

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Oļegs LINKEVIČS**

**KOGENERĀCIJAS ELEKTROSTACIJU DARBĪBAS REŽĪMU  
OPTIMIZĀCIJA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2008**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Enerģētikas institūts

**Oļegs LINKEVIČS**  
Enerģētikas programmas doktorants

**KOGENERĀCIJAS ELEKTROSTACIJU DARBĪBAS REŽĪMU  
OPTIMIZĀCIJA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**A.SAUHATS**

**Rīga 2008**

UDK 621.311.22(043.2)  
Li 584 k

Linkevičs O. Koģenerācijas elektrostaciju  
darbības režīmu optimizācija. Promocijas darba  
kopsavilkums.-R.: RTU, 2008.-25 lpp.

Iespiests saskaņā ar Enerģētikas institūta  
2008.gada 17. jūnija lēmumu, protokols Nr.1

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTĒ  
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2008.g. 29. augustā 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Inženierzinātņu doktors Vilnis Krēsliņš  
Latvijas elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācija

Inženierzinātņu doktors Jānis Priedīte  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Mati Valdma  
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

**APSTIPRINĀJUMS**

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Oļegs Linkevičs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu, 36 tabulas, 76 zīmējumus un ilustrācijas, 212 formulas, kopā 190 lappuses. Literatūras sarakstā ir 144 nosaukumi.

## Saturs

1.	IEVADS .....	1
1.1.	Tēmas aktualitāte.....	1
1.2.	Darba mērķis .....	2
1.3.	Pētījumu metodika.....	2
1.4.	Galvenie rezultāti .....	3
1.5.	Zinātniskā novitāte .....	3
1.6.	Praktiskā vērtība.....	3
1.7.	Autora svarīgākās publikācijas .....	4
2.	DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS .....	5
2.1.	Koģenerācijas attīstības nozīme un perspektīvas .....	6
2.2.	Koģenerācijas modeļi un prognozēšanas bloki.....	8
2.3.	Darbības režīmu optimizācija .....	10
2.4.	Rīgas TEC-1 darbības režīmu modelēšana.....	17
2.5.	Jaudas palielināšanas optimizācija .....	21
3.	SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS .....	22
3.1.	Secinājumi.....	22
3.2.	Rekomendācijas .....	23

# 1. IEVADS

## 1.1. Tēmas aktualitāte

Eiropas Savienībā koģenerācijas elektrostaciju attīstība tiek īpaši veicināta, jo tā ļauj ietaupīt ievērojamus kurināmā daudzumus, uzlabot elektroapgādes drošumu, kā arī būtiski samazināt izmešus atmosfērā, īpaši siltumnīcas efekta gāzes. Eiropas Savienības Parlaments ir izvirzījis mērķi līdz 2010.gadam panākt TEC īpatsvara palielināšanos siltumelektrostaciju vidū no 11% (1998.g.) līdz 18%. Ir pieņemta jauna direktīva 2004/8/EC par augsti efektīvas koģenerācijas veicināšanu.

Vienlaicīgi tiek meklētas jaunas tirgus metodes koģenerācijas elektrostaciju atbalstīšanai. Dažas valstis, piemēram, Dānija un Somija ir atteikušās no obligātā elektroenerģijas iepirkuma un regulētiem tarifiem, kas ļāva koģenerācijas elektrostacijām strādāt ar garantēto peļņu, bet faktiski kropļoja elektroenerģijas tirgu. Veco atbalsta mehānismu vietā tiek piedāvātas jaunas shēmas, piemēram, subsīdijas investīcijām, piemaksas, jaudas iepirkumi, konkursi, sertifikāti, nodokļu atvieglojumi.

Lielākā atšķirība ir tāda, ka augstāk minētās shēmas sedz tikai daļu no izmaksām, bet pārējo daļu koģenerācijas elektrostacijas īpašniekam ir nepieciešams nopelnīt pašam, elektroenerģiju piedāvājot brīvajā elektroenerģijas tirgū. Tas nozīmē, ka apriori nav zināmi ne pārdošanās elektroenerģijas apjomi, ne elektroenerģijas cenas.

Tas padara koģenerācijas elektrostaciju darba režīmu optimizāciju par daudz komplicētāku stohastisko uzdevumu. Lai risinātu šo uzdevumu, jāizstrādā jaunas metodes, kas ļautu modelēt koģenerācijas elektrostacijās ražotas elektroenerģijas tirdzniecību SPOT tirgū.

Vēl viens faktors, kas sarežģī koģenerācijas elektrostaciju darba režīmu modelēšanu, ir CO<sub>2</sub> emisijas tirdzniecība, kad fosila kurināmā elektrostacijām jāpērk trūkstošās CO<sub>2</sub> emisijas atļaujas tirgū. CO<sub>2</sub> emisijas atļauju cena ir mainīga vērtība, bet nepieciešamais daudzums ir atkarīgs no tirgū realizētas enerģijas apjoma un, respektīvi, no patērēta kurināmā daudzuma.

Lai pieņemtu pareizo lēmumu, izvēloties visizdevīgāko tirdzniecības stratēģiju, optimālāko iekārtu sastāvu un tās noslogojumu, ir nepieciešams attiecīgais optimizācijas modelis.

## 1.2. Darba mērķis

Šī promocijas darba mērķis ir izstrādāt jaunas metodes, algoritmus un matemātisko modeli koģenerācijas elektrostaciju darbības režīmu optimizācijai elektroenerģijas tirgus apstākļos, ņemot vērā CO<sub>2</sub> emisijas tirdzniecības sistēmu.

Koģenerācijas elektrostacijas īstermiņa optimizācijas galvenie uzdevumi ir optimāla iekārtu sastāva izvēle (*unit commitment*) un slodzes optimālais sadalījums starp izvēlētajām iekārtām (*unit dispatch*). Elektrostacijas ekonomiskās dispečerizācijas mērķis ir nodrošināt pieprasījumu ar minimālām izmaksām vai ar maksimālo peļņu.

Lai sasniegtu augstāk minēto mērķi, ir nepieciešams rast risinājumus sekojošiem uzdevumiem, kas ir izskatīti šajā promocijas darbā:

- Elektriskās un siltuma slodžu modelēšana;
- Enerģijas un energoresursu cenu modelēšana;
- Koģenerācijas elektrostaciju iekārtu raksturlikņu aproksimācija;
- Koģenerācijas elektrostacijas darbības režīmu optimizācija: optimālo iekārtu sastāva izvēle un optimālais slodzes sadalījums;
- Koģenerācijas elektrostacijās ražotās elektroenerģijas SPOT tirdzniecības modelēšana;
- Stohastisko parametru modelēšana;
- Jaudas paplašināšanas optimizācija.

## 1.3. Pētījumu metodika

Koģenerācijas elektrostacijas elementu (katli, dzinēji, turbīnas) modelēšanai ir izmantoti otras pakāpes polinoma vienādojumi. Vienādojumu koeficientu noteikšanai ir izmantotas matricas, kuras ir aprēķinātas ar Kramera formulām.

Elektrisko un siltuma slodžu modelēšanai ir izmantoti autokorelācijas funkcija un Furjē diskrēta pārveidošana, kā arī matemātiskās statistikas metodes. Ilgtermiņa elektroenerģijas pieprasījuma prognozēšanai ir izmantota ekonometriskā metode.

Energoresursu cenu modelēšanai ir izmantoti matemātiskas statistikas metodes, ņemot vērā Hubberta teoriju par naftas resursu krājumu izsīkšanu. Koģenerācijas tarifu modelēšanai ir izmantoti regulatora apstiprinātas koģenerācijas tarifu aprēķināšanas metodikas.

Šajā promocijas darbā ir piedāvāta oriģināla metodika ienākumu sadalīšanai starp elektroenerģiju un siltumenerģiju, tā, lai abi enerģijas veidi būtu konkurētspējīgi.

Koģenerācijas elektrostaciju darbības režīmu optimizācijai statiskā formā ir piedāvāts izmantot optimizācijas problēmas Lagranža funkciju un pirmās pakāpes Kuna-Takera nosacījumus (optimalitātes nosacījumus). Tomēr izstrādāta algoritmā tiek pielietota Monte-

Karlo metode, lai meklētu koģenerācijas elektrostacijas iekārtu optimālo sastāvu un tās noslodzi. Uzdevuma dinamiskam formulējumam ir jāizmanto dinamiskā programmēšana.

Piespiedu dīkstāves modelēšanai ir piedāvāts izmantot varbūtības simulēšanas metode ar konvolūcijas algoritmu.

Jaudas paplašināšanas optimizācijai tiek izskatītas dažādas metodes, tajā skaitā: investīciju atmaksāšanas metodes (NPV, IRR), anuitātes metode, izlīdzināto izmaksu metode, atmaksāšanās lūzuma punkta metode, dinamiskā programmēšana.

#### **1.4. Galvenie rezultāti**

Promocijas darbā ir izstrādāta koģenerācijas elektrostaciju darbības režīmu optimizācijas programma „Elektrostacijas režīmu optimizācijas modelis (EROM). Programma EROM ir realizēta matemātiskās programmatūras MATLAB v.6.5. vidē.

Matemātiskais modelis ir aprobēts un verificēts, modelējot AS Latvenergo ražotnes Rīgas TEC-1 darbības režīmus.

#### **1.5. Zinātniskā novitāte**

Atšķirībā no daudziem iepriekšējiem darbiem, promocijas darbā tika izstrādāts algoritms, kas ļauj optimizēt koģenerācijas elektrostacijas darba režīmus, ņemot vērā elektroenerģijas tirgus un CO<sub>2</sub> emisiju atļauju cenas. Modelis diezgan precīzi apraksta dažādu koģenerācijas tehnoloģiju raksturlīknes. Tika analizētas siltuma akumulācijas iespējas un tās ietekme uz darbības režīmiem.

#### **1.6. Praktiskā vērtība**

Izstrādātās metodes un matemātisko modeli var izmantot: elektroenerģijas ražotāji – koģenerācijas elektrostaciju ikdienas darbības režīmu plānošanai, tirgotāji – optimālas tirdzniecības stratēģijas izstrādāšanai, sabiedrisko pakalpojumu regulatori – subsīdijas vai atbalsta apjoma noteikšanai, plānotāji un attīstītāji – jaudas paplašināšanas vai jaunas koģenerācijas elektrostacijas celtniecības variantu izvērtēšanai.

AS Latvenergo speciālisti izradīja interesi par modeļa EROM pilnveidošanu Rīgas termoelektrostaciju darbības režīmu modelēšanai.



## 1.7. Autora svarīgākās publikācijas

- 1) Я.Х. Герхард, С.А Гусева, А.Б. Долгицер, О.А. Линкевич, А.Е. Махнитко, И.А.Зицмане, Оптимизация загрузки оборудования когенерационных электростанций// Problems of present-day electrotechnics, Kyiv, Ukraine, 2008.
- 2) A. Dolgicers, S. Guseva, O. Linkevics, A. Mahnitko, I. Zicmane, Operative optimisation of equipment load for co-generation stations with non-uniform structure// APE'07, Jurata, Poland, 2007.
- 3) O. Linkevičs, G. Klāvs, E. Vesperis, A. Babikovs, S. Ķiene, Vēja elektrostaciju celtniecība un to izvietojums Latvijā// "Latvijas Fizikas un tehnisko zinātņu žurnāls", Nr. 5, 2007.
- 4) O. Linkevics, A. Sauhats, A. Dolgicers, Capacity expansion algorithm for CHP Systems// Electrical and Control Technologies, ECT-2006, Kaunas, Lithuania, 2006.
- 5) O. Linkevics, A. Sauhats, Probabilistic production simulation of CHP plants// Power and Electrical Engineering, vol 4, pub.17, pp. 44 – 51. – RTU, Riga, Latvia, 2006.
- 6) O. Linkevics, A. Sauhats, Formulation of the objective function for economic dispatch optimisation of steam cycle CHP plants// IEEE St.Petersburg Power Tech conference, Russia, 2005.
- 7) A. Sauhats, V. Chuvychin, N.Gurov, V. Strelkovs, I.Svalova, O. Linkevics, J. Rivkins, The Latvian experience and problems of the grid integration of renewable energy sources in the power system// IEEE St.Petersburg Power Tech conference, Russia, 2005.
- 8) O. Linkevičs, M. Balodis, M. Bočkarjova, A. Sauhats, V. Čuvičins, I. Svalova, Will distributed energy resources make a revolution in the power sector of Baltic States?// conference EPE PEMC, Rīga, 2004.
- 9) O. Linkevičs The program of rehabilitation of Riga CHP plants and their integration into the interconnected district heating system of Riga// The 7<sup>th</sup> Central and Eastern European power industry forum, Prāgā, 2000.
- 10) O. Linkevičs, N. Petrova, Modelling of combined heat and power supply plants in Upland model// Rīga, 1998.

## 2. DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu, 36 tabulas, 76 zīmējumus un ilustrācijas, 212 formulas, kopā 190 lappuses. Literatūras sarakstā ir 144 nosaukumi.

**1. daļa** ir ievads. **2. daļā** ir aprakstītas Baltijas elektroenerģijas tirgus attīstības tendences. Ir analizētas koģenerācijas elektrostaciju attīstības perspektīvas Eiropas Savienībā un Latvijā. Latvijai ir noteikts koģenerācijas potenciāls (MW) līdz 2025. gadam. Tika izvērtēta Rīgas termoelektrocentrāļu atbilstība ES Direktīvas 2004/8/EC prasībām. Tika izskatītas koģenerācijas elektrostaciju iespējamie elementi un struktūra, tajā skaitā koģenerācijas tehnoloģiju dažādība un triģenerācija.

**3. daļā** ir formulēts darbības režīmu optimizācijas uzdevums vispārīgā formā. Ir aprakstīti koģenerācijas elektrostaciju elementu (katli, dzinēji, turbīnas) modeļi. Ieejas-izejas raksturlīknes ir uzdotas ar pirmās vai otras pakāpes polinomiem. Ir noteikti elektrisko un siltuma slodžu ietekmējošie faktori un piedāvātas metodes slodžu prognozēšanai, atsevišķi īstermiņa un ilgtermiņa prognozēm. Ir izskatīti naftas cenu attīstības scenāriji un likumsakarības starp naftas cenām un citu kurināmo veidu cenām. Ir analizētas koģenerācijas atbalsta shēmas un koģenerācijas tarifu aprēķināšanas metodikas.

**4. daļā** ir detalizēti izskatīts koģenerācijas elektrostaciju darbības režīmu optimizācijas uzdevums gan statiskā, gan dinamiskā formulējumā. Ir formulētas mērķfunkcijas un uzdoti optimizācijas uzdevuma ierobežojumi. Tika piedāvāti algoritmi optimizācijas uzdevuma risināšanai. Ir analizēta nenoteiktību un stohastiska riska faktoru ietekme uz ražošanas simulācijas procesiem, īpaši piespiedu dīkstāves stohastiskums.

**5. daļā** ir izskatītas koģenerācijas elektrostaciju jaudas paplašināšanas optimizācijas kritēriji, metodes un algoritmi. Ar anuitātes metodi tika izanalizētas dažādas koģenerācijas tehnoloģijas.

**6. daļā** darbības režīmu optimizācijas algoritms un programma EROM ir aprobētas un verificētas uz AS Latvenego ražotnes Rīgas TEC-1 piemērā.

**7. daļa** ir secinājumi un rekomendācijas turpmākai modeļa pilnveidošanai.

## 2.1. Koģenerācijas attīstības nozīme un perspektīvas

Koģenerācija ir siltumenerģijas un elektroenerģijas un/vai mehāniskās enerģijas vienlaicīga ražošana vienā procesā. To veiksmīgi organizējot, iespējams ietaupīt ievērojamus kurināmā daudzumus, kā arī būtiski samazināt izmešus atmosfērā, tajā skaitā arī siltumnīcefekta gāzes (SEG) emisijas.

Eiropas Savienības dalībvalstīs koģenerācijas elektrostaciju, jeb termoelektrocentrāļu (TEC) attīstība tiek īpaši veicināta. Tā ES Parlaments ir izvirzījis mērķi līdz 2010.gadam panākt TEC īpatsvara palielināšanos siltumelektrostaciju vidū no 11% (1998.g.) līdz 18%.

Ņemot vērā jauno Eiropas Komisijas politiku enerģētikas jomā, visstraujāko attīstību var prognozēt atjaunojamo energoresursu izmantojošām koģenerācijas elektrostacijām, īpaši biomasas un biogāzes TEC.

Liela cerība saista ar tā saucamo “izkliedēto” enerģijas ražošanu (distributed generation), kas ir pieslēgta sadales elektrotīklu līmenī, vai darbojas izolētās elektriskās sistēmās ( $\mu$ -grid). Perspektīvā pat nelielās dzīvojamās mājās, var uzstādīt koģenerācijas iekārtas, kurās bez siltuma tiktu ražota arī elektrība.

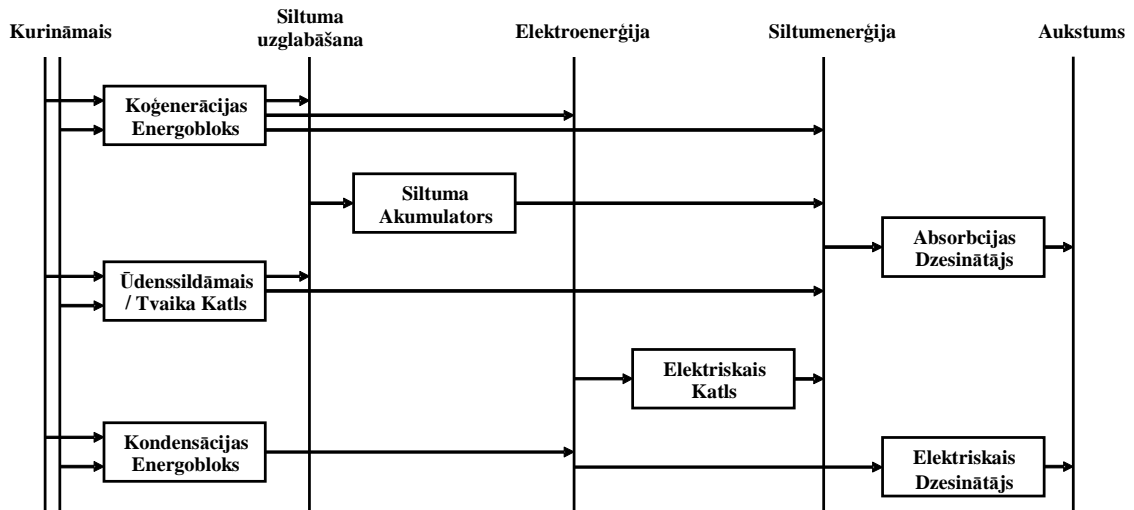
Līdz 2025. gadam koģenerācijas attīstības potenciāls Latvijā ir vērtējams līdz 1100...1300 MW siltuma jaudas, tajā skaitā 600...800 MW – termofikācijas koģenerācija un 500 MW – rūpniecības koģenerācija.

Mūsdienās koģenerācijas sistēmas var būt pietiekoši sarežģītas (1. att.) un sastāvēt no vairākiem elementiem, piemēram, koģenerācijas energobloks, ūdenssildāmais vai tvaika katls, kondensācijas energobloks, siltuma akumulators, elektriskais katls, dzesinātājs (centralizētai dzesēšanas sistēmai). Katra elementa efektivitātes raksturlīknes var uzdot ar lineāriem vai kvadrātiskiem vienādojumiem.

1. tabula

Izplatītāko koģenerācijas tehnoloģiju pamatrādītāji

Tehnoloģijas	Attiecība starp elektrisko un siltuma jaudu, $MW_{el}/MW_{th}$	Kurināmā izmantošanas koeficients, %
Iekšdedzes dzinējs	0,75 – 0,89	84% - 91%
Gāzes turbīna ar utilizācijas katlu	0,55 – 0,58	83% - 91%
Pretspiediena turbīna (rūpniecība)	0,28	81% - 87%
Pretspiediena turbīna (apkure)	0,52	83% - 90%
Kondensācijas turbīna ar tvaika nozarojumu (uz termofikāciju)	0,3 – 0,45	41% - 75%
Kombinētais cikls	0,95 – 1,15	84% - 91%



1. att. Modelējamais objekts

Koģenerācijas energobloki var izmantot jebkuru no 1. tabulā minētajām tehnoloģijām. To cenšas pēc iespējas maksimāli slogot bāzes režīmā visa gada griezumā, lai pilnībā izmantotu koģenerācijas cikla priekšrocības.

Ūdenssildāmos un tvaika katlus pamatā izmanto pīķu slodžu segšanai visaukstākā gada laikā vai pārejas režīmos, piemēram, apkures perioda sākumā un beigās, kad siltuma slodze vēl nav pietiekoša koģenerācijas energobloka optimālai darbībai. Ļoti bieži katlus izmanto koģenerācijas energobloka rezervēšanai. Ūdenssildāmos katlus ir iespējams īsā laikā palaist un noslogot līdz nominālai slodzei.

Elektroenerģijas tirgus apstākļos, koģenerācijas energobloka darbības optimizēšanai ļoti bieži izmanto siltuma akumulatorus. Princips ir ļoti vienkāršs: stundās, kad elektroenerģijas cenas ir augstas, bet siltumenerģijas pieprasījums ir zems, koģenerācijas energobloku joprojām var darbināt ar pilno slodzi, bet pārpaliekošo siltumenerģiju var nodot uzglabāšanai siltuma akumulatorā.

Gadījumā, kad elektroenerģijas cenas ir zemas vai ir liels elektriskās jaudas pārpalikums, piemēram, atomelektrostacijās, varētu būt lietderīgi izmantot elektrisko katlu siltumenerģijas ražošanai.

Aukstuma ražošana ļauj būtiski uzlabot koģenerācijas energobloka noslodzi. Koģenerācijas procesā ražoto siltumu var izmantot absorbcijas dzesinātājā, lai ražotu aukstumu centralizētai dzesēšanas sistēmai. Dzesēšanas pīķu slodzes var segt lokāli ar elektriskiem dzesinātājiem.

## 2.2. Koģenerācijas modeļi un prognozēšanas bloki

Pieņemsim, ka tika nosprausts enerģijas ražošanas procesa optimālās vadības uzdevums koģenerācijas elektrostacijām ar zināmo iekārtu struktūru  $\Sigma_o$ , iespējamo vadības parametru  $\Pi_{vad}$  un struktūru  $\Pi_\Sigma$  sarakstu, kā arī ar tehniskiem ierobežojumiem  $O_T$  elektrostacijas parametriem un struktūrām.

Koģenerācijas elektrostacijas optimālās darbības nodrošināšanai ir nepieciešams:

- Izvēlēties iekārtu struktūras izmaiņas stratēģiju  $\Sigma_o(t)$  laika periodā  $t$ ;
- Katrai konkrētai struktūrai izvēlēties optimālus vadības parametrus  $\Pi_{vad}(t)$ ;

Nodrošināt tehnisko ierobežojumu ievērošanu:

$$\Sigma_o(t), \Pi_{vad}(t) \in O_{Tpiel} \quad (1)$$

kur  $O_{Tpiel}$  - pieļaujamo struktūru un parametru lauks;

- Nodrošināt katra enerģijas veida (karstais ūdens, tvaiks, elektroenerģija) ražošanu uzdotā daudzumā.

Optimālās vadības uzdevuma galvenais mērķis ir nodrošināt maksimāli iespējamās peļņas  $P$  gūšanu. Var apgalvot, ka peļņa ir atkarīga no izvēlētas struktūras un parametriem:

$$P = P[\Sigma_o(t), \Pi_{vad}(t)] \quad (2)$$

Optimizācijas uzdevumu var formulēt sekojoša veidā:

$$\Sigma_o^{opt}(t), \Pi_{vad}^{opt}(t) = \arg \left\{ \max_{t=t_0}^T \int P[\Sigma_o(t), \Pi_{vad}(t)] dt \right\} \quad (3)$$

Ar citiem vārdiem sakot, tika nosprausts optimālās struktūras  $\Sigma_o(t)$  un parametru  $\Pi_{vad}(t)$  izvēles uzdevums ar mērķi maksimizēt peļņu  $P$  laika periodā  $t$ .

Atzīmēsim, ka peļņu  $P$  nosaka ne tikai vadības struktūra un parametri, bet arī cenas  $C_Q$ ,  $C_N$  attiecīgi uz siltumenerģiju  $Q$ , un elektroenerģiju  $N_e$ , kā arī enerģijas pieprasījums  $W_Q(t)$  un  $W_N(t)$ .

Koģenerācijas elektrostacijas darbībā elektroenerģijas tirgus apstākļos, visi augstākminētie ietekmes faktori ir laika gadījumfunkcijas. Tas ienes optimizācijas uzdevuma (3) risināšanā praktiski nepārvaramas grūtības.

Lai, tomēr, pārvarētu minētas grūtības, pāriesim pie uzdevuma nostādījuma diskrētajā laikā. Pieņemsim, ka elektrostacijas struktūra un parametri var mainīties tikai laika momentos:  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ . Šajā gadījumā gadījumfunkcijas  $W(t)$  un  $C(t)$  varētu tikt nomainītas ar

attiecīgajām gadījumu lielumu sistēmām:  $W_1, W_2, \dots, W_n$  un  $C_1, C_2, \dots, C_n$ . Attiecīgi, optimizācijas uzdevums atbilstoši (3) transformējās sekojošā veidā:

$$\Sigma_o^{opt}(t_0), \Pi_{vad}^{opt}(t_0) = \arg \max E[P(\Sigma_{o1}, \dots, \Sigma_{on}, \Pi_{vad1}, \dots, \Pi_{vadn}, C_1, \dots, C_n, W_1, \dots, W_n)] \quad (4)$$

kur  $E[P]$  - peļņas matemātiskā varbūtība laika posmos  $T = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ .

Matemātisku varbūtību  $E[P]$  var definēt ar sekojošo izteiksmi:

$$E(P) = \sum_{i=1}^n \int \dots \int_{\Omega}^{k=6 \times n} P_i(\Sigma, \Pi, C, W) dF(C, W) \quad (5)$$

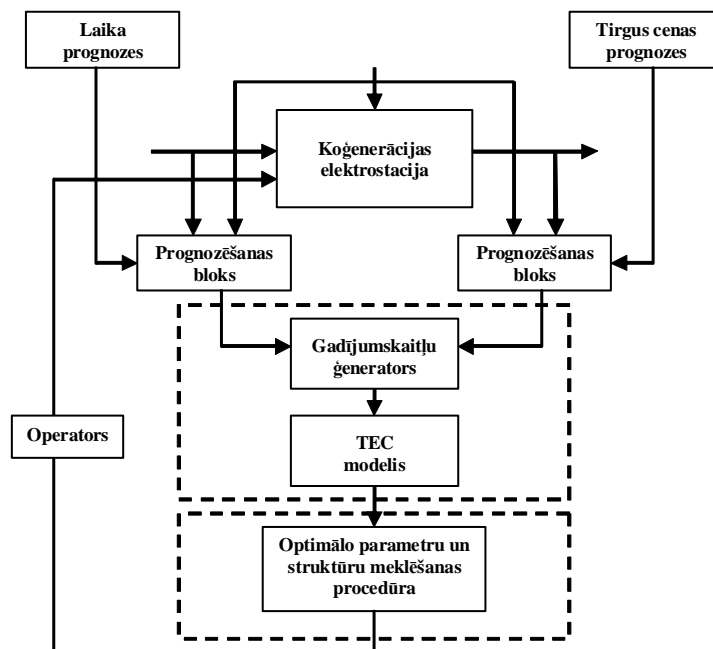
kur  $k$  - gadījumu lielumu ( $C$  un  $G$ ) sistēmas dimensija;

$F$  - sistēmas varbūtības sadalījuma funkcija;

Optimizācijas procedūras realizācijai (4) ir nepieciešams risināt sekojošus uzdevumus:

- 1) peļņas  $P$  noteikšana pie uzdotas struktūras, parametriem, enerģijas cenām un slodzēm, 2) enerģijas ražošanas procesa tehnisko un citu ierobežojumu izpildes pārbaude, 3) gadījumu lielumu, kas raksturo cenas un slodzes grafikus, sistēmas varbūtības sadalījuma funkcijas uzdošana, 4) daudzkārtēja integrāļa, kas tiek izmantots peļņas matemātiskās varbūtības noteikšanai, aprēķināšanas procedūras sintēze, 5) struktūras un parametru, kas maksimizē peļņu, meklēšanas procedūras sintēze. Daudzkārtējo integrāļu aprēķināšanai, saskaņā ar (5) formulu, vislabāk piemērota ir Monte-Karlo metode.

Optimālas uzdevuma risinājuma procedūras strukturāla shēma ir uzradīta 2. attēlā.



2. att. Kogenerācijas elektrostācijas vadības algoritma strukturāla shēma

### 2.3. Darbības režīmu optimizācija

Koģenerācijas elektrostacijas īstermiņa optimizācijas galvenie uzdevumi ir optimāla iekārtu sastāva izvēle un slodzes optimālais sadalījums starp izvēlētajām iekārtām. Elektrostacijas ekonomiskās dispečerizācijas mērķis ir nodrošināt pieprasījumu ar minimālām izmaksām vai ar maksimālo peļņu.

Koģenerācijas sistēmas mērķfunkciju var formulēt kā tās atsevišķo elementu, piemēram, koģenerācijas energobloka, ūdenssildāmā katla un kondensācijas energobloka izmaksu funkciju summu.

Koģenerācijas elektrostacijas mērķfunkcijas formulējums varētu būt šāds:

$$C_{TEC} = \min \sum_{t=1}^{n_t} \left[ \Pi_{PEt} N_{PEt} + \sum_{y=1}^{n_{KOG}} (C_y(N_t^y, Q_t^y) \cdot w_{yt} + C_{Start}^y \cdot v_{yt} + C_{Stop}^y \cdot u_{yt}) + \sum_{x=1}^{n_{CK}} C_x(Q_t^x) \right] \quad (6)$$

kur

- $n_t$  - laika intervālu skaits ar ilgumu  $\Delta t$ ;
- $\Pi_{PEt}$  - pirktais elektroenerģijas cena laika momentā  $t_n$ ;
- $N_{PEt}$  - pirktais elektroenerģijas apjoms (jauda) laika momentā  $t_n$ ;
- $C_y(N_t^y, Q_t^y)$  - koģenerācijas „y” energobloka izmaksu funkcija, atkarībā no elektriskās jaudas  $N_t^y$  un siltuma jaudas  $Q_t^y$  laika momentā  $t_n$ ;
- $w_{yt}$  - binārais variabls, kas raksturo energobloka statusu („0” – iekārta ir izslēgta, „1” – iekārta ir darbā);
- $n_{KOG}$  - koģenerācijas energobloku skaits;
- $C_{Start}^y, C_{Stop}^y$  - „y” energobloka palaišanas un apturēšanas izmaksas;
- $v_{yt}$  - binārais variabls, kurš ir lielāks par „0”, ja „y” energobloks bija iedarbināts;
- $u_{yt}$  - binārais variabls, kurš ir lielāks par „0”, ja „y” energobloks bija apturēts;
- $C_x(Q_t^x)$  - „x” katla izmaksu funkcija, atkarībā no siltuma slodzes  $Q_t^x$ ;
- $n_{CK}$  - ūdenssildāmo katlu skaits.

Palaišanas izmaksas ( $C_{Start}$ ) laika intervālam  $t = \overline{1, \dots, n_{Start}}$  var aprēķināt pēc formulas:

$$C_{Start} = \sum_{t=1}^{n_{Start}} \left[ \sum_{i=1}^{n_{TEC}} (B_{it} C_{KUR}^t + E_{it}^{CO_2} \Pi_t^{CO_2}) \right] \quad (7)$$

kur  $n_{Start}$  ir palaišanas laiks. Līdzīgi var aprēķināt apturēšanas izmaksas ( $C_{Stop}$ ).

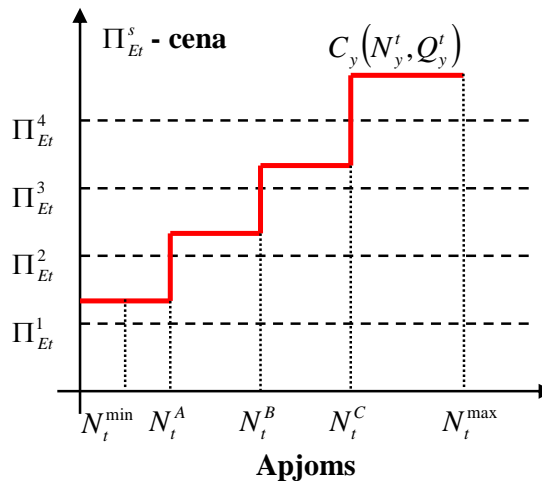
Binārais variabls  $v_{yt}$  norāda uz to, ka laika momentā  $t_n$ , koģenerācijas energobloks bija iedarbināts, ja  $v_{yt} > 0$ , bet  $u_{yt}$  - ka energobloks bija apturēts, ja  $u_{yt} > 0$ . To var izteikt caur energobloka statusa bināro variablu:

$$v_{yt} = w_{yt} - w_{yt-1} \quad (8)$$

$$u_{yt} = w_{yt-1} - w_{yt} \quad (9)$$

Dažas koģenerācijas atbalsta shēmas, t.i. piemaksas, zaļie sertifikāti, nodokļu atvieglojumi un subsīdijas investīcijām paredz koģenerācijas elektrostaciju darbību elektroenerģijas tirgū. Tāpēc ir ļoti svarīgi izstrādāt algoritmus koģenerācijas elektrostaciju modelēšanai brīvajā elektroenerģijas tirgū.

Izskatīsim koģenerācijas elektrostacijas cenas piedāvājumu SPOT tirgū. Pieņemsim, ka  $\Pi_{Et}^s$  ir elektroenerģijas tirgus SPOT cena laika momentā  $t_n$  ( $t = \overline{1, \dots, n_t}$ ) un tirgus cenas scenārijā  $s$  ( $s = \overline{1, \dots, n_s}$ ).  $\phi_s$  ir SPOT cenas scenārija varbūtība. Koģenerācijas elektrostacijas cenas piedāvājumu SPOT tirgū ilustrē 3. attēls. Ja cenu līmenis ir zemāk par  $\Pi_{Et}^1$  ( $\Pi_{Et}^1 < \Pi_{Et}^s$ ), tad koģenerācijas elektrostacija tirgū nepārdod neko, jo tās marginālas ražošanas izmaksas  $C_y(N_y^t, Q_y^t)$  ir augstākas par tirgus cenu  $\Pi_{Et}^1$ . Ja cenu līmenis ir  $\Pi_{Et}^1 \leq \Pi_{Et}^s \leq \Pi_{Et}^2$ , tad koģenerācijas elektrostacija pārdod elektroenerģijas apjomu, kas ir vienāds  $N_t^A$ . Attiecīgi, ja cenu līmenis ir  $\Pi_{Et}^2 \leq \Pi_{Et}^s \leq \Pi_{Et}^3$ , tad pārdod apjomu  $N_t^B$ , bet ja  $\Pi_{Et}^3 \leq \Pi_{Et}^s \leq \Pi_{Et}^4$ , tad pārdod  $N_t^C$ , un  $\Pi_{Et}^s > \Pi_{Et}^4$  gadījumā, elektrostacija pārdod nominālo jaudu.



3. att. Koģenerācijas elektrostacijas cenas piedāvājums SPOT tirgū



Respektīvi, ja  $\Pi_{Et}^s > \Pi_{Et}^1$ , tad binārais variabls  $w_{yt}^s = 1$  un koģenerācijas elektrostacijas cenas piedāvājums ir pieņemts, bet ja  $\Pi_{Et}^1 < \Pi_{Et}^s$ , tad  $w_{yt}^s = 0$  un piedāvājums nav pieņemts.

Koģenerācijas elektrostacija, kas pārdot elektroenerģiju SPOT tirgū, centīsies maksimizēt peļņu:

$$P_{TEC} = \max \sum_{t=1}^{n_t} \phi_s \left[ \Pi_{Et}^s \sum_{y=1}^{n_{KOG}} N_t^y w_{yt}^s + \Pi_{Qt} \left( \sum_{y=1}^{n_{KOG}} Q_t^y w_{yt}^s + \sum_{x=1}^{n_{OK}} Q_t^x \right) - C_{TEC} \right] \quad (10)$$

kur

- $\Pi_{Et}^s$  - elektroenerģijas tirgus SPOT cena laika momentā  $t_n$ , scenārijā  $s$ ;
- $\Pi_{Qt}$  - siltumenerģijas cena vai tarifs laika momentā  $t_n$ ;
- $w_{yt}^s$  - TEC statusa binārais variabls;
- $C_{TEC}$  - koģenerācijas elektrostacijas izmaksu funkcija, saskaņā ar (6).

Formulu (10) var vienkāršot un pārrakstīt šāda veidā:

$$P_{TEC} = \max \sum_{t=1}^{n_t} \phi_s \left[ \Pi_{Et}^s N_{Et}^{SPOT} + \Pi_{Qt} Q_{St} - C_{TEC} \right] \quad (11)$$

kur

- $N_{Et}^{SPOT}$  - SPOT tirgū realizējama elektriskā jauda, saskaņā ar (16);
- $Q_{St}$  - siltumenerģijas tirgū realizējama siltuma jauda, saskaņā ar (17) vai (26).

Gadījumā, kad koģenerācijas elektrostacija ar kādu patērētāju ir noslēgusi elektroenerģijas pirkšanas-pārdošanas līgumu par apjomu  $N_{Et}^{EPL}$  un cenu  $\Pi_{Et}^{EPL}$ , daļu no elektriskās jaudas  $N_{Et}^{SPOT}$  plāno realizēt SPOT tirgū, kur prognozētā cena ir  $\Pi_{Et}^s$  (ar varbūtību  $\phi_s$ ), bet pārējo jaudu plāno piedāvāt pārvades sistēmas operatoram ( $N_{Et}^{AUX} = N_t^{\max} - N_{Et}^{SPOT} - N_{Et}^{EPL}$ ) kā rotējošo rezervi par samaksu  $\Pi_{Et}^{AUX}$ , tad koģenerācijas elektrostacijas peļņas funkcija būs:

$$P_{TEC} = \max \sum_{t=1}^{n_t} \phi_s \left[ \Pi_{Et}^{EPL} N_{Et}^{EPL} + \Pi_{Et}^s N_{Et}^{SPOT} + \Pi_{Et}^{AUX} N_{Et}^{AUX} - C_{TEC} \right] \quad (12)$$

Eiropas Savienības Emisijas tirdzniecības sistēma nopietni ietekmējusi elektrostaciju darbības režīmu plānošanas un vadības loģiku. Optimizācijas funkcijā tagad jāiekļauj papildus izmaksas, kas ir saistītas ar CO<sub>2</sub> emisijas kvotu pirkšanu:

$$C_{TEC} = \min \sum_{t=1}^{n_t} \left[ \sum_{y=1}^{n_{KOG}} \left( C_y(N_t^y, Q_t^y) \cdot w_{yt} + C_{Start}^y \cdot v_{yt} + C_{Stop}^y \cdot u_{yt} + \Pi_{yt}^{CO_2} E_{yt}^{CO_2} \right) \right] \quad (13)$$

kur

$\Pi_{yt}^{CO_2}$  - CO<sub>2</sub> emisijas kvotu cena laika momentā  $t_n$ ;

$E_{yt}^{CO_2}$  - CO<sub>2</sub> emisijas apjomi laika momentā  $t_n$ , saskaņā ar formulu:

$$E_{ij}^{CO_2} = u_0 + u_1 B_{ij} + u_2 (B_{ij})^2 \quad (14)$$

Otrajā tirdzniecības periodā (2008.-2012.g.) elektroenerģijas ražotājiem joprojām būs izvēle: ražot elektroenerģiju un tērēt viņiem piešķirtās bezmaksas CO<sub>2</sub> emisijas kvotas, vai apturēt ražošanu un gūt peļņu no CO<sub>2</sub> emisijas kvotu pārdošanas. Lēmumu var pieņemt balstoties uz elektroenerģijas un kvotu cenu analīzi. Šo gadījumu var aprakstīt ar šādu mērķfunkciju, ņemot vērā (10) un (13):

$$P_{TEC} = \max \sum_{t=1}^{n_t} \phi_s \left[ \left( \Pi_{Et}^s \sum_{y=1}^{n_{KOG}} N_t^y + \Pi_{Qt} \sum_{y=1}^{n_{KOG}} Q_t^y \right) \cdot w_{yt}^s + \Pi_{yt}^{CO_2} \sum_{y=1}^{n_{KOG}} E_{yt}^{CO_2} \cdot (1 - w_{yt}^s) - C_{TEC} \right] \quad (15)$$

Šajā gadījumā optimizācijas uzdevums būtu maksimizēt peļņu no elektroenerģijas un siltumenerģijas tirdzniecības, vai CO<sub>2</sub> emisijas kvotu pārdošanas. Bināram koeficientam  $(1 - w_{yt}^s)$  ir pretēja vērtība, salīdzinot ar  $w_{yt}^s$ : jā  $w_{yt}^s = 0$ , tad  $(1 - w_{yt}^s) = 1$ . Aprēķinot mērķfunkciju, ir jāņem vērā visus ierobežojumus, tajā skaitā CO<sub>2</sub> emisijas ierobežojumu. Ja ir nepieciešams, tad līdzīgi var ņemt vērā arī papildus izmaksas, kas ir saistītas ar NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> un cietam daļiņām.

Veicot mērķfunkcijas (6) un (13) minimizāciju, vai mērķfunkcijas (10), (12) un (15) maksimizāciju, ir nepieciešams ieverot globālus un lokālus ierobežojumus. Koģenerācijas sistēmas elektriskās un siltuma jaudas bilances ir globālie ierobežojumi, bet koģenerācijas energobloka minimālā un maksimālā jauda ir lokālie ierobežojumi. Papildus tam, uzdevumā var iekļaut emisijas, enerģijas un kurināmā apjomu ierobežojumus.

Globālie ierobežojumi:

$$N_{PEt} + \sum_{y=1}^{n_{KOG}} N_t^y w_{yt} = N_{Et} , \quad t = \overline{1, \dots, n_t} \quad (16)$$

$$\sum_{x=1}^{n_{OK}} Q_t^x + \sum_{y=1}^{n_{KOG}} Q_t^y w_{yt} = Q_{St} , \quad t = \overline{1, \dots, n_t} \quad (17)$$

Ja koģenerācijas sistēmā darbojās siltuma akumulators, tad siltuma bilanci ir jāpapildina ar siltuma akumulatora kapacitāti (tilpumu), atbilstoši (26). Gadījumā, ja daļu no koģenerācijas elektrostacijās saražotās elektroenerģijas ir paredzēts pārdot SPOT tirgū ( $N_{Et}^{SPOT}$ ), daļu realizēt saskaņā ar divpusējo elektroenerģijas pirkšanas-pārdošanas līgumu ( $N_{Et}^{EPL}$ ), bet neizmantoto jaudu piedāvāt sistēmas operatoram energosistēmas sistēmas

pakalpojumu nodrošināšanai ( $N_{Et}^{AUX}$ ) kā rotējošo rezervi, tad vienādojumu (16) var pārrakstīt sekojošā veidā:

$$N_{PEt} + \sum_{y=1}^{n_{KOG}} N_t^y = N_{Et}^{SPOT} + N_{Et}^{EPL} + N_{Et}^{AUX} \quad (18)$$

Lokālie ierobežojumi:

$$N_{yt}^{\min} w_{yt} \leq N_t^y \leq N_{yt}^{\max} w_{yt}, \quad y = \overline{1, \dots, n_{KOG}} \quad (19)$$

$$Q_{yt}^{\min} w_{yt} \leq Q_t^y \leq Q_{yt}^{\max} w_{yt}, \quad y = \overline{1, \dots, n_{KOG}} \quad (20)$$

$$Q_{xt}^{\min} \leq Q_t^x \leq Q_{xt}^{\max}, \quad x = \overline{1, \dots, n_{UK}} \quad (21)$$

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max} \quad (22)$$

Emisijas, enerģijas un kurināmā apjomu ierobežojumi:

$$\sum_{t=1}^{n_t} E_{yt}^{CO_2} \cdot \Delta t \leq E_y^{kvota} \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^{n_t} N_t^y \cdot \Delta t \leq W_{y \max day} \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^{n_t} B_t^y \cdot \Delta t \leq F_{y \max day} \quad (25)$$

kur

- $N_{Et}, Q_{St}$  - attiecīgi siltuma un elektriskā slodze laika momentā  $t_n$ ;
- $N_{yt}^{\min}, N_{yt}^{\max}$  - koģenerācijas „y” energobloka minimālā un maksimālā elektriskā jauda laika momentā  $t_n$ ;
- $Q_{yt}^{\min}, Q_{yt}^{\max}$  - koģenerācijas „y” energobloka minimālā un maksimālā siltuma jauda laika momentā  $t_n$ ;
- $Q_{xt}^{\min}, Q_{xt}^{\max}$  - „x” katla minimālā un maksimālā siltuma jauda laika momentā  $t_n$ ;
- $E_y^{kvota}$  - brīvās CO<sub>2</sub> emisijas kvotas (ja tādas ir);
- $W_{y \max day}$  - diennakts maksimālā ģenerācija;
- $F_{y \max day}$  - diennakts maksimālais kurināmā patēriņš.

Siltuma akumulatorus ņem vērā, sastādot koģenerācijas elektrostacijas siltuma bilanci (17), to pārrakstot šāda formā:

$$V_{t+1} = V_t + \sum_{y=1}^{n_{KG}} Q_{KGt}^y + \sum_{x=1}^{n_{UK}} Q_{UKt}^x - Q_{St} - Q_{TDt}, \quad t = \overline{1, \dots, n_t} \quad (26)$$

kur  $V_t$  un  $V_{t+1}$  - siltuma akumulatora jauda (tilpums) attiecīgi laika periodā  $t$  un  $t+1$ .

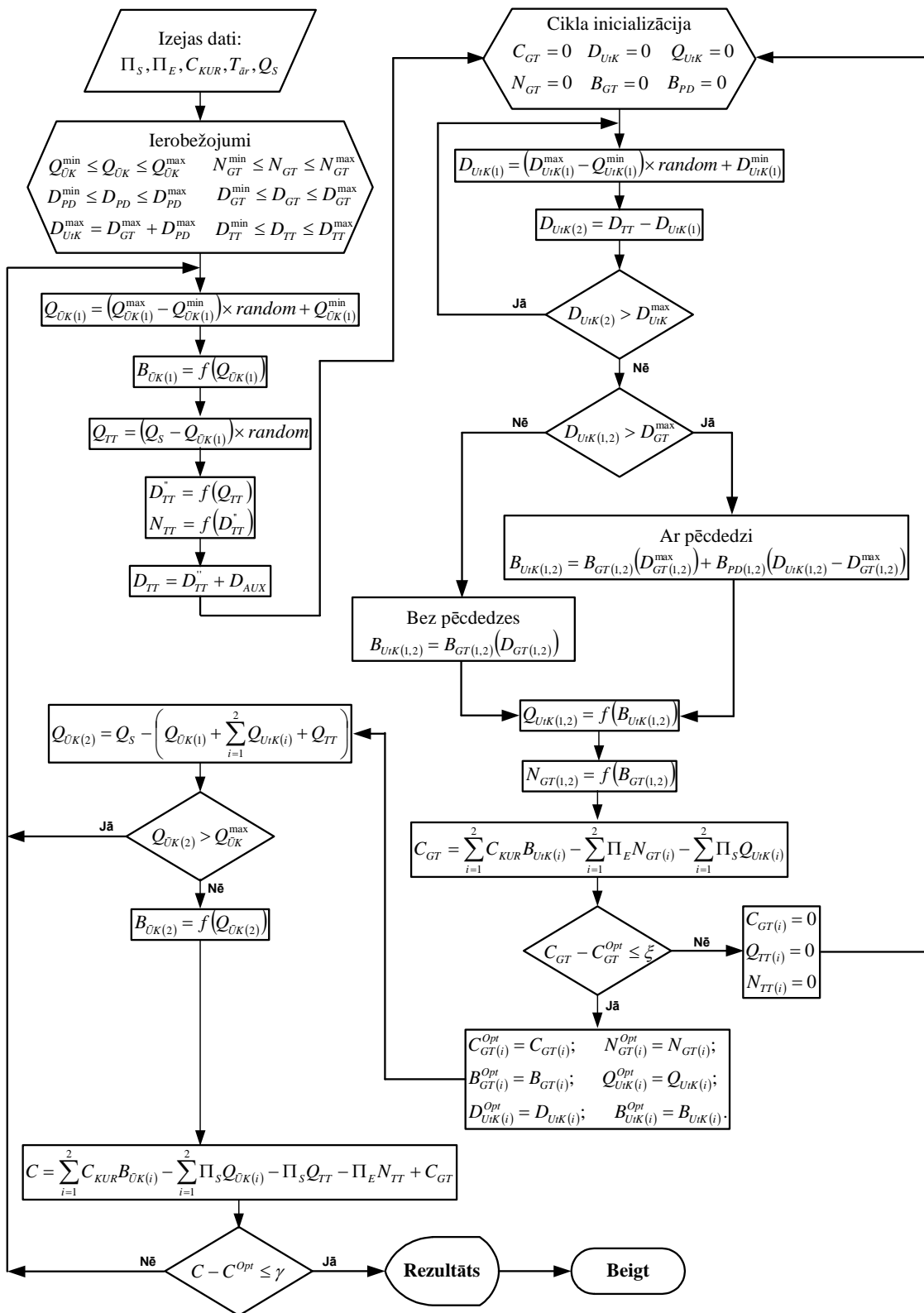
Promocijas darbā ir izstrādāta koģenerācijas elektrostaciju darbības režīmu optimizācijas programma „Elektrostacijas režīmu optimizācijas modelis (EROM)”, kas izmanto Monte-Karlo metodi, lai meklētu koģenerācijas elektrostacijas iekārtu optimālo sastāvu un tās noslodzi. Programma ir realizēta matemātiskās programmatūras MATLAB v.6.5. vidē.

4. attēlā ir uzrādīts kombinētā cikla koģenerācijas elektrostacijas darbības režīmu optimizācijas algoritms. Par piemēru tiek izmantota Rīgas TEC-1 iekārta (skat. 2.4. sadaļu). Algoritms ir izveidots ar diviem cikliem: iekšējais cikls – gāzes turbīnu un utilizācijas katlu peļņas maksimizēšanai un ārējais cikls – visas elektrostacijas peļņas maksimizēšanai. Rezultātu iegūšanai tiek izmantotas vairākas iterācijas, kamēr tiek sasniegti optimizācijas kritēriji, attiecīgi  $\xi$  un  $\gamma$ .

Algoritms uzsākas ar izejas datu (tarifi, cenas, ārējā gaisa temperatūra un siltuma slodze) ieviešanu un ierobežojumu (iekārtu minimālā un maksimālā jauda) definēšanu. Pēc tam sākas ārējais cikls. Izmantojot gadījumskaitļu ģeneratoru, dotajā iterācijā tiek noteikta pirmā ūdenssildāmā katla siltuma jauda un kurināmā patēriņš. Tvaika turbīnas siltuma jaudu aprēķina kā starpību starp uzdoto siltuma slodzi un pirmā ūdenssildāmā katla jaudu, to reizinot ar gadījumskaitļu funkciju „rand”. Zinot tvaika turbīnas siltuma jaudu, var aprēķināt tās elektrisko jaudu un tvaika patēriņu uz turbīnu.

Tālāk seko iekšējais cikls. Pirmais solis ir tvaika patēriņa sadalīšana starp diviem utilizācijas katliem. Šeit atkal tiek izmantots gadījumskaitļu ģenerators „rand”, lai noteiktu tvaika patēriņu no pirmā utilizācijas katla. Pārējais tvaika patēriņš tiek nodrošināts ar otro utilizācijas katlu. Gadījumā, ja tvaika patēriņu no katla nevar nodrošināt, darbinot tikai gāzes turbīnu, tad tiek ieslēgta arī pēdēdzes iekārta. Tiek aprēķināts kurināmā patēriņš gāzes turbīnās un pēdēdzes iekārtās. Gāzes turbīnas elektrisko jaudu aprēķina kā funkciju no tās kurināmā patēriņa. Tagad var noteikt gāzes turbīnu un utilizācijas katlu peļņu. Aprēķināto peļņu salīdzina ar peļņu iepriekšējā iterācijā. Ja starpība ir mazāka par uzdoto kritēriju  $\xi$ , tad iekšējā cikla optimums ir atrasts un jāatgriežas uz ārējo ciklu, ja nav, tad – turpina ar nākošo iterāciju.

Atgriežoties ārējā ciklā, tiek aprēķināta otra ūdenssildāmā katla jauda un kurināmā patēriņš, kas nodrošina siltuma bilanci. Tālāk tiek aprēķināta elektrostacijas kopējā peļņa. To salīdzina ar peļņu iepriekšējā iterācijā un, ja optimums ir sasniegts, tad izdrukā rezultātus un nobeidz aprēķinu.



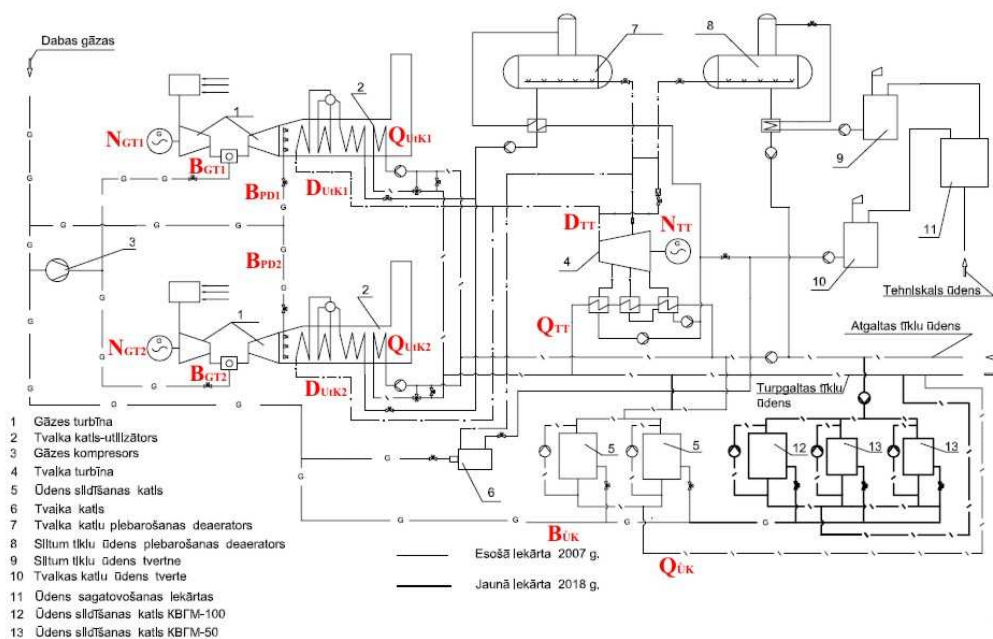
4. att. Kombinētā cikla koģenerācijas stacijas darbības režīmu optimizācijas algoritms

## 2.4. Rīgas TEC-1 darbības režīmu modelēšana

Rīgas TEC-1 ir kombinētā cikla koģenerācijas elektrostacija ar eklektisko jaudu (neto) 144 MW un kopējo siltuma jaudu 375 MW, tajā skaitā tajā skaitā 232 MW no ūdenssildāmiem katliem. Rīgas TEC-1 kombinētā cikla energobloka galvenie komponenti ir divas gāzes turbīnas ar elektrisko jaudu 43 MW, divi utilizācijas katli ar diviem kontūriem (tvaika un termofikācijas kontūri) un ar pēdcedzes iekārtu, kā arī viena pretspiediena tvaika turbīna MP 24 ar uzstādīto elektrisko jaudu 54 MW. Energobloka siltuma jauda ir 142 MW.

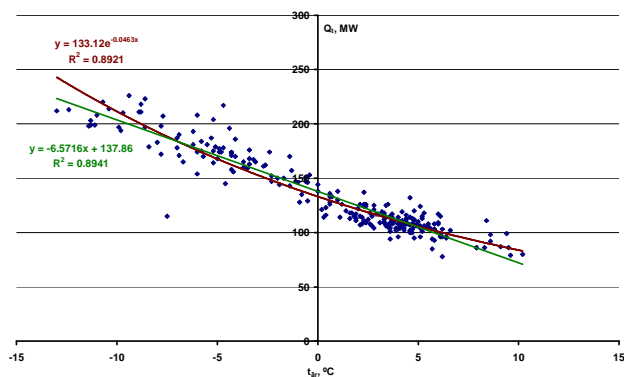
Rīgas TEC-1 kombinētā cikla energobloka principiāla shēma ar pamatrādītājiem ir uzrādīta 5. attēlā. Pamatrādītāju apzīmējumi:

$N_{GTj}$ - gāzes turbīnas „j” elektriskā jauda;	$B_{GTj}$ - gāzes turbīnas „j” kurināmā patēriņš;
$D_{UkKj}$ - utilizācijas katla „j” tvaika ražība;	$B_{PDj}$ - pēdcedzes iekārtas „j” kurināmā patēriņš;
$Q_{UkKj}$ - utilizācijas katla „j” termofikācijas kontūra siltuma jauda;	$D_{TT}$ - tvaika patēriņš uz tvaika turbīnu;
$B_{UKl}$ - ūdenssildāmā katla „l” kurināmā patēriņš;	$N_{TTi}$ - tvaika turbīnas elektriskā jauda;
$Q_{UKl}$ - ūdenssildāmā katla „l” siltuma jauda;	$Q_{TTi}$ - siltumtīklu boileru „i” siltuma jauda;



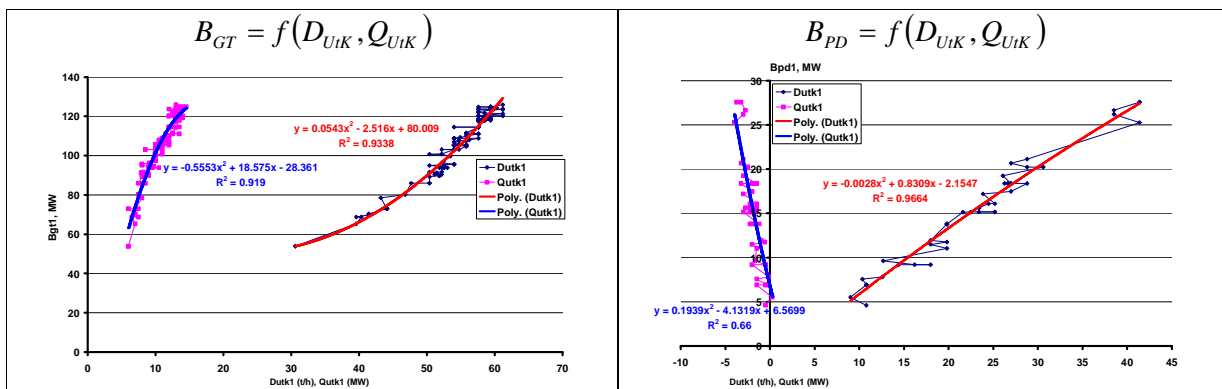
5. att. Rīgas TEC-1 principiālā shēma

Noteiksim korelāciju starp Rīgas TEC-1 iktundas siltuma slodzi ( $Q_t$ , MW) 2007. gada janvārī un ārējā gaisa temperatūru ( $t_{ār}$ , °C) par attiecīgo periodu. Uzzīmēsim grafiku  $Q_t = f(t_{ār})$ , skat. 6. attēlu. To var aproksimēt ar lineāro vienādojumu  $Q_t = -6,5716 \cdot t_{ār} + 137,86$ , jeb eksponenciāla veidā  $Q_t = 133,12 \cdot e^{-0,0463}$ .



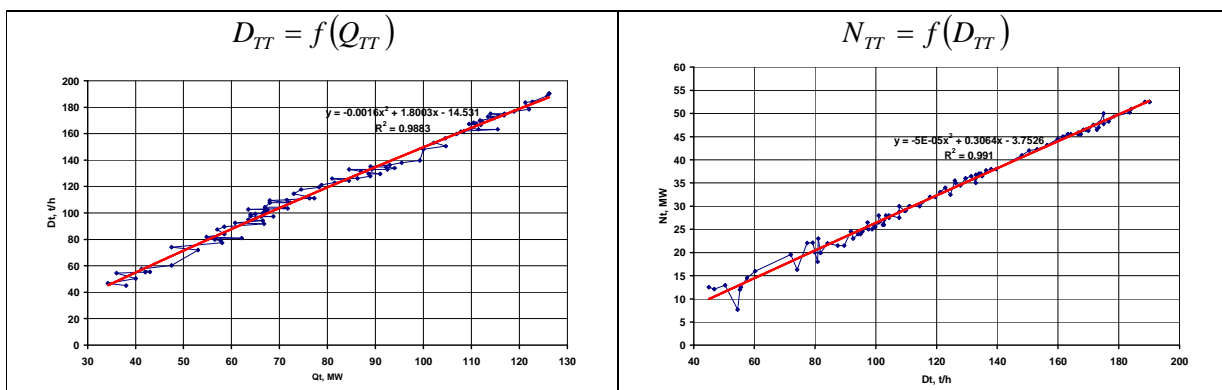
6. att. Rīgas TEC-1 ikstundas slodžu korelācija ar ārēja gaisa temperatūrām

Utilizācijas katla tvaika ražību ( $D_{UiK}$ ) un termofikācijas kontūra siltuma jaudu ( $Q_{UiK}$ ) var definēt kā funkciju no kurināmā patēriņa gāzes turbīnā un pēdcedzes iekārtā pie uzdotas ārējās gaisa temperatūras. 7. attēlā ir uzradīta funkcija  $B_{GT} = f(D_{UiK}, Q_{UiK})$  un  $B_{PD} = f(D_{UiK}, Q_{UiK})$  pie  $T_{ā} = +10^0 C$ .



7. att. Utilizācijas katla raksturlīknes

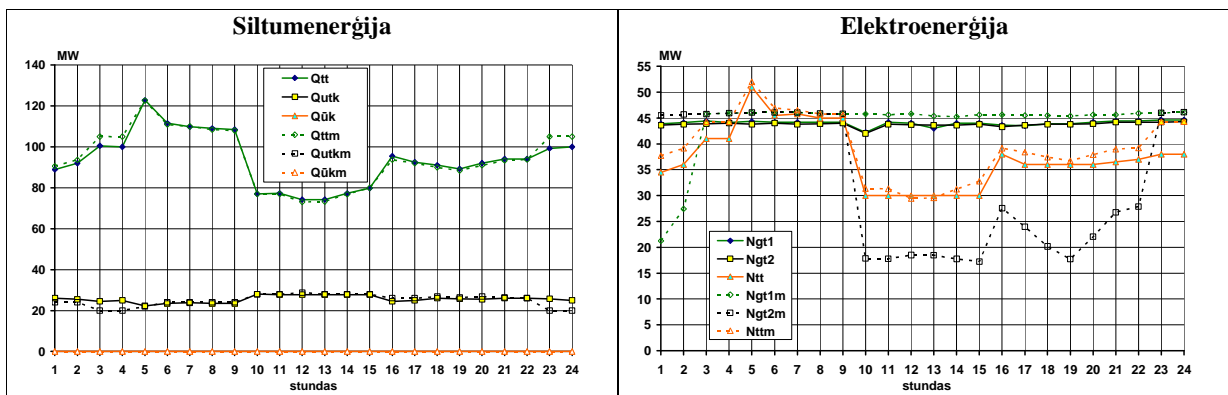
8. attēlā ir uzrādītas attiecības: tvaika patēriņš atkarībā no turbīnas siltuma jaudas  $D_{TT} = f(Q_{TT})$  un elektriskā jauda atkarībā no tvaika patēriņa uz turbīnu  $N_{TT} = f(D_{TT})$ .



8. att. Tvaika turbīnas raksturlīknes

Rīgas TEC-1 darbības režīmu modelēšanai ir izmantots optimizācijas modelis EROM, kurš ir izstrādāts šajā promocijas darbā programmas MATLAB v.6.5. vidē. Lai verificētu izstrādāto algoritmu, aprēķinu rezultāti ir salīdzināti ar atskaites datiem. Tika pārbaudīti dažādi elektrostacijas darbības režīmi, tajā skaitā ziemas maksimuma režīms ( $T_a = -25^{\circ}C$ ), apkures perioda vidējais režīms ( $T_a = -5^{\circ}C$ ), vasaras režīms ( $T_a = +20^{\circ}C$ ) un pavasara režīms ( $T_a = +5^{\circ}C$ ). Aprēķinu rezultāti ir salīdzināti ar 2006. gada datiem, kas ir iegūti no elektrostacijas vadības un monitoringa sistēmas (CMS – Control Monitoring System). Tika modelēti diennakts grafiki ar laika soli viena stunda.

Sīkāk izpētīsim pavasara režīmu, kas ir reģistrēts 2006. gada 30. martā. 9. attēlā ir uzrādīti siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas grafiki reālam un modelētām režīmam. Modelētie parametri ir uzrādīti ar raustīto līniju. Simulētais siltumenerģijas ražošanas grafiks praktiski sakrīt ar atskaites datiem (starpība ir 0,07%), bet modelējamo elektroenerģijas ražošanas grafiks nedaudz atšķiras no statistikas (starpība ir -7,5%). Galvenā atšķirība ir gāzes turbīnu un pēdcedzes iekārtu darbībā. Optimizācijas modelis izvēlas stratēģiju, kura paredz vienas gāzes turbīnas jaudas samazināšanu par labu pēdcedzes iekārtai un otrai gāzes turbīnai.

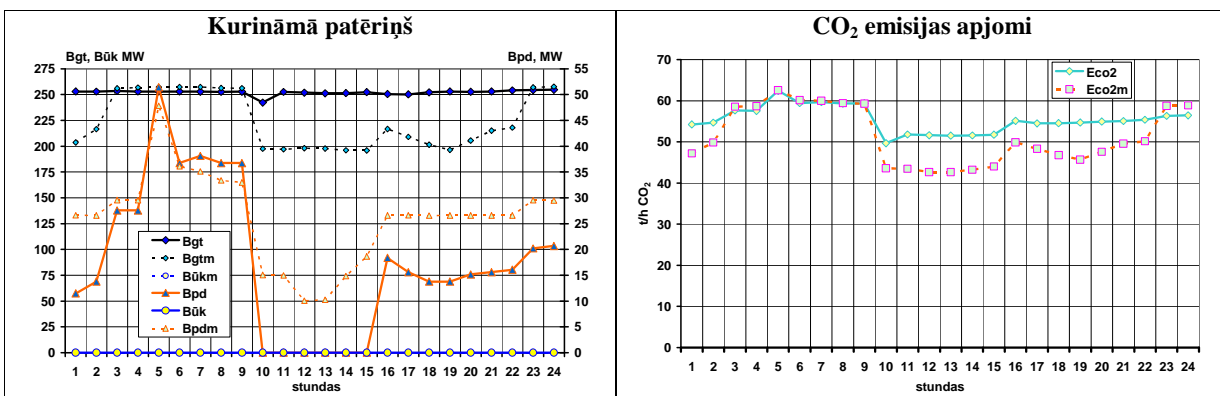


9. att. Siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas apjomu salīdzinājums

Šī stratēģija ir attaisnojama ar nelielu kurināmā ekonomiju, apmērām -3,5% robežās diennakts laikā un, kas ir svarīgi, arī ar CO<sub>2</sub> emisijas samazināšanu par -7%. Vēl viens loģiskais skaidrojums iegūtam rezultātam ir zems elektroenerģijas tarifs, kurš neveicina elektrostacijas darbību ar maksimālo elektroenerģijas izstrādi koģenerācijas režīmā. Rezultātā Rīgas TEC-1 aprēķinātā elektroenerģijas izstrāde ir mazāka par faktisko (9. att.).

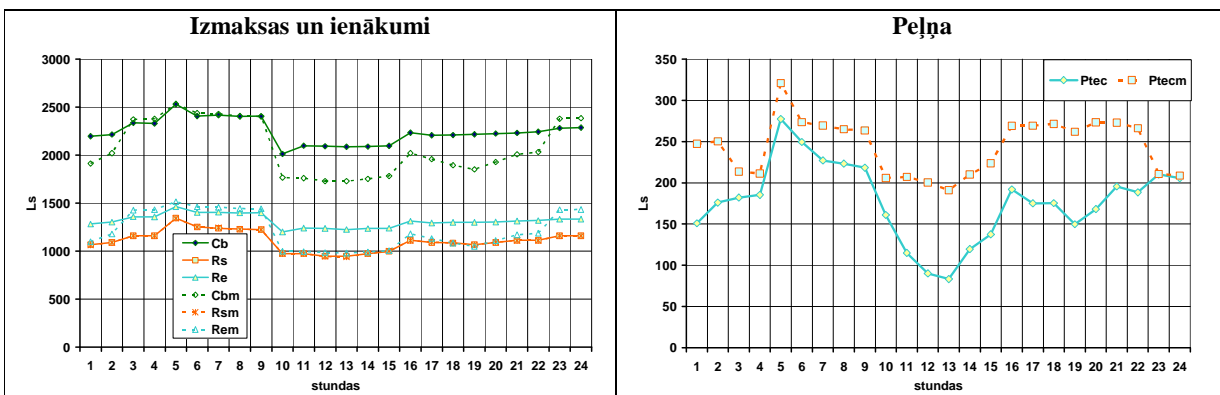
10. attēlā var konstatēt lielāku kurināmā patēriņu pēdcedzes iekārtās un kurināmā patēriņa samazinājumu gāzes turbīnā. Līdz ar kurināmā ekonomiju ir arī CO<sub>2</sub> emisijas samazinājums.





10. att. Kurināmā patēriņa un CO<sub>2</sub> emisijas apjumu salīdzinājums

Ņemot vērā elektroenerģijas ražošanas apjoma samazinājumu, aprēķinātā variantā kopējie ienākumi ir mazāki, salīdzinot ar atskaites datiem (11. att.). Tomēr, mazākas ir arī ražošanas izmaksas kurināmā ekonomijas dēļ. Kopsummā, aprēķinātā režīma peļņa ir lielāka par faktisko peļņu.



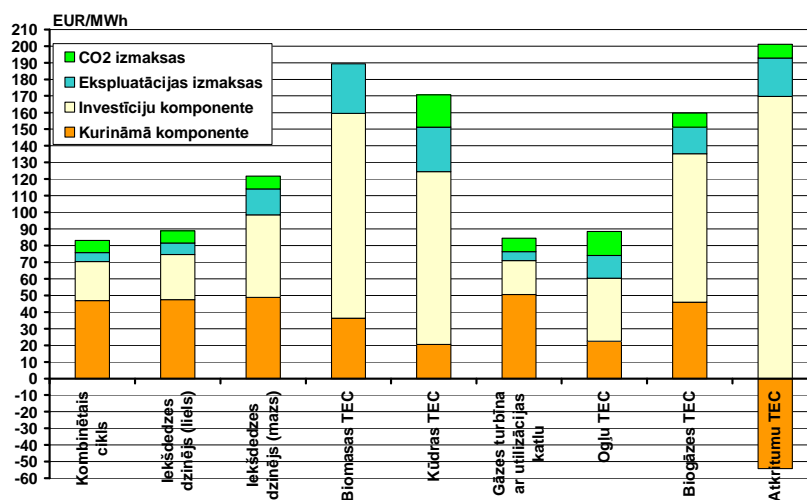
11. att. Izmaksu, ienākumu un peļņas salīdzinājums

Modelis salīdzina izmaksu un ienākumu mainīgo daļu, neņemot vērā pastāvīgas un investīciju izmaksas. Dienakts režīmu dispečerizācijā tiek ievērotas tikai marginālas (mainīgas) izmaksas, kas ietver pamatā kurināmā un CO<sub>2</sub> emisijas kvotu pirkšanas izmaksas.

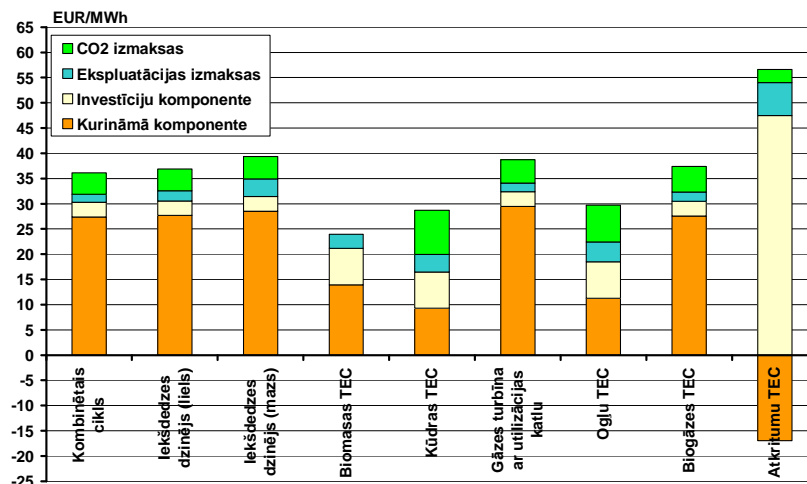
## 2.5. Jaudas palielināšanas optimizācija

Jaudas palielināšanas plānošanai var izmantot virkni metožu - gan ļoti vienkāršo investīciju atmaksāšanas izvērtēšanu, gan sarežģītas dinamiskas programmēšanas metodes: investīciju atmaksāšanas metodes, piemēram, diskontētas patreizējas vērtības (NPV) metode vai iekšējās peļņas (IRR) metode, anuitātes metode, izlīdzināto izmaksu metode, atmaksāšanās lūzuma punkta analīze, drošuma, ražošanas un investīciju izmaksu izvērtēšana, lineāra programmēšana, nelineāra programmēšana algoritmi ar vispārīgo Bendersa dekompozīciju, dinamiskā programmēšana.

Šajā darbā elektroenerģijas (12. att.) un siltumenerģijas (13. att.) ražošanas izmaksas dažādam koģenerācijas tehnoloģijām ir aprēķinātas izmantojot anuitātes metodi. Tas ir vidējas enerģijas ražošanas izmaksas visā elektrostacijas ekspluatācijas periodā. Šeit nav iekļauti: peļņa, atsevišķie nodokļi un inflācija. Anuitātes metodi izmanto tehnoloģiju salīdzināšanai.



12. att. Aprēķinātas TEC elektroenerģijas izmaksas (2010. gads)



13. att. Aprēķinātas TEC siltumenerģijas izmaksas (2010. gads)

### 3. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS

#### 3.1. Secinājumi

- 1) Eiropas Savienībā koģenerācijas elektrostaciju attīstība tiek īpaši veicināta, jo tā ļauj ietaupīt ievērojamus kurināmā daudzumus, uzlabot elektroapgādes drošumu, kā arī būtiski samazināt izmešus atmosfērā, īpaši siltumnīcas efekta gāzes.
- 2) Jaunās koģenerācijas atbalsta shēmas (piemaksas, zaļie sertifikāti, nodokļu atvieglojumi un subsīdijas investīcijām) paredz koģenerācijas elektrostaciju darbību elektroenerģijas tirgū, kur apriori nav zināmi ne pārdotās elektroenerģijas apjomi, ne elektroenerģijas cenas.
- 3) Koģenerācijas elektrostaciju darba režīmu optimizācija ir kļuvusi par daudz komplicētāku stohastisko uzdevumu. Lai risinātu šo uzdevumu, jāizstrādā jaunas metodes, kas ļautu modelēt koģenerācijas elektrostacijās ražotas elektroenerģijas tirdzniecību SPOT tirgū, divpusējos elektroenerģijas pirkšanas – pārdošanas darījumus un sistēmas pakalpojumu sniegšanu sistēmas operatoriem.
- 4) Koģenerācijas elektrostaciju darba režīmu modelēšanu sarežģī CO<sub>2</sub> emisijas tirdzniecība, kad fosila kurināmā elektrostacijām jāpērk trūkstošās CO<sub>2</sub> emisijas atļaujas tirgū. CO<sub>2</sub> emisijas atļauju cena ir mainīga vērtība, bet nepieciešamais daudzums ir atkarīgs no tirgū realizētas enerģijas apjoma, un patērēta kurināmā daudzuma.
- 5) Tirgus apstākļos TEC režīmu operatīvu vadību nav iespējams veikt bez specializētas programmas, kas ļautu modelēt TEC tirdzniecību enerģijas tirgos.
- 6) Promocijas darbā ir izstrādāts algoritms un matemātiskais modelis, kura galvenais uzdevums ir noteikt koģenerācijas elektrostācijas optimālo iekārtas sastāvu un tās noslogojumu.
- 7) Peļņas maksimizācija varētu kļūt par galveno optimizācijas kritēriju elektroenerģijas tirgus apstākļos. Šajā gadījumā TEC varētu strādāt „pēc elektriskā grafika” jauktā koģenerācijas / kondensācijas režīmā. Lai regulētu siltumenerģijas piegādi no šādas „tirgus TEC”, būtu lietderīgi izmantot siltuma akumulatorus.
- 8) Matemātiskais modelis ir aprobēts un verificēts, modelējot Rīgas TEC-1 darbības režīmus. Simulācijas rezultāti būtiski neatšķiras no atskaites datiem.

### 3.2. Rekomendācijas

- 1) Izstrādātās metodes un matemātisko modeli var izmantot: elektroenerģijas ražotāji – koģenerācijas elektrostaciju ikdienas darbības režīmu plānošanai, tirgotāji – optimālas tirdzniecības stratēģijas izstrādāšanai, sabiedrisko pakalpojumu regulatori – subsīdijas vai atbalsta apjoma noteikšanai, plānotāji un attīstītāji – jaudas paplašināšanas vai jaunas koģenerācijas elektrostacijas celtniecības variantu izvērtēšanai.
- 2) AS Latvenergo izrādīja interesi par modeļa adaptāciju Rīgas TES darbības režīmu prognozēšanai. Nākošā etapā būtu lietderīgi turpināt darbu pie modeļa pielāgošanas uzņēmuma vajadzībām ar mērķi modelēt divas koģenerācijas stacijas Rīgas TEC-1 un TEC-2, lai optimāli dalītu siltuma slodzi ne tikai vienas stacijas ietvaros, bet arī starp divām minētām elektrostacijām.
- 3) Siltumenerģijas zudumu prognozēšanai ir jāizstrādā ekvivalento siltumtīklu shēma un modelis, kurš simulētu siltuma plūsmas, balstoties uz enerģijas un masas bilanču aprēķiniem. Šis modelis ļautu precīzāk modelēt siltuma slodžu sadalījumu starp diviem, trim un vairākiem siltuma avotiem.
- 4) AS Latvenergo ir interese par iespēju ietvert hidroelektrostaciju modelēšanas iespējas, jeb tā saucamo „termo- un hidroelektrostaciju kopīgo dispečerizāciju”.
- 5) Ir nepieciešams turpināt darbu pie modeļa dinamiskās daļas realizācijas un stohastisko parametru modelēšanas.
- 6) Koģenerācijas elektrostaciju darbības režīmu optimizācijas programmai EROM ir nepieciešams izstrādāt „user-friendly” interfeisu.