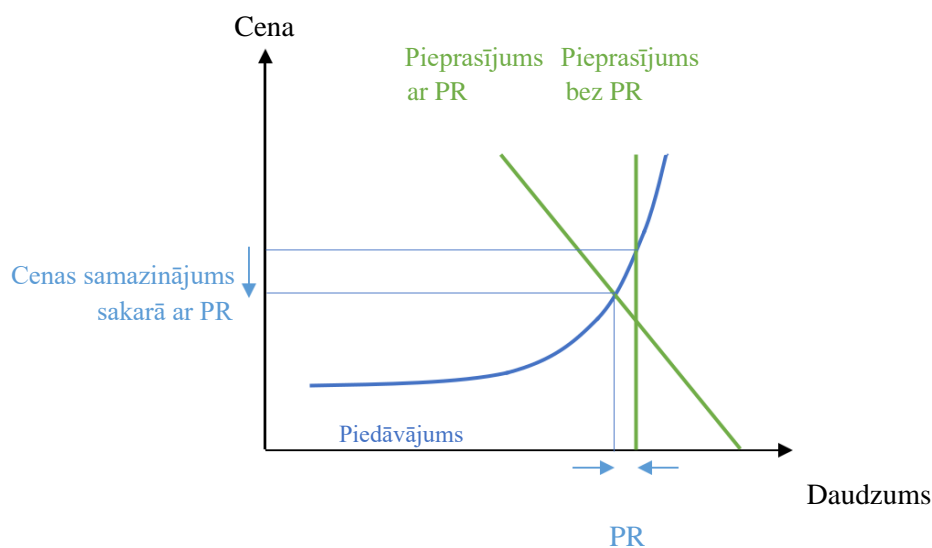
EERP modeļi ir kļuvuši arvien populārāki praksē, jo to ieviešana parasti nav saistīta ar lielām investīcijām. Līdz ar to pētījumi par EERP pēdējos gados ir piesaistījuši ievērojamu uzmanību, kā rezultāts ir daudzas publikācijas, it īpaši pēdējā desmitgadē.

Pirms pievēršanās analīzei saistībā ar ražotņu optimizāciju būtu sīkāk, nekā tas darīts ievadā, jāraksturo jēdziens „pieprasījuma reakcija” [14].

Pieprasījuma reakciju (PR) var definēt kā izmaiņas elektroenerģijas lietojumā no galalietotāju puses, mainot patēriņu, reaģējot uz elektroenerģijas cenas izmaiņām laika gaitā. Bez tam PR var definēt arī kā stimulējošos maksājumus, kas paredzēti, lai panāktu mazāku elektroenerģijas patēriņu laikā, kad vairumtirdzniecības tirgus cenas ir augstas vai kad apdraudēts ir sistēmas drošums [15].

Patērētāji var reaģēt 3 veidos [15]:

1. Samazināt patēriņu noteiktajos laikos, bet saglabāt nemainīgu patēriņu pārējā laikā;
2. Pārvietot patēriņu no noteiktajiem laikiem uz citu laiku, tā ka kopējā patēriņa vērtība paliek nemainīga; vai
3. Ģenerēt enerģiju uz vietas un samazināt patēriņu no tīkla.



1.1. att. Vienkāršots elektroenerģijas tirgus attēlojums ar pieprasījuma reakciju un bez tās [15]

Pieprasījuma reakcija paaugstina pieprasījuma elastību, jo šajā gadījumā patērētāji ir jutīgāki un reaģējošāki pret cenu signāliem, kā redzams 1.1. attēlā. Pieprasījuma reakcija var būt fiksēta (iegūta līgumu ceļā) vai mainīga (uz tirgu balstīta).

C.L. Su un D. Kirschen darbā [16] kvantitatīvi raksturots pieprasījumu reakcijas iespaids uz elektroenerģijas tirgiem un piedāvāts rīks tirgus līdzsvara panākšanai nākamajai dienai. Pieprasījumam vairāk pārvietojoties laikā, tirgus līdzsvara cenas pazeminās. Autori konstatē, ka sistēma ir efektīvāka un tiek maksimizēta arī sociālā labklājība, ja pieprasījumu reakcijā piedalās vairāk slodžu (t.i., pieaug slodžu iesaistes koeficients, angļu val. – *load participation factor*). Taču te spēkā ir krītošās efektivitātes likums, jo, iesaistoties lielākam skaitam slodžu, sistēmas ekspluatācijas izmaksu ietaupījumi piesātināsies sakarā ar ģeneratoru ražošanas robežizmaksu nesamazināšanos raksturu.

A. Khodaei, M. Shahidehpour un S. Bahramirad darbā [17] izmantotas vairākas gadījumizpētes, lai parādītu pieprasījumu reakcijas sniegtos labumus. Autori atklājuši, ka pieprasījumu reakcija var „nolīdzināt slodzes pīķus, samazināt sistēmas ekspluatācijas izmaksas, samazināt kurināmā patēriņu un oglekļa pēdu, kā arī samazināt pārvades slodzes sastrēgumus, pārveidojot ikstundas slodzes profilu”.

Elektroenerģijas patēriņa samazināšana var sniegt dažādus ieguvumus. Parasto mērķu skaitā ir šādi: elektroenerģijas tirgus cenas pazemināšana sakarā ar pieprasījuma samazināšanos; izvairīšanās no lielām investīcijām infrastruktūrā, tostarp jaunās ģenerācijas, pārvades un sadales tehnoloģijās; kā arī siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšana. Papildu ieguvumi ir sistēmu drošība, drošums, frekvences vadība, vēja enerģijas integrācija, slogotā rezerve, sprieguma vadība (reaktīvā jauda), spēja strauji palaist un apturēt iekārtas u.c. Pieprasījumu reakcija ir mērķēta pieeja, kas ļauj šos mērķus efektīvi sasniegt, jo sistēma maksā par slodžu ierobežošanu tikai tad, kad tai nepieciešams sasniegt savus mērķus.

Pieprasījumu reakcija ir plaši pētīta kā rīks, kas ļauj labāk, efektīvāk integrēt vēja enerģiju un citus atjaunīgos ģenerācijas resursus. Vēja enerģijai raksturīgajai dinamiskajai pārtraukumainībai, nenoteiktībai, mainīgumam un nepastāvībai iespējams pretdarboties ar pieprasījumu reakciju ātrā, rentablā veidā.

K. Dietrich, J.M. Latorre, L. Olmos un A. Ramos darbā [18] modelēta problēma saistībā ar agregātu slodžu grafiku izolētai sistēmai ar lielu vēja enerģijas iesaisti, un šis modelis tiek piemērots Grankanārijai, kas ir maza sala Kanāriju salu grupā. Modelis apskata divus scenārijus: pirmajā sistēmas operators attālināti pārvalda slodzi (pieprasījuma pārbīdīšana), bet otrajā patērētāji neatkarīgi reaģē uz cenu signāliem (pīķu nolīdzināšana). Sociālās labklājības maksimizēšanas vietā tiek minimizētas cenas. K. Dietrich, J.M. Latorre, L. Olmos un A. Ramos [18] parāda, ka pieprasījuma puses pārvaldības rezultātā visos gadījumos bija vērojams izmaksu ietaupījums. Grankanārijas pētījumā pieprasījuma puses pārvaldība „ļāva sasniegt izmaksu ietaupījumu līdz 30 % apmērā”.

Vēl viena analīze, lai novērtētu pieprasījumu reakcijas ietekmi uz Vācijas tirgu, veikta Klobasa, M. [19] darbā. Šis pētījums rāda, ka pieprasījumu reakcijas potenciāls kopā ar uzlabotām vēja enerģijas prognozēm var ievērojami ierobežot papildu balansēšanas izmaksas Vācijas tirgū.

B. Zeng, J. Zhang, X. Yang, J. Wang, J. Dong un Y. Zhang [20] prezentē integrētu metodoloģiju, kur atjaunīgo resursu izkliedētā ģenerācija (angļu val. – *renewable distributed generation (RDG)*) un pieprasījumu reakcija (angļu val. – *demand response (DR)*) uzskatītas par izvēles iespējām sadales sistēmu plānošanā, pārejot uz ilgtspēju ar zemām oglekļa emisijām. Tā kā pieprasījumu reakcija ļauj elektroenerģijas patēriņam ciešāk sekot atjaunīgo resursu izkliedētās ģenerācijas iekšējai ražošanai, kopējā plānošana ir uzrādījusi superaditīvu efektu attiecībā uz ieguvumiem videi salīdzinājumā ar atjaunīgo resursu izkliedētās ģenerācijas neatkarīgu integrēšanu.

Lai gan vēja enerģijas ģenerācija nerada emisijas, tās reāllaika izejošā jauda var būt stipri mainīga un nenoteikta. Tai nepieciešama papildu konvencionālās ģenerācijas jauda, kas var paaugstināt iesaistāmo ģeneratoru emisiju apjomu.

S.H. Madaeni un R. Sioshansi [21] atrisina šo, izmantojot pieprasījumu reakciju, un ievieš modeli, kas traktē pieprasījumu reakciju ar reāllaika cenu veidošanos (angļu val. – *real time pricing (RTP)*) kā operējamu resursu, kuru sistēmas operators var izmantot, lai segtu slodzi.

S.A. Pourmousavi un M.H. Nehrir [22] piedāvā pieprasījumu reakcijas vadības sistēmu, kas uzlabo energosistēmas stabilitāti un tās dinamisko darbību. Autori pievieno pieprasījumu reakcijas atgriezeniskās saites sistēmu tradicionālam slodzes frekvences regulēšanas (angļu val. – *load frequency control (LFC)*) modelim, un slodzes var reālā laikā reaģēt uz tirgus cenu un sniegt palīgpakalpojumus.

Atgriezīsimies pie ražošanas optimizācijas jautājuma. Autori Denton, F.T., Jefferies, K.L., Mountain, D.C., Robb, A.L., Spencer, B.G [23] bija pirmie, kas pētīja, kā laikā mainīgi enerģijas tarifi, kuros iekļauts gan enerģijas patēriņš, gan jaudas pieprasījuma maksa, ietekmē ražošanas grafika sastādīšanu. Apskatīja scenāriju, pie kura uzņēmums izgatavo vienu izstrādājumu vienā apkopotā ražošanas etapā.

Uzņēmums saskaras ar lēmumu problēmām trijos hierarhiskos līmeņos: (I) katru gadu uzņēmumam jāizlemj, vai ražot vienmērīgi visa gada gaitā vai arī intensīvāk dažos periodos un mazāk intensīvi citos; (II) katru nedēļu uzņēmumam jāizlemj, vai darboties tikai darba dienās vai arī vēl nedēļas nogalē; (III) katru dienu uzņēmumam jāizlemj, vai darboties vienā, divās vai trijās maiņās dienā, un kādā pakāpē katrā maiņā jāizmanto jaudas.

Gada perspektīvā izveidotais modelis minimizē fiksētās izmaksas, pamatfondu uzturēšanas izmaksas, kapitāla pakalpojumu izmaksas, materiālu izmaksas, darbaspēka izmaksas, krājumu uzturēšanas izmaksas un enerģijas izmaksas. Enerģijas izmaksas sastāv no elektroenerģijas, dabasgāzes un naftas produktu izmaksām.

Līdz ar to katru sezonu jāmaksā ikmēneša pieprasījuma maksa, kas ir atkarīga no maksimālā jaudas pieprasījuma pīķa pieprasījuma periodā un no maksimālā jaudas pieprasījuma pārējā laikā. Kamēr tā tiek aprēķināta precīzi pēc noteikumiem, tā nemainās ne sezonāli, ne arī līdz ar pieprasījuma dinamiku. Atšķirībā no elektroenerģijas un dabasgāzes cenām par naftas produktu cenām tiek pieņemts, ka tās laika gaitā nemainās.

Fethke, G., Tishler, A. [24] arī pēta ražošanas plānošanas uzdevumu uzņēmumā, kas ņem vērā laikā mainīgas enerģijas cenas, nosakot savu ražošanas grafiku. Atšķirībā no Denton, F.T., Jefferies, K.L., Mountain, D.C., Robb, A.L., Spencer, B.G. [23], autori tieši saista kāda procesa enerģijas patēriņu ar tā ražošanas apjomu.

Atšķirībā no iepriekšējiem autoriem [23, 24], Bakhrankova, K. [25] un Kondili, E., Pantelides, C., Sargent, R. [26] pēta energoefektīvu ražošanas plānošanu vairāku izstrādājumu nepārtrauktu ražošanas procesu kontekstā. No vienas puses, koncentrējas uz labāku jaudas izmantošanu, sinhronizējot ražošanas un izplatīšanas plānošanu attiecībā uz enerģijas izmaksām [25].

No otras puses, piekārto apstrādājamus izstrādājumus darbgaldiem un laikposmiem un nosaka, kuram darbgaldam jāpaliek dīkā noteiktā laikposmā un kad darbgaldam jāieplāno pāreja no vienas izstrādājuma kvalitātes uz citu [26].

Castro, P.M., Harjunoski, I., Grossmann, I.E. [27] arī pēta vairāku izstrādājumu nepārtrauktas ražošanas objekta ražošanas grafika sastādīšanas problēmu. Taču minētajā darbā piedāvātā modeļa galvenā iezīme ir nepārtraukta laika formulējuma ieviešana ar mērķi efektīvāk ņemt vērā laikā mainīgas enerģijas cenas. Šeit mērķis ir pēc iespējas vairāk ražot laika posmos, kas saistīti ar zemām enerģijas cenām.

Castro, P.M., Harjunoski, I., Grossmann, I.E. [28] paplašina šo modeli, pievienojot ar enerģiju saistītajām izmaksām (ERC) soda naudas izmaksas, kas ļauj ņemt vērā maksimālās līguma pieprasītās jaudas pārkāpumus.

Pētīts, kā dažādas elektroenerģijas pieprasījuma funkcijas (EPF) ietekmē ražošanas grafika sastādīšanu. Šim nolūkam autori pētīja ražošanas procesu ar aptuveni lineāru EPF, procesu ar paaugstinātu EPF nelinearitāti, kā arī ražošanas procesu ar nelineāru EPF ar negatīvu slīpumu. Lai minimizētu sistēmas izmaksas, autori variēja ražošanas plūsmu

noteiktās robežās attiecībā uz 2 dažādiem enerģijas tarifiem, kuros abos ņemta vērā enerģijas patēriņa maksa un jaudas pieprasījuma maksa [29].

Citā darbā pētījumus paplašināja, papildus ņemot vērā elektroenerģijas tarifus ar paaugstinātu un pazeminātu diferenciāciju [30]. Šajā gadījumā elektroenerģijas cenas dienā ir daudz augstākas vai arī tikai nedaudz augstākas par cenām naktī. Modeļa mērķis bija atrast ražošanas grafiku, kam ir optimālas ar enerģiju saistītās izmaksas (ERC), un pētīt dažādu EPF ietekmi, kā arī elektroenerģijas tarifa diferenciācijas ietekmi.

Karwan, M.H., Keblis, M.F. darbā [31] tika ņemta vērā reāllaika elektroenerģijas cenu veidošanās ražošanas grafika sastādīšanai gaisa sadalīšanas stacijas vajadzībām un tika salīdzināts iegūtais ražošanas grafiks ar ražošanas grafikiem diennakts laikā diferencētas cenas, kā arī citas dinamiskas cenu veidošanās shēmas ietvaros.

Autori Mitra un citi [32] atkal pētīja enerģijas patēriņu ražošanas grafiku sastādīšanā un ņēma vērā dažādus iekārtu darbības režīmus (tai skaitā palaidi un apturi). Nosakot ražošanas līmeņus, darbības režīmus, krājumu līmeņus un izstrādājumu pārdošanas apjomus, piedāvātais modelis minimizē krājumu uzturēšanas izmaksu summu, darbības režīmu izmaiņas (angļu val. – *operating mode changes* (OMCH)) un ar enerģiju saistītās izmaksas (ERC).

Mitra, S., Grossmann, I.E., Pinto, J.M., Arora, N. darbā [33] sniegtais modelis tika paplašināts Mitra, S., Pinto, J.M., Grossmann, I.E. darbā [34], kur tika izstrādāts vairākmērogu jaudas plānošanas modelis nenoteiktības apstākļos, kurā integrēta gan stratēģiskā, gan operatīvā plānošana.

Latifoğlu, C., Belotti, P., Snyder, L.V. darbā [35] piedāvāts pirmais lēmumu atbalsta modelis uzņēmumiem, kas izmanto atslēdzamās slodzes līgumus (ILC). Tā kā slodzes pārtraukumu konkrētais laiks parasti uz priekšu nav nosakāms (ir nenoteikts), tika izstrādāta robusta plānošanas pieeja, kas minimizē ar enerģiju saistītās izmaksas pie visiem iespējamajiem pārtraukšanas scenārijiem, netraucējot prasību izpildi.

Choi, Y.-C., Xirouchakis, P. darbs [36] ir pirmais, kur pētīta energoefektīva ražošanas plānošana vairākizstrādājumu elastīgai ražošanas sistēmai. Autori piedāvā jaunu metodoloģiju enerģijas patēriņa un materiālu plūsmu novērtēšanai dažādiem ražošanas plāniem noteiktam detaļu tipam.

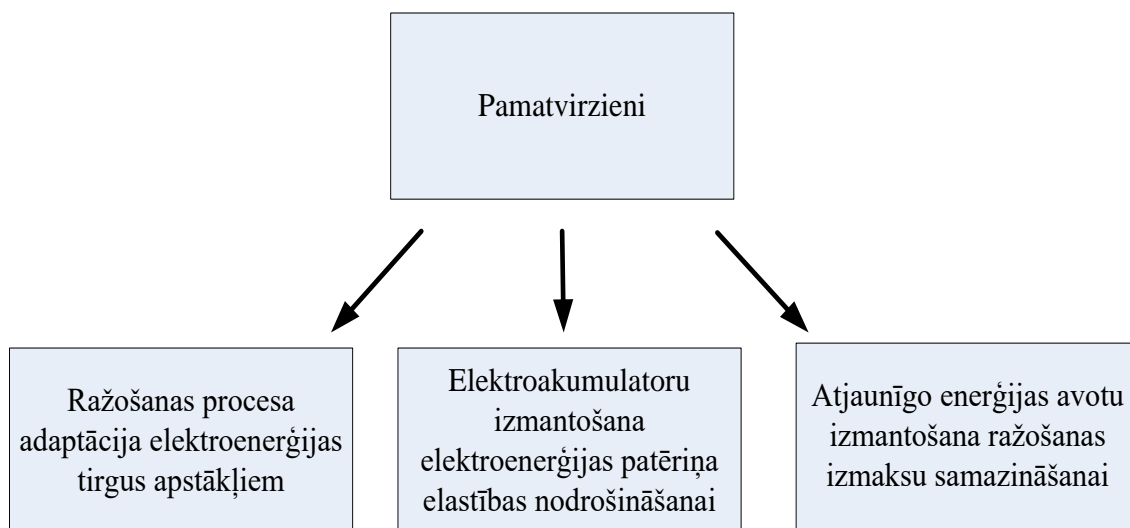
Nosakot ražošanas apjomu noteiktam detaļu tipam noteiktā laika periodā un tam atbilstošo procesu plānu, izstrādātais modelis minimizē svērto summu no enerģijas patēriņa, krājumu uzturēšanas izmaksām un zaudējumiem deficīta dēļ. Šo pieeju paplašināja Choi, Y.-C., Xirouchakis, P. [37], kur piedāvāta trīspakāpju holistiska ražošanas plānošanas pieeja.

Pirmajā plānošanas līmenī šī pieeja identificē tehnoloģiskās instrukcijas, kuras apraksta, kā ražojams konkrēts izstrādājums. Otrajā plānošanas līmenī pieeja novērtē enerģijas patēriņa sekas un ietekmi uz vidi, kas saistīta ar dažādām sistēmas rekonfigurācijām. Trešajā plānošanas līmenī šī pieeja minimizē enerģijas patēriņu un krājumu uzturēšanas izmaksas, kā arī maksimizē ražīgumu, nosakot, kādi detaļu tipu ražošanas apjomi būtu apstrādājami saskaņā ar kuru ražošanas plānu.

Zanoni, S., Bettoni, L., Glock, C.H. darbā [38] pirmo reizi produkcijas daudzuma noteikšanā integrēti dažādi darbības režīmi iekārtām, kas saistīti ar dažādiem enerģijas patēriņa līmeņiem. Autori pēta divpakāpju ražošanas sistēmu ar vadāmu ražīgumu un buferrezervēm. Pētītas divas ražošanas stratēģijas: nepārtrauktas ražošanas stratēģija, kur abas iekārtas ražo visu bez pārtraukuma, un pārtrauktas ražošanas stratēģija, kur pirmā iekārta pēc noteikta daudzuma saražošanas tiek ieslēgta dīkstāves režīmā un atkal iedarbināta tādā laikā, kas ļauj izvairīties no rezervju izsīkuma otrajai iekārtai. Modelī minimizētas krājumu uzturēšanas izmaksas, iestatīšanas izmaksas, piegādes izmaksas un ar enerģiju saistītās izmaksas (dīkstāves, pārslēgšanas un ražošanas izmaksas).

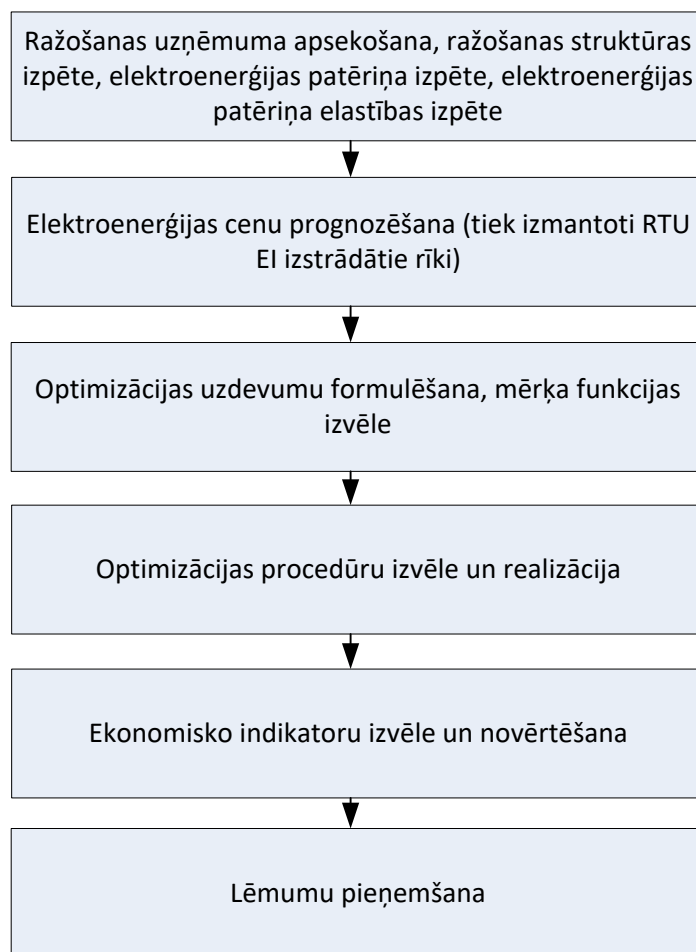
Papildus ražošanas enerģijas patēriņam Bazan, E., Jaber, M.Y., Zanoni, S. darbā [39] ņemtas vērā CO<sub>2</sub> emisijas no ražošanas un transporta operācijām divās viena pārdevēja (ražotāja) un viena pircēja ražošanas – krājumu sistēmās ar attiecīgajiem vairāklīmeņu emisiju nodokļiem un attiecīgo enerģijas izlietojumu, kāds nepieciešams ražošanai.

Apkopojot pētījumus, var izdalīt ražošanas uzņēmumu energoefektivitātes paaugstināšanas pamatvirzienus (1.2. att.).



1.2. att. Energoefektivitātes paaugstināšanas pamatvirzieni

Katra virziena realizācijas struktūra parādīta 1.3. attēlā.



1.3. att. Ražošanas uzņēmuma energoefektivitātes realizācijas struktūra

## 1.2. Nodaļas secinājumi

Apkopojot visu augstāk aprakstīto, var secināt:

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 pētīta ražošanas sistēma, kas sastāv no vienas iekārtas, tad atbilstoši vienkāršojas piedāvātās kopas un mainīgie [23].
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, bet 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, kā rezultātā izdotas daudzas publikācijas, kur energoefektivitātes apsvērumi integrēti pašreizējos ražošanas plānošanas modeļos. Tomēr esošās modelēšanas pieejas pašlaik vēl nevar atzīt par atbilstošām.

## 2. UZŅĒMUMA ELEKTROENERĢIJAS PATĒRIŅA 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 (vispārīgā gadījumā runa ir par vairāku veidu produkciju);
2. Līdz minimumam samazināt izdevumus saistībā ar elektroenerģijas izmantošanu.

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

Turklāt nepieciešams ņemt vērā trīs veidu ierobežojumus:

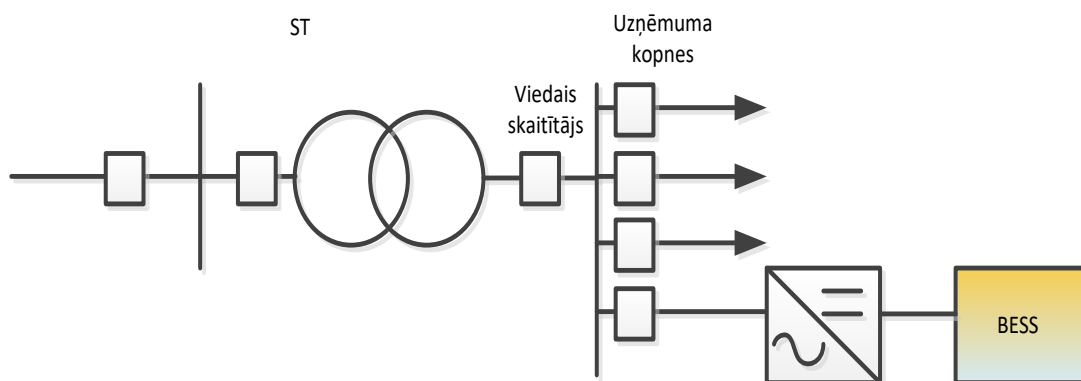
- ražošanas iekārtu jaudas ierobežojumu;
- maksimāli pieļaujamo patērēto jaudu ierobežojumu;
- tehnoloģiskos ierobežojumus.

Lai paaugstinātu ražošanas elastīgumu, iespējams izmantot papildu tehniskās sistēmas (risinājumus), kas nodrošina enerģijas uzglabāšanu. Pie šādām sistēmām pieder tehnoloģijas, kas balstītas uz uzkrājējierīču izmantošanu, piemēram, akumulācijas baterijas (*Battery Energy Storage System*, BESS) (2.1. att.) [40, 41, 42].

Turpmāk tiek aplūkota tieši tāda ražošana, kur elektroenerģijas izmantošanas efektivitātes paaugstināšanas un izmaksu samazināšanas nolūkā tiek uzstādītas iekārtas (BESS), kurām raksturīgs elastīgums un ierobežojumi attiecībā uz maksimāli pieļaujamo patēriņu. Papildus tam izmantojam 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 divpusēju vienošanos pamata. Tiek izmantots dinamisks tarifs, kur elektroenerģijas cena ir atkarīga no cenām tirgū (cena mainās ik stundu) un kurā līdztekus tirgus cenai ietilpst arī AS „Sadales Tīkls” tarifs, obligātā iepirkuma komponente un nodoklis;

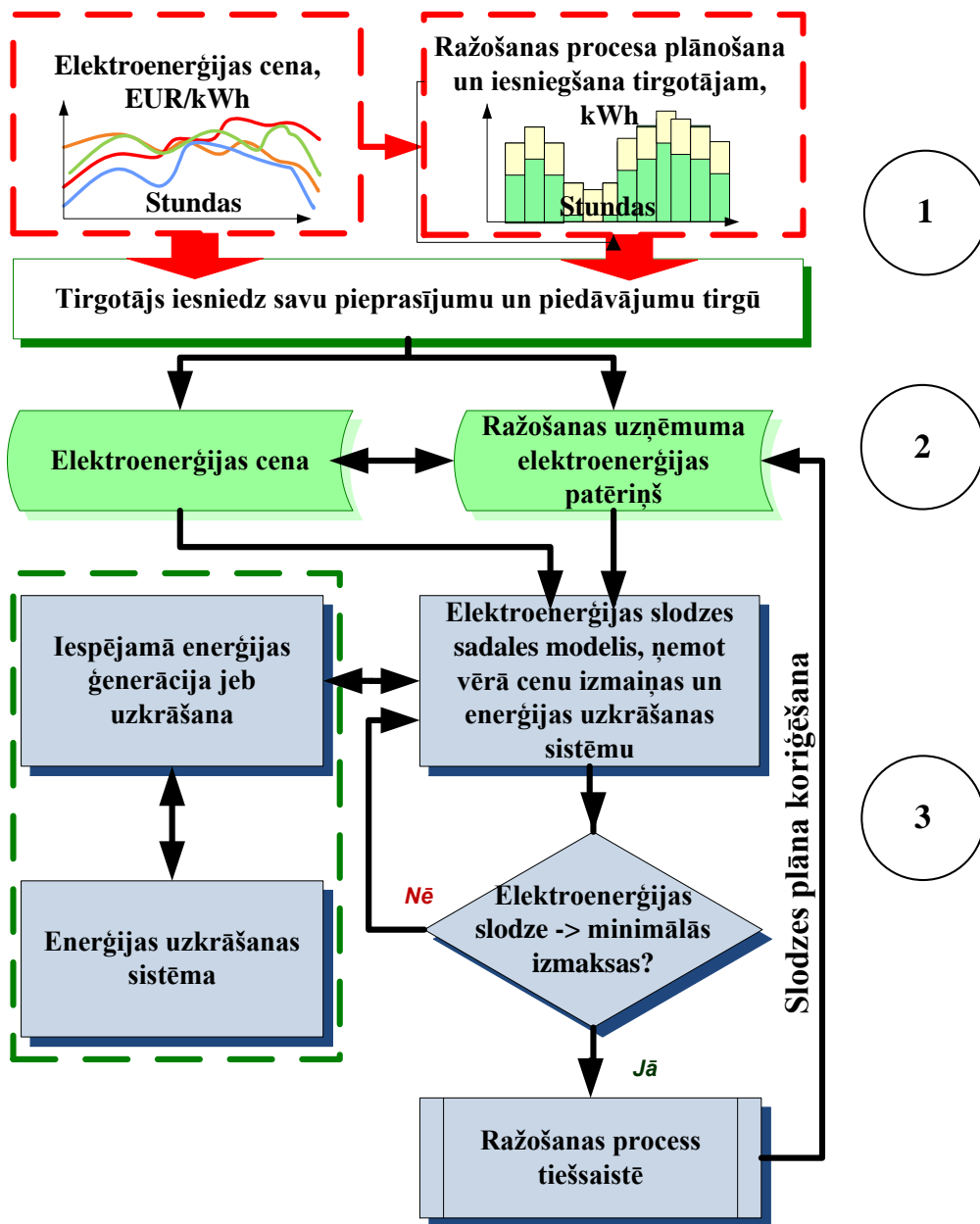
3. Patērētāja lēmums neietekmē elektroenerģijas cenas tirgū;
4. Plānošanas periods ir ierobežots laika posmā vienu nedēļu uz priekšu. Tomēr pēc ikdienas informācijas saņemšanas par cenām diennaktij uz priekšu ražošanas plāni var tikt mainīti.



2.1. att. Pieslēguma vienkāršota elektriskā shēma

Ražošanas uzņēmuma energoapgādes optimizācijas algoritmu vispārīgā veidā var aprakstīt ar trim apakšblokiem (2.2. att.), kuri 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 rezultātu, nosūta ražošanas operatoram cenas uz rītdienu;
- 2) Ražošanas uzņēmums, zinot elektroenerģijas cenas, veic optimizāciju 24 stundām uz priekšu, sadalot optimāli 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, bet izlāde jeb baterijas ģenerācija tiktu veikta augsto cenu stundās, nogludinot izmaksas patēriņam.



2.2. att. Rūpnieciskā uzņēmuma slodzes plānošanas algoritma struktūra [43]

### 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 mēs neizvirzām uzdevumu izstrādāt unikāli efektīvu optimizācijas un plānošanas metodi. Mūsu mērķis ir apvienot dažādus pasākumus, tādus kā energoefektivitātes paaugstināšana, enerģijas patēriņa paaugstināšana, enerģijas patēriņa un ražošanas procesu optimizācija, akumulācijas tehnoloģiju ieviešana (pieprasījumreakcija) un pašu zaļās ģenerācijas ieviešana, lai samazinātu elektroenerģijas izdevumus konkrētā uzņēmuma piemērā. Tādēļ šajā darbā mēs

sniedzam optimizācijas metodiku, kuru var visplašāk 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 universāla, 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 visu veidu plānotā produkcija, un lai netiek pārtraukti ražošanas procesi, netiek pārsniegti ierobežojumi attiecībā uz pieļaujamo jaudu un darba stundām, kā arī lai kopējās izmaksas elektroenerģijai ir viszemākās. Ņemot vērā to, ka ražotnē vienlaikus var darboties vairākas ražošanas līnijas, gan savā starpā saistītas, gan nesaistītas, parādās liels daudzums variantu, kā ražotnes līniju slodzi var sakārtot dienas griezumā. Atkarībā no uzdevuma sarežģītības pat pie neliela mainīgo skaita savstarpējo kombināciju daudzums var būt ļoti liels.

Uzņēmuma ražošanas modelēšanas realizēšanai ir jāveic programmatūras sintēze, kuras mērķis ir optimizēt elektroenerģijas patēriņu, balstoties uz tirgus cenām. 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 veidojamā programmā [44].

Otrais programmas mērķis ir optimizēt elektroenerģijas akumulatoru darbību – to uzlādi un izlādi dienas laikā. Tātad uzdevums sastāv no diviem apakšmoduļiem, t.i., no elektrisko slodžu grafika sadalījuma un uzkrāšanas sistēmas modelēšanas. Tad kopējam uzdevumam var stādīt 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:  $C_t$  ir elektroenerģijas cena  $t$ -tajā stundā, €/kWh;  $A_{i,t}$  ir  $i$ -tā produkta elektroenerģijas patēriņš  $t$ -tajā stundā, kWh;  $A_{BC,t}^n$  ir akumulācijas baterijas uzlādes enerģijas daudzums  $t$ -tajā stundā, kWh;  $A_{BD,t}$  ir akumulācijas baterijas izlādes enerģijas daudzums  $t$ -tajā stundā, kWh.

Uzdevuma ierobežojošie nosacījumi ir šādi:

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  $A_{max}$  ir kopējā maksimāli atļautā ikstundas slodze, kWh. Nosacījumam (2.2) ir jāizpildās pie visiem  $t$ .

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  $A_{imax}$  ir  $i$ -tā produkcijas veida maksimāli atļautā ikstundas slodze, kWh. Nosacījumam (2.3) ir jāizpildās pie visiem  $t$ .

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 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;
- uzdota 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, kurus var ražot kopā, vai pretēji, kurus nevar ražot kopā.

Detalizētu nosaukto ierobežojumu matemātisku aprakstu var veikt tikai konkrētam uzņēmumam. Vispārīgā gadījumā, izejot no ierobežojuma būtības, var veikt to klasifikāciju un matemātisko aprakstu.

4) Ražošanas plāna izpildes ierobežojumi.

Pieņemsim, 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, tātad:

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

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

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

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

Analizējot (2.4) un (2.5), varam secināt, ka šajā gadījumā ražošanas plāna izpildes ierobežojumus iespējams aprakstīt lineāru vienādojumā veidā un mērķa funkciju var uzdot vienā vienīgā variantā. Taču vispārīgā gadījumā daļa no organizatoriskiem un tehnoloģiskiem ierobežojumiem ir jāapraksta ar loģiskām izteiksmēm. Piemēram: var gadīties situācija, kad otro produktu nevar ražot kopā ar pirmo, vai šie produkti var tikt ražoti tikai kopā, vai pirmais produkts obligāti jāsarāžo pirmais, vai akumulatora izlādi var veikt tikai pēc uzlādes. Šajā gadījumā ierobežojumi ir aprakstāmi ar loģiskām izteiksmēm, kas satur loģiskas operācijas „UN”, „VAI”, „NE”, un optimizācijas uzdevums kļūst par nelineāru. Izdevumu minimizācija ir veicama, ņemot vērā tikai atļautas ražošanas operāciju secības. Vispārīgā gadījumā var būt atļautas daudzas ražošanas operāciju secības, katrai no kurām atbilst sava veida mērķa funkcija. Pieņemsim, ka pastāv operāciju secības ( $OS$ ), kuras tiek aprakstītas ar mērķa funkcijām:

$$f_1(OS), f_2(OS), \dots, f_{os}(OS) \quad (2.6)$$

Optimizācijas uzdevums ļoti sarežģģās, jo ir nepieciešams:

1. Atrast katra iespējamā varianta izmaksu minimumu:

$$\begin{cases} f_1(OS) = \min\{f_1(OS)\} \\ \dots \\ f_{os}(OS) = \min\{f_{os}(OS)\} \end{cases} \quad (2.7)$$

2. Izvēlēties variantu ar mazāko mērķa funkcijas vērtību:

$$f_{os}(OS) = \min\{f_1(OS), f_2(OS), \dots, f_{os}(OS)\} \dots \quad (2.8)$$

Uzdevumu (2.7) un (2.8) atrisināšanas nepieciešamība pārvieto optimizācijas uzdevumu uz izteikti nelineāro uzdevumu klasi un rada ievērojamas grūtības minimizācijas procedūras realizācijā [45, 46, 47].

Risinot konkrēto uzdevumu, var meklēt specializētu nelineārā uzdevuma risinājumu, tomēr, kad uzdevuma struktūra var būt mainīga atkarībā no ražotnes īpatnībām, nepieciešama pēc iespējas universāla pieeja. Pie universālām metodēm var pieskaitīt pārlases (angļu val. – *enumeration*) metodi vai ar Montekarlo paņēmiena palīdzību realizētu gadījuma pārlasi (angļu val. – *random enumeration*) [48, 49]. Šīs metodes patērē ievērojamus datora resursus, bet nodrošina to, ka programma var rast risinājumu ļoti daudzveidīgiem uzdevumiem (ar lokāliem minimumiem), nodrošinot funkcijas optimizāciju nelineāros gadījumos. Minētās metodes var pielietot gadījumos, ja to realizācija prasa pieņemama apjoma datora resursus. Šī problēma tiks izskatīta turpmāk.

Ražošanas procesu analīze dod iespēju izdalīt vienu diezgan retu, bet svarīgu gadījumu, kurš ietver ļoti elastīgu ražošanu. Šajā gadījumā visi produktu veidi var tikt ražoti jebkurā secībā un jebkurā produkcijas veidu kombinācijā. Šādu ražošanu var aprakstīt ar lineāro minimizēšanas modeli. Turpmāk apskatīsim iespēju savienot šo modeli ar pārlases metodi, jo šajā gadījumā pārlasāmo variantu skaits samazinās dramatiski.

## 2.2. Elektroenerģijas slodzes sadalījuma uzdevuma nostādne gadījumam, ja akumulācija netiek izmantota

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

$$f(A, T_{pl}) = \sum_{t=1}^{T_{pl}} C_t \cdot (A_{t,1} + A_{t,2} + \dots + A_{t,I}) \rightarrow \min \quad (2.9)$$

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

$$C_{pat,t} = C_{el,t} + OIK_{main,t} + ST_{main,t} \quad (2.10)$$

Salīdzinot (2.9) ar (2.1), redzams, ka otrā mērķa funkcija nesatur mainīgos, kuri būtu saistīti ar bateriju darbību, tātad mainīgo skaits samazinās un uzdevums vienkāršojas. Jāatzīmē, ka gadījumā, ja uzdevumā (2.1) bateriju jaudu pieņem vienādu ar nulli, tad šis uzdevums transformējas par (2.9).



### 2.3. Tehnoloģisko un organizatorisko ierobežojumu varianti

Kā jau minēts iepriekš, ierobežojumi stipri ietekmē minimizēšanas funkcijas aprēķinu. Apskatīsim pēc būtības dažādu ierobežojumu pamatvariantus:

1. Ražošanas maiņu esamība. Ja uzņēmums strādā vienā vai divās maiņās, tad attiecīgi plānošanas periodu var samazināt līdz 8 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 uzdots ar ražošanai plānoto produktu skaitu. Produktu skaits ir uzdots, katra produkta īpatnējais enerģijas patēriņš ir zināms. Produktu ražošanas secība un ražošanas stundas ir uzdots. Minimizācijas procedūra vienkāršojas. Optimizāciju var veikt tikai gadījumā, ja tiek izmantota enerģijas akumulēšana.
3. Ražošanas plāns ir uzdots ar ražošanai plānoto produktu skaitu. Produktu skaits ir uzdots, katra produkta īpatnējais enerģijas patēriņš ir zināms. Produktu ražošanas secība ir uzdots, bet ražošanas stundas var izvēlēties, pārnesot ražošanas sākumu uz citu laiku. Minimizēšanas procedūra vienkāršojas.
4. Savā starpā saistītu produktu ražošana. Tiek ražoti vairāki produktu veidi, bet to ražošana var notikt tikai kopā, ražošanas secība laikā visiem produktiem ir uzdots.
5. Savā starpā nesaistītu produktu ražošana. Tiek ražoti vairāki produktu veidi, bet to ražošana var notikt jebkurā produktu veidu kombinācijā, ražošanas secība laikā visiem produktiem ir brīvi izvēlama. Šis gadījums var dot vislielākos ietaupījumus, jo ražošana ir maksimāli elastīga.
6. Jaukta ražošana. Vispārīgā gadījumā minētie ierobežojumu varianti var parādīties kopā. Ir saistītie un nesaistītie produkti, daļa no plāna ir stingri uzdots. Daļa – brīvi izvēlama.

Tālāk, ņemot vērā teikto, apkoposim minētos variantus.

### 2.4. Ražošanas modeļi

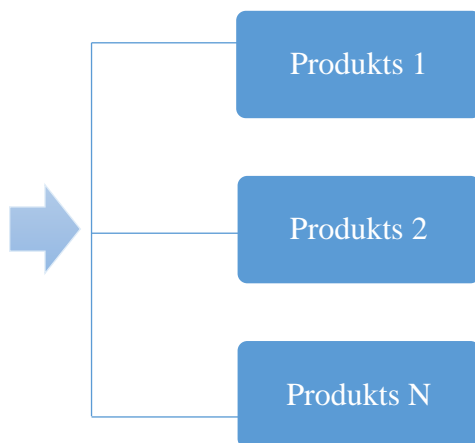
Pieņemsim, ka tiek ražoti  $I$  produkcijas veidi – produkti. Ir uzdots plānošanas perioda ilgums  $T_{pl}$ . Ir uzdots katra produkta daudzums  $q_i$  (kur  $i$  ir produkta indekss), kāds ir jāizgatavo plānošanas periodā. Ir zināms katra produkcijas veida īpatnējais enerģijas patēriņš  $p_i$ .

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

1. Paralēli (sk. 2.3. att.). Produkti tiek ražoti vienlaicīgi;

2. Pēc kārtas (sk. 2.4. att.). Produkti tiek ražoti secīgi. Var izdalīt divus apakšgadījumus:
  - 2.1. Ražošanas secība ir brīvi izvēlama;
  - 2.2. Uzdots produktu ražošanas secība. Šāda veida ierobežojumi var rasties, piemēram, no produktu piegādes nosacījumiem vai saskaņojot ar izejvielu piegādes grafikiem;
3. Jaukti (sk. 2.5. att.). Šajā gadījumā viena daļa no produktiem var tikt ražota vienlaicīgi, bet cita – secīgi.

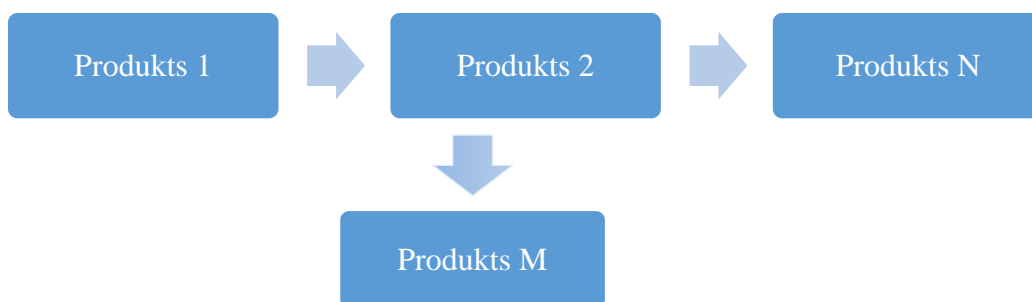
Atzīmēsim, ka izmantojamais termins „produkts” var apzīmēt ne tikai ražojamo galaproduktu. Tas var tikt pielietots arī gadījumos, kad ir vajadzība izdalīt atsevišķas ražošanas operācijas vai etapus. Tātad „produkts” var apzīmēt jebkuru ražošanas procesa rezultātu.



2.3. att. Paralēlas ražošanas shēma



2.4. att. Secīgas ražošanas shēma



2.5. att. Secīgas ražošanas shēma

Jauktas ražošanas shēma atspoguļo vispārīgu gadījumu. Atzīmēsim, ka paralēlas ražošanas etapu var būt vairāk par vienu.

Apskatīsim šīs ražošanas shēmas detalizētāk.

## 2.5. Paralēlā ražošana

Gadījumā, ja produktus var ražot tikai kopā, var ieviest papildu vienādojumus, kuriem ir šāds veids:

$$q_{t,i} = s \cdot q_{t,j} \quad (2.11)$$

kur  $s$  ir koeficients, kurš uzdod proporciju starp ražojamās produkcijas veidiem;  $j$  ir produkcijas veida indekss;  $t$  ir plānošanas perioda solis, h.

Vienādības (5.11) ievērošana noved pie optimizācijas uzdevuma mainīgo skaita samazināšanās. Vienlaikus var parādīties papildu ierobežojumi, kurus var aprakstīt ar nevienādībām, kas satur mainīgos, kas apraksta saistītus produktus:

$$q_{pat} = (q_{t,i} + s_1 \cdot q_{t,i+1} + s_{t,I-1} \cdot q_{t,1}) < q_{pat\_max} \quad (2.12)$$

kur  $q_{pat}$  ir paralēli ražojamo produktu daudzums (optimizācijas mainīgie)  $t$ -tajā stundā, gab.;  $q_{pat\_max}$  ir paralēli ražojamo produktu daudzuma ierobežojums, kas ir uzdots, izejot no ražošanas procesā izmantojamo iekārtu kapacitātes, gab.

Izteiksmju (2.11) un (2.12) izmantošana dod iespēju vienkāršot paralēlās ražošanas shēmu, aizvietojot paralēlās ražošanas zarus (sk. 2.2. att.) ar vienu – apvienojošu.

## 2.6. Jauktā ražošana

Produkti var tikt daļēji ražoti paralēli, bet daļēji – secīgi. Aizvietojot visus paralēlās ražošanas posmus ar apvienojošiem, jaukto shēmu var transformēt par secīgu.

## 2.7. Secīga ražošana

Ņemot vērā iespēju aizvietot paralēlus etapus ar vienu – apvienojošu, varam secināt, ka jauktu ražošanu iespējams transformēt par secīgu. Šī shēmas analīze dod iespēju izdalīt divus uzdevumu veidus:

*SR1* – produktu ražošanas secība nav svarīga.

*SR2* – produktu ražošanas secība ir svarīga, zināma un uzdots.

Gadījums *SR1* ir īpaši interesants, jo tas, kā tiks pierādīts tālāk, var kalpot par pamatu ražošanas optimizācijas uzdevumu atrisināšanai, izmantojot lineāro programmēšanu.

Papildinot to ar pārlases metodi, kuras uzdevums tiek sašaurināts līdz produktu ražošanas secības ievērošanai, var atrisināt arī uzdevumu  $SR2$ .

## 2.8. Optimizācijas uzdevumu dekompozīcija

Slodzes pārvaldība arī ir atkarīga no iespējas uzkrāt elektroenerģiju stundās, kad patēriņš vai enerģijas cena ir zema, un vispirms izmantot šo enerģiju stundās, kad enerģijas cena ir augstāka, tādējādi nodrošinot iekārtu ietaupījumu.

Ja tiek sastādīts uzdevums optimizēt ražošanu plānošanas periodam, kas ir 24 stundas, tiek ražoti  $N$  produkcijas veidi un baterija katru stundu var tikt uzlādēta vai izlādēta, tad mainīgo skaits  $M_{sk}$  būs vienāds ar:

$$M_{sk} = N \cdot 24 + 48, \quad (2.13)$$

kur 48 ir iespējamais baterijas uzlāžu un izlāžu skaits.

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

## 2.9. 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 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. Izrēķināt stundu skaitu  $SS1$ , kurš nepieciešams pirmā produkta uzdotā apjoma ražošanai. Jāņem vērā, ka kopējais enerģijas patēriņš katrā stundā jau ir uzdots (ņemts no lineārās programmēšanas rezultātiem). To mainīt nevar. Jāņem vērā arī iespējamais pirmā produkta tehnoloģijas kapacitātes ierobežojums.
2. Pārnesam pirmā produkta ražošanu no visām plānošanas perioda stundām tā, lai nevienā stundā enerģijas patēriņš nemainītos.

3. Izrēķinām enerģijas atlikumu, kurš paliek otrā produkta ražošanai pēdējā no *SSI* stundām.
4. Rēķinām stundu skaitu *SS2*, sākot no pēdējās *SSI* stundas.
5. Atkārtojam aprakstītos soļus visiem produktiem.

Aprakstītā procedūra tiek realizēta, izmantojot elementāras aritmētiskas un loģiskas operācijas, un pat pie liela produktu skaita neprasa lielus datora resursus.

## 2.10. Minimizēšanas procedūras

Mērķa funkciju (2.1) un (2.9) minimizēšanu var veikt, pielietojot dažādas metodes, atkarībā vispirms no ierobežojumu veidiem, kuri 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 pārlases (angļu val. – *random enumeration*) metode
3. Lineārā programmēšana un pārlases metode (angļu val. – *linear programming and enumeration*).

Pirmās divas metodes var izmantot daudzos nelineāros gadījumos. To pielietojuma galvenais ierobežojums un trūkums – nepieciešami datora resursi, jo nepieciešamo iterāciju (mēģinājumu) skaits var būt milzīgs. Nosauktās 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 turpmāk daudzveidīgos piemēros.

## 2.11. Ieejas datu apstrāde

Pieņemam, ka elektroenerģijas cenas dienai uz priekšu ir zināmas un ir zināmas citas patērētāja cenu komponentes: sadales tarifa mainīgā komponente, obligātā iepirkuma mainīgā komponente. Tādējādi mērķa funkcijā (2.1) cenu komponente ir zināma. Datu, kuri apraksta enerģijas patēriņu katrā stundā, ievade ir jāparedz divos veidos:

1. Operators ievada plānoto produktu elektroenerģijas patēriņu ( $A_{ti}$ ), katram produktam katru ražošanas stundu. Piemērs dots 2.1. tabulā. Šo datu ievades veidu iespējams realizēt tikai gadījumos, ja operatoram šādi dati ir. Diemžēl apsekotajās ražotnēs tik detalizētu datu nebija, neskatoties uz to, ka ražotnes strādāja atbilstoši ISO 900001

standartam. Uzņēmumā, kurš nolēma veikt energoapgādes optimizāciju, šādus datus iespējams savākt, bet tas prasa laiku un izdevumus.

2. Operators ievada ikstundas uzdevumu (produktu vienību daudzumu) konkrētu produktu ražošanai. Vienlaikus tiek reģistrēts enerģijas pieprasījums. Notiek vēsturisko datu apstrāde. Piemērs dots 2.2. tabulā.

Pirmais datu ievades veids paredz, ka katram atsevišķam produktam katrā stundā var tikt patērēta enerģija, kas ir vienāda ar nepieciešamo vērtību ( $A_{it}$ ) vai ar 0 (stundās, kad nav plānots ražot produktu, attiecīgās ailes obligāti jāaizpilda ar 0), un operators to zina atkarībā no dienas plāna un iesaistīto iekārtu sastāva. Vienas kolonas ietvaros programma ievadīto enerģijas sadalījumu pa stundām uzskatīs par nesadalāmu procesu. Pirms tiek palaists optimizācijas modulis, tiek pārbaudīts, vai kādā no stundām summārā patērētā enerģija nepārsniedz ierobežojumu, kas varētu būt noteikts līgumā vai ar transformatora maksimālo slodzi.

2.1. tabula. Patēriņa ievadīšana katram produktam katrai stundai

Grupas numurs	0/1...10 (0 – nav saistīts ne ar vienu grupu; 1...10 – ir saistīts ar grupu ar šādu numuru)	0/1...10	0/1...10	0/1...10
Stunda	Produkts 1, $A_1$	Produkts 2, $A_2$	Produkts 3, $A_3$	Produkts $i$ , $A_i$
1	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{1i}$
2	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	$A_{2i}$
3	$A_{31}$	$A_{32}$	$A_{33}$	$A_{3i}$
4	$A_{41}$	$A_{42}$	$A_{43}$	$A_{4i}$
...	...	...	...	...
$t$	$A_{t1}$	$A_{t2}$	$A_{t3}$	$A_{ti}$

Otrais ievades veids paredz, ka katram atsevišķam produktam katrā stundā var tikt saražots noteikts daudzums, kas ir vienāds nepieciešamo vērtību ( $q_{it}$ ) vai ar 0 (stundās, kad nav plānots ražot produktu, ailes obligāti jāaizpilda ar 0), un operators to zina atkarībā no

dienas plāna un iesaistīto iekārtu sastāva; ievades piemērs parādīts 2.2. tabulā. Šis ievades variants ir nepieciešams, ja konkrēts elektroenerģijas patēriņš iekārtai kāda produkta ražošanai stundā nav zināms, jo nav veiktie attiecīgie aprēķini ražošanas kartēs, nav uzstādīti individuālie skaitītāji katrai ražošanas līnijai, kas ļautu izveidot precīzu sadalījumu starp ražošanas daudzumu, produkta veidu un patērēto enerģiju, vai arī kādu citu iemeslu dēļ. Tādā gadījumā var izmantot vēsturiskos ražošanas – patēriņa reģistrācijas datus (turpmāk tekstā – vēsturiskie dati). Vēsturiskajiem datiem jāsaturs katras iekārtas saražotā produkta daudzums stundā, kā arī kopējā ražotnes patērētā elektroenerģija attiecīgajā stundā. Vēsturiskie dati jāpieraksta datu bāzē, kā tas parādīts 2.3. tabulā.

Papildus minētajiem datiem jānorāda ikstundas patēriņa maksimuma ierobežojumi un pieļaujamie darba laiki, kā arī saistība starp produktiem. Var norādīt ražošanas grupu, kurā ietilps konkrētais produkts; tad ir jāveic visu vienas grupas produktu apvienošana vienā saistītā procesā. Atkarībā no grupu skaita var izveidot secīgu ražošanu (visas kolonas pieder vienai grupai), jauktu ražošanu (produkti pieder vairākām grupām vai ir produkti bez grupām) un paralēlo ražošanu (visi produkti pieder nulles grupai).

2.2. tabula Plānotā saražotā daudzuma ievadīšana katram produktam katrai stundai

Grupas numurs	0/1...10 (0 – nav saistīts ne ar vienu grupu; 1...10 – ir saistīts ar grupu ar šādu numuru)	0/1...10	0/1...10
Stunda	Produkts 1, gab./kg/m <sup>3</sup>	Produkts 2, gab./kg/m <sup>3</sup>	Produkts i, gab./kg/m <sup>3</sup>
1	q <sub>11</sub>	q <sub>12</sub>	q <sub>1i</sub>
2	q <sub>21</sub>	q <sub>22</sub>	q <sub>2i</sub>
3	q <sub>31</sub>	q <sub>32</sub>	q <sub>3i</sub>
4	q <sub>41</sub>	q <sub>42</sub>	q <sub>4i</sub>
...	...	...	...
t	q <sub>t1</sub>	q <sub>t2</sub>	q <sub>ti</sub>

2.3. tabula Vēsturisko datu ievades forma

Stunda	Produkts 1, gab./kg/m <sup>3</sup>	Produkts 2, gab./kg/m <sup>3</sup>	Produkts i, gab./kg/m <sup>3</sup>	Kopējais ražotnes patēriņš $A_{t\Sigma}$ , kWh
1	$q_{11}$	$q_{12}$	$q_{1i}$	$A_{1\Sigma}$
2	$q_{21}$	$q_{22}$	$q_{2i}$	$A_{2\Sigma}$
3	$q_{31}$	$q_{32}$	$q_{3i}$	$A_{3\Sigma}$
4	$q_{41}$	$q_{42}$	$q_{4i}$	$A_{4\Sigma}$
t (gadam 8760)*	$q_{t1}$	$q_{t2}$	$q_{ti}$	$A_{t\Sigma}$

\* Datu bāzei jābūt pietiekoši lielai un jāiekļauj dati par visiem produktiem; datu bāzi vēlams regulāri papildināt, kas ļaus nākotnē iegūt rezultātus ar lielāku precizitāti.

Uzdotot vēsturiskus datus, ja vienā iekārtā var ražot dažādus produktus (vai viena produkta dažādus daudzumus), tad katrs produkts (daudzums) jāieraksta atsevišķā kolonā.

Katras stundas patēriņu var pierakstīt šādi:

$$A_{ti} = \sum_{i=1}^I q_{ti} \cdot p_{ti}, \quad (2.14)$$

kur  $A_{ti}$  ir kopējais elektroenerģijas patēriņš  $t$  stundā, MWh.

Attiecīgi katram atsevišķam produktam vienas iekārtas ietvaros patēriņš stundā ir izsakāms šādi:

$$A_{t1} = q_{t1} \cdot p_{t1} \quad (2.15)$$

Kā redzams no 2.3. tabulas, nezināmais ir tieši produkta ražošanas īpatnējais elektroenerģijas patēriņš  $p_{ti}$ . To var aprēķināt, sastādot vienādojumu sistēmu no vēsturiskiem datiem vienai stundai visiem iesaistītajiem produktiem un iekārtām. Vienādojumus var atrisināt, izmantojot dažādas pieejas. Visplašāk tiek izmantota mazāko kvadrātu metode (MKM). Tās vienādojums izskatās sekojoši:

$$\mathbf{Q} \cdot \mathbf{x} = \bar{\mathbf{b}} \quad (2.16)$$

kur  $\mathbf{Q}$  ir produktu stundas daudzuma matrica;  $\bar{\mathbf{b}}$  ir stundas kopējā patēriņa vektors;  $\mathbf{x}$  ir meklējamie mainīgie vai katra produkta īpatnējais enerģijas patēriņš  $p_i$ , kWh/gab.

Vispārīgā gadījumā vienādojumam (2.16) nav atrisinājuma. Tomēr var atrast tādas mainīgos  $\mathbf{x}$ , lai minimizētu starpību starp  $\mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}$  un  $\bar{\mathbf{b}}$ :

$$(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{x} - \bar{\mathbf{b}})^T \cdot (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{x} - \bar{\mathbf{b}}) \rightarrow \min, \quad (2.17)$$

kur indekss  $T$  nozīmē matricas transponēšanu.

Minimizācijas uzdevums (2.17) noved pie vienādojuma (2.18) risināšanas:



$$x = (Q^T \cdot Q)^{-1} \cdot Q^T \cdot \bar{b} \quad (2.18)$$

Vienādojums (2.18) satur tikai operācijas ar matricām un ir viegli realizējams pat salīdzinoši liela izmēra matricu gadījumā. Vienādojuma (2.17) transformācija uz (2.18) veikta, pieņemot, ka tiek minimizēta vidējā kvadrātiskā starpība starp  $Q \cdot x$  un  $\bar{b}$ .

Gadījumā, ja ir nepieciešams minimizēt absolūto novirzes vērtību, vienādojums (2.18) nav izmantojams. Taču šo uzdevumu iespējams atrisināt ar gadījuma pārlases pieejas palīdzību.

Atšķirība starp minētajām pieejām ir tāda, ka gadījuma pārlases metode ļauj veikt aprēķinu ar uzdoto precizitāti. Mazāko kvadrātu metode vienmēr dod rezultātu, atšķirībā no gadījuma pārlases metodes, kura pie uzdota iterāciju skaita var neatrast vajadzīgo risinājumu. Ir atšķirība arī nezināmo meklēšanas ātrumā: vienai uzdevuma rindai ar mazāko kvadrātu metodi rezultātus var atrast milisekunžu laikā, bet ar gadījuma pārlases (Montekarlo) metodi, pie 10 000 000 iterācijām un 2 % novirzes no vēsturiskajiem datiem, rezultāts tiek atrasts 0,4 līdz 1,6 sekunžu laikā.

Tālāk tiks doti piemēri ar abu metožu pielietošanas rezultātiem un to salīdzinājums. Izvērtējot abu metožu rezultātus ar modelētiem datiem, secināts, ka tos var pielietot produktu īpatnējo elektroenerģijas patēriņu noteikšanai. Tomēr bez pārbaudes ar reāliem datiem galīgo secinājumu nav iespējams izteikt.

Pirms sāksim stikla apstrādes uzņēmuma optimizāciju (sk. tālāk), apskatīsim vairākus virtuālus scenārijus, lai novērtētu šīs metodikas pielietojumu dažādām ražotnēm. Ar šādu mērķi modelēsim virtuālu uzdevumu.

Ir nepieciešams atrast katra produkta īpatnējo patēriņu,  $p_i$  (kWh/gab.), izmantojot mazāko kvadrātu metodi (MKM). Aprēķini tiek veikti *MATLAB* vidē.

Uzdevumā tiek izmantoti šādi pieņēmumi:

- ✓ Tiek ražoti 5 produktu veidi.
- ✓ Tiek fiksēts produktu daudzums katrā stundā.
- ✓ Tiek fiksēts kopējais uzņēmuma enerģijas patēriņš katrā stundā.

Tiek apskatīti 2 varianti:

1. Ikstundas kopējais patēriņš  $A_{\Sigma}$  (kWh) ir precīzi zināms.
2. Neprecizitātes dēļ mērīšanas process  $A_{\Sigma}$  satur neprecīzu informāciju.

Šim gadījumam ieviesīsim ikstundas kopējā patēriņā  $A_{\Sigma}$  iespējamo mērījuma kļūdu (troksni). Tiek pieņemts, ka troksni var aprakstīt ar normāli sadalītu gadījuma skaitli. Turklāt

matemātiskā cerība ( $\mu$ ) ir vienāda ar nulli, bet vidējā kvadrātiskā novirze (sigma jeb  $\sigma$ ) ir uzdots scenāriju veidā, ir mainīga un vienāda ar: 2,5 %; 5,0 %; 7,5 %; 10,0 %.

Produktu daudzums stundā  $q_t$  (gab.) un kopējais patēriņš dots 2.4. tabulā.

2.4. tabula. Ieejas dati

Stundas numurs	$q_1$ , gab.	$q_2$ , gab.	$q_3$ , gab.	$q_4$ , gab.	$q_5$ , gab.	$A_\Sigma$ , kWh
1.	100	200	300	100	200	410
2.	50	100	200	200	100	285
3.	100	100	200	0	100	230
4.	50	0	300	100	0	185
5.	0	200	0	300	200	320
...	...	...	...	...	...	...
30.	0	200	200	200	0	280
...	...	...	...	...	...	...
120.	0	200	200	200	0	280

2.4. tabula satur fragmentu no 120 mērījuma stundām. Lai izpētītu metodes precizitātes atkarību no stundu skaita, tiek izmantotas 2.4. tabulas pirmās 30 stundas (2. varianta 1. gadījums) un visas 120 stundas (2. varianta 2. gadījums).

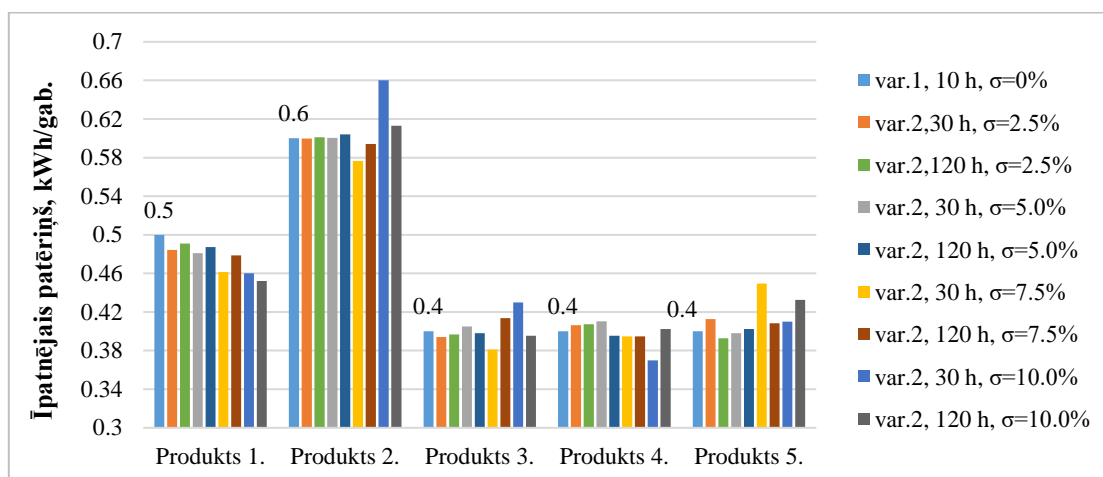
Kopumā tiek aprēķināti 9 scenāriji katram produktam. Rezultāti atspoguļoti 2.5. un 2.6. tabulā, kā arī grafiski (2.6. att.).

2.5. tabula. 1. varianta rezultāti (pie  $\sigma=0$ )

$p_1$ , kWh/gab.	$p_2$ , kWh/gab.	$p_3$ , kWh/gab.	$p_4$ , kWh/gab.	$p_5$ , kWh/gab.
0,5	0,6	0,4	0,4	0,4

2.6. tabula. 2. varianta rezultāti

$\sigma$ , %	$p_1$ , kWh/gab.	$p_2$ , kWh/gab.	$p_3$ , kWh/gab.	$p_4$ , kWh/gab.	$p_5$ , kWh/gab.
	<i>1. gadījums</i>				
2,5	0,48	0,60	0,39	0,41	0,41
5,0	0,48	0,60	0,41	0,41	0,40
7,5	0,46	0,58	0,38	0,39	0,45
10,0	0,46	0,66	0,43	0,37	0,41
<i>2. gadījums</i>					
2,5	0,49	0,60	0,40	0,41	0,39
5,0	0,49	0,60	0,40	0,40	0,40
7,5	0,48	0,59	0,41	0,39	0,41
10,0	0,45	0,61	0,40	0,40	0,43



2.5. att. Īpatnējā enerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti

No aprēķinu rezultātiem redzam, ka īpatnējā patēriņa novērtēšanas precizitāte ir atkarīga no mērījuma kļūdas vidējās kvadrātiskās novirzes vērtības (no  $\sigma$ ). Ir arī pamanāms neliels precizitātes pieaugums atkarībā no stundu skaita palielināšanas. Tā stundu skaita palielināšana no 30 līdz 120 stundām nedaudz uzlabo vidējās precizitātes vērtību. Var secināt, ka pirmā un otrā varianta īpatnējā patēriņa  $p_i$  rezultāti ir apmēram līdzīgi.

### 2.12. Īpatnējo slodžu aprēķina piemērs, izmantojot gadījuma pārļasi

Arī šajā gadījumā pieņemts, ka ikstundas kopējā patēriņa  $A_\Sigma$  mērījumi notiek ar kļūdu (troksni). Tiek pieņemts, ka troksni var aprakstīt ar normāli sadalītu gadījuma skaitli. Turklāt matemātiskā cerība ( $\mu$ ) ir vienāda ar nulli, bet vidējā kvadrātiskā novirze ( $\sigma$ ) ir uzdota un vienāda ar 10 %; 2.7. tabula parāda, kādā formātā bija ievadīti vēsturiskie dati, kas tika izmantoti programmas verifikācijai. Parādītas ir tikai 28 stundas no vairākiem simtiem. Datu bāze izskatās šādi:

2.7. tabula. Modelēto vēsturisko datu piemērs (parādīta tikai neliela daļa)

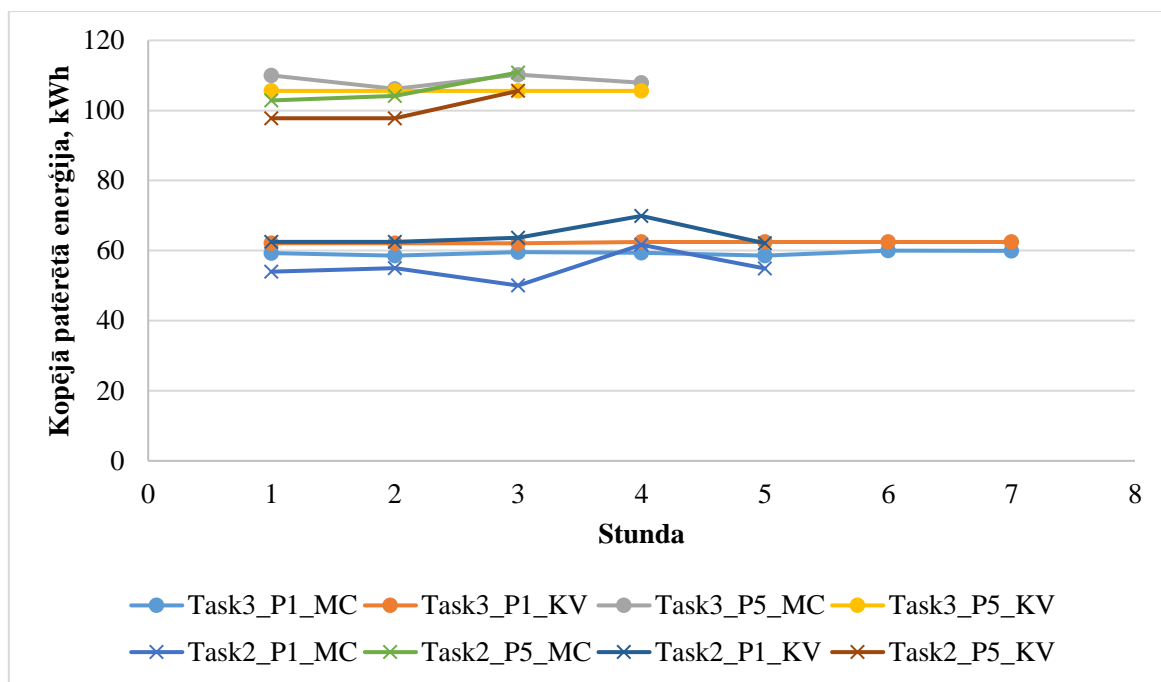
	Produkts	Produkts	Produkts		Produkts	Produkts	Patēriņš
	1	2	3		4	5	
	gab.	gab.	gab.		gab.	gab.	kWh
Stunda	$q1$	$q2$	$q3$		$q4$	$q5$	-
1	25	30	0		0	100	216,4851
2	25	30	0		0	100	219,6076
3	25	30	0		45	100	252,3013
4	25	30	0		45	100	249,1811
5	25	30	0		45	100	251,6599
6	25	30	80		45	100	371,4054

7	25	30	80		45	100	376,2368
8	25	30	80		45	100	368,1713
9	25	30	80		45	0	266,0978
10	25	30	80		45	0	264,4203
11	25	30	80		45	0	267,1866
12	25	30	80		45	0	265,628
13	25	30	80		45	0	261,9516
14	25	30	0		45	0	147,0909
15	25	30	0		45	100	250,7752
16	25	30	0		45	100	251,6773
17	25	30	0		45	100	255,5957
18	25	30	80		45	100	376,2739
19	25	30	80		45	100	376,9552
20	25	30	80		45	100	372,1864
21	25	30	80		45	100	376,216
22	25	30	80		45	100	369,7583
23	25	30	80		45	100	376,7271
24	25	30	80		45	100	375,5388
25	25	30	80		45	100	377,6984
26	25	30	0		45	100	249,3672
27	25	30	0		45	100	256,6139
28	25	30	0		45	100	251,5803

Tika uzdoti vairāki uzdevumi, un daži no rezultātiem ir attēloti 2.7. attēlā. Var redzēt, ka mazāko kvadrātu metode (attēlā izmantots saīsinājums KV) un gadījuma pārslases metode (attēlā izmantots saīsinājums MC) dod tuvus rezultātus.

2.8. tabula. Īpatnējā elektroenerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti (gadījuma pārslases metode)

<i>p1</i> , kWh/gab.	<i>p2</i> , kWh/gab.	<i>p3</i> , kWh/gab.	<i>p4</i> , kWh/gab.	<i>p5</i> , kWh/gab.
2,387843269	1,723523176	1,551503408	0,632931788	1,055911085
2,339439402	1,803341979	1,519892884	0,710322058	1,062123469
2,194527599	1,805063074	1,624534955	0,622931351	1,110461089
2,357543105	1,778107802	1,622403345	0,770153841	1,061887464
2,402082024	1,761950432	2,248890339	0,711896761	1,074648442
2,137155845	1,876056298	1,148979633	0,778828669	1,111022677
2,380545587	1,779100434	1,811480399	0,734493847	1,069560722
2,221242527	1,84975562	1,561954867	0,742294245	1,091091553
2,025871209	2,076108444	1,501663376	0,732869342	1,145493777
2,211647914	1,84032731	1,465748249	0,776366983	1,093491102
2,416316964	1,717905662	1,592737765	0,698123663	1,0620952



2.6. att. Noteiktie produktu īpatnējie elektroenerģijas patēriņi

2.8. tabulā ir parādīti īpatnējo elektroenerģijas patēriņu aprēķinu rezultāti ar gadījuma pārlases (Montekarlo) metodi un 2.9. tabulā tā paša uzdevuma īpatnējo elektroenerģijas patēriņu aprēķinu rezultāti ar mazāko kvadrātu metodi.

2.9. tabula. Īpatnējā elektroenerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti (mazāko kvadrātu metode)

$p1$ , kWh/gab.	$p2$ , kWh/gab.	$p3$ , kWh/gab.	$p4$ , kWh/gab.	$p5$ , kWh/gab.
2,483834598	1,632756185	1,579323072	0,626699242	1,055930631
2,483834598	1,632756185	1,579323072	0,626699242	1,055930631
2,483834598	1,632756185	1,579323072	0,626699242	1,055930631
2,498751703	1,686970187	1,536331773	0,711415499	1,034072516
2,498751703	1,686970187	1,536331773	0,711415499	1,034072516
2,498751703	1,686970187	1,536331773	0,711415499	1,034072516
2,498751703	1,686970187	1,536331773	0,711415499	1,034072516
2,498751703	1,686970187	1,536331773	0,711415499	1,034072516
2,498751703	1,686970187	1,536331773	0,711415499	1,034072516
2,5488914	1,645187106	1,552000428	0,711415499	1,021537592
2,5488914	1,645187106	1,552000428	0,711415499	1,021537592
2,483834598	1,632756185	1,579323072	0,626699242	1,055930631

2.8. un 2.9. tabulā uzrādīto rezultātu izklāde skaidrojama ar to, ka tika modelēti dažādi ražošanas plāni un atkarībā no tiem tika mainītas ieejas datu stundas, kas tiek izmantotas īpatnējā elektroenerģijas patēriņa novērtēšanai. Vienlaicīgi tika modelēts relatīvi intensīvs troksnis (vidējā kvadrātiskā novirze 10 %, tādējādi, ja izmanto  $3\sigma$  kārtulu, ir iespējamas pat 30 % novirzes). Izmantotās vērtības bez trokšņa dotas 2.10. tabulā.

2.10. tabula. Sākotnējie uzdotie īpatnējie elektroenerģijas patēriņi

$p1$ , kWh/gab.	$p2$ , kWh/gab.	$p3$ , kWh/gab.	$p4$ , kWh/gab.	$p5$ , kWh/gab.
2,3	1,8	1,2	0,8	1,1

Atzīmēsim, ka bez reālo datu apstrādes un rezultātu analīzes nevar spriest par kādas no metodēm viennozīmīgām priekšrocībām. 2.7. att. atspoguļotie kopējā enerģijas patēriņa novērtēšanas rezultāti ļauj apgalvot, ka nevar atņemt nevienu no izmantotajām pieejām. Papildu precizitātes novērtēšanas rezultāti doti šīs nodaļas beigās. No datora resursu viedokļa abas metodes var uzskatīt par pieņemamām.

### 2.13. Slodzes optimālā sadalījuma piemēri. Lineārā programmēšana ar pārslasi

Lai veiktu dziļāku analīzi, apskatīsim dažādus scenārijus, kas ir aprakstīti zemāk:

- Šajā aprēķinā tiek ņemti 5 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 (2.11. tabula).

- Elektroenerģijas cenas ( $C_{el}$ ) ir zināmas no plkst. 14.00 dienai uz priekšu no *Nord Pool* biržas. Rezultātā dienas sākums ir 14.00–15.00, bet tās beigas ir 13.00–14.00. Piemērā tiek ņemts 2018. gada 26. februāris (augsto svārstību cenas grafiks) un 19. jūlijs (zemo svārstību cenas grafiks) (2.8. att.).

- Sadales tarifs tiek ņemts 3 laika zonām (S8): nakts zona un nedēļas nogale (0,030625 €/kWh), maksimumstundu zona (0,055902 €/kWh), dienas zona (0,039507 €/kWh) [50].

- OIK maksa tiek apskatīta atbilstoši esošajam regulējumam no 2019. gada 1. janvāra (0,01783 €/kWh) [51].

- Katram produkta veidam tiek uzdots īpatnējais enerģijas patēriņš ( $p$ ). Dati apkopoti 2.12. tabulā.

- Kopējā maksimālā atļautā ikstundas slodze ( $A_{max}$ ) vienāda ar 500 kWh/h.
- Katra produkcijas veida maksimālā atļautā slodze dota 2.13. tabulā.
- Tiek apskatīti 11 scenāriji:

- ✓ 1. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze nav ierobežota. Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V1 (2.11. tabula). Tiek veikts optimālais slodžu sadalījums, izmantojot lineāro programmēšanu.

✓ 2. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V1 (2.11. tabula). Tiek veikts optimālais slodžu sadalījums, izmantojot lineāro programmēšanu.

✓ 3. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V6 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V1 (2.11. tabula). Tiek veikts optimālais slodžu sadalījums, izmantojot lineāro programmēšanu.

✓ 4. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V2 varianta (2.11. tabula). Tiek veikts optimālais slodžu sadalījums, izmantojot lineāro programmēšanu.

✓ 5. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V2 varianta (2.11. tabula). Tiek veikts vienmērīgs slodžu sadalījums: katra produkcijas veida daudzums vienmērīgi sadalīts diennaktī.

✓ 6. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V3 varianta (2.11. tabula). Tiek veikts optimāls slodžu sadalījums, izmantojot lineāro programmēšanu.

✓ 7. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V3 varianta (2.11. tabula). Tiek veikts vienmērīgs slodžu sadalījums.

✓ 8. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 1 maiņas darbs (no 8.00 līdz 16.00). Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V4 varianta (2.11. tabula). Tiek veikts optimāls slodžu sadalījums, izmantojot lineāro programmēšanu.

✓ 9. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 1 maiņas darbs (no 8.00 līdz 16.00). Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V4 varianta (2.11. tabula). Tiek veikts vienmērīgs slodžu sadalījums.

✓ 10. scenārijs. Katra produkta tipa kapacitāte/slodze ir ierobežota (2.13. tabula, V5 variants). Uzņēmumam ir raksturīgs 3 maiņu darbs. Produkta veidu daudzums tiek ņemts pēc V1 varianta (2.11. tabula). Tiek ievērotas ražotāja vēlmes. Ražotājs ir ieinteresēts sadalīt

produkcijas veidus laikā: saražot vispirms pirmo produkcijas veidu, pēc tam otro utt. Šajā scenārijā par bāzes rezultātiem (optimālais slodžu sadalījums) tiek ņemti 2. scenārija rezultāti un, izmantojot šķirošanu, tiek izpildītas ražotāja vēlmes. Jāpievērš uzmanība tam, ka 2. scenārija ikstundas kopējais elektroenerģijas patēriņš netiek saglabāts.

✓ 11. scenārijs. Šajā scenārijā par bāzes rezultātiem (optimālais slodžu sadalījums) tiek ņemti 2. scenārija rezultāti, un, izmantojot šķirošanas metodi, tiek izpildītas ražotāja vēlmes. Jāpievērš uzmanība tam, ka 2. scenārija ikstundas kopējais elektroenerģijas patēriņš tiek saglabāts.

2.11. tabula. Produkta veidu daudzums (gab.)

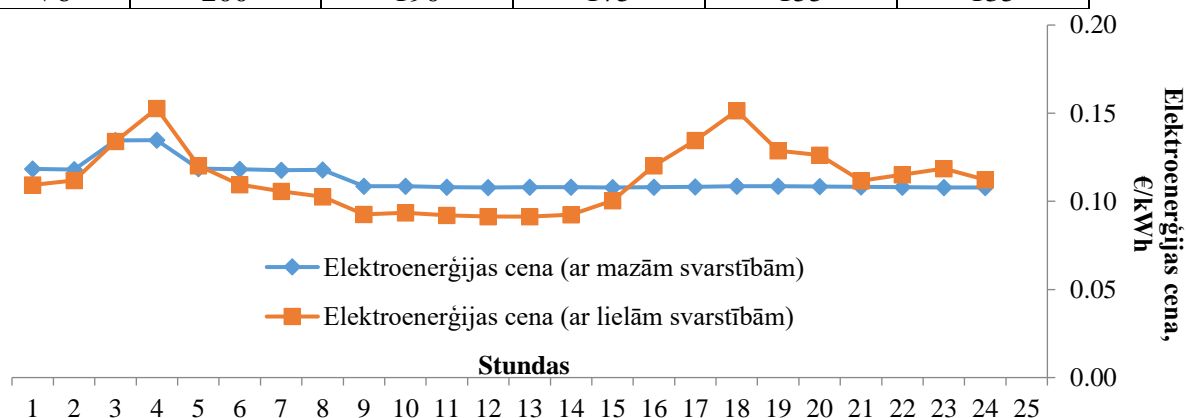
Varianta Nr.	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$
V1	10000	5000	4000	3000	2000
V2	7000	3000	2000	1000	1000
V3	5000	2000	1000	1000	1000
V4	3000	2000	1000	500	500

2.12. tabula. Produkta veida īpatnējais patēriņš (kWh/gab.)

$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
0,5	0,6	0,4	0,4	0,4

2.13. tabula. Produkta veida maksimālā atļautā slodze (kWh/h)

Varianta Nr.	$A_{max1}$	$A_{max2}$	$A_{max3}$	$A_{max4}$	$A_{max5}$
V5	210	200	185	165	145
V6	200	190	175	155	135



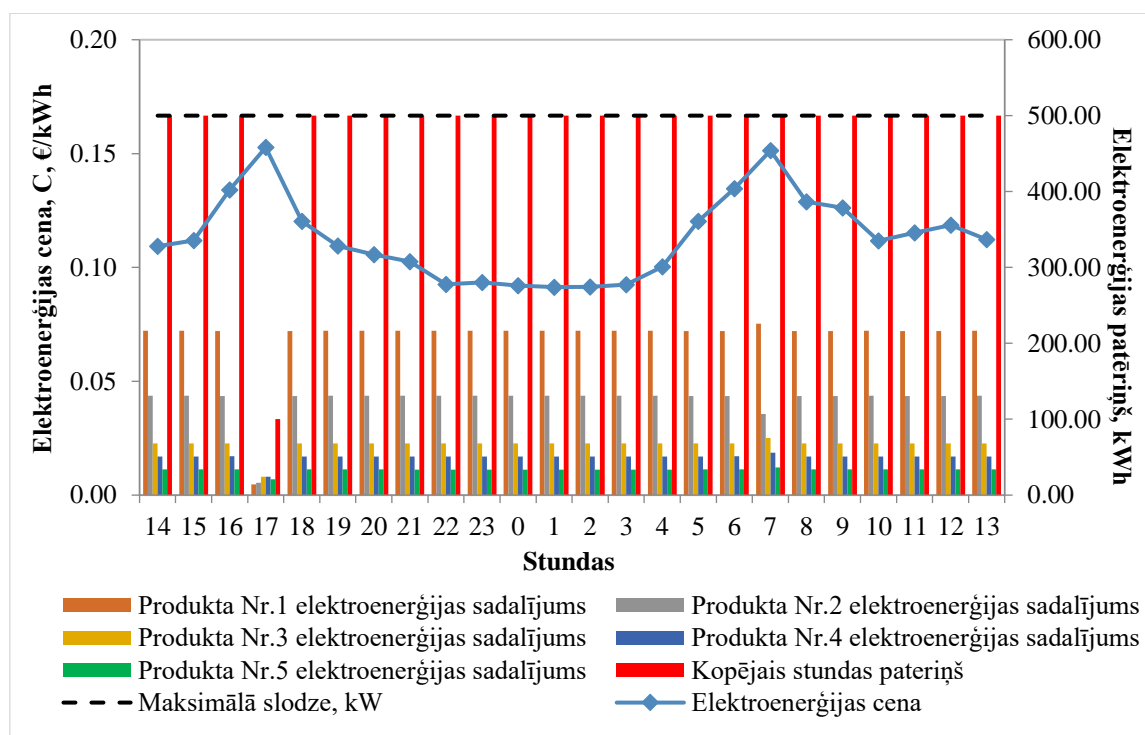
2.7. att. Elektroenerģijas cenas izmaiņas diviem gadījumiem



## 2.14. Rezultāti

Pirmajā aprēķinā visiem scenārijiem tiek ņemta elektroenerģijas cena ar augstām svārstībām. Rezultāti tiem pašiem scenārijiem, bet gadījumam ar zemām cenu svārstībām ir apkopoti 2.14. tabulā.

✓ 1.scenārijs. Šajā gadījumā katra produkta tipa kapacitāte nav ierobežota. Tomēr ir jāizpilda nosacījums attiecībā uz kopējo atļauto ikstundas maksimālo slodzi. 2.9. attēlā šī robeža tiek parādīta ar raustītu melnu līniju, un kopējais produktu patēriņš (sarkanais stabiņš) nepārsniedz šo vērtību.

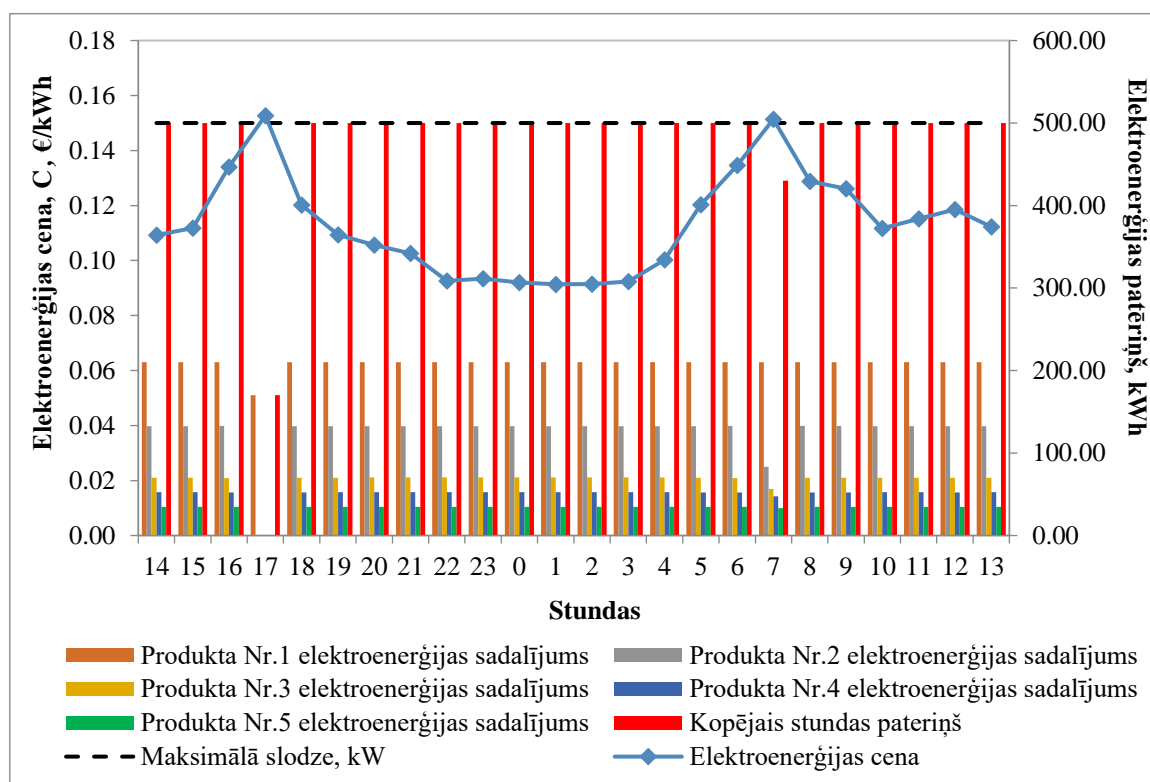


2.8. att. 1. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

Grafikā ir attēlota elektroenerģijas cena C. Ir redzami divi izteikti cenas pieaugumi: plkst. 17.00 (0,1527 €/kWh) un plkst. 7.00 (0,1514 €/kWh). Optimizācijas rezultātā minimālais produktu ražošanas apjoms ir izvēlēts 17. stundā. Lai saražotu visus produktu apjomus, ir nepieciešamas 3 maiņas, jo kopējais produktu skaits ir 24 000 gab., un šo daudzumu iespējams saražot tikai trijās maiņās. Kopējās izmaksas ir **1298,05 €**.

✓ 2. scenārijs. Šajā gadījumā katra produkta tipa ražošanas kapacitāte ir ierobežota. Ja kapacitāte ir ierobežota, tad optimizācijas gaitā tiek izvēlēts šāds risinājums: pirmajā – lētākajā – stundā ražot ar maksimālo kapacitāti, nākamajās – ražot uzdotā plāna atlikumu. Arī šajā gadījumā izpildās nosacījums attiecībā uz kopējo atļauto ikstundas maksimālo slodzi (2.10. att.).

✓ Varam vērot, ka slodzes sadalījums nedaudz atšķiras no 1. scenārija. Piemēram, 1. scenārijā 1. produkta ikstundas patēriņš bija 216 kWh, kamēr šajā gadījumā jau 210 kWh.

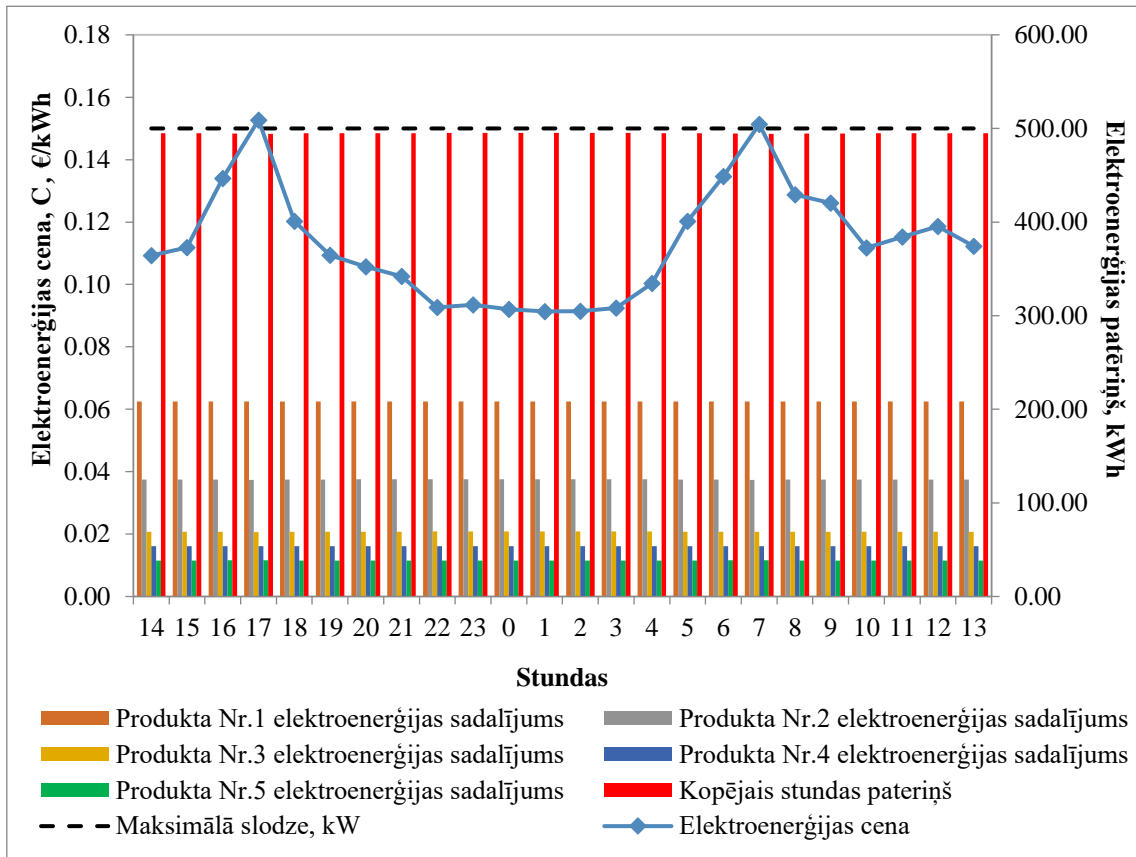


2.9. att. 2. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

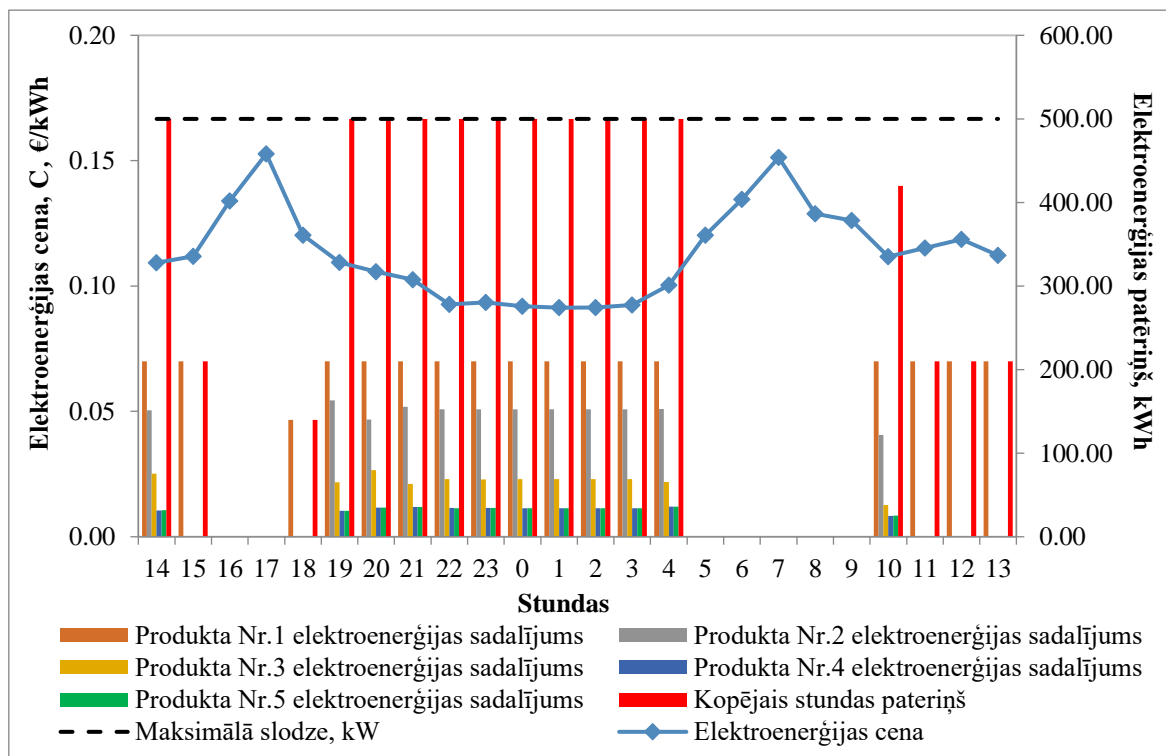
Līdz ar to pārējiem produktu tipiem patēriņš palielinās apmēram par 2 kWh. Rezultātā 17. stundā tiek ražots tikai 1. produkta tips. To var izskaidrot ar to, ka šī produkta daudzums ir uzdots ievērojami lielāks nekā pārējiem produktiem un, kā bija minēts, ar kapacitātes ierobežojumu. Kopējās izmaksas ir **1298,15 €** un praktiski sakrīt ar iepriekšējo gadījumu.

3. scenārijs. Šajā gadījumā par bāzes scenāriju tika ņemts 2. scenārijs. Galvenā atšķirība ir katra produkcijas tipa maksimālās atļautās robežas. Slodzes ierobežojumi tika samazināti par 10 kWh/h (2.11. att.). Šajā gadījumā optimizācijas uzdevums netiek izpildīts korekti, jo ierobežojumu dēļ nevar saražot uzdoto konkrēto produktu apjomu. Piemēram, 1. produkta maksimālā kapacitāte ir pieņemta vienāda ar 200 kWh/h. Šī robeža ir pārāk maza, modelis parāda kļūdu, neizpilda esošo nosacījumu un aprēķina ikstundas patēriņu, kas ir vienāds ar 208 kWh/h, lai saražotu produktu, kura ražošanai diennaktī nepieciešamas 5000 kWh. Šādos gadījumos nepieciešama ražošanas plāna pārstrāde. Programmatūrā, kas realizē apskatāmo modeli, jāparedz brīdinājuma ģenerēšana. Kā risinājumu var paņemt 25 stundu plānošanas periodu, uzdot 25. stundā augstas cenas un fiksēt gadījumus, ja algoritms 25. stundā izrēķina ražošanas daudzumu, kas lielāks par 0. Atsevišķos gadījumos var paaugstināt atļautās slodzes

robežu (ja to atļauj izmantojamās tehnoloģijas vai iekārtas). Kopējās izmaksas ir **1345,09 €**.



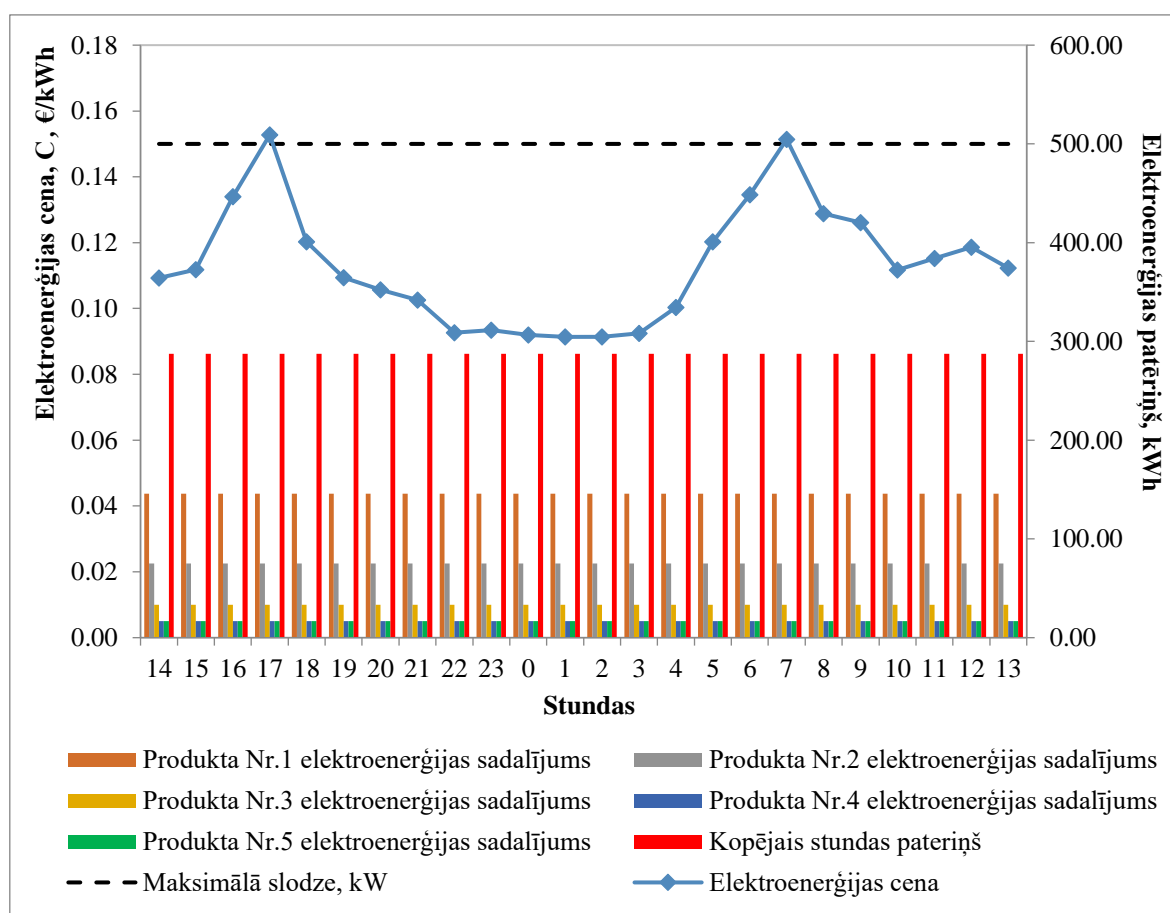
att. 3. scenārija slodzes sadalījums pa stundām



✓ 4. scenārijs. Šajā gadījumā katra produkta tipa kapacitāte ir ierobežota. Atšķirībā no 1.–3. scenārija tiek mainīti ieejas dati (2.11. tabula, V2 variants). Attiecīgajam variantam ir raksturīgs mazāks ražošanas apjoms nekā V1 variantā (2.12. att.).

Rezultātā varam vērot, ka zemāko cenu stundās notiek ražošanas process, bet augstāko cenu stundās ražošana tiek pārtraukta. Kopējās izmaksas ir **700,21 €**. Šajā gadījumā var rasties jautājums par pārtraukumu pieļaujamību. No scenārija slodžu sadalījuma redzam, ka ražošanas plānu iespējams izpildīt divās maiņās. Ražošanas operators var atkārtot aprēķinu, stādot uzdevumu divām maiņām, un pēc tam pieņemt lēmumu par darba organizēšanas variantu.

✓ 5. scenārijs. Šim scenārijam par ieejas datiem tiek izmantoti 4. scenārija ieejas dati. Esošajā gadījumā tiek veikts vienmērīgs slodžu sadalījums (2.13. att.). Izdevumu minimizācijas uzdevums netiek stādīts. Scenārijs ir dots salīdzinājumam, lai novērtētu optimizācijas procedūras efektivitāti.

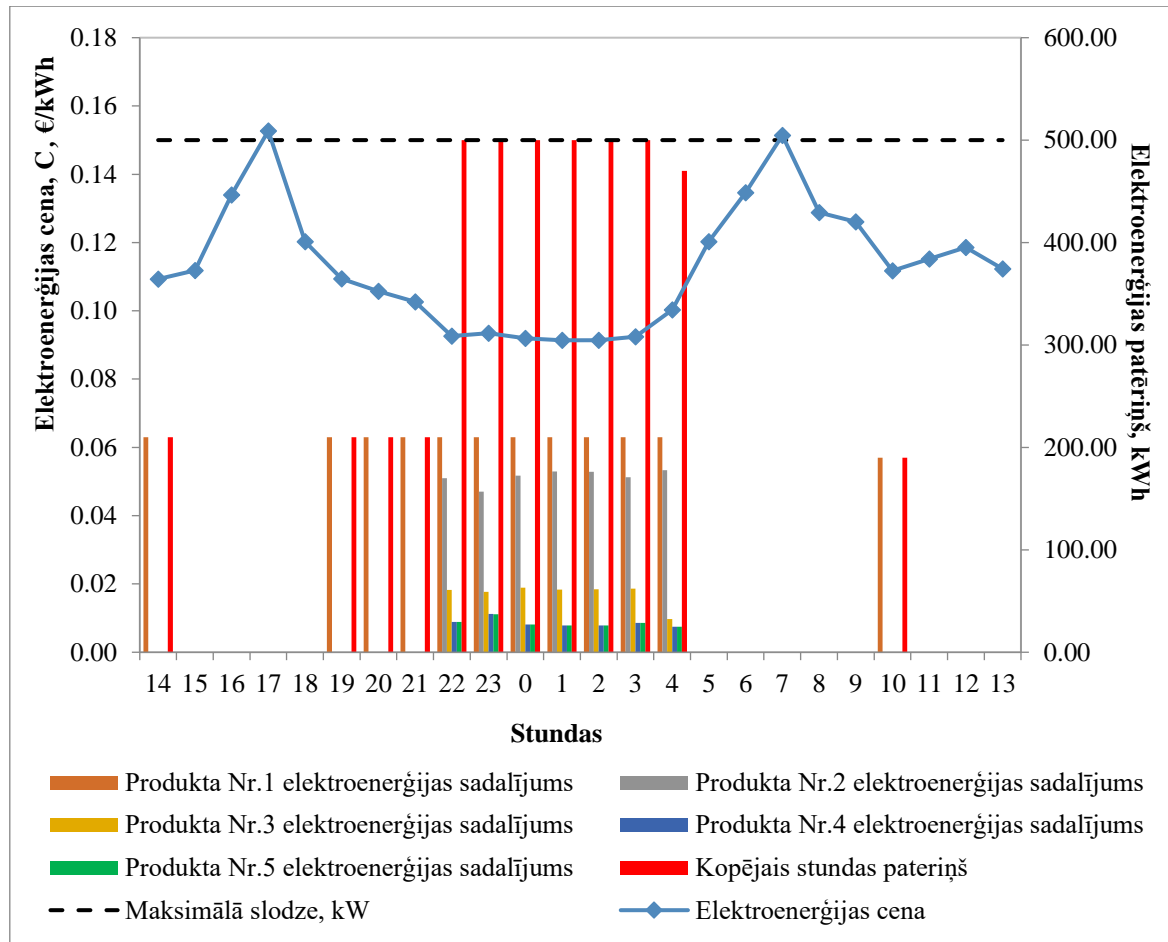


2.12. att. 5. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

Salīdzinot 2.12. un 2.13. attēlu, var vizuāli vērot slodzes sadalījuma atšķirību. 5. scenārijā nav ievērota zemu elektroenerģijas cenu prioritāte, līdz ar to kopējās diennakts

izmaksas ir vienādas ar **781,50 €**, kas ir par **11,6 % vairāk** nekā 4. scenārijā. Taču šis scenārijs var būt labāks no ražošanas organizācijas atvieglināšanas viedokļa. Lēmums jāpieņem ražošanas operatoram.

✓ 6. scenārijs. Šim scenārijam tiek izmantoti ieejas dati no 2.11. tabulas, V3 varianta (2.14. att.).

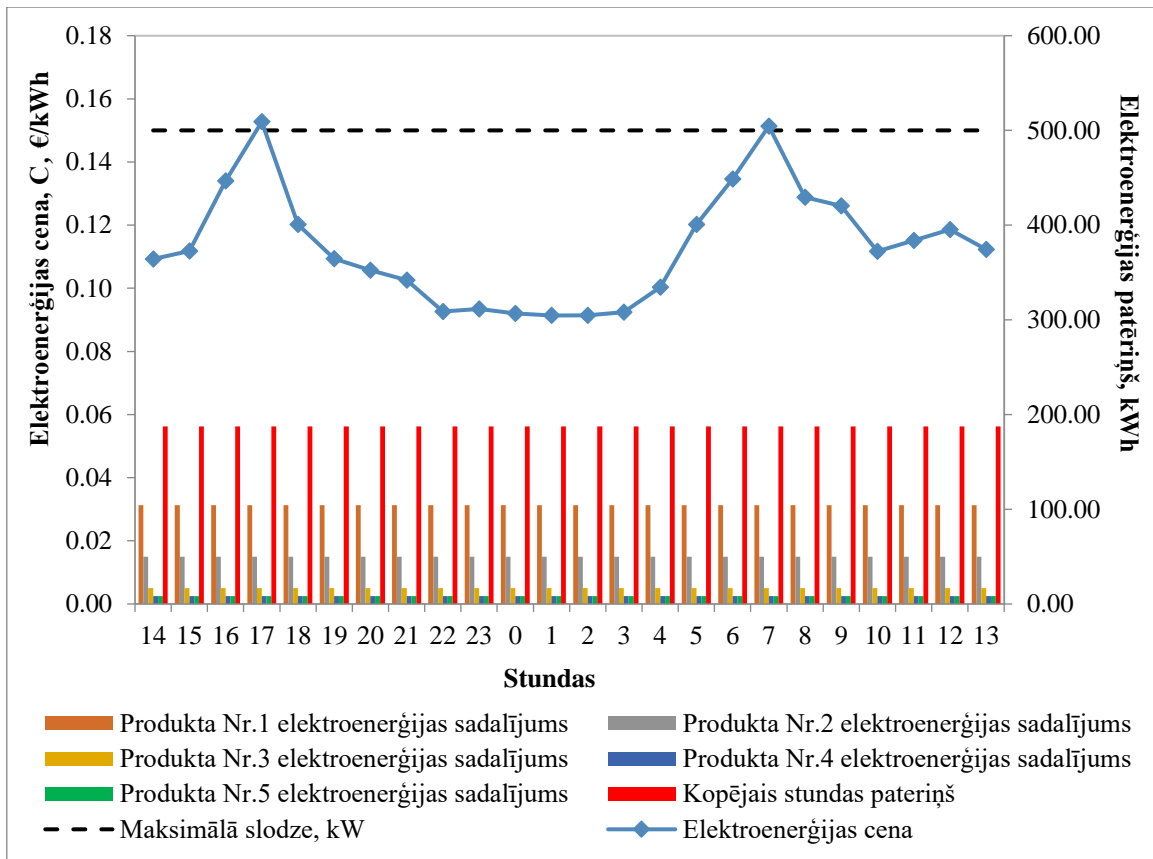


2.13. att. 6. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

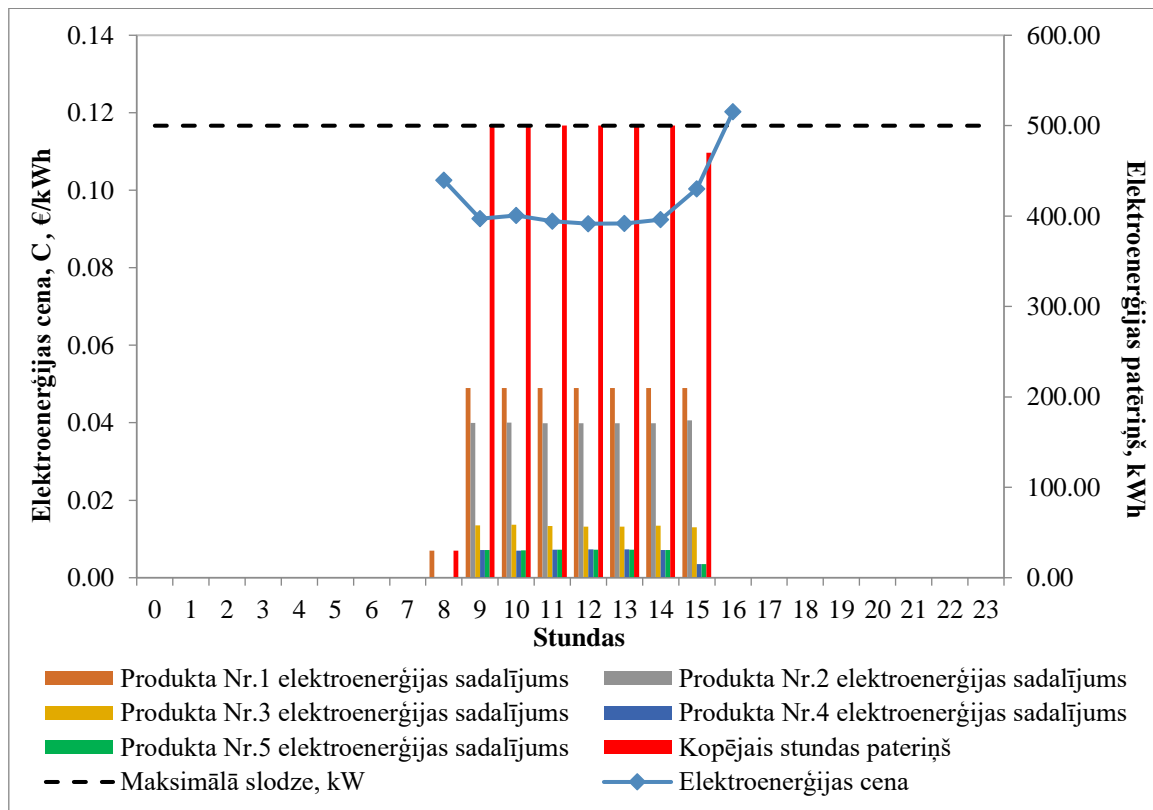
Tā kā kopējais plānotais ražošanas apjoms ir mazāks (9 000 gab.) nekā 4. scenārijā (14 000 gab.), kopējās izmaksas arī ir mazākas un ir vienādas ar **434,69 €**. Atkal redzami pārtraukumi, jāpieņem lēmums par darba stundu samazināšanu.

✓ 7. scenārijs. Šim scenārijam par ieejas datiem tiek izmantoti 6. scenārija ieejas dati. Esošajā gadījumā tiek veikts vienmērīgs slodžu sadalījums (2.15. att.). Izdevumu minimizācijas uzdevums netiek stādīts.

Scenārijs ir dots salīdzinājumam, lai novērtētu optimizācijas procedūras efektivitāti. Salīdzinot 6. un 7. scenārija kopējo izmaksu rezultātus, 7. scenārijā izmaksas ir ievērojami lielākas, **509,68 €**, kas ir par **14,7 % vairāk** nekā 6. scenārijā.



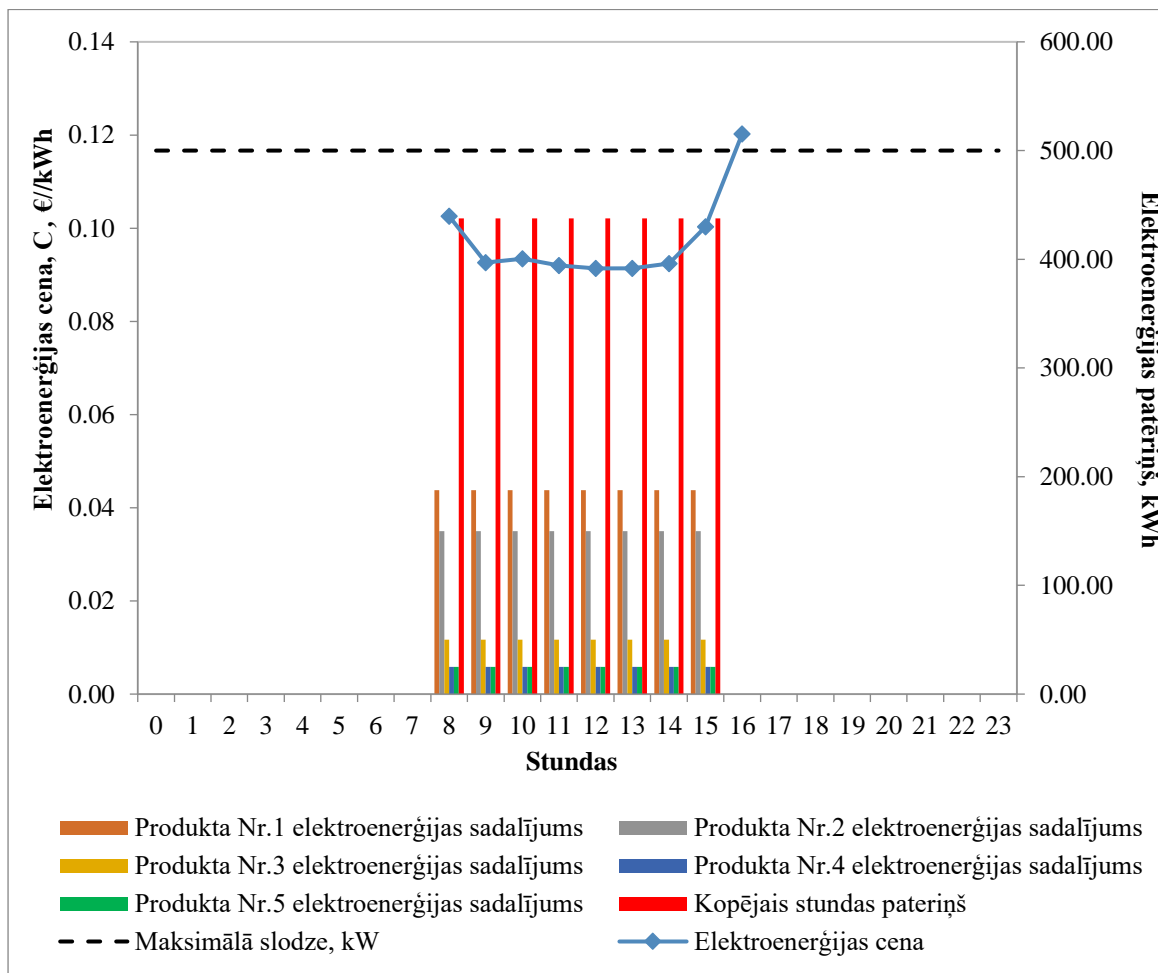
2.14. att. 7. scenārija slodzes sadalījums pa stundām



2.15. att. 8. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

✓ 8. scenārijs. Šajā gadījumā katra produkta tipa ražošanas kapacitāte ir ierobežota. Kopējais ražošanas apjoms pēc 2.11. tabulas V4 varianta datiem ir 7 000 gab. Esošajā gadījumā tiek nolemts veidot tikai vienu maiņu. Laika periods izvēlēts no 7.00 līdz 16.00. Produktu slodzes sadalījums parādīts 2.16. attēlā. No attēla redzams, ka periodā no 7.00 līdz 8.00, kad elektroenerģijas cena ir visaugstākā (0,1026 €/kWh), ir minimālais ražošanas process, un lielākais produktu apjoms ir sadalīts pa zemāko cenu stundām. Kopējās izmaksas ir **326,88 €**.

✓ 9. scenārijs. Šim scenārijam par ieejas datiem tiek izmantoti 8. scenārija ieejas dati. Esošajā gadījumā tiek veikts vienmērīgs slodžu sadalījums (2.17. att.). Izdevumu minimizācijas uzdevums netiek stādīts. Scenārijs ir dots salīdzinājumam, lai novērtētu optimizācijas procedūras efektivitāti.

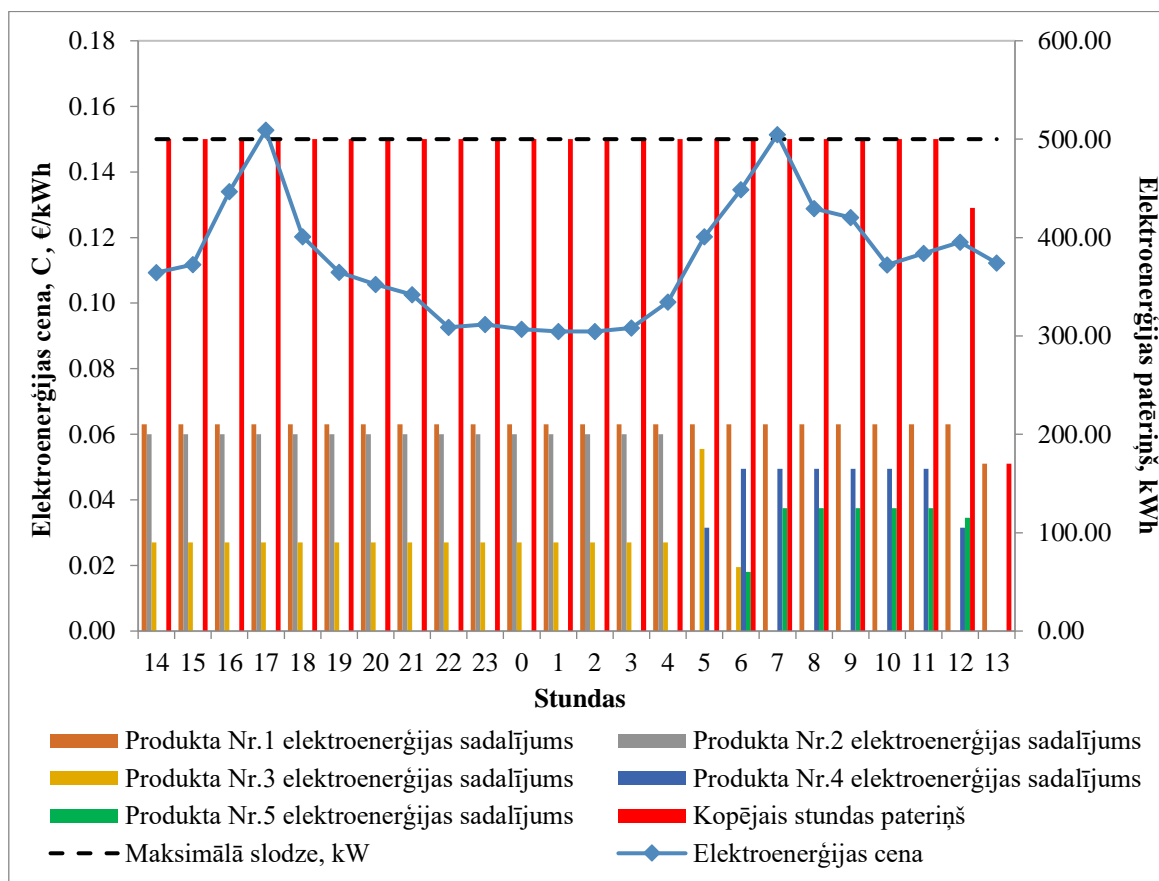


2.16. att. 9. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

Salīdzinot pēdējos divus attēlus, var vērot, ka 2.17. attēlā kopējais elektroenerģijas patēriņš periodā no 9.00 līdz 15.00 sasniedz atļauto maksimālo slodzi. Šis periods sakrīt ar zemām elektroenerģijas cenām, kad ir izdevīgi saražot vairāk un maksāt mazāk. 9. scenārijā

visa plānošanas perioda kopējais elektroenerģijas patēriņš ir 437,50 kWh, neievērojot elektroenerģijas cenas vērtību. Rezultātā kopējās izmaksas ir tikai nedaudz lielākas (**330,85 €**) nekā iepriekšējā scenārijā (**326,88 €**).

✓ 10. scenārijs. Šajā gadījumā par bāzes scenāriju tika ņemti 2. scenārija ieejas dati un nosacījumi. Galvenā atšķirība ir papildu prasība: pieņemam, ka produktu ražošana jāveic pēc kārtas. Vispirms jāsarāžo 1. produkta veids, pēc tam 2. veids utt., ievērojot katram produktam atļautās maksimālās slodzes. Pieņemam, ka katrā stundā paralēli var sarāžot dažādus produktu tipus/veidus. Jāpievērš uzmanība tam, ka 2. scenārija ikstundas kopējais elektroenerģijas patēriņš netiek saglabāts (2.18. att.). Papildus lineārai programmēšanai tiek izmantota šķirošanas procedūra.



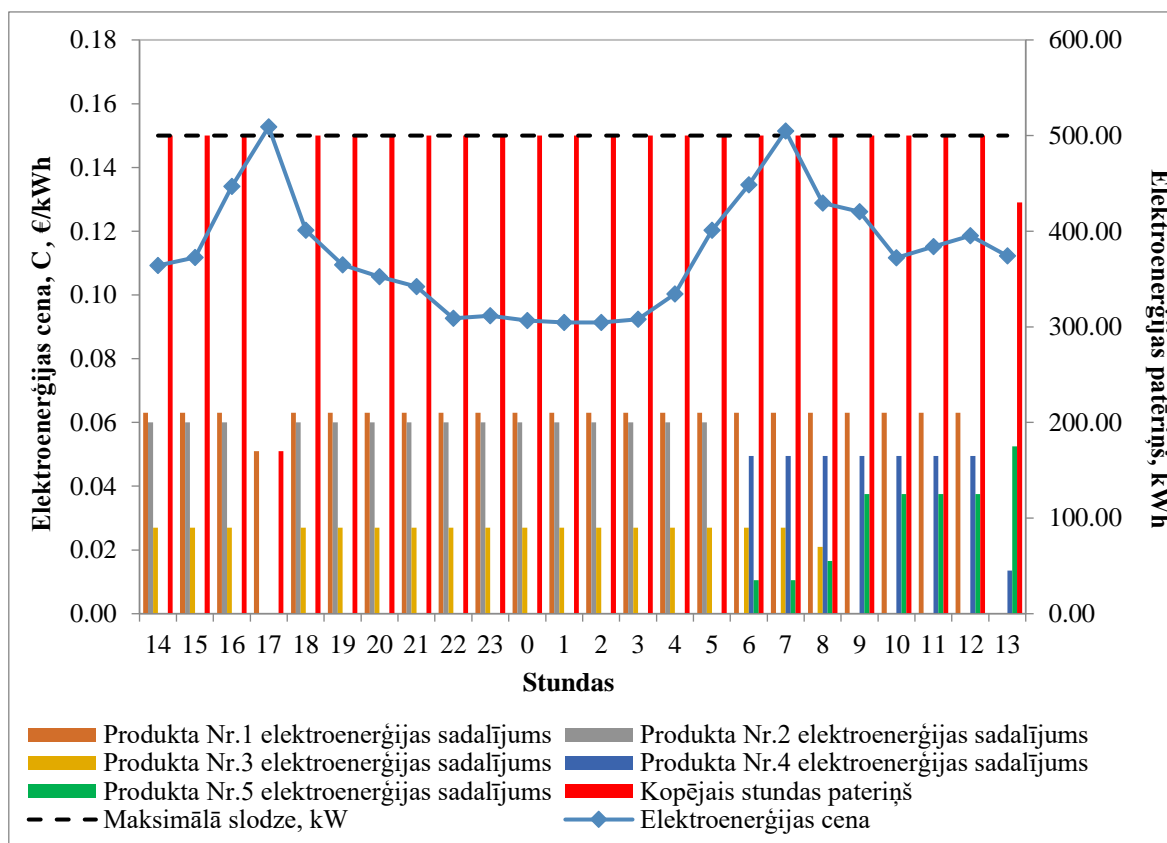
2.17. att. 10. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

Lai ievērotu ražotāja vēlmes, produktu ražošana notiek visā diennaktī un pat augstākās cenas stundās. Rezultātā kopējās izmaksas ir lielākas nekā 2. scenārijā, **1313,78 €, bet starpība ir tikai 1,2 %.**

✓ 11. scenārijs. Šis scenārijs ir gandrīz tāds pats kā 10. scenārijs. Atšķirība ir tikai tāda, ka 2. scenārija ikstundas kopējais elektroenerģijas patēriņš tiek saglabāts (2.19.



att.). Papildus lineārai programmēšanai tiek izmantota šķirošanas procedūra. Šajā gadījumā kopējās izmaksas ir tādas pašas kā 2. scenārijā – **1298,1471 €**. Taču šķirošanas rezultātā produktu ražošana notiek, ievērojot uzdoto kārtību.



2.18. att. 11. scenārija slodzes sadalījums pa stundām

Vispirms tiek saražots pirmais, bet kā pēdējie – ceturtais un piektais produkts.

Slodžu sadalījums un izmaksu novērtēšana visiem izskatītajiem scenārijiem veikta arī gadījumam ar zemām cenu svārstībām. Kopējie rezultāti doti 2.14. tabulā.

2.14. tabula. Kopējo izmaksu novērtēšanas rezultāti dažādiem scenārijiem

Scenārija Nr.	Izmaksas, €		Starpība, %
	1. gadījums. Cenas ar lielām svārstībām	2. gadījums. Cenas ar nelielām svārstībām	
1.	1298,05	1300,41	0,18%
2.	1298,15	1300,43	0,18%
3.	1345,09	1287,22	-4,50%
4.	700,21	747,27	6,30%
5.	781,50	778,71	-0,36%

6.	434,69	529,21	17,86%
7.	509,68	507,85	-0,36%
8.	326,88	383,56	14,78%
9.	330,85	387,40	14,60%
10.	1313,78	1311,12	-0,20%
11.	1298,15	1300,43	0,18%

No 2.14. tabulas redzams, ka vairumā scenāriju 1. gadījumā izmaksas ir mazākas. Vidējā starpība starp divu gadījumu rezultātiem ir 4,42 %.

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

Piecu produktu ražošanas gadījumā un 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.

## 2.15. Pārlases metodes pielietojuma piemērs

Šīs metodes palaišanai jāuzdod dati atbilstoši 2.1. vai 2.2. tabulai. Turklāt jānorāda, 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 savā starpā saistītus produktus, tad galējo uzdevuma ievades tabulu var pierakstīt, kā parādīts 2.15. tabulā, kuru gatavojot, katras stundas summāro slodzi aprēķina šādi:

$$A_{t\Sigma} = \sum_t^T A_{ti} \quad (2.19)$$

2.15. tabula. Produkta ievades tabula

Stunda	Produktu $A_{\Sigma}$
1	$A_{1\Sigma}$
2	$A_{2\Sigma}$
3	$A_{3\Sigma}$
4	$A_{4\Sigma}$
...	...
24	$A_{24\Sigma}$

Var redzēt, ka paliek tikai viens stabiņš, kur sakārtoti summārie stundas patēriņi. Piemēram, ražošanas procesam nepieciešamas tikai 4 secīgas stundas, tad matrica iegūst šādu veidu:

2.16. tabula. Patēriņa ievades tabula

Stunda	Patēriņš $A_{t\Sigma}$
1	$A_{1\Sigma}$
2	$A_{2\Sigma}$
3	$A_{3\Sigma}$
4	$A_{4\Sigma}$
5	0
6	0
...	...
...	...
24	0

Turklāt stundas ar slodzi var būt jebkurā diennakts laikā jeb sākties ar jebkuru stundu – to nosaka ievaddati. Šajā gadījumā tiek pielietota pārlases (angļu val. – *enumeration*) metode. Pirmajā solī programma aprēķina kopējās izmaksas un saglabā tās atmiņā, aprēķins veikts pēc formulas:

$$f(R) = C_1 * A_{1\Sigma} + C_2 * A_{2\Sigma} + \dots + C_t * A_{t\Sigma}, \quad (2.20.)$$

kur  $C_1 \dots C_t$  ir elektroenerģijas cena  $t$ -tajā stundā, €/kWh;  $A_{1\Sigma} \dots A_{t\Sigma}$  ir  $t$  stundas kopējais elektroenerģijas patēriņš, kWh.

Tiek saglabāts arī slodzes izkārtojums pa stundām. Nākamajā solī slodzes pāriet uz otro stundu, un, sākot no tās, secīgi aizpilda matricu, kā redzams 2.15 tabulā, programma atkal aprēķina kopējās izmaksas; ja tās ir mazākas par pirmajā solī esošajām, tad rezultāts un matrica tiek pārrakstīti un sākas trešais solis, pārbīdot slodzes vēl par stundu, tātad aprēķins turpināsies, sākot no trešās stundas.

Ja rezultāts nav labāks, tad programma vienkārši pāriet pie nākamā soļa, nesaglabājot pašreizējā soļa rezultātu. Programma beidzas, kad patēriņa pēdējā stunda kļūst par 24. stundu. Pēc tam labākais rezultāts un matrica tiek izvadīti kā optimālais patēriņa sadalījums.

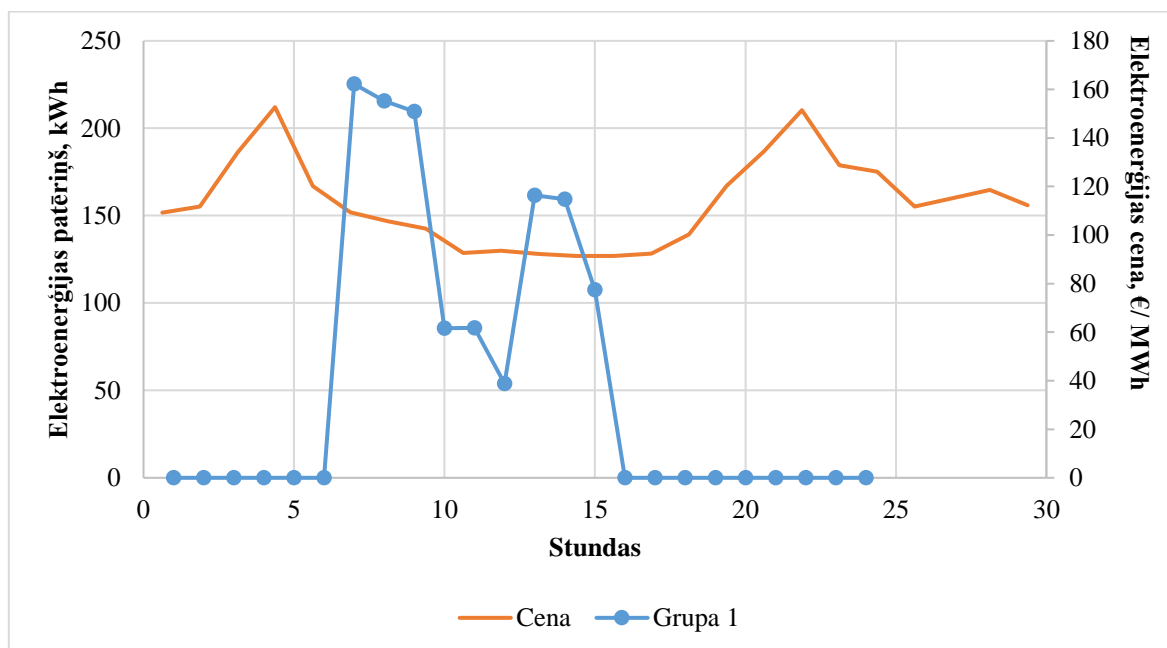
Programmā nav funkcijas ar patēriņa pārnesanu aiz 24. stundas, piemēram, kad pēdējā slodze tiek pārnesta uz nākamās dienas pirmo stundu.

## 2.16. Rezultāti

Uzdevums parādīts 2.17. tabulā, un vēsturiskie dati ir ņemti no 2.7. tabulas.

2.17. tabula. Piemērs

Grupās numurs	1	1	1	1	1
	Produkts 1	Produkts 2	Produkts 3	Produkts 4	Produkts 5
	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



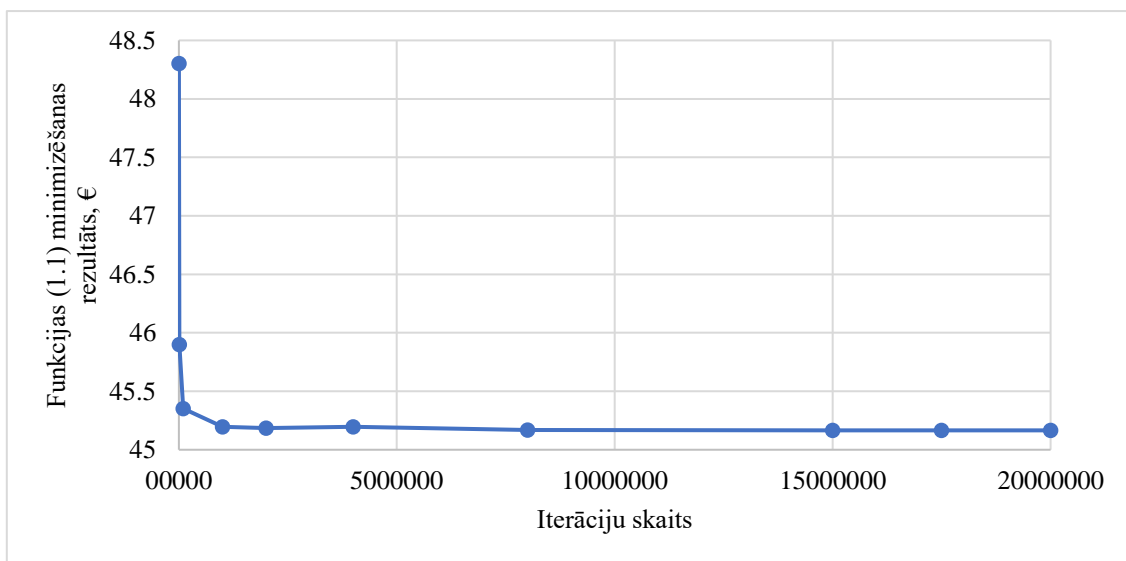
2.19. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar pārlases metodi

No 2.20. attēlā parādītā grafika 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 uzdots ražošanas secība. Ja šo ierobežojumu var noņemt, tad ražošanas sadale pa stundām varētu būt ievērojami efektīvāka.

## 2.17. Gadījuma pārlases metodes pielietojuma piemēri

Datu ievade šim gadījumam ir tāda pati kā pārlases metodei, atšķirība ir tāda, ka visi produkti vairs nav saistīti. Iepriekš izskatītā pārlases metode kļuš neefektīva, jo jāpārskata ļoti daudz dažādu kombināciju. Izveidotā programma automātiski „saprot”, kad jāpāriet uz gadījuma pārlases metodi. Sāksies programmas modulis, kas pirmkārt apvienos visus savā starpā saistītos produktus (secīga ražošana) kolonās pa grupām. Šeit paliek arī saistības starp rindiņām vienas kolonas ietvaros (piemēram, patēriņš, kas ievadīts kā process, kas notiek 4 stundas pēc kārtas, netiks sadalīts pa vienai stundai vai pa divām).

Šādā gadījumā uzdevuma atrisināšanai tiek pielietota Montekarlo metode, ar kuras palīdzību tiek realizēta gadījuma pārlases procedūra (angļu val. – *random enumeration*). 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 nē, tad tiks veikts mērķa funkcijas (2.1.) 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, uzreiz notiek nākamā iterācija.

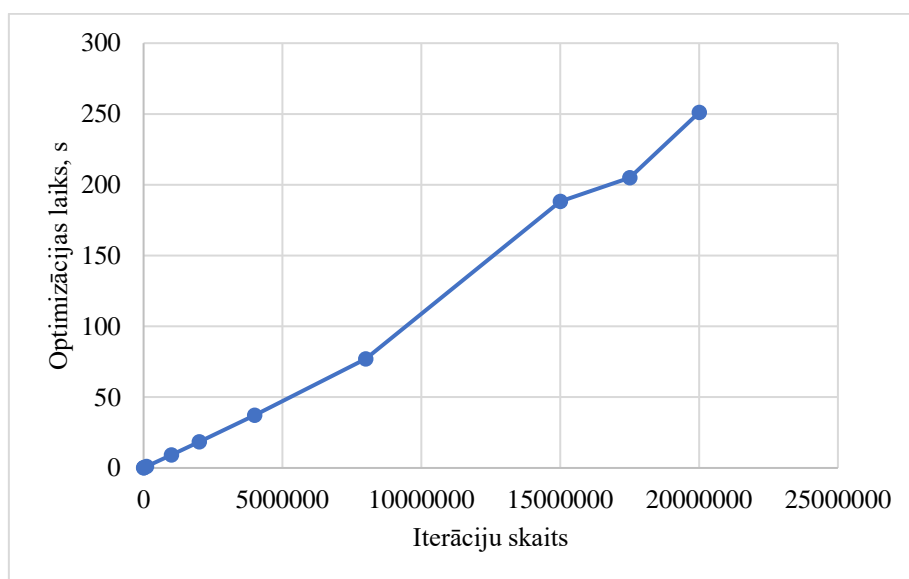


2.20. att. Optimizācijas rezultāti ar dažādu pielietoto iterāciju skaitu, izmantojot Montekarlo metodi

Gadījuma pārlases procedūras pielietošanā 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. Pielietojot Montekarlo metodi, vienai uzdevuma rindai tiek patērēts līdz 1,6 sekundēm. Ja

produktu elektroenerģijas patēriņš ir uzdots, tad laiks īpatnējo slodžu aprēķinam vispār netiek patērēts. Lai noteiktu nepieciešamo iterāciju skaitu gadījuma pārļases procedūras izpildei, tika veikti vairāki skaitliskie eksperimenti. To rezultāti parādīti 2.21. attēlā.

Pie 1 000 un 10 000 iekšējiem cikliem tika novēroti rezultāti, kas ļoti atšķiras pie katras programmas palaišanas. No 100 000 līdz 4 000 000 iterāciju rezultāti arī bija atšķirīgi, tomēr atradās daudz šaurākā diapazonā. Pat pie 8 000 000 iterācijām tika novērotas nobīdes. Sākot ar 15 000 000 iterācijām, optimizācijas rezultāti kļuva līdzīgi. Laiks, ko programma patērē slodzes optimizācijai, parādīts 2.22. attēlā.



2.21. att. Laiks, ko aizņem iterācijas Montekarlo ciklā

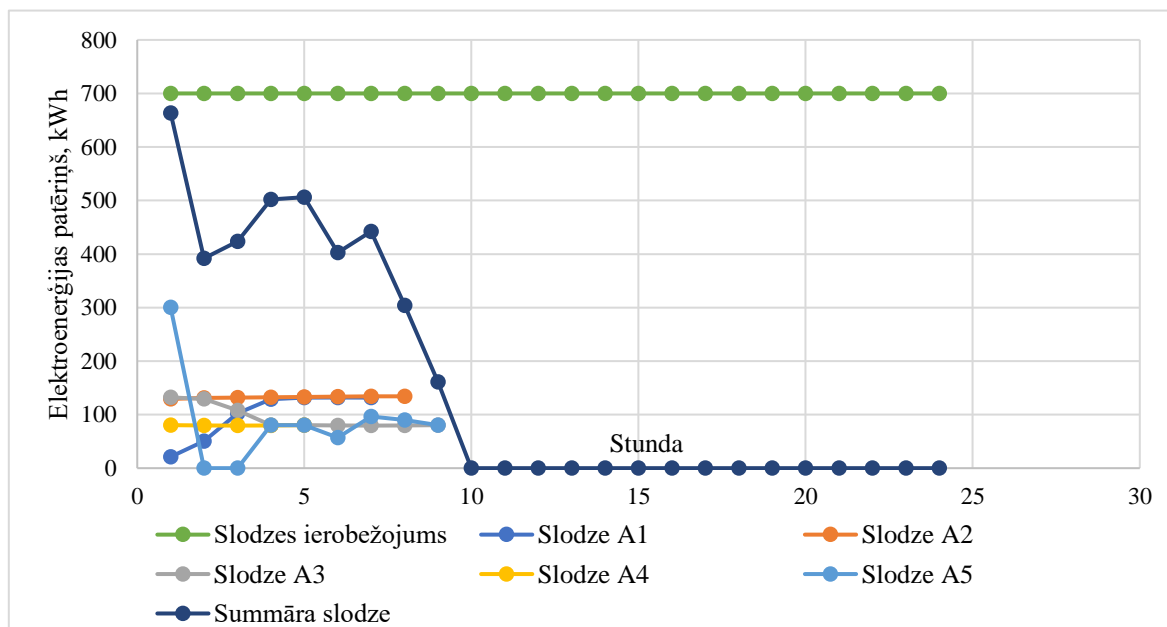
Slodzes (kWh), kuras uzdod operators, dotas 2.18. tabulā. Tiek izskatīts gadījums ar paralēlu ražošanu.

2.18. tabula. Modelētais operatora 1. uzdevums

Grupās numurs	0	0	0	0	0
Stunda	Produkts 1, $A_1$	Produkts 2, $A_2$	Produkts 3, $A_3$	Produkts 4, $A_4$	Produkts 5, $A_5$
1	0	0	132,1936	0	300,1936
2	0	0	129,3776	0	1
3	0	129,3248	107,9628	0	1
4	21,1904	131,4016	80,4848	0	80,4848
5	50,2436	132,1012	80,2384	80,2384	80,2384
6	102,7268	132,638	79,9436	79,9436	56,9436
7	128,7308	133,1176	79,5476	79,5476	96,5476
8	131,8548	133,628	79,8952	79,8952	89,8952
9	131,9824	134,2308	80,4716	80,4716	80,4716
10	131,9164	134,1164	0	0	0

2.19. tabula. Ievaddati dienai, kurā tiek veikta optimizācija

Stundas	Cenas, €/MWh	Maksimāli pieļaujamā stundas slodze, kW	Stundas	Cenas, €/MWh	Maksimāli pieļaujamā stundas slodze, kW
00 – 01	35,05	700	12 – 13	53,43	700
01 – 02	33,07	700	13 – 14	52,09	700
02 – 03	32,43	700	14 – 15	42,13	700
03 – 04	33,4	700	15 – 16	50,79	700
04 – 05	33,99	700	16 – 17	47,66	700
05 – 06	35,55	700	17 – 18	47,04	700
06 – 07	41,41	700	18 – 19	47,02	700
07 – 08	49,83	700	19 – 20	53,41	700
08 – 09	63	700	20 – 21	42,06	700
09 – 10	70,69	700	21 – 22	37,94	700
10 – 11	60,4	700	22 – 23	37,6	700
11 – 12	60,4	700	23 – 00	36	700



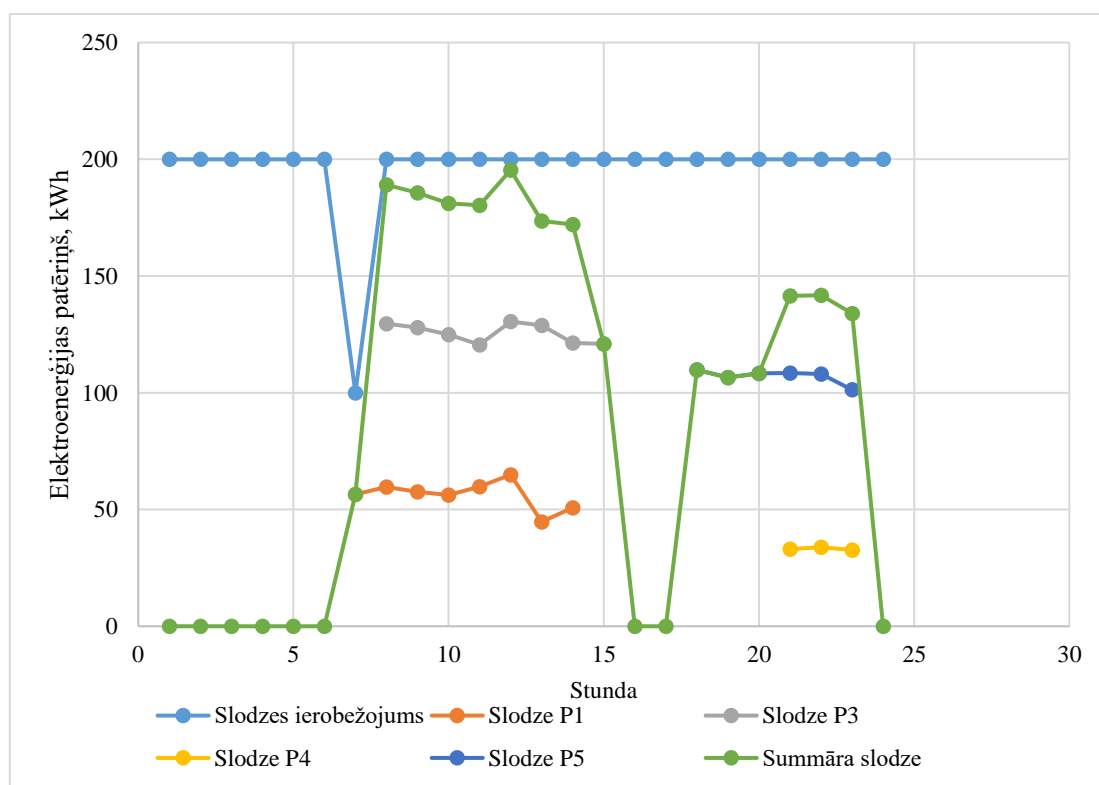
2.22. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi

Otrais uzdevums tika risināts atbilstoši 2.20. tabulas datiem, pie tam vienai no stundām maksimālās jaudas ierobežojums tika uzdots 100 kW, nevis 200 kW kā pārējām stundām, lai pārlicinātos, ka algoritms nostrādā korekti. Cenas tika ņemtas no 2.18. tabulas. Rezultāti apkopoti 2.23., 2.24. un 2.25. attēlā. Var redzēt, ka 100 kW ierobežojums 7. stundā

piespiež algoritmu sameklēt nākošo izdevīgāko risinājumu; ja tāda ierobežojuma nav, 7. stunda tiek izmantota pēc iespējas vairāk.

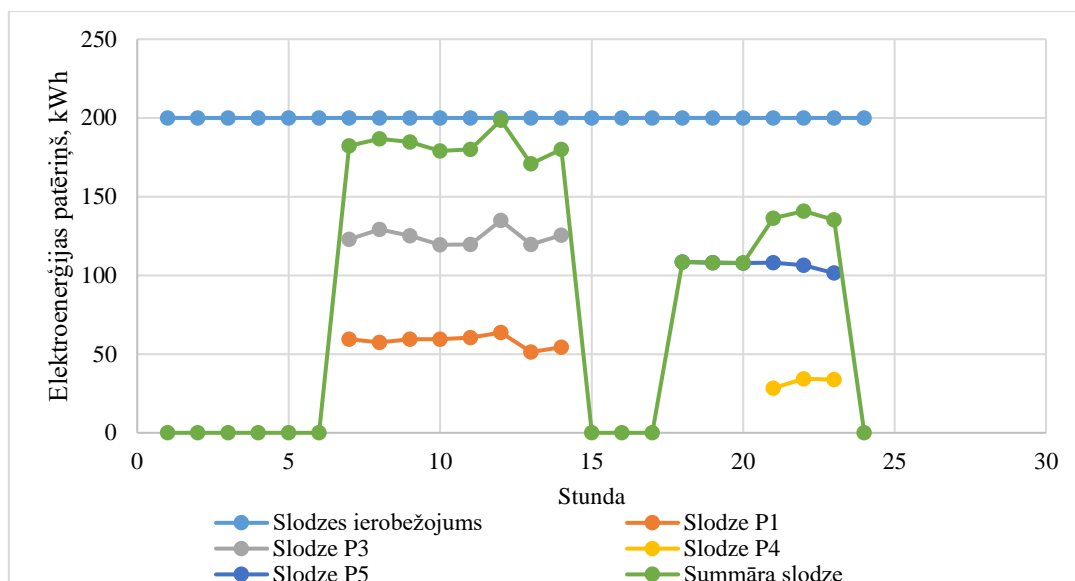
2.20. tabula. 2. uzdevuma dati

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



2.23. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai (2. uzdevums)



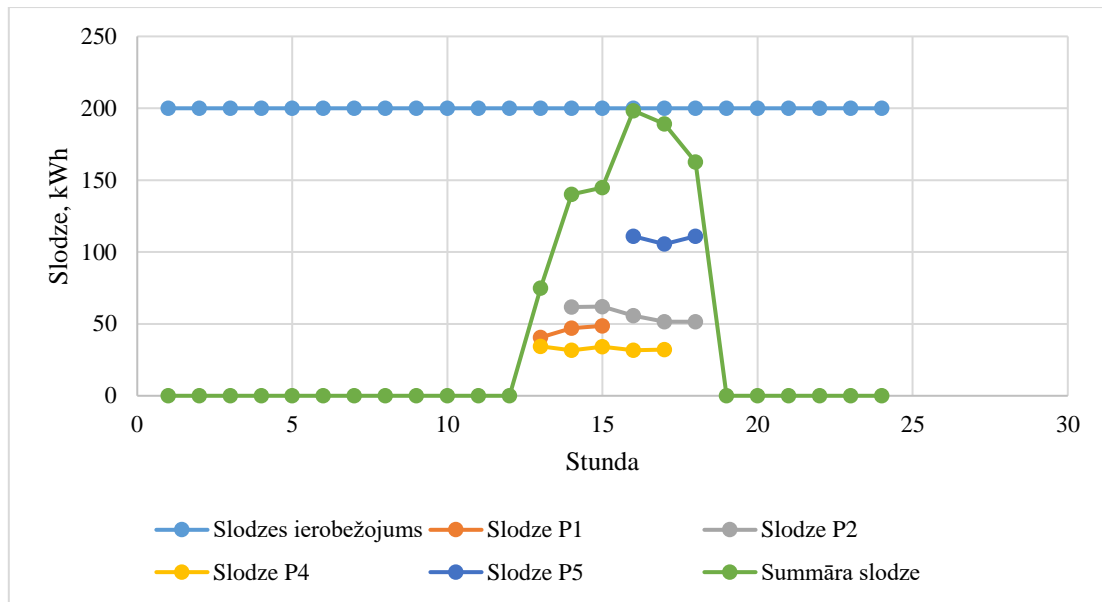


2.24. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai bez 100 kW maksimālās slodzes ierobežojuma

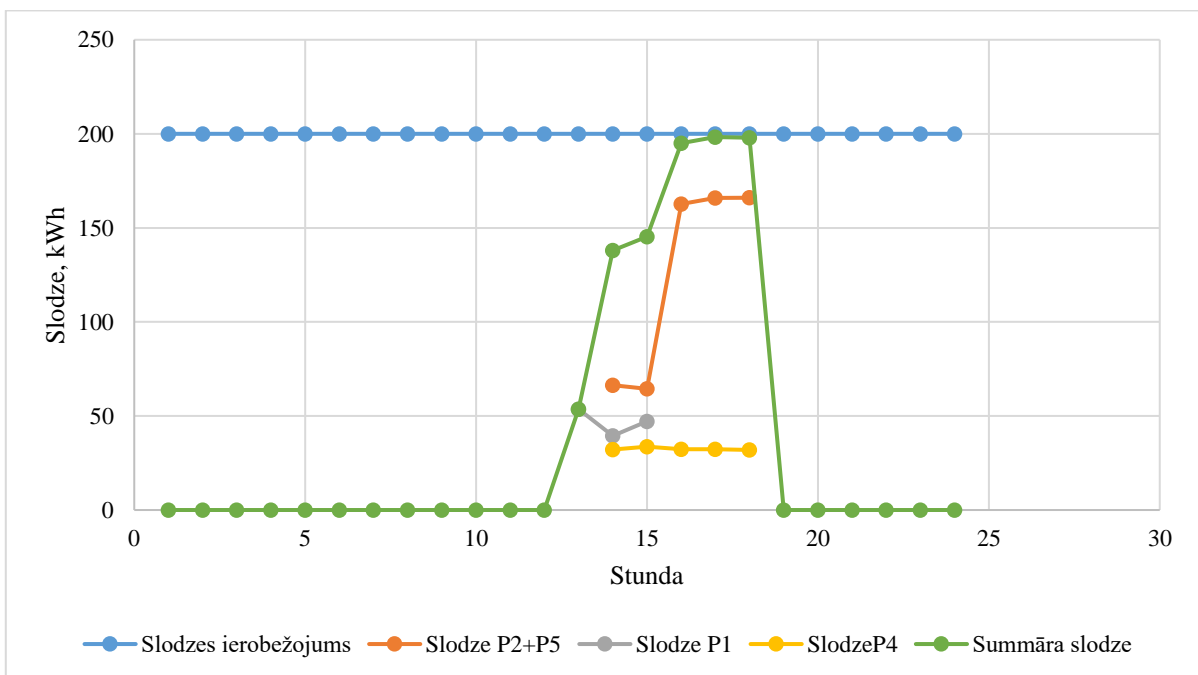
Tad tika ievadīts trešais uzdevums (2.21. tabula), kur tika pārbaudīta slodžu sapludināšana un darba stundu ierobežošana no pulksten 6 līdz 18. Ja divi procesi tiek pievienoti vienai grupai, tad tie notiek saistīti. 2.21. attēlā ir parādīts, ka, kad procesi P2 un P5 nav saistīti, tad P5 notiek dienas sākumā, kas ir izdevīgāk. 2.22. attēlā procesi P2 un P5 jau ir saistīti, to izpilde notiek vienlaicīgi no stundas, kad tie pārklājas uzdevumā (2.22. tabula). Šo abu produktu (P2 un P5) ražošana tagad nav sadalāma, un programma tos mēģina optimizēt dienas laikā jau kā vienotu procesu, ievērojot to savstarpējo izkārtojumu uzdevumā.

2.21. tabula. 3. uzdevuma dati

Grupas numurs	0	1	0	0	1
	<b>Produkts 1</b>	<b>Produkts 2</b>	<b>Produkts 3</b>	<b>Produkts 4</b>	<b>Produkts 5</b>
	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>
<b>Stunda</b>	<i>q1</i>	<i>q2</i>	<i>q3</i>	<i>q4</i>	<i>q5</i>
<b>1</b>	25	0	0	45	0
<b>2</b>	25	0	0	45	0
<b>3</b>	25	0	0	45	0
<b>4</b>	0	30	0	45	0
<b>5</b>	0	30	0	45	0
<b>6</b>	0	30	0	0	100
<b>7</b>	0	30	0	0	100
<b>8</b>	0	30	0	0	100



2.25. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai, darba laiks no 6 līdz 18 (3. uzdevums)



2.26. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai, darba laiks no plkst. 8 līdz 20, P2 un P5 slodzes tiek saistītas (3. uzdevums)

Lai novērtētu rezultātu atšķirību, veicot produktu īpatnējo patēriņu aprēķinu ar Montekarlo metodi un mazāko kvadrātu metodi, tika risināts 4. uzdevums (2.22. tabula). Ikstundas cenas un ierobežojumi doti 2.23. tabulā. No 2.28. attēla var redzēt, ka mazāko kvadrātu metode dod vienmērīgākus rezultātus, bet praksē tas nenozīmē labāku atbilstību

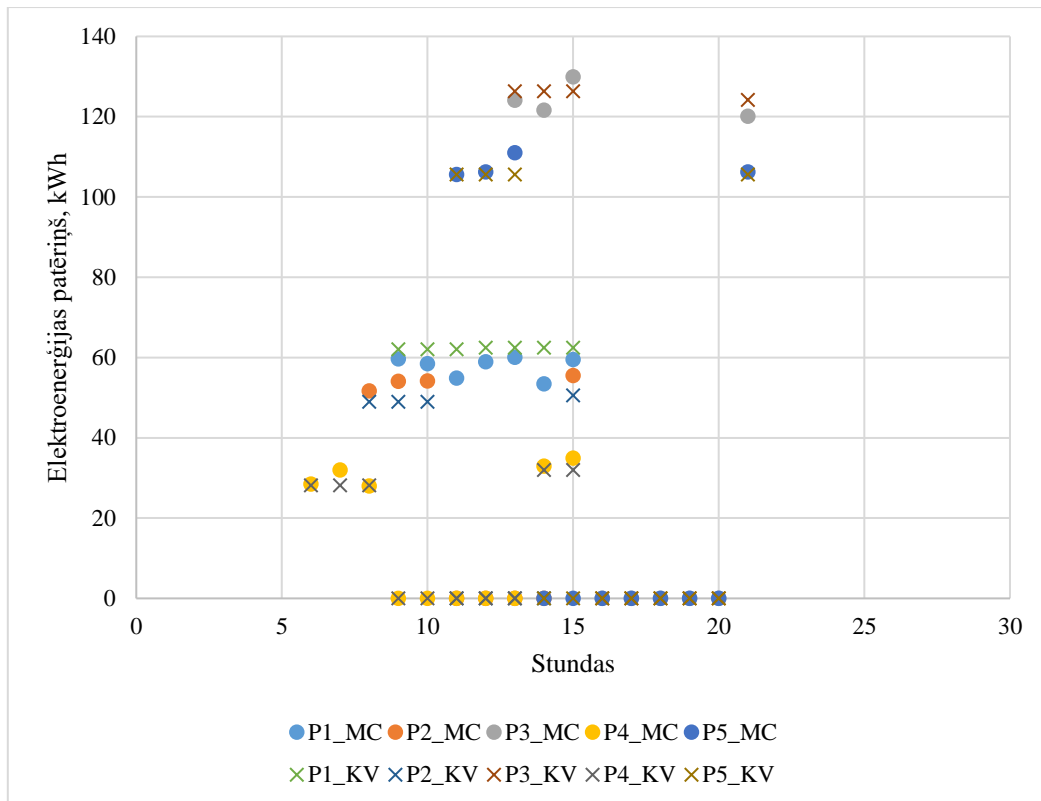
reālajam patēriņam. Visos izskatītajos gadījumos patēriņu sadalījums pa stundām (2.1) funkcijas minimizēšanai sakrita Montekarlo un mazāko kvadrātu metodēm. Galīgo secinājumu var izdarīt tikai pēc abu metožu pārbaudes ar reāliem datiem.

2.22. tabula. 3. uzdevuma dati

Grupas numurs	0	0	0	0	0
	Produkts 1	Produkts 2	Produkts 3	Produkts 4	Produkts 5
	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>	gab./kg/m <sup>3</sup>
Stunda	<i>q1</i>	<i>q2</i>	<i>q3</i>	<i>q4</i>	<i>q5</i>
<b>1</b>	25	30	80	45	100
<b>2</b>	25	30	80	45	100
<b>3</b>	25	30	80	45	100
<b>4</b>	25	0	0	0	0
<b>5</b>	25	0	0	0	0
<b>6</b>	25	0	0	0	0
<b>7</b>	25	0	0	0	0
<b>8</b>	0	30	0	0	0
<b>9</b>	0	0	80	45	0
<b>10</b>	0	0	0	45	0
<b>11</b>	0	0	0	0	100

2.23. tabula. Ievaddati dienai, kurā tiek veikta optimizācija

Stundas	Cenas, €/MWh	Maksimāli pieļaujamā stundas slodze, kW	Stundas	Cenas, €/MWh	Maksimāli pieļaujamā stundas slodze, kW
00 – 01	109,3	500	12 – 13	91,4	500
01 – 02	111,8	500	13 – 14	92,4	500
02 – 03	134	500	14 – 15	100,3	500
03 – 04	152,7	500	15 – 16	120,3	500
04 – 05	120,2	500	16 – 17	134,6	500
05 – 06	109,4	500	17 – 18	151,4	500
06 – 07	105,7	500	18 – 19	128,8	500
07 – 08	102,6	500	19 – 20	126,1	500
08 – 09	92,6	500	20 – 21	111,7	500
09 – 10	93,5	500	21 – 22	115,2	500
10 – 11	92,2	500	22 – 23	118,6	500
11 – 12	91,4	500	23 – 00	112,3	500



2.27. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus. Salīdzinājums starp Montekarlo un mazāko kvadrātu metodēm īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai (4. uzdevums)

Attēlotie rezultāti atļauj secināt, ka abas izmantotās pieejas dod savstarpēji tuvus enerģijas patēriņa novērtējumus.

### 2.18. Piemērs: lineārās programmēšanas un gadījuma pārlases metožu salīdzinājums

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

Pieņemsim, ka tiek ražoti 10 produktu veidi un tiek izmantotas paralēlas ražotnes, kuras var strādāt vienlaicīgi 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, attiecīgi:  $A_{1max}, A_{2max}, \dots, A_{10max}$ . Ir zināmas enerģijas cenas dienai uz priekšu:  $C_1, C_2, \dots, C_{24}$ .

Konkrētā piemēra dati doti 2.24. tabulā. Dati piemeklēti tā, lai uzdevuma atrisināšanas rezultāts būtu acīmredzams.

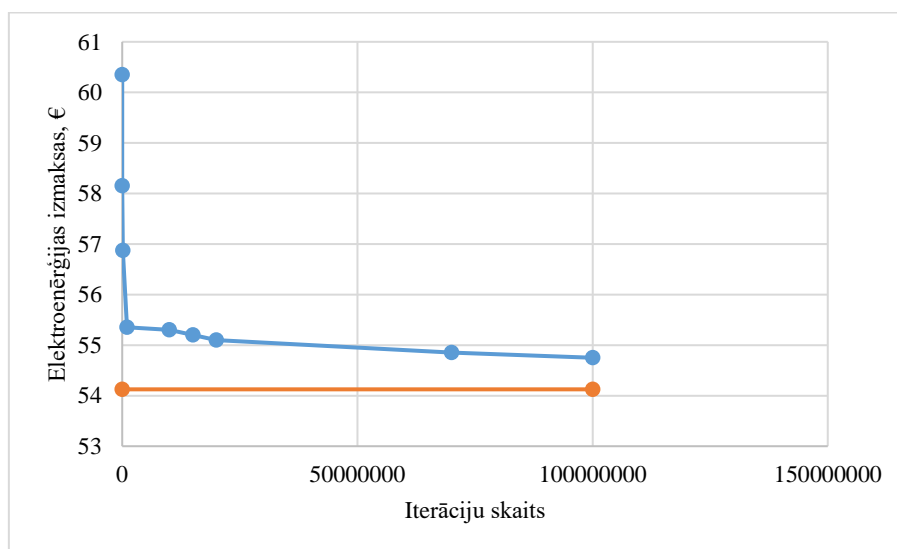
2.24. tabula. Piemēra ieejas dati

$q_i$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$	$q_9$	$q_{10}$
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 savā starpā vienādi un vienādi ar 500; uzņēmuma atļautā jauda ir ierobežota ar 500 kW.

No uzdotajiem ierobežojumiem redzam, ka vienā stundā var saražot tikai vienu produktu. Minimālas enerģijas izmaksas būs, ja vislielākais enerģijas patēriņš būs pirmajā stundā un vismazākais desmitajā stundā. Tādējādi optimālais ražošanas grafiks sakrīt ar tabulas pirmo rindu. Pie tam enerģijas izmaksas būs 54,13 EUR. Rezultāts ir viegli sasniedzams ar lineārās programmēšanas palīdzību. Pavisam cita situācija parādās, ja pielieto pārlases metodes, jo ir viegli aprēķināt, ka ir jāizvēlas vienīgais no iespējamajiem  $24^{10}$  variantiem. Variantu skaits ir vienāds ar 63 403 380 965 376. Gadījuma pārlases metode arī nedos garantētu rezultātu. Bet, lai to pielietotu, mainīsim optimizācijas uzdevumu un mēģināsim atrast risinājumu, kurš **tuvojas** optimālajam.

2.29. attēlā atspoguļota novērtēto enerģijas izmaksu atkarība no mēģinājumu skaita. Var redzēt, ka rezultāts tuvojas 54,13 € vērtībai, kaut arī nesasniedz to.



2.28. att. Gadījuma pārlases tuvošanās lineārās programmēšanas rezultātam

Iterāciju skaita palielināšanas sākuma stadijā varam novērot ātru precizitātes pieaugumu. Divu procentu precizitāte tiek sasniegta apmēram pie 5 miljoniem iterāciju. Rezultāti apkopoti 2.25. tabulā.

2.25. tabula. Rezultāti

Iterāciju skaits	Elektroenerģijas izmaksas, €	Patērētais laiks,
1000	60,35	00:00:00.0117616
10000	58,15	00:00:00.1117690
100000	57,8	00:00:01.0930839
1000000	55,35	00:00:10.6354650
10000000	55,3	00:01:43.6261274
15000000	55,2	00:02:35.2857695
20000000	55,1	00:03:30.3958702
70000000	54,85	00:12:48.0478043
100000000	54,75	00:18:00.8334500

Desmit miljonu iterāciju realizācija aizņem apmēram divas minūtes. Atzīmēsim, ka šo laiku iespējams vairākas reizes samazināt, pielietojot jaunākās paaudzes personālo datoru.

Atzīmēsim, ka pielietošanai var ieteikt abas metodes. Lineāro pieeju var izmantot gadījumos, kad ražošana ir maksimāli elastīga un produktu ražošanas secība ir brīvi izvēlama. Tieši šajos gadījumos var sasniegt maksimālo izmaksu ekonomijas efektu. Citos gadījumos, kad ir jāņem vērā tehnoloģiskie un organizatoriskie ierobežojumi, var izmantot gadījuma pārlases metodi. Turklāt rezultātu var salīdzināt ar lineāro gadījumu, lai novērtētu ražošanas elastīguma pasākumu iespējamās ieviešanas efektivitāti.

### 2.19. Nodaļas secinājumi

1. Industriālā uzņēmuma energoefektīvai ražošanas plānošanai ir jāveic programmatūras sintēze, kuras mērķis ir optimizēt elektroenerģijas patēriņa izmaksas, balstoties uz tirgus cenām. 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 datu bāzes.
2. Atkarībā no konkrētiem produkcijas veidiem, izmantojamām tehnoloģijām un iekārtām ražošana var būt organizēta dažādi:
  - paralēli. Produkti tiek ražoti vienlaicīgi;
  - pēc kārtas. Produkti tiek ražoti secīgi. Var izdalīt divus apakšgadījumus:
    - o Produktu ražošanas secība ir brīvi izvēlama;
    - o produktu ražošanas secība ir uzdota. Šāda veida ierobežojumi var rasties, piemēram, no produktu piegādes nosacījumiem vai saskaņojot ar izejvielu piegādes grafikiem;

- jaukti. Šajā gadījumā viena daļa produktu var tikt ražota vienlaicīgi, bet cita – secīgi.

3. Optimizējot enerģijas patēriņu, mērķa funkciju minimizēšanu var veikt, pielietojot dažādas metodes, atkarībā no ierobežojumu veidiem, kuri izriet no konkrētajiem ražošanas apstākļiem un pieejamās informācijas. Tika izvēlētas divas pamatmetodes:

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

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

4. Gadījumam, 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 jā satur 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

## 3.1. Uzņēmuma produkcija un ražošanas struktūra

Rīgā strādājošais stikla apstrādes uzņēmums ir izrādījis interesi par šo pētījumu un sniedzis tam nepieciešamo informāciju, kas 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 un gatavās produkcijas veidus.

Ražotnē tiek veikti šādi procesi:

- Stikla griešana (*P1*) – pēc pasūtījuma saņemšanas noteikta galprodukta izgatavošanai notiek tehnoloģiski un ekonomiski pamatota pasūtījuma izvietošana uz stikla loksniem ar izmēriem 3210x6000 mm, kam seko parametru uzdošana griešanas darbgaldam, kur lielo loksni sagriež mazākās daļās;
- Stikla apstrāde (*P2*) – šeit apskatām tehnoloģisko komponenti, kurā stiklam ir asas malas un (dažos gadījumos) nelīdzenumi un tiek veikta vai nu stikla tehniska malu apstrāde, kad visās stikla malās tiek noņemta neliela maliņa, vai arī malas pulēšana, kad stikls tiek nopulēts līdz gludam stāvoklim.
- Stikla rūdīšana (*P3*) – speciāls termiskās apstrādes process. Tā laikā stikls tiek uzkaršēts līdz 600–700 °C un pēc tam strauji atdzesēts ar spēcīgu gaisa plūsmu. Stikls kļūst vidēji 5–7 reizes izturīgāks nekā iepriekš un spēj izturēt temperatūras svārstības diapazonā no 60 °C līdz 300 °C.
- Stikla laminēšana (*P4*) – daudzslāņu konstrukciju izgatavošana no stikla ar polivinila plēves palīdzību, kur starp 2–3 vienāda izmēra stikla gabaliem ievieto polivinila plēvi un termoapstrādes procesā galarezultātā iegūst vairākslāņu stiklu.
- Stikla paketēšana (*P5*) – stikla pakešu izgatavošana. Speciālās stikla pakešu izgatavošanas iekārtās stiklu mazgā ar speciālām mazgāšanas mašīnām. Pēc tam nomazgātos stikla gabalus padod uz speciālu galdu, kas apgaismots ar jaudīgām



lampām, kas ļauj ieraudzīt dažādus stikla defektus un apskatīt mazgāšanas rezultātus. Pēc tam ar pirmā hermetizējošā slāņa (butila auklas) palīdzību starp stikla gabaliem iestiprina t.s. distancēšanas rāmjus, kas izgatavoti no speciāliem alumīnija profiliem (vai plastmasas materiāla), kas aizpildīti ar molekulāro sietu (silikagēls), kas uzsūc mitrumu veidojamajās starpstiklu kamerās. Noslēdzošais stikla pakešu izgatavošanas etaps ir to apspaide speciālā presē un hermetizācija pa perimetru ar otru hermetizējošo slāni (tiokolu). Stikla pakešu izgatavošanas procesa pašās beigās tās uzmanīgi noņem no stenda un pārnes stikla pakešu uzglabāšanas un transportēšanas telpā.

- Stikla krāsošana (*P6*) – krāsošana ar veltņa metodi (angļu val. – *roller coating*), piešķirot stiklam vajadzīgo krāsas toni, kam seko rūdīšanas process.

Darbā apskatīti šādi gatavās produkcijas veidi:

- Struktūrstiklojums (*PU1*) – īpašā pazīme ir tā gludā vienlaidu virsma, ar stiprinājumiem, kas daļēji vai pilnībā noslēpti aiz stikla. Stiklojums var tikt pielīmēts pie nesošās konstrukcijas ar silikonu vai piestiprināts ar īpašiem apslēptiem stiprinājumiem.
- Stikla pakete (*PU2*) – parasta vienkameras pakete, kur izmantoti 2 stikla gabali.
- Rūdīts stikls (*PU3*) – stikls, kas ticis pakļauts termiskai apstrādei, ar paaugstinātu izturību un paaugstinātu drošības pakāpi saplīšanas gadījumā. Šādu stiklu tālāk apstrādāt nav iespējams.
- Laminēts rūdīts stikls (*PU4*) – pēc rūdīšanas vairākus stikla gabalus savieno ar polivinila plēves palīdzību.
- Stikla pakete ar rūdītiem stikliem (*PU5*) – divkameru stikla pakete no 2 rūdīta stikla gabaliem un 1 nerūdīta stikla gabala.
- Stikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu (*PU6*) – vienkameras stikla pakete no viena krāsota un rūdīta stikla gabala un viena nerūdīta stikla gabala.
- Dubultstikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu (*PU7*) – divkameru stikla pakete no diviem rūdīta stikla gabaliem un viena krāsota un rūdīta stikla gabala.

Tālāk darbā aplūkosim ražotnē notiekošo ražošanas procesu aprakstu pa etapiem, kas atainots 3.1. attēlā.

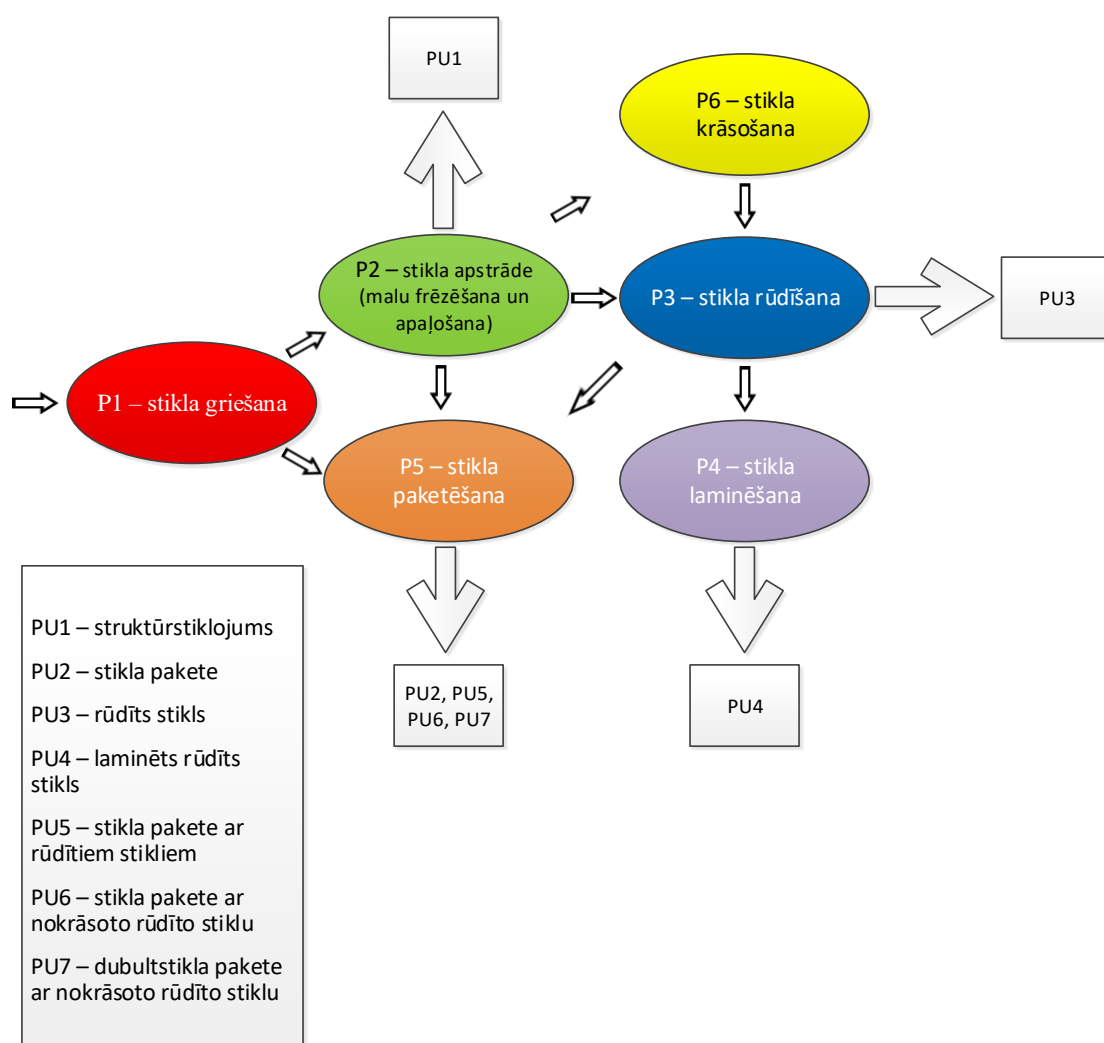
No izejvielu saņemšanas līdz galaprodukcijai:

- Vispirms ražotāji uz stikla apstrādes rūpnīcu piegādā stikla materiālu izmērā 3210x6000 mm (standartizpildījums), un noliktavā tiek glabāts optimāls tā daudzums, vadoties pēc pasūtījumu daudzuma prognozes tuvākajam laikam un pēc galaprodukcijas popularitātes.
- Pēc tam kad tehnologs ar programmas palīdzību ir optimāli izvietojis galaprodukta nepieciešamos izmērus uz lielajām loksņēm, pasūtījumi nonāk ražošanā.
- Stikls tiek automātiski padots uz griešanas galdu, kur operators ir izvēlējis vajadzīgo stikla veidu un uzdevis vajadzīgo pasūtījumu izpildes secību attiecīgajai darba dienai.
- Tieši griešanas sektorā notiek sagrieztā stikla dalīšana vajadzīgajām sekojošajām darbībām (apstrāde, paketēšana).
- Apstrādes laikā stikls tiek apstrādāts no visām četrām pusēm atkarībā no tālākā cikla (gatavā produkcija, rūdīšana, paketēšana, krāsošana).
- Stikla krāsošana notiek ar veltnīti, un pēc tam stikls tiek virzīts uz rūdīšanu.
- Stikla rūdīšana notiek automātiski, ar noteiktiem iestatījumiem katram stikla veidam un izmēram. Izvēloties iestatījumus kļūdaini, stikls var plīst. Pēc rūdīšanas stiklu vairs nevar pakļaut mehāniskai iedarbei, lai mainītu izmērus vai ieviestu konstruktīvus elementus. Tālākie cikli ir gatavā produkcija, paketēšana, laminēšana.
- Paketēšanas process – vairāku sagatavotu stikla gabalu salikšana vienā galaproduktā stikla paketei, pamatsalikšana stikla paketē. Gatavais produkts.
- Laminēšanas process seko pēc rūdīšanas, un tas ir visilgākais, jo laiks ir vajadzīgs polivinila plēves pārveidei krāsnī. Beigās – gatavā produkcija.

Lai iegūtu gatavās produkcijas ražošanas vajadzības matemātisku sadalījumu, 50 m<sup>2</sup> gatavās produkcijas izgatavošanai darbā pieņemti šādi iestatījumi (jāsaprot, ka procesi seko cits citam, izmantojot vienu un to pašu kvadrāturu):

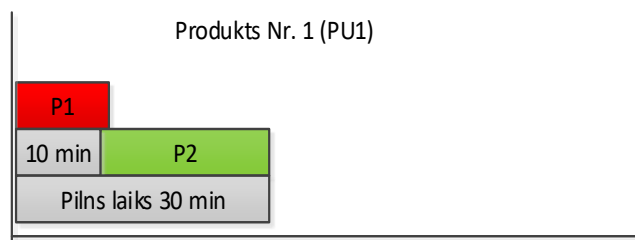
- ✓ 50 m<sup>2</sup> struktūrstiklojuma sastāv no 50 m<sup>2</sup> griešanas un 50 m<sup>2</sup> apstrādes – *PU1*, jeb veidojas no *P1* un *P2*.
- ✓ 50 m<sup>2</sup> stikla pakete – 100 m<sup>2</sup> griešana, 50 m<sup>2</sup> apstrāde un 50 m<sup>2</sup> paketēšana – *PU2*, jeb veidojas no *2xP1*, *P2* un *P5*.
- ✓ 50 m<sup>2</sup> rūdīts stikls – 50 m<sup>2</sup> griešana, 50 m<sup>2</sup> apstrāde un 50 m<sup>2</sup> rūdīšana – *PU3*, jeb veidojas no *P1*, *P2* un *P3*.
- ✓ 50 m<sup>2</sup> laminēts rūdīts stikls – 100 m<sup>2</sup> griešana, 100 m<sup>2</sup> apstrāde, 100 m<sup>2</sup> rūdīšana, 50 m<sup>2</sup> laminēšana – *PU4*, jeb veidojas no *2xP1*, *2xP2*, *2xP3* un *P4*.

- ✓ 50 m<sup>2</sup> stikla pakete no rūdīta stikla – 150 m<sup>2</sup> griešana, 100 m<sup>2</sup> apstrāde, 100 m<sup>2</sup> rūdīšana, 50 m<sup>2</sup> paketēšana – *PU5*, jeb veidojas no *3xP1*, *2xP2*, *2xP3* un *P5*.
- ✓ 50 m<sup>2</sup> stikla pakete ar krāsotu stiklu – 100 m<sup>2</sup> griešana, 50 m<sup>2</sup> apstrāde, 50 m<sup>2</sup> krāsošana, 50 m<sup>2</sup> rūdīšana, 50 m<sup>2</sup> paketēšana – *PU6*, jeb veidojas no *2xP1*, *P2*, *P6*, *P3*, *P5*.
- ✓ 50 m<sup>2</sup> dubultā stikla pakete ar krāsotu stiklu – 150 m<sup>2</sup> griešana, 100 m<sup>2</sup> apstrāde, 50 m<sup>2</sup> krāsošana, 100 m<sup>2</sup> rūdīšana, 50 m<sup>2</sup> paketēšana – *PU7*, jeb veidojas no *3xP1*, *2xP2*, *P6*, *2xP3*, *P5*.

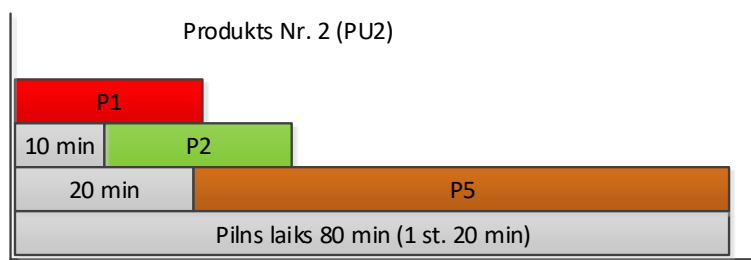


3.1. att. Vienkāršots stikla apstrādes ražotnes ražošanas plūsmu attēlojums

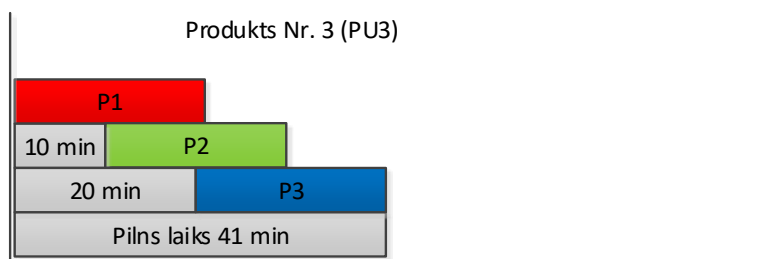
Aplūkosim katru gatavo produktu uz laika skalas (3.2.–3.8. att.):



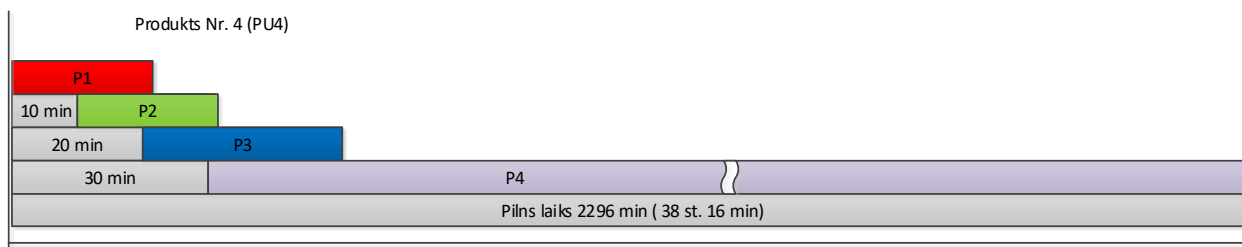
3.2. att. PU1 – struktūrstiklojums, 50 m<sup>2</sup> struktūrstiklojuma izgatavošanai nepieciešamas 30 minūtes.



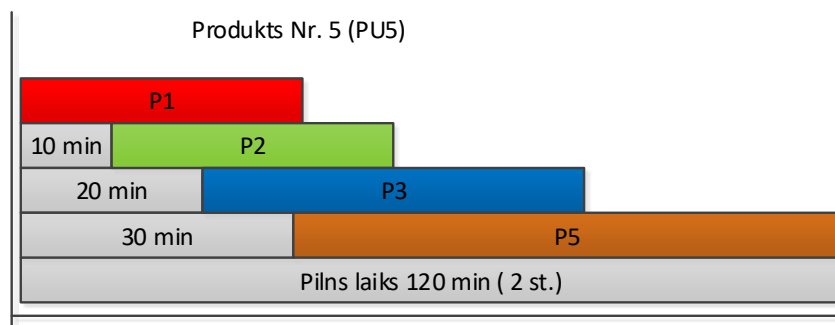
3.3. att. PU2 – stikla pakete, 50 m<sup>2</sup> stikla paketes izgatavošanai nepieciešamas 80 minūtes.



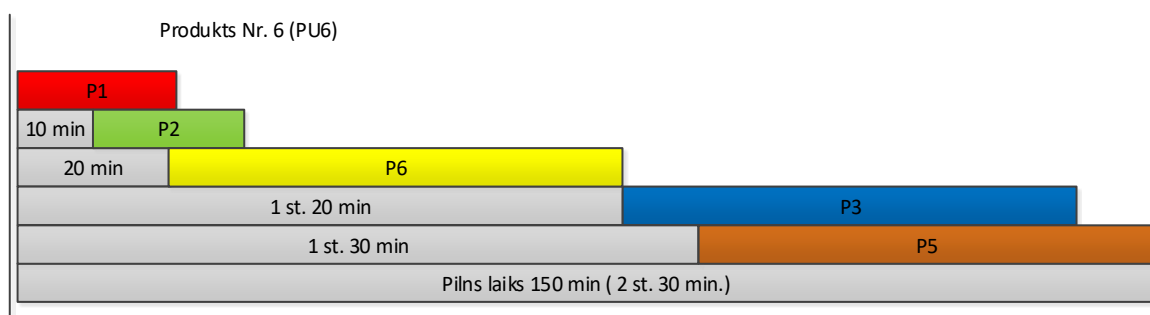
3.4. att. PU3 – rūdīts stikls, 50 m<sup>2</sup> rūdīta stikla izgatavošanai nepieciešama 41 minūte.



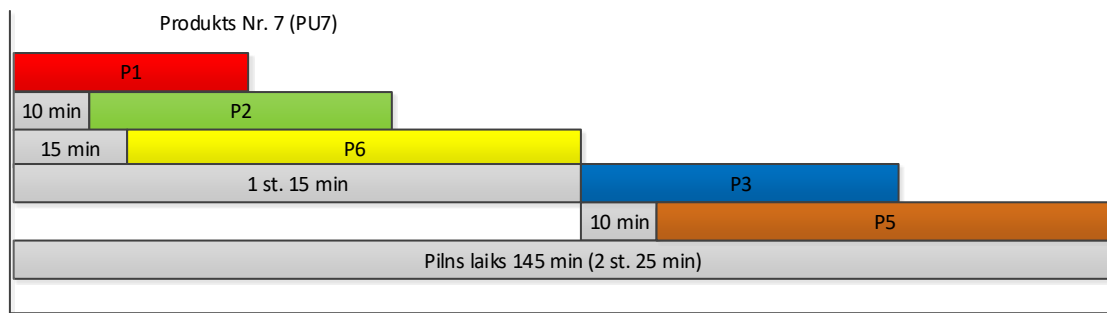
3.5. att. PU4 – laminēts rūdīts stikls, 50 m<sup>2</sup> laminēta rūdīta stikla izgatavošanai nepieciešamas 2296 minūtes.



3.6. att. PU5 – stikla pakete ar rūdītiem stikliem, 50 m<sup>2</sup> stikla paketes izgatavošanai ar rūdītiem stikliem nepieciešamas 120 minūtes.

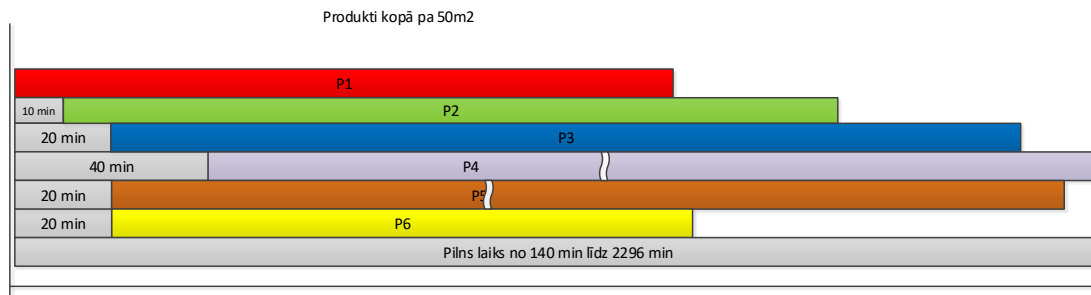


3.7. att. PU6 – stikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu, 50 m<sup>2</sup> stikla paketes izgatavošanai ar nokrāsotu rūdīto stiklu nepieciešamas 150 minūtes.



3.8. att. PU7 – dubultstikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu, 50 m<sup>2</sup> dubultstikla paketes izgatavošanai ar nokrāsotu rūdīto stiklu nepieciešamas 145 minūtes.

Tagad apskatīsim sarežģītāku kombināciju pasūtījumus 350 m<sup>2</sup> gatavās produkcijas apjomā, pa 50 m<sup>2</sup> no katra. Tā kā visi pasūtījumi tiek izpildīti vienlaikus, pēdējais produkts būs gatavs pēc 2296 minūtēm, 3.9. att.



3.9. att. Visi 7 produkti kopā pa 50 m<sup>2</sup>, pēdējais produkts būs gatavs pēc 2296 minūtēm

Nākamais solis – apskatīsim cik daudz gatavās produkcijas ir iespējams izgatavot vienā darba dienā.

Tā kā gatavās produkcijas *PU4*, *PU6* un *PU7* veidu apjoms, pa 50 m<sup>2</sup> no katra veida, jau atbilst nedēļas apjomam, tad to var pieņemt par atskaites punktu jeb bāzi. Apskatīsim, kādus gatavās produkcijas veidus iespējams izgatavot atlikušajā laikā. Ņemsim vērā, ka gatavās produkcijas apjomu var izgatavot 7 darba stundās vienā maiņā, jo personālam darba procesa starplaikos ir paredzēts atpūtas laiks. Mums atliek produkti *PU1*, *PU2*, *PU3* un *PU5*.

Pašreiz laiks, kas patērēts procesam *P1*, ir 136 minūtes (*TP1*); procesam *P2* – 160 minūtes (*TP2*); procesam *P3* – 188 minūtes (*TP3*); procesam *P5* – 240 minūtes (*TP5*). 7 stundas atbilst 420 minūtēm – šo laiku apzīmēsim par  $T_{kop}$ . No tā aprēķinām atlikušo laiku, kuru var izmantot gatavās produkcijas izgatavošanai, ko apzīmējam ar  $T_{paliek}$ .

$$TP1_{paliek} = T_{kop} - TP1 = 420 - 136 = 284 \quad (3.1)$$

$$TP2_{paliek} = T_{kop} - TP2 = 420 - 160 = 260 \quad (3.2)$$

$$TP3_{paliek} = T_{kop} - TP3 = 420 - 188 = 232 \quad (3.3)$$

$$TP5_{paliek} = T_{kop} - TP5 = 420 - 240 = 180 \quad (3.4)$$

Attiecībā uz darbizlietojumu tālāk apskatīsim produktu *PU2* un *PU5* izgatavošanas apjomu.

$TP5_{paliek} = 180 \text{ min.}$  ļauj atlikušajā laikā izgatavot  $180/60 = 3$  produktus, kuros iesaistīts process *P5*, tas ir, produktus *PU2* vai *PU5*. Tā kā nepieciešams saražot vairāk produkta *PU2*, veiksīm šādu sadalījumu: *PU2* – 2 apjomi (1 apjoms tiek pielīdzināts 50 m<sup>2</sup> gatavās produkcijas) un *PU5* – 1 apjoms.

Lai izgatavotu 3 apjomus, mēs patērēsim šādu laika daudzumu:

$$P1' = (11 \times 2) * 2 + 3 * 11 = 77 \text{ (min.)} \quad (3.5)$$

$$P2' = 20 * 2 + 20 * 2 = 80 \text{ (min.)} \quad (3.6)$$

$$P3' = 2 \cdot 21 + 38^I = 80 \text{ (min.)} \quad (3.7)$$

$$P5' = 60 \cdot 3 = 180 \text{ (min.)} \quad (3.8)$$

Pašreiz gatavās produkcijas  $PU2$  un  $PU5$  apjomi atbilst dienas normai, līdz ar to tagad:

$$TP1 = 136 + 77 = 213 \text{ (min.)} \quad (3.9)$$

$$TP2 = 160 + 80 = 240 \text{ (min.)} \quad (3.10)$$

$$TP3 = 188 + 80 = 268 \text{ (min.)} \quad (3.11)$$

tad

$$TP1_{\text{paliek}} = 420 - 213 = 207 \quad (3.12)$$

$$TP2_{\text{paliek}} = 420 - 240 = 180 \quad (3.13)$$

$$TP3_{\text{paliek}} = 420 - 268 = 152 \quad (3.14)$$

Nākamais produkts darbizlietojuma ziņā ir  $PU3$ , kur gala procesu  $P3$  atlikušajā laikā var veikt  $152/21 \approx 7$  apjomu apmērā.

Lai saražotu 7 apjomus, mēs patērēsim šādu darba procesu laika daudzumu:

$$P1'' = 7 \cdot 11 = 77 \text{ (min.)} \quad (3.15);$$

$$P2'' = 7 \cdot 20 = 140 \text{ (min.)} \quad (3.16);$$

$$P3'' = 152 \text{ (min.)} \quad (3.17).$$

$PU3$  gatavās produkcijas dienas norma ir sasniegta, līdz ar to tagad:

$$TP1 = 213 + 77 = 290 \text{ (min.)} \quad (3.18);$$

$$TP2 = 240 + 140 = 380 \text{ (min.)} \quad (3.19),$$

tad

$$TP1_{\text{paliek}} = 420 - 290 = 130 \text{ (min.)} \quad (3.20);$$

$$TP2_{\text{paliek}} = 420 - 380 = 40 \text{ (min.)} \quad (3.21).$$

Atlikušajā laikā izgatavosim produktu  $PU1$ , kur iesaistīti procesi  $P1$  un  $P2$ ,  $40/20 = 2$  apjomi, tad

---

<sup>1</sup> Laika izlietojums pieaug procesa  $P2$  ilguma dēļ

$$P1''' = 2 * 11 = 22 \text{ (min.)} \quad (3.22)$$

$$P2''' = 2 * 20 = 40 \text{ (min.)} \quad (3.23)$$

Šādi veicot darba procesus, iznākumā iegūstam šādu gatavās produkcijas daudzumu 1 darba dienā:

$$PU7 = 50 \text{ m}^2 \quad (3.24)$$

$$PU6 = 50 \text{ m}^2 \quad (3.25)$$

$$PU5 = 50 * 2 = 100 \text{ m}^2 \quad (3.26)$$

$$PU4 = 50 / 7 \approx 7 \text{ m}^2 \quad (3.27)$$

$$PU3 = 50 * 8 = 400 \text{ m}^2 \quad (3.28)$$

$$PU2 = 50 * 3 = 150 \text{ m}^2 \quad (3.29)$$

$$PU1 = 50 * 3 = 150 \text{ m}^2 \quad (3.30)$$

Vienā darba dienā ražošanas procesiem patērēts šāds laika daudzums:

$P1 = 312 \text{ min.}$ ,  $P2 = 420 \text{ min.}$ ,  $P3 = 420 \text{ min.}$ ,  $P4$  – neapskatām,  $P5 = 420 \text{ min.}$ ,  $P6 = 120 \text{ min.}$

Lai iegūtu nedēļas grafiku, varam pareizināt ar 5 visus rādītājus. Mēneša grafikam reizinām nedēļas datus ar 4.

Rezultātā (3.1. tabula) nonākam pie optimālā iegūstamās produkcijas daudzuma, izmantojot uzņēmuma esošās ražošanas jaudas, viena mēneša laikā, strādājot vienā maiņā, bez izejvielu piegādes aizkavējumiem un ar pasūtījumiem par noteiktu gatavās produkcijas veidu, kā arī, ja nav citu neparedzētu apstākļu.

3.1. tabula. Optimālais saražojamās produkcijas daudzums

	Gatavās produkcijas daudzums, m <sup>2</sup>	P1 – stikla griešana, m <sup>2</sup>	P2 – stikla apstrāde, m <sup>2</sup>	P3 – stikla rūdīšana, m <sup>2</sup>	P4 – stikla laminēšana, m <sup>2</sup>	P5 – stikla paketēšana, m <sup>2</sup>	P6 – stikla krāsošana, m <sup>2</sup>
PU1 – struktūrstiklojums	3000	3000	3000				
PU2 – stikla pakete	3000	6000	3000			3000	
PU3 – rūdīts stikls	8000	8000	8000	8000			
PU4 – laminēts rūdīts stikls	140	280	280	280	140		
PU5 – stikla pakete ar rūdītiem stikliem	2000	6000	4000	4000		2000	
PU6 – stikla pakete ar nokrāsotu rūdīto stiklu	1000	2000	1000	1000			1000



PU7 – dubultstikla pakete ar nokrāsošu rūdīto stiklu	1000	3000	2000	2000		1000	1000
<b>Kopā</b>	18140	28280	21280	15280	140	6000	2000

Tālāk apskatīsim datus par faktisko ražotnes noslodzi, kas attēloti tālāk, 3.2. tabulā, un pāriesim pie modeļa sastādīšanas.

3.2. tabula. Ražotnes faktiskā noslodze 1 mēneša laikā

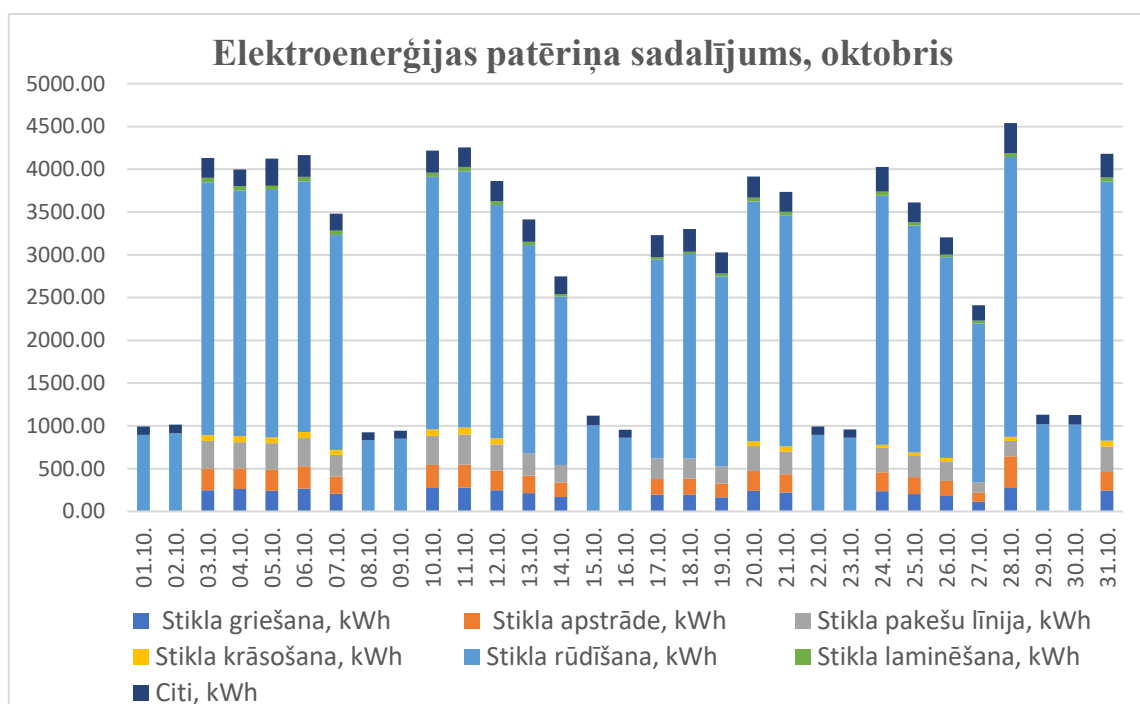
	Gatavās produkcijas daudzums, m <sup>2</sup>	P1 – stikla griešana, m <sup>2</sup>	P2 – stikla apstrāde, m <sup>2</sup>	P3 – stikla rūdīšana, m <sup>2</sup>	P4 – stikla laminēšana, m <sup>2</sup>	P5 – stikla paketēšana, m <sup>2</sup>	P6 – stikla krāsošana, m <sup>2</sup>
PU1 – struktūrstiklojums	627	627	627				
PU2 – stikla pakete	1095	2190	1095			1095	
PU3 – rūdīts stikls	8317	8317	8317	8317			
PU4 – laminēts rūdīts stikls	233	466	466	466	233		
PU5 – stikla pakete ar rūdītiem stikliem	1089	3267	2178	2178		1089	
PU6 – stikla pakete ar nokrāsošu rūdīto stiklu	73	146	73	73			73
PU7 – dubultstikla pakete ar nokrāsošu rūdīto stiklu	150	450	300	300		150	150
	11584	15463	13056	11334	233	2334	223

### 3.2. 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. Tālāk, 3.10. un 3.11. attēlā, parādīti apstrādātie elektroenerģijas patēriņa dati par katru

ražošanas ķēdi par 2019. gada oktobri un janvāri. Tāpat arī 3.3. tabulā un 3.12. attēlā sniegti dati attiecībā uz pieslēgto elektroenerģijas tarifu.

Izmantojot šos datus, tika noteikta produktu pašizmaksas struktūra, kas parādīta 3.13. attēlā. Kā šeit redzams, 10 % no produktu pašizmaksas veido elektroenerģijas izmaksas; tas ļauj mums klasificēt šo ražotni kā energoietilpīgai nozarei piederīgu. Energoietilpīgās nozarēs (piem., papīra un celulozes ražošanā, metalurģijā, ķīmiskajā rūpniecībā) šīs izmaksas veido vairāk nekā 5 % no ražošanas izmaksām, bet dažās nozarēs tiek ziņots pat par 15–20 % [52, 53]. Lielāks enerģijas patēriņš un tam sekojošās izmaksas ir likuši energoietilpīgās nozarēs ieviest ievērojamus uzlabojumus.

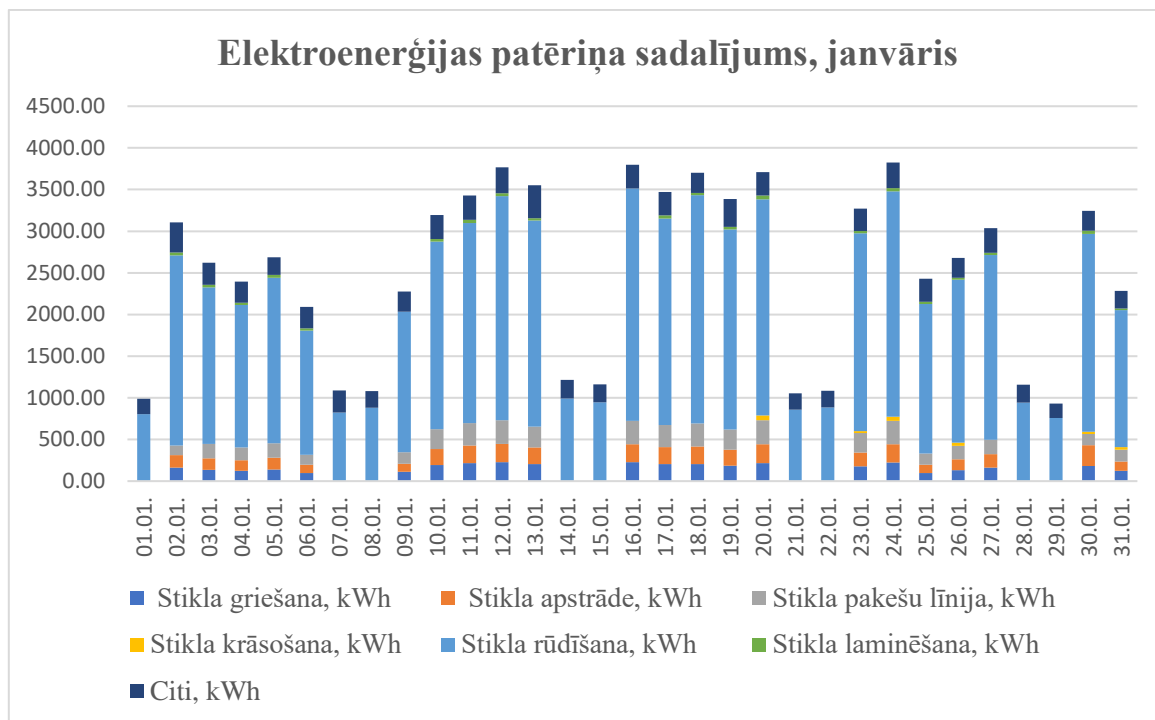


3.10. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums, oktobris

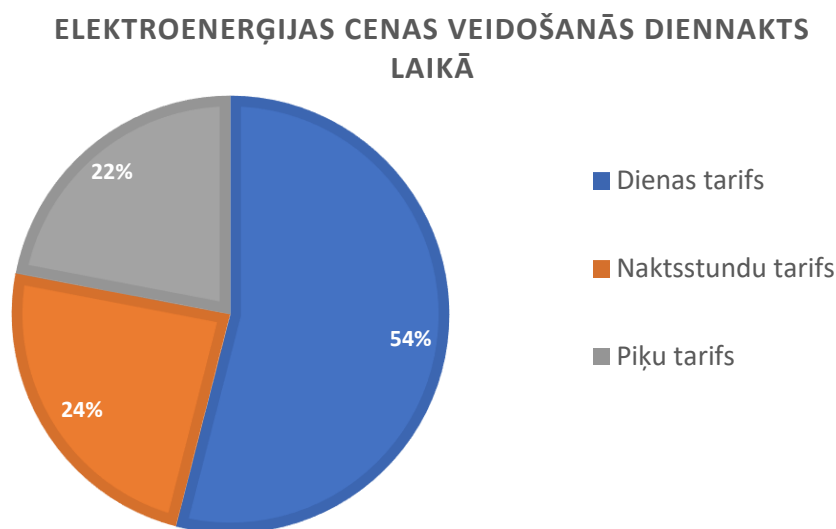
3.3. tabula. Pamatpieņēmumi

Parametra nosaukums; mērvienība	Vērtība *
Ražotnes nominālā maksimāli pieļaujamā strāva, A	909
Elektroenerģijas sadales tarifs	S-8
Obligātā iepirkuma komponente, €/kWh	0,0178
Elektroenerģijas sadales maksa, €/kWh:	
- dienas zona	0,039
- maksimumstundu zona	0,055
- nakts zona / brīvdienas	0,0306
Obligātā iepirkuma komponente pieslēgumam, €/A/gadā.	8,71
Uz jaudu balstīta pieslēguma maksa sadales sistēmas operatoram, €/A/gadā	13,96

- Enerģijas patēriņa elektroenerģijas sadales maksa sadalīta 3 zonās (sakarā ar S-8 maiņām): dienas zona (no 7.00 līdz 8.00, no 10.00 līdz 17.00 un no 20.00 līdz 23.00), maksimumstundu zona (no 8.00 līdz 10.00 un no 17.00 līdz 20.00) un nakts zona (no 23.00 līdz 7.00).
- Kopējā maksimālā stundas slodze ( $W_{max}$ ) ir 550 kWh/h.



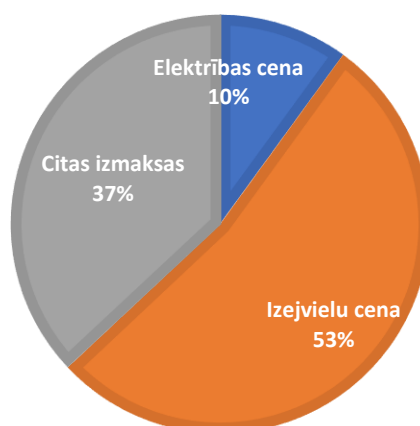
3.11. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums, janvāris



3.12. att. Elektroenerģijas cenas veidošanās diennakts laikā

### PRODUKCIJAS KOPĒJĀS IZMAKSAS

■ Elektrības cena    ■ Izejvielu cena    ■ Citas izmaksas



3.13. att. Produkcijas kopējās izmaksas

Analizējot 3.4. tabulas datus, kur attēlots elektroenerģijas patēriņš katram atsevišķam tehnoloģiskajam procesam/ražošanas ķēdei, var secināt, ka pats energoietilpīgākais process ir rūdišana, un tieši šī procesa energoefektivitātes paaugstināšana var dot visjūtamāko rezultātu.

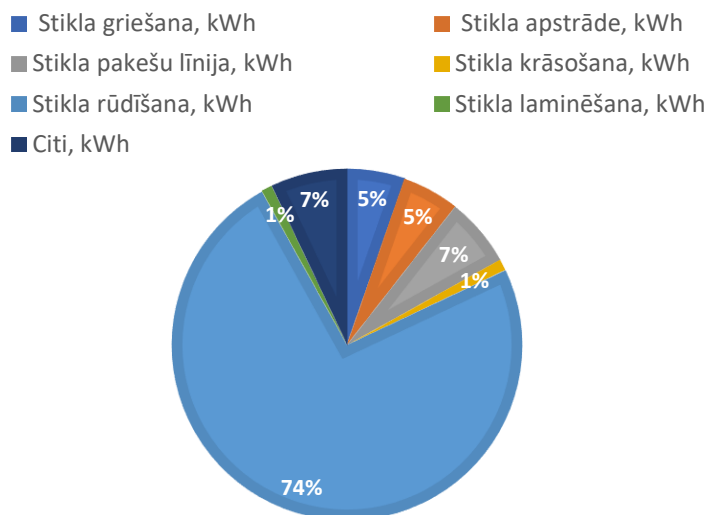
3.4. tabula. Elektroenerģijas patēriņš katram atsevišķajam tehnoloģiskajam procesam/ražošanas ķēdei

	m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /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 rūdišana	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

Izanalizējot rūdišanas ciklu, var secināt, ka katru dienu liels elektroenerģijas daudzums tiek patērēts, lai sakarsētu rūdišanas krāsni. T.i., katru dienu krāsns tiek izslēgta, atdziest, un nākamā cikla darbības sākšanai nepieciešams to no jauna uzkarstēt. Pastāv arī

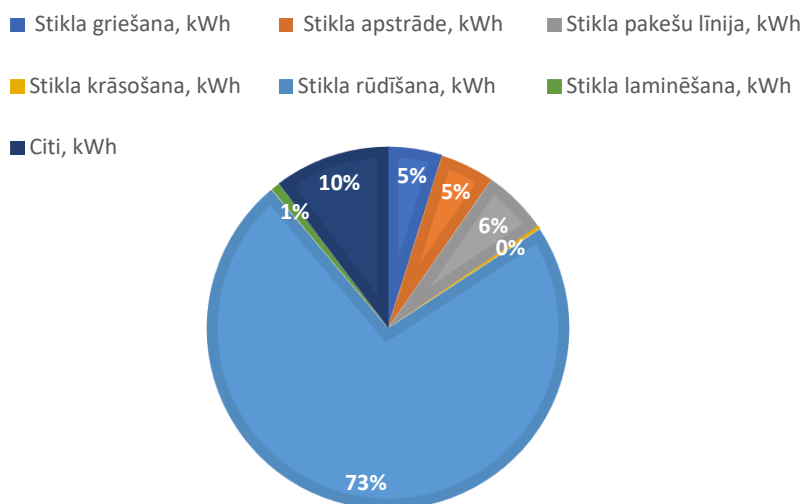
jaunākas iekārtas, kurām paredzēts darboties bez izslēgšanas, t.i., starplaikos starp rūdišanas cikliem (kas šajā gadījumā notiek reizi dienā) krāsns pāriet zemākas temperatūras uzturēšanas režīmā. T.i., tā neatdziest. Elektroenerģijas sadalījums ir parādīts 3.14. attēlā un 3.15. attēlā:

### SADALĪJUMS, OKTOBRIS



3.14. att. Sadalījums, oktobris

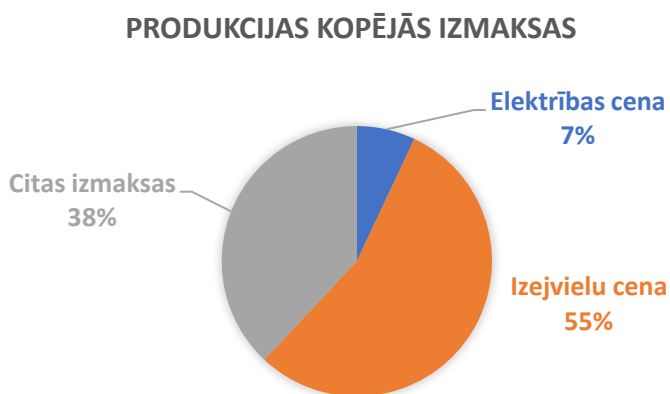
### SADALĪJUMS, JANVĀRIS



3.15. att. Sadalījums, janvāris

Jaunas krāsns ieviešana ar jaunu darba grafiku, t.i., krāsns pāriet dīkstāves režīmā laikā, kad stikla rūdišana nenotiek, maina elektroenerģijas rēķinu sadalījumu pa stundām. Tā rezultātā pieaugs patēriņš nakts laikā, bet samazināsies patēriņš dienas laikā un maksimālās elektroenerģijas cenas laikā.

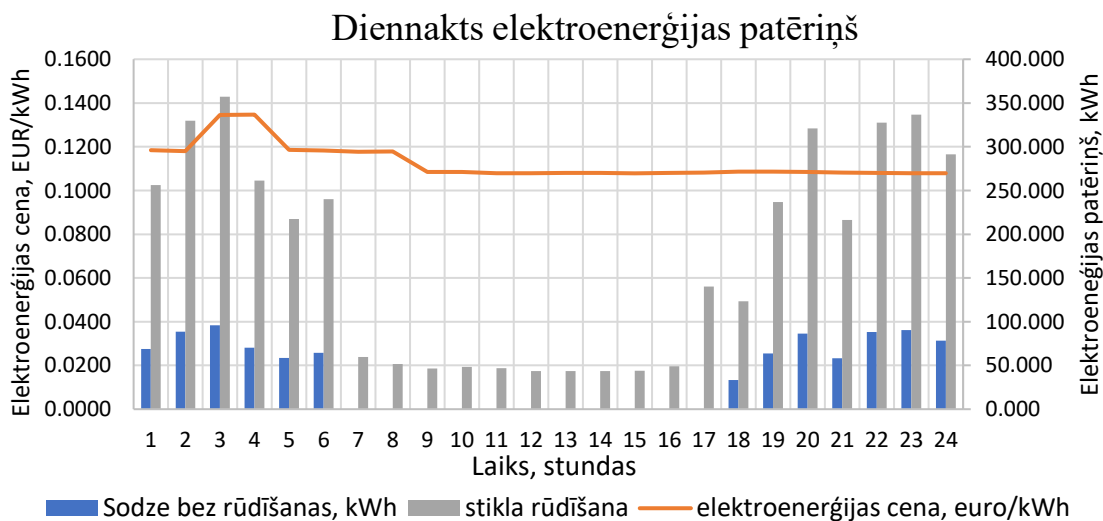
Sakarā ar krāsns elektroenerģijas patēriņa samazināšanos un slodzes pārdali stikla rūdīšanas procesa daļa kopējā elektroenerģijas patēriņā samazinās no 64 % līdz 47 %. Elektroenerģijas patēriņš stikla rūdīšanai uz 1 m<sup>2</sup> samazināsies divas reizes, turklāt elektroenerģijas izmaksu procents produktu galīgajās izmaksās samazinās no 10 % līdz 7 %, 3.16. attēls. Elektroenerģijas patēriņa samazināšana ļauj arī samazināt CO<sub>2</sub> izmešu daudzumu atmosfērā. Pieņemot, ka lai saražotu 1 kWh stundu gāzes elektrostacijas izdala ~ 350 g CO<sub>2</sub>, var secināt, ka minēta energoefektivitātes uzlabošana samazina CO<sub>2</sub> izmešu daudzumu par ~ 22.75 t gadā.



3.16. att. Stikla izstrādājumu ražošanas uzņēmuma kopējās ražošanas izmaksas pēc jaunas krāsns ieviešanas

### 3.3. Stikla apstrādes ražotnes enerģijas patēriņa optimizācija

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



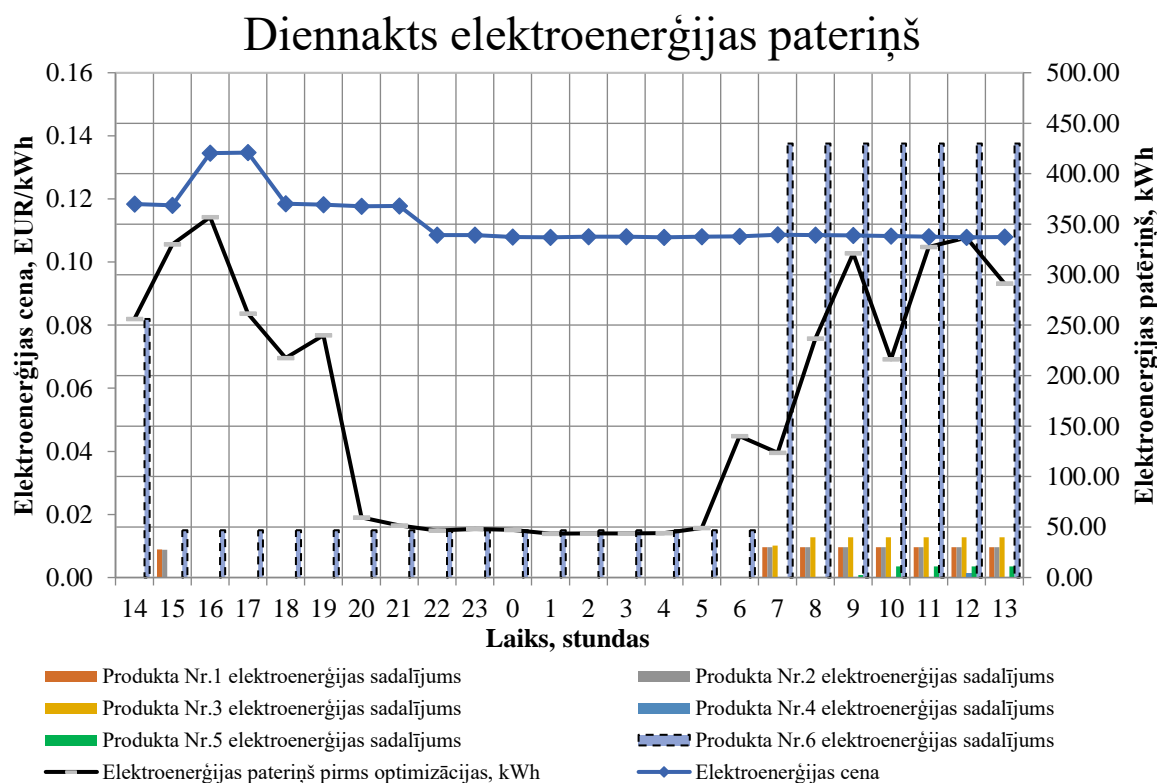
3.17. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš

Kā redzams no grafika 3.17, elektroenerģijas patēriņa maksimums laikā sakrīt ar cenu maksimumu. Izmantojam iepriekš aprakstītos algoritmus ražotnes diennakts grafika optimizācijai. Ražošanas tehnoloģiskās ķēdes, kuras nepieciešamas optimizācijas algoritmam, aprakstītas 3.1. attēlā. Apkoposim datus.

Kopā ir 6 tehnoloģiskie procesi, no kuriem viens ir rūdīšana. Tā kā rūdīšana patērē daudz vairāk enerģijas nekā citi ražošanas procesi, atainosim pārējo 5 ražošanas procesu optimizāciju atsevišķā grafikā. Dienas plāns, līniju ražīgums, kā arī ražošanas līniju elektroenerģijas patēriņš parādīti 3.4. tabulā.

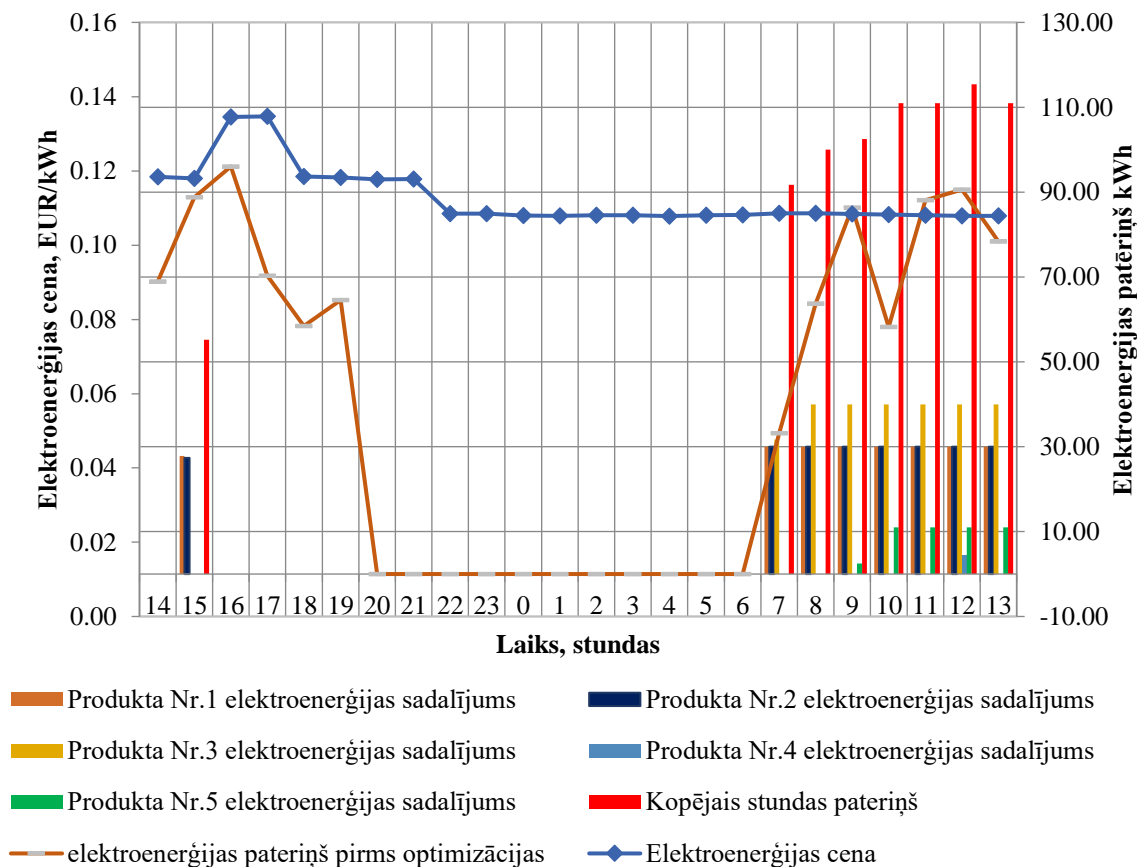
Jāatzīmē, ka secīgās ražošanas ķēdēs cits citam sekojoši ražošanas procesi tiek palaisti tikai tad, ja ir produkts, kurš izgājis caur iepriekšējo stadiju. Tādēļ šajā uzņēmumā griešana, pēc tam arī apstrāde vienmēr sākas pirmā vai arī darba dienas beigās tiek veidota sagrieztā un apstrādātā stikla rezerve nākamajai dienai. Darba diena noslēdzas ar pirmapstrādi nākamajai dienai. 2019. gadā elektroenerģijas ietaupījums, pateicoties optimizācijai, ir 25 730 EUR.

Optimizācijas rezultāts parādīts 3.18.–3.19. att.



3.18. att. Diennakts elektroenerģijas pateriņš ar rūdīšanas procesu

## Diennakts elektroenerģijas patēriņš



3.19. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš bez rūdišanas procesa

### 3.4. 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 euro.



## 4. ELEKTROENERĢIJAS AKUMULATORI UN PAŠGENERĀCIJA

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, bet stundās ar visaugstāko elektroenerģijas cenu uzkrātā elektroenerģija tiek izmantota, tādējādi samazinot dārgās elektroenerģijas patēriņu. Līdz ar to savukārt izlīdzinās patēriņa grafiks un tiek noņemti patēriņa pīķi „dārgajās” stundās. Elektroenerģijas akumulatoru izmantošana un integrācija sastāv no trim galvenajām problēmām. Pirmā – akumulācijas tehnoloģijas izvēle. Otrā – optimālās kapacitātes noteikšana, ņemot vērā ekspluatācijas termiņu, kā arī atmaksāšanās termiņus. Trešā – akumulatora integrācija ražošanas ciklu optimizācijas procesā, kur mērķa funkcija paliek tā pati – izmaksu minimizācija.

Aktuālās elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģijas un to salīdzinājums izmantošanai Latvijā aprakstīti K. Baltputna rakstā „Elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģijas Baltijas valstu kontekstā” [54].

Universālākie un ražotājiem gabarītu ziņā piemērotākie ir kompaktie akumulatori, kas atainoti 4.1. tabulā. Mūsu darbā apskatīsim visizplatītāko akumulatoru veidu – litija jonu baterijas [54].

4.1. tabula. Kompaktie akumulatori

Tehnoloģija	Jauda (kW)	Izlādes ilgums	Pilna cikla lietderības koeficients	Jaudas blīvums (W/kg)	Uzkrāšanas ilgums	Pašizlāde (dienā)	Darb-mūžs (gados)	Darb-mūžs (ciklos)
<b>Spararati</b>	līdz 250	ms-15 min	0,93-0,95	1000	s-min	100%	15-20	20000-100000
<b>Kondensatori</b>	līdz 50	ms-60 min	0,60-0,65	100	s-h	40%	5-8	50
<b>SMLEA</b>	100-10000	ms-8 s	0,95-0,98	500-2000	min-h	10-15%	15-20	>100000
<b>Svinskābes akumulatori</b>	līdz 20000	s-h	0,70-0,90	75-300	min-dienas	0.1-0.3%	5-15	2000-4500
<b>NaS akumulatori</b>	50-8000	s-h	0,75-0,90	150-250	s-h	20%	10-15	2500-4500
<b>Litija jonu akumulatori</b>	līdz 10	min-h	0,85-0,95	150-350	min-dienas	0.1-0.3%	5-15	1500-4500

Pāriesim pie nākamā jautājuma – akumulatoru baterijas kapacitātes noteikšanas. Baterijas optimālajam lielumam vajadzētu būt tādām, kas var apmierināt paredzamās vajadzības pēc minimālajām kopējām izmaksām, lai panāktu maksimālu labumu un paralēli samazinātu atmaksāšanās laiku. Tomēr, lai piemērotu izmēru noteikšanas procedūru, ir jābūt ievaddatiem.

➤ Temperatūra

Galvenais litija akumulatora novecošanas ātruma faktors ir temperatūra. Uzglabāšanas temperatūra ir galvenais nosacījums, ņemot vērā kalendāro novecošanu un pašizlādi [55]. Ja temperatūra ir augsta, tiek atvieglotas sekundārās reakcijas, piemēram, korozija, un litija zudums ir ievērojamāks nekā mērenā temperatūrā; tas izraisa jaudu zaudējumu [56]. Zemas temperatūras ļauj ierobežot šo parādību attīstību, taču šie apstākļi rada zināmas problēmas materiālu izkliedes zudumu dēļ un maina akumulatora ķīmiju [57]. Saskaņā ar tehnisko literatūru un specifikācijām litija akumulatora optimālā darba temperatūra ir 25 °C (77 °F).

➤ Novecošanas koeficients

Novecošanas un degradācijas mehānismu noteikšana akumulatorā ir galvenais un sarežģītākais uzdevums. Šādi procesi ir sarežģīti, jo daudzi faktori no vides vai izmantošanas režīma mijiedarbojas un rada dažādus novecošanas efektus.

450-2002 IEEE standartā un 1188-2005 IEEE standartā ieteikts mainīt akumulatoru, ja tā faktiskā kapacitāte samazinās līdz 80% no nominālās kapacitātes; tādēļ akumulatora nominālajai kapacitātei jābūt vismaz 125% no slodzes, kas sagaidāma tā kalpošanas laika beigās. Ja lietotājs plāno nomainīt akumulatoru, pirms tā kapacitāte sasniedz 80% no nominālās vērtības, tad izmantotā novecošanas robeža to var atspoguļot.

➤ Izlādes dziļums

Izlādes dziļums (DoD) ir alternatīva metode, lai norādītu akumulatora uzlādes līmeni (SoC). DoD ir SoC papildinājums, jo, vienam no rādītājiem palielinoties, otrs samazinās. Kamēr SoC vienības ir procentpunkti (0 % = tukšs; 100 % = pilns), DoD var izmantot Ah vienības (piemēram: 0 = pilna, 50 Ah = tukša) vai procentpunktus (100 % = tukšs; 0 % = pilns). Tā kā akumulatoram var būt lielāka jauda nekā tā nominālā vērtība, DoD vērtība var pārsniegt pilnu vērtību.

➤ Akumulatora enerģijas pārveides efektivitāte

(angļu val. – *round trip efficiency*)

Akumulatora enerģijas pārveides efektivitāte ( $\eta_{bat,rt}$ ) ir uzglabāšanas energoefektivitāte (no līdzstrāvas avota līdz uzglabāšanai – līdz līdzstrāvas avotam – līdz enerģijas patēriņam, jeb enerģijas daļa, kas ievietota uzglabāšanā un ko var atgūt.  $\eta_{bat,rt}$  nekad nevar būt vienāds ar

100%, jo būs enerģijas zudumi, piemēram, siltuma zudumi enerģijas uzglabāšanas ierīcē). Ražotāji parasti nenorāda konkrētās baterijas lietderības koeficientu, bet literatūrā šī parametra vērtības var atrast [58].

Uzlādes ( $\eta_{bat,ch}$ ) un izlādes ( $\eta_{bat,disch}$ ) lietderības koeficienti šajā darbā tiek ņemti no [59].

➤ Sākuma baterijas rezerve

Tas arī ir nepieciešams parametrs, kas ietekmē lietotāja izmaksas un paredzamo galīgo patēriņu. Var pieņemt dažādus scenārijus, kad baterija sākumā ir uzlādēta līdz: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %. Optimizācijas modelī tiek pieņemts, ka baterija sākumā ir pilnīgi uzlādēta.

Akumulatoru baterijas kapacitāte tiek aprēķināta pēc šādas formulas:

$$W_{apl.bat} = \frac{P_{pat,vid} \cdot (k_{novoc} \cdot k_{temp} \cdot k_{kap})}{DOD_{vid} \cdot \eta_{bat,rt}} \quad (4.1)$$

kur  $W_{apl.bat}$  – sākuma aplēses baterijas kapacitāte, kWh;

$P_{pat,vid}$  – lietotāja vidējais patēriņš, kW;

$k_{novoc}$  – baterijas novecošanas koeficients, r.v.;

$k_{temp}$  – temperatūras korekcijas koeficients, r.v.;

$k_{kap}$  – jaudas koeficients, r.v.;

$DOD_{vid}$  – baterijas vidējais uzlādes dziļums, r.v.

Invertora jauda ( $P_{inv}$ ) tiek aprēķināta pēc formulas:

$$P_{inv} = \frac{W_{apl.bat} \cdot (SOC_{max} - SOC_{min})}{\eta_{inv}} \quad (4.2)$$

kur  $SOC_{max}$  – maksimālais uzlādes stāvoklis, r.v.;

$SOC_{min}$  – minimālais uzlādes stāvoklis, r.v.

$\eta_{inv}$  – invertora lietderības koeficients, t.v.

Optimizācijas mērķis ir izveidot efektīvu regulēšanas un slodzes līdzsvarošanas shēmu (paredzot akumulatora uzglabāšanas darbību dienas ietvaros, kontrolējot akumulatora parametrus, tostarp uzlādes/izlādes ātrumu, DoD, SoC un ikdienas ciklu skaitu), kas samazina maksimālās slodzes un nodrošina maksimāli samazinātas izmaksas jeb palielinātu peļņu.

Pieņemta mērķa funkcija:

$$f_{obj,1}(W_{apl.bat}, P_{inv}, C_{biržas}, C_{ST,var}, t) \rightarrow max \quad (4.3)$$

kur  $t$  – laika vērtība stundās.

Mērķa funkciju (4.3) var pārrakstīt šādi:

$$f_{obj,1} = C_{ietaup}^d = \sum_{t=1}^{24} (W_{ch}^t \cdot (C_{biržas}^t + C_{ST,var}^t) - W_{disch}^t \cdot (C_{biržas}^t + C_{ST,var}^t)) \quad (4.4)$$

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

$W_{ch}^t, W_{disch}^t$  – 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 un 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 veidošanās sistēmas kapitālieguldījumi akumulatoru baterijā neatmaksājas. Tādēļ akumulatoru baterijas esamība tiek izskatīta nākotnes perspektīvā.

Veicot modelēšanu, tika ņemti vērā šādi nosacījumi un ierobežojumi:

- baterijas uzlādes-izlādes vadības veids: optimālā vadība. Deterministiskā pieeja. Plānošanas periods: viena diena (sākot no 14.00 līdz 13.00 pēc Latvijas laika). Cenas uz nākamo dienu ir zināmas. Ciklu skaits ir uzdots;
- sakarā ar īso laika periodu starp uzlādes un izlādes izpildi mēs pieņemam, ka jaudas zudumi un gaidīšanas zaudējumi vienā ciklā ir vienādi ar nulli;
- baterijas izlādes enerģija tiek izmantota tikai galalietotāju pašpatēriņam, kas ir pieslēgts tīklam; enerģijas atdošana tīklā nav iespējama;
- baterijas uzlādes un izlādes algoritms tiek īstenots tā, lai baterijas tiktu uzlādētas pie viszemākajām cenām un izlādētas maksimālo cenu stundu laikā. Bet, ja slodzes maksimums (kas pārsniedz slodzes robežas) tiek prognozēts nākamajā dienā noteiktā stundā vai stundās, tad akumulatora uzlādes enerģijas apjoms tiek novirzīts maksimuma izlīdzināšanai;
- baterijas stundas uzlādes/izlādes enerģijai jābūt vienādai vai mazākai par jaudas pārveidošanas sistēmas nominālo jaudu ( $P_{inv}$ , kW), kas reizināta ar izlādes/uzlādes

lietderības koeficientu un laika posmu ( $\Delta t = 1$  h). Ja šis nosacījums nav izpildīts, uzlādes/izlādes enerģija stundā ir vienāda ar  $P_{inv} \cdot \eta_{ch}$  (vai  $\eta_{disch}$ )  $\cdot \Delta t$ ;

- baterijas stundas izlādes enerģijai jābūt vienāgai vai mazākai par attiecīgā galalietotāja enerģijas patēriņu tajā pašā stundā;
- kopējais enerģijas patēriņš stundā nedrīkst pārsniegt maksimālo atļauto slodzi.

Ievērojot iepriekšminētos 2 gadījumus (bez baterijas un ar bateriju), lietotāja gada elektroenerģijas patēriņš tiek aprēķināts attiecīgi:

$$P_{pat}^g = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{24} (P_{liet}^{t,d} \cdot \tau) \quad (4.5)$$

$$P_{pat}^g = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{24} (P_{liet}^{t,d} \cdot \tau + W_{uzl}^{t,d} - W_{izl}^{t,d}) \quad (4.6)$$

kur  $D$  – kopējais dienu skaits gadā;

$g$  – gada indekss;

$W_{uzl}^{t,d}$  – uzlādes enerģijas daudzums  $d$ -tajā dienā,  $t$ -tajā stundā, kWh;

$W_{izl}^{t,d}$  – izlādes enerģijas daudzums  $d$ -tajā dienā,  $t$ -tajā stundā, kWh;

- $\tau$  – stundas solis ( $\tau = 1$  h).

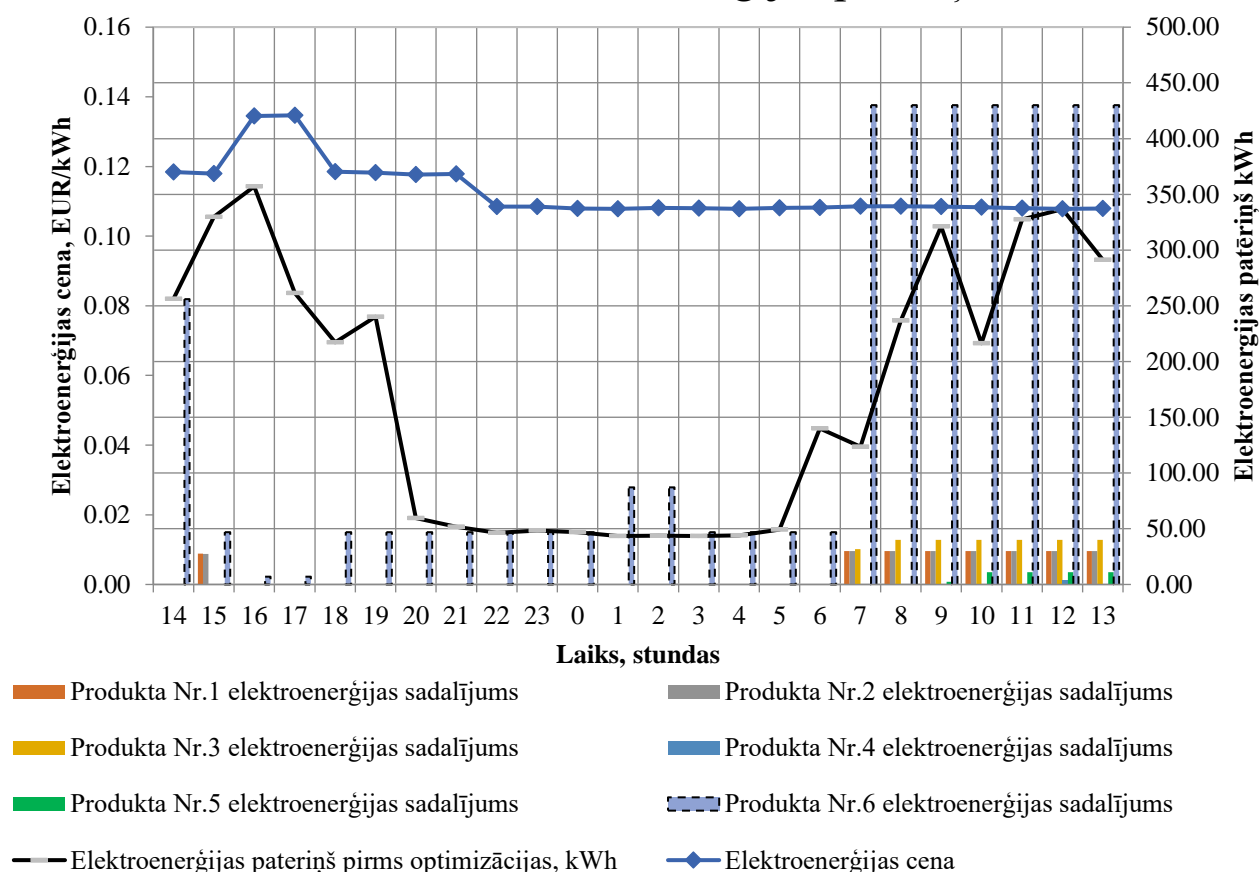
### Nepieciešamā ieejas informācija:

- ✓ SoC un DoD parametri. Tie būs jau integrēti modelī;
- ✓ Visi palīgkoeficienti: novecošanas, temperatūras, kapacitātes utt. Tie būs jau integrēti modelī;
- ✓ Lietderības koeficienti. Tie būs jau integrēti modelī;
- ✓ Ciklu skaits. Lietotājam ir iespēja manuāli ievadīt šo vērtību;
- ✓ Sākuma rezerve;
- ✓ Lietotāja gada ikstundas slodzes patēriņš. 4.3. tabulā doti baterijas nominālie parametri.

4.2. tabula. Baterijas ieejas dati

Parametra nosaukums un mērvienība	Vērtība
Maksimālais/minimālais SoC, %	85/20
Maksimālais/minimālais DoD, %	90/10
$\eta_{inv}$ , %	97
$\eta_{bat,rt}$ , %	98
$k_{temp}$	1
$k_{novec}$	1,25
$k_{kap}$	1,2
$\eta_{bat,ch}$ , %	94,4
$\eta_{bat,disch}$ , %	93,9
DoD <sub>vid</sub> , %	50

### Diennakts elektroenerģijas patēriņš



4.1. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš, izmantojot akumulatoru baterijas

Ņemot vērā pētāmās rūpnīcas finanšu stāvokli, apskatīsim scenāriju ar 100 kWh Li-ion akumulatora bateriju. 4.2. attēlā sniegts optimizācijas piemērs, izvēloties baterijas DoD 80 % apmērā. Ekonomisko efektivitāti, izmantojot NPV kritēriju, izskatīsim turpmāk.

#### 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:

$$C_{ietaup}^g = C_{izm,nav\_bat}^g - C_{izm,bat}^g \quad (4.7)$$

Izdevumi bez baterijas un ar to tiek aprēķināti šādi:

$$C_{izm,nav\_bat}^g = (C_{ST,const}^g + C_{OIK,const}^g) + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{24} (P_{liet}^{t,d} \cdot \tau) \cdot (C_{biržas}^{t,d} + C_{ST,var}^{t,d} + C_{OIK,var}^{t,d} + C_{pakalp}) \quad (4.8)$$

$$C_{izm,bat}^g = (C_{ST,const}^g + C_{OIK,const}^g) + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{24} (P_{liet}^{t,d} \cdot \tau + W_{uzl}^{t,d} - W_{izl}^{t,d}) \cdot (C_{biržas}^{t,d} + C_{ST,var}^{t,d} + C_{OIK,var}^{t,d} + C_{pakalp}) \quad (4.9)$$

kur

$$C_{ST,const}^g = \sum_{m=1}^M k_{sods} \cdot C_{ST,const}^m \quad (4.10)$$

kur  $k_{sods}$  – soda koeficients, ja lietotāja patēriņš mēneša laikā par 10 % pārsniedz atļauto maksimālo slodzi. Ja pārsniegšanas nav, tad  $k_{sods}=0$ , ja ir, tad  $k_{sods}=3$ .

Kopējās izvēlētās baterijas izmaksas ir vienādas ar:

$$C_{bat\_izmaksas} = W_{apl.bat} \cdot (C_{bat} + C_{tansp} + C_{inst}) + C_{uztur} + C_{bat\_plaukts} + C_{ekspl} \quad (4.11)$$

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

$C_{transp}$  – akumulatoru baterijas transporta izmaksas, €/kW;

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

$C_{uztur}$  – akumulatoru baterijas uzturēšanas izmaksas, €;

$C_{bat\_plaukts}$  – akumulatoru baterijas plaukta izmaksas, €;

$C_{ekspl}$  – akumulatoru baterijas ekspluatācijas izmaksas, €.

Invertora izmaksas ir šādas:

$$C_{inver\_izmaksas} = P_{inv} \cdot C_{inver} \quad (4.12)$$

kur  $C_{inver}$  – invertora izmaksas par 1 kW, €/kW.

Kopējās investīcijas:

$$C_{inv\_kop} = C_{inver\_izmaksas} + C_{bat\_izmaksas} - C_{rekonst\_izmaksas} \quad (4.13)$$

kur  $C_{rekonst\_izmaksas}$  – rekonstrukcijas izmaksas, €. Dažreiz notiek tā, ka lietotājam trūkst atļautās maksimālās slodzes, un tad ir nepieciešams šo vērtību palielināt, kas noved pie papildu investīcijām. Baterijas uzstādīšanas process novērš papildu izmaksas, jo, uzstādot bateriju ir iespēja izlīdzināt pīkus.

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

- neņemot kredītu

$$NPV = -(C_{inv\_kop}) + \sum_{g=1}^G \frac{C_{ietaup}^g}{(1 + i_{disk})^g} \quad (4.14)$$

kur  $i_{disk}$  – diskonta likme, %;

- ņemot kredītu



$$NPV = -(C_{inv\_kop}) + \sum_{g=1}^G \frac{C_{ietaup}^g - (\frac{C_{inv\_kop}}{G} + C_{atlik,g} \cdot i_{kred})}{(1 + i_d)^g} \quad (4.15)$$

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

$i_{kred}$  – kredīta likme, %;

$i_d$  – diskonta likme, %.

**Nepieciešamā ieejas informācija:**

- ✓ Akumulatoru baterijas izmaksas par 1 kWh, €/kWh. Lietotājam ir iespēja manuāli ievadīt šo vērtību;
- ✓ Invertora izmaksas par 1 kW, €/kW; lietotājam ir iespēja manuāli ievadīt šo vērtību;
- ✓ Akumulatoru baterijas uzstādīšanas izmaksas, €/kWh; integrēts modelī;
- ✓ Akumulatoru baterijas uzturēšanas izmaksas, €/kWh; integrēts modelī;
- ✓ Akumulatoru baterijas plaukta izmaksas, €/kWh; integrēts modelī;
- ✓ Kredīta likme; lietotājam ir iespēja manuāli ievadīt šo vērtību;
- ✓ Diskonta likme; lietotājam ir iespēja manuāli ievadīt šo vērtību.

4.4. tabulā dotas ievaddatu vērtības NPV aprēķinam.

4.3. tabula. Ievaddati NPV aprēķinam

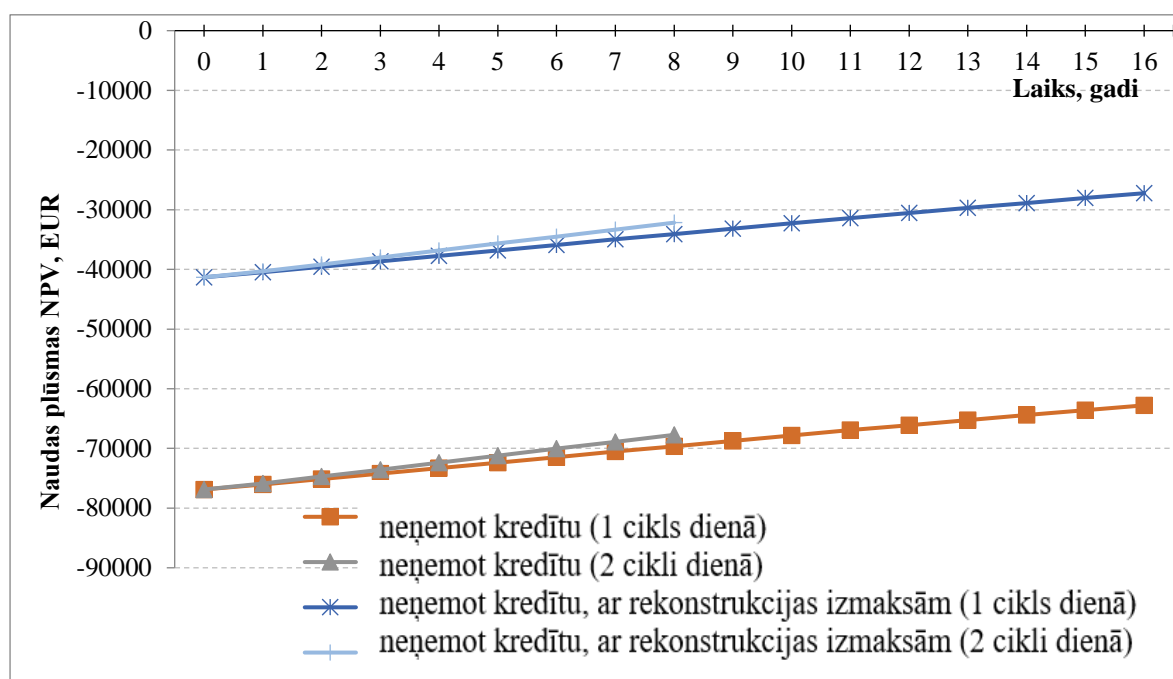
Parametra nosaukums un mērvienība	Vērtība
$i_{kred}$ – kredīta likme, %	2,2
$i_d$ – diskonta likme, %	2,7
$C_{bat}$ – akumulatoru baterijas izmaksas par 1 kWh, €/kWh	498
$C_{transp}$ – akumulatoru baterijas transporta izmaksas, €/kWh	3,98
$C_{inst}$ – akumulatoru baterijas uzstādīšanas izmaksas, €/kWh	9,13
$C_{uztur}$ – akumulatoru baterijas uzturēšanas izmaksas, €	788
$C_{bat\_plaukts}$ – akumulatoru baterijas plaukta izmaksas, €	898
$C_{ekspl}$ – akumulatoru baterijas ekspluatācijas izmaksas, €	137
$C_{rekonst\_izmaksas}$ – rekonstrukcijas izmaksas, €	38400
$C_{inv}$ – invertora izmaksas par 1 kW, €/kW;	347

4.3. att. parādīts NPV atspoguļošanas piemērs dažādiem gadījumiem:

1. NPV aprēķins, kad tiek pieņemts, ka dienas laikā notiek viena uzlāde un viena izlāde (1 cikls).

2. NPV aprēķins, kad tiek pieņemts, ka dienas laikā notiek divas uzlādes un divas izlādes (2 cikli).
3. NPV aprēķins, kad ir 1 cikls dienā un tiek ievērotas rekonstrukcijas izmaksas.
4. NPV aprēķins, kad ir 2 cikli dienā un tiek ievērotas rekonstrukcijas izmaksas.

Jāņem vērā, ka litija baterijas kopējais ciklu skaits ir apmēram 6000. Tas nozīmē, ka, uzstādot 1 ciklu dienā, baterijas darbmužs būs apmēram 16 gadi; ja dienā ir 2 cikli, tad 8 gadi.



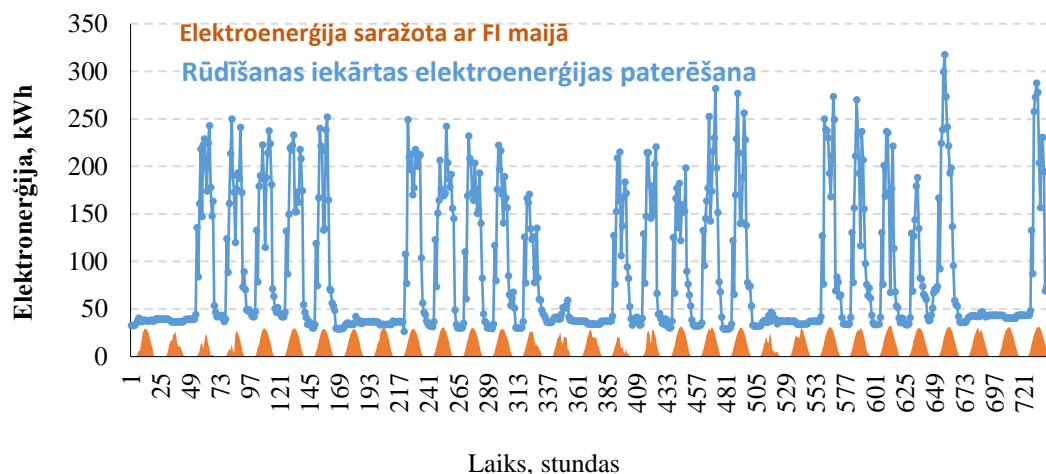
4.2. att. NPV aprēķins 4 gadījumiem

#### 4.2. Pašu atjaunīgās ģenerācijas uzstādīšana

Nākamais solis ir uzstādīt savu pašu ģenerāciju no atjaunīgās enerģijas avotiem. Šajā darbā pieņemam, ka fotoelektriskajai tehnoloģijai ar 33 kW jaudu iegādes un uzstādīšanas izmaksas ir aptuveni 41 000 € [60]. Taču ir sagaidāms, ka tuvā nākotnē fotoelektrisko iekārtu cenas samazināsies, par ko liecina jaudīgu saules elektrostaciju reālās cenas. Piemēram, Pērnāvā, Igaunijā, 1 kW uzstādīšanas maksa jaunā 3,96 MW saules elektrostacijā ir 883,83 € [61]. Šādas jaudas izvēli nosaka iespēja izskatīt fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanu bez akumulatoriem un ar noteikumu, ka notiek 100% patēriņš, jo izdot 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. Tā

kā saules paneļu jauda ir mazāka par minimālo patēriņu – rūdišanas krāsns darbojas 24 stundas diennaktī –, tie neietekmēja slodzes sadalījumu. Toties saules paneļi ļāva ietaupīt uz elektroenerģijas patēriņa rēķina. Aplūkosim saules paneļu uzstādīšanā veikto ieguldījumu atmaksāšanos – NPV.



4.3. att. Elektroenerģijas ražošana ar fotoelektrisko iekārtu

- NPV tiek aprēķināta 4 variantiem:

1. 1. variants – tiek ņemts kredīts, un tiek ņemtas 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  $y$ , €;  $p_{loan,y}$  – atlikušais kredīta apjoms gadam  $y$ , €;  $i$  – kredīta likme, %.

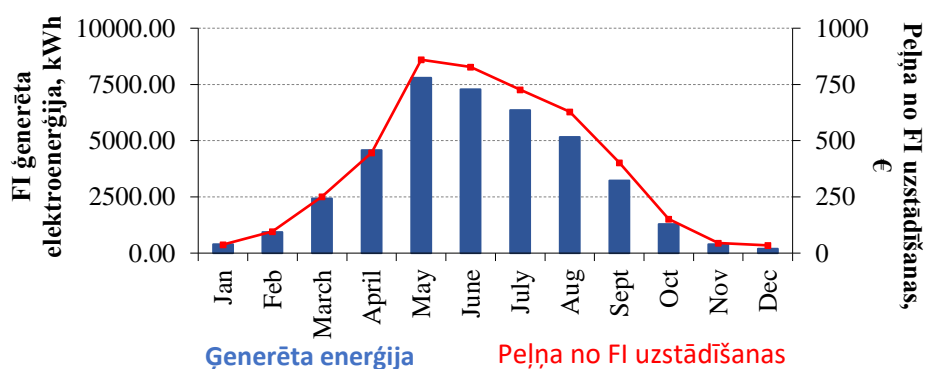
2. 2. variants – tiek ņemts kredīts, un tiek ņemtas vērā fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanas novērstās izmaksas ( $C_{AC_{PV}}$ ):

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

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

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

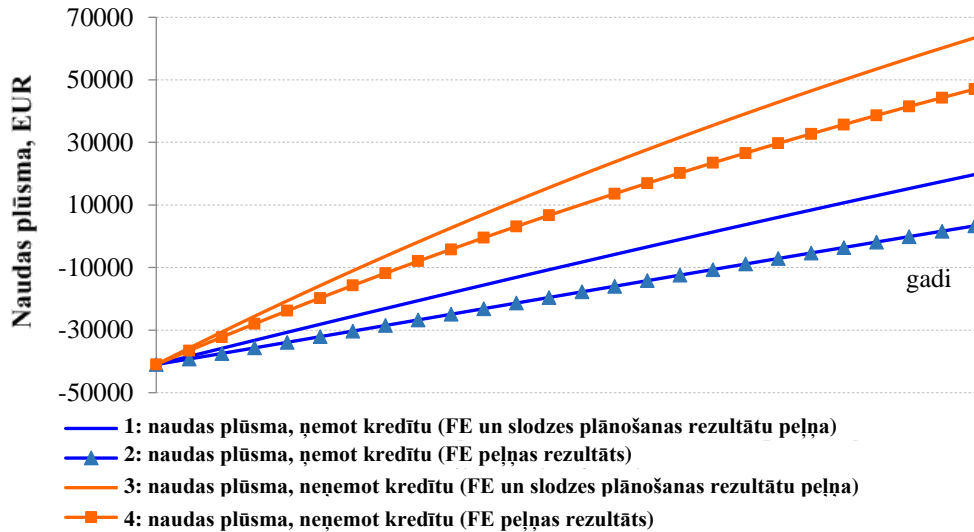
Vispirms attēlosim modelēšanas rezultātus par saražoto enerģiju un gūto peļņu no fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanas Latvijā pa mēnešiem (4.5. att.).



4.4. att. Saražotā enerģija un gūtā peļņa no fotoelektriskajām iekārtām pa mēnešiem

4.5. attēlā ir skaidri redzams, ka pavasara – vasaras periodā saražotās enerģijas daudzums ir lielāks, attiecīgi pieaug arī peļņa (vai mūsu gadījumā – novērstās izmaksas) no fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanas. 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 augstāk sniegtos NPV aprēķinus, var secināt, ka akumulatoru ieviešanas projekta atmaksāšanās pašreiz šajā ražotnē nav investīciju ziņā pievilcīgs risinājums un prasa subsīdijas no malas. Taču šādu variantu izskatīt var, jo, ievērojami samazinoties akumulatoru bateriju sākumcenai un paaugstinoties elektroenerģijas cenai, perspektīvā šis risinājums var kļūt ekonomiski pamatotāks.



4.5. att. NPV aprēķins

Ražotnes ikgadējie ienākumi no fotoelektrisko iekārtu izmantošanas ir 4509,52 €. Šī ir maksimālā summa, kādu lietotājs var iegūt, pielāgojot enerģijas patēriņu tās ģenerācijai. Turklāt fotoelektrisko iekārtu izmantojuma orientējošā NPV uzrāda pozitīvu tendenci (4.5. att). Kā redzams, 3. variants atbilst visienesīgākajam gadījumam, kad kredīts netiek ņemts un NPV aprēķinam tiek izmantotas kopējās novērstās izmaksas. Šeit atmaksāšanās periods ir 8 gadi, un kopējā NPV ir 63 430,97 €. Visvājākie rezultāti ir 2. variantam: atmaksāšanās periods ir 23 gadi, bet NPV ir tikai 3346,96 €. Kas attiecas uz 1. un 4. variantu, atmaksāšanās periods ir attiecīgi 16 un 10 gadi.

# SECINĀJUMI

Pētījumu apjoms par energoefektīvu ražošanas plānošanu pēdējos gados ir ievērojami pieaudzis, kā rezultātā izdotas daudzas publikācijas, kur energoefektivitātes apsvērumi integrēti pašreizējos ražošanas plānošanas modeļos. Tomēr esošās modelēšanas pieejas pašlaik vēl nevar atzīt par atbilstošām.

Industriālā uzņēmuma energoefektīvai ražošanas plānošanai ir jāveic programmatūras sintēze, kuras mērķis ir optimizēt elektroenerģijas patēriņa izmaksas, balstoties uz tirgus cenām. 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 datu bāzes. Elektroenerģijas izmantošana lētākās stundas laikā ļauj arī samazināt CO<sub>2</sub> izmešu daudzumu atmosfērā, jo dārgākā elektroenerģija ir no elektrostacijām kas izmanto fosilo kurināmo.

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

- paralēli. Produkti tiek ražoti vienlaicīgi;
- pēc kārtas. Produkti tiek ražoti secīgi. Var izdalīt divus apakšgadījumus:
  - Produktu ražošanas secība ir brīvi izvēlama;
  - produktu ražošanas secība ir uzdots. Šāda veida ierobežojumi var rasties, piemēram, no produktu piegādes nosacījumiem vai saskaņojot ar izejvielu piegādes grafikiem;
- jaukti. Šajā gadījumā viena daļa produktu var tikt ražota vienlaicīgi, bet cita – secīgi.

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

Tika izvēlētas divas pamatmetodes:

- gadījuma pārlases (angļu val. – *random enumeration*) metode;

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

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

Gadījumam, 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 jāsaturs 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.

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

Akumulatoru ieviešanas projekta atmaksāšanās pašreiz izvēlētajā ražotnē nav investīciju ziņā pievilcīgs risinājums un prasa subsīdijas no malas. 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 novērstās izmaksas. Šeit atmaksāšanās periods ir 8 gadi.

# IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Oficiāla 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](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. Duflou, 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](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](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.