



VPP “Enerģētika”
Projekts “FutureProof”
VPP-EM-INFRA-2018/1-0005



Latvijas elektroenerģijas sistēmas nākotnes attīstības scenāriji

Nodevums D1.2

Pētījuma pasūtītājs: Ekonomikas ministrija

Pētījumu veic Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas institūts sadarbībā ar Ventspils
Augstskolas Inženierzinātņu institūtu “Ventspils Starptautiskais radioastronomijas centrs”

10.11.2020.

Saturs

Attēlu saraksts	4
Ievads	5
1. Energosistēmas attīstības plānošanas optimizācijas uzdevums.....	8
1.1. Attīstības mērķi un uzdevumi	8
1.2. Scenāriju metode	11
1.3. Energosistēmas attīstības plānošanas uzdevuma specifika.....	12
1.3.1. Optimizācijas mainīgie un parametri	13
1.3.2. Nenoteiktie un varbūtiskie mainīgie	13
1.3.3. Energosistēmas vadība kā spēle.....	13
1.3.4. Ietekmējošo procesu dimensionalitāte un korelācija	14
1.3.5. Lēmumu pieņemšana laika intervālos	14
1.3.6. Ierobežojumi	14
1.3.7. Dimensionalitātes lāsts	15
2. Latvijas energosistēmas nākotnes attīstības scenāriju modelēšana.....	16
2.1. Energosistēmu modelēšanas vide Backbone	16
2.2. RTU Enerģētikas institūta modelēšanas rīku komplekss.....	20
2.3. Abu modelēšanas metožu kopējās iezīmes un komplementārās atšķirības.....	23
2.4. Modelējamie nākotnes scenāriji.....	24
Kopsavilkums.....	28

Attēlu saraksts

1.1. att. Vispārīga energosistēmas struktūra	8
1.2. att. Lēmumu pieņēmēji enerģētikas attīstības plānošanā	9
1.3. att. Attīstības uzdevumu risinātāji un uzdevumu risināšanas mērķi	10
1.4. att. Attīstības plānošanas uzdevuma risināšanas algoritma struktūras piemērs	10
1.5. att. Galvenie ierobežojumu veidi energosistēmas attīstības uzdevumos	11
2.1. att. Backbone modeļa struktūras piemērs ar tīkliem, mezgliem, zariem un vienībām	18
2.2. att. REM telpiskās struktūras ilustratīva shēma	21
2.3. att. Scenāriju veidošanai izmantojamo procesu izmaiņu ātruma pieņēmumi (piemērs)	26
2.4. att. Ģenerācijas avotu uzstādītās jaudas īpatsvara robežvērtības energosistēmas attīstības scenāriju veidošanā	26
2.5. att. Energosistēmas attīstības scenāriju analīzes rezultātu izmantošana tirgus un risku modelēšanas uzdevumos	27

Ievads

Šis ir otrais projekta "FutureProof" galvenā darba posma WP1 (energosistēmas attīstības scenāriji) nodevums D1.2, kurā identificēti galvenie Latvijas enerģosistēmas attīstības scenāriju modelēšanai izmantojamie parametri, pamatpieņēmumi un izklāstītas modelēšanas metodes, kas tiek izmantotas projekta turpmākajos posmos.

Virzība uz energoapgādes ekonomiskās efektivitātes un drošuma paaugstināšanu un ietekmes uz klimata pārmaiņām samazināšanu ir izsaukusi būtiskas izmaiņas enerģijas ražošanā, sadalē un pārvadē, tās izmantošanā un energoapgādes procesu vadībā. Dažas no nozīmīgākajām izmaiņām ir uzskaitītas turpmāk.

1. Strauji attīstās atjaunīgo energoresursu (AER) izmantošanas tehnoloģijas, attiecīgi aug to skaits, jauda un īpatsvars saražotās enerģijas apjomā. AER izstrāde ir ļoti mainīga laikā un ir atkarīga no tādiem faktoriem kā temperatūra, vēja ātrums, saules starojums, ūdens pietece upēs u. c.
2. Notiek pakāpeniska videi kaitīgo elektrostaciju slēgšana.
3. Kļuvusi pieejama virkne jaunu tehnoloģiju enerģijas ražošanā un sadalē, piemēram, tvaika-gāzes tehnoloģijas, kuras ir jaudīgu koģenerācijas staciju uzbūves pamatā; viedo tīklu tehnoloģijas, kas īsteno mērījumus un izmanto interneta tehnoloģijas ar divpusējas vadības iespēju; izklaidētā ģenerācija; alternatīvie enerģijas avoti; elegāzes iekārtas apakšstacijās; jauna tipa kabeļi un gaisvadi; energoelektronikas iekārtas, kuras paver lielākas iespējas starpsistēmu līdzstrāvas augstsprieguma līniju izmantošanai.
4. Kļūst aizvien pieejamākas jaudīgas automatizētās vadības tehnoloģijas un datu vākšanas, pārraides un glabāšanas sistēmas. Pateicoties tām, attīstās dažādi enerģijas tirgi, tiek ieviestas jaunas vadības, automātikas, uzskaites un norēķinu sistēmas.
5. Pieaug koģenerācijas staciju loma. Šādas stacijas daudzos gadījumos ražo siltumenerģiju kā pamatproduktu un elektrību kā blakusproduktu. Tomēr palielinās šo divu energoapgādes sektoru saites un savstarpējā mijiedarbība. Tā kā siltumenerģijas pieprasījums ir atkarīgs pirmām kārtām no gaisa temperatūras, arī elektroenerģijas izstrāde šādā gadījumā ir atkarīga no dabas apstākļiem. Augstas efektivitātes koģenerācijas stacijās kā primāro energoresursu izmanto dabasgāzi, tādējādi arī gāzapgādes sistēma ir nozīmīga sekmīgai elektroapgādes un siltumapgādes sistēmas funkcionēšanai.
6. Savulaik vertikāli integrētās Eiropas enerģosistēmas ir sadalītas vairākās neatkarīgās daļās, nodalot elektroenerģijas ražošanas, pārvades un sadales procesus. Savukārt pārvades sistēmu operatori izvērš arvien ciešāku savstarpējo sadarbību, tostarp integrējot rezervju tirgus un nepieciešamības gadījumā sniedzot palīdzību partneriem.
7. Lai nodrošinātu enerģijas ražošanas un patēriņa koordināciju, ir izveidoti dažādi enerģijas tirgi, kuru noteikumi ietekmē kopējo enerģosistēmas darbību. Tirgus apstākļos veidojas mainīgas enerģijas cenas, kuras nosaka enerģijas pieprasījums un piedāvājums konkrētajā laika periodā un šo parametru elastīgums.

Īpaši straujas izmaiņas notiek Baltijas jūras reģionā. Baltijas valstu energosistēmas ir ar līdzstrāvas elektrolīnijām un gāzes cauruļvadiem savienotas ar Ziemeļvalstīm un Poliju. Diversificējot primāro energoresursu importa avotus, nodrošināta arī sašķidrinātās gāzes piegādes iespēja. Notiek turpmāka energosistēmu integrēšana, veidojot jaunas saites starp vēl nesen nesaistītām energosistēmām, tostarp plānota Baltijas energosistēmu integrācija kontinentālās Eiropas sinhronajā sistēmā, izveidojot mainstrāvas savienojumus ar Poliju.

Vienlaikus ar energosistēmu integrācijas un mijiedarbības stiprināšanu notiek nozīmīgu (bet bīstamu vai kaitīgu) elektrostaciju apturēšana, piemēram, slēgta ļoti jaudīgā Ignalinas atomelektrostacija. Ir plānota desinhronizācija no Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām. Vācijā, Polijā, Dānijā, Zviedrijā, Igaunijā un citviet plānota daudzu atomelektrostaciju un fosilo siltumelektrostaciju slēgšana. Savukārt elektroenerģijas tirdzniecības darījumi (un līdz ar to izstrādes režīmu plānošana) reģionā galvenokārt tiek veikta, izmantojot *Nord Pool* elektroenerģijas biržu.

Apkopojot norādītās mūsdienu energosistēmas darbības īpatnības, notiekošās un plānotās izmaiņas, var apgalvot, ka energouzņēmumu darbības apstākļi un tos raksturojošie faktori (izstrādātās enerģijas un izmantotā kurināmā daudzums, peļņa, ražošanas izmaksas u. c.) strauji mainās un ir atkarīgi no vides faktoriem. Tomēr arī šādos mainīgos apstākļos ir jāņem vērā viens no energosistēmu vadības pamatzdevumiem – saražotās enerģijas apjomam jebkurā laika brīdī ir jābūt pēc iespējas vienādam ar tās pieprasījumu. Šo problēmu var atrisināt, tikai plānojot enerģijas ražošanu, pārvadi un patēriņu nākotnes laika periodam. Plānošanas perioda ilgums atkarībā no uzdevuma nostādnes var būt mērāms sekundēs, minūtēs, stundās vai pat desmitgadēs. Energouzņēmumu režīmu plānošana un vadība sākas no skiču projektu, tehnisko projektu izstrādes un energoobjektu būvniecības. Šī pirmā stadija ir gan ārkārtīgi svarīga, gan sarežģīta, jo jāņem vērā sistēmas attīstības prognozes daudziem gadiem uz priekšu. Pieņemtie lēmumi var ietekmēt ne tikai energosistēmas darbību, bet arī valsts ekonomiku, jo to realizācija daudzos gadījumos saistīta ar vērienīgām investīcijām. Tieši ārkārtīgi lielā pieņemamo lēmumu cena nosaka energosistēmu attīstības problēmas aktualitāti.

Attīstības plānošanas izpilde ir vēlama optimizācijas uzdevuma formā, kas savukārt prasa ražošanas procesu modeļu izveidi un darbības apstākļu aprakstu, iespējams – scenāriju un modeļu veidā. Energosistēmu ietekmē daudzi faktori un procesi. Aprakstot tos, var izmantot milzīgu scenāriju skaitu. Viens no svarīgiem uzdevumiem ir scenāriju skaita ierobežošana, izmantojot papildu pieņēmumus, kuri izriet no valstu ekonomikas un pieejamo tehnoloģiju attīstības tendencēm, ka arī no Eiropas Savienības un Latvijas politikas veidotāju pieņemtajiem lēmumiem.

Šī nodevuma 1. nodaļā sniegta vispārīga informācija par energosistēmas attīstības plānošanas un optimizācijas uzdevumu, tā nozīmi, sarežģītību un scenāriju metodes izmantošanu uzdevuma risināšanā. Norādīts, ka uzdevuma nostādne ir ļoti atkarīga no lēmuma pieņēmēja līmeņa un konkrētiem mērķiem. Uzskaitīti dažādiem lēmumu pieņēmējiem raksturīgie uzdevumi un to atrisināšanā izmantojamie galvenie ierobežojumu veidi. Aprakstīta energosistēmas attīstības plānošanas uzdevuma specifika.

Savukārt 2. nodaļā aplūkota RTU Enerģētikas institūta izvēlētā metodika projekta “FutureProof” darba posma WP1 turpinājumam un izklāstīts tās lietojums konkrēti Latvijas energosistēmas (un Baltijas valstu) attīstības scenāriju modelēšanā. Izvēlēta divpusēja pieeja:

- atvērtā koda energosistēmu modelēšanas vide *Backbone*, ko izstrādājuši pētnieki no *VTT Technical Research Centre of Finland* Somijā un *University College Dublin* Īrijā. Paredzēts šo viegli pielāgojamo vidi izmantot, lai izstrādātu Baltijas energosistēmai atbilstošus modeļus un imitētu tās attīstības scenārijus līdz pat 2050. gadam;
- uz RTU Enerģētikas institūta līdzšinējo plašo pieredzi balstītais modeļu komplekss, kas pielāgots Baltijas valstu energosistēmu modelēšanai.

Abos gadījumos detalizēti modelēt paredzēts tikai Baltijas valstis, ņemot vērā lielāko elektrostaciju un patērētāju/ražotājlietotāju īpatnības, siltumenerģijas pieprasījumu un tamlīdzīgus faktorus. Pārējās reģiona valstis (piemēram, Somija, Zviedrija, Polija) tiek modelētas, ņemot vērā starpsavienojumu ierobežojumus un prognozēto elektroenerģijas cenas dinamiku attiecīgajos tirdzniecības apgabalos.

2. nodaļas nobeigumā doti sākotnējie scenāriju veidošanai izmantojamo procesu izmaiņu ātruma pieņēmumi un dažādu ģenerācijas avotu īpatsvara energosistēmā prognožu robežvērtības, kas tiks izmantotas turpmākajā modelēšanā.

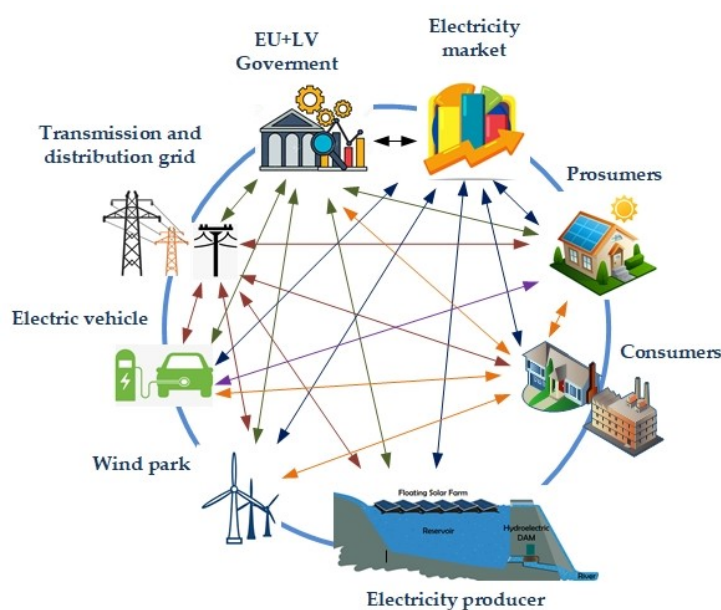
1. Energosistēmas attīstības plānošanas optimizācijas uzdevums

1.1. Attīstības mērķi un uzdevumi

Kā izriet no Eiropas Savienības (ES) un tās dalībvalstu nacionālajiem enerģētikas un klimata politikas plānošanas dokumentiem, kuri detalizētāk aplūkoti projekta “FutureProof” nodevumā D1.1, enerģētikas nozares attīstībā ES un tās dalībvalstīs izvirzījušās šādas galvenos vispasaules mērogā atzītus mērķus:

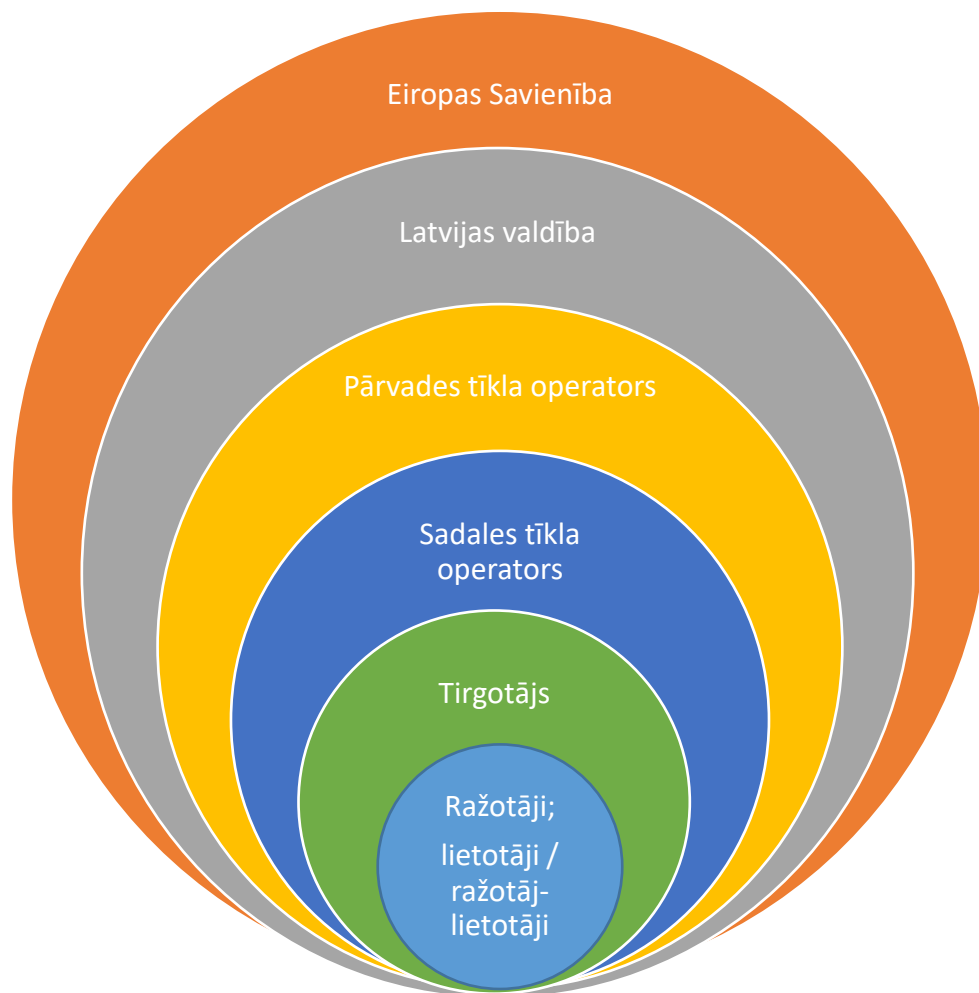
- efektīva enerģijas piegāde lietotājiem;
- droša un pastāvīga energoapgāde;
- ietekmes mazināšana uz vidi un klimata izmaiņām;
- ilgtspējas nodrošināšana.

Apzinoties minēto mērķu nozīmīgumu, starptautiskā līmenī ir noslēgtas vienošanās par atjaunīgo energoresursu izmantošanu, ogļu un atomelektrostaciju būvniecības ierobežošanu, energosistēmu restrukturizāciju un liberalizāciju, primāro energoresursu diversifikāciju, tirgus mehānismu izmantošanu energosistēmu attīstības un darbības vadībā. Lai īstenotu šos lēmumus, rodas nepieciešamība būtiski mainīt energosistēmu struktūru (1.1. att.), attīstības plānošanu un darbību. Energosistēmu restrukturizācijas un liberalizācijas rezultātā energoapgādes monopoluzņēmumi tika aizstāti ar (vairāk vai mazāk) neatkarīgiem uzņēmumiem, kas tiecas palielināt savus ieguvumus, izmantojot citu energoapgādes procesa dalībnieku iespējas un ņemot vērā tirgus apstākļus un konkurences esamību. Strauji pieaug tādu izkliedētu enerģijas avotu, kuri pieder enerģijas lietotājiem (kas tādējādi kļūst par ražotājlietotājiem). Jaunie apstākļi nosaka būtiskas izmaiņas energosistēmu attīstības plānošanā kopumā, tostarp elektrostaciju, elektrisko tīklu izbūves un ražotājlietotāju izveides plānošanā.



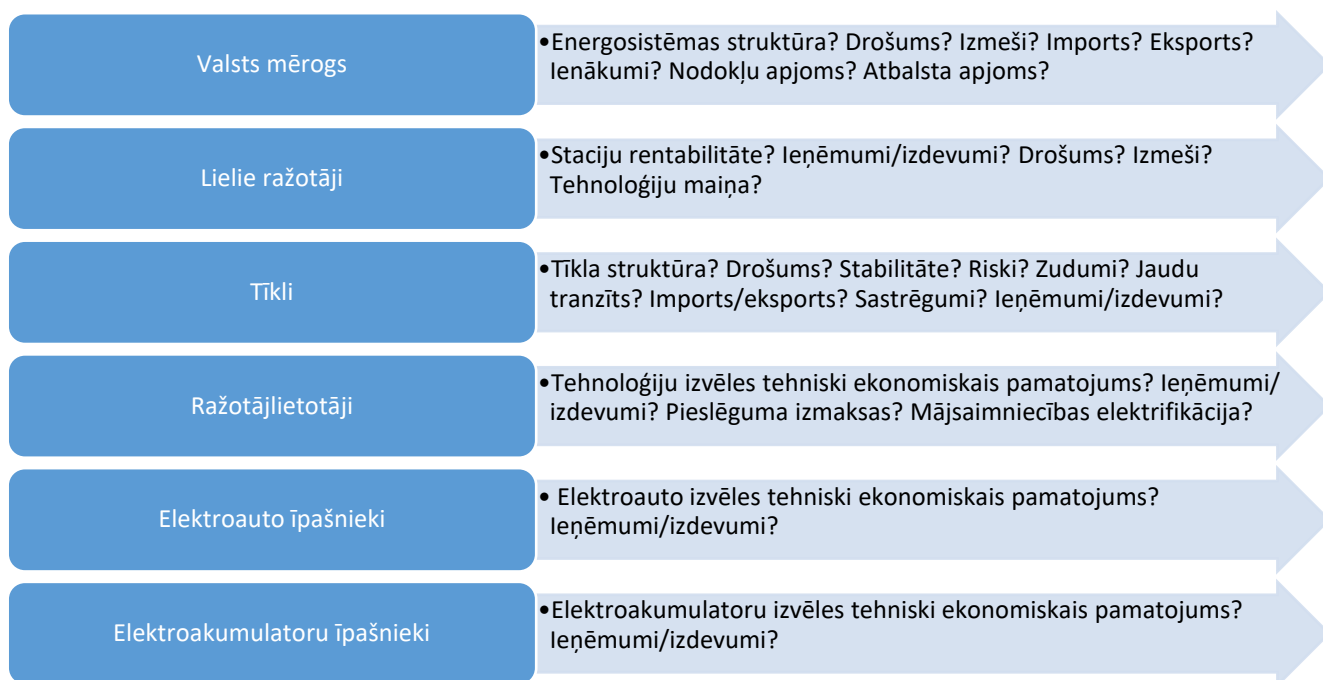
1.1. att. Vispārīga energosistēmas struktūra

Lēmumi tiek pieņemti dažādos līmeņos (1.2. att.), modelējot nākotnes energosistēmas un tās elementu darbību, balstoties uz virkni enerģijas ražošanas un patēriņa, ietekmes uz klimatu, primāro energoresursu izmantošanas un izmaksu prognozēm nākotnē. Turklāt šā procesa ietvaros tiek meklēts labākais attīstības variants. Jāpiebilst, ka 1.1. att. un 1.2. att. ilustrācijas ir vienkāršotas; tajās nav parādītas, piemēram, kaimiņvalstu energosistēmas, centralizētās siltumapgādes sistēmas, gāzapgādes tīkli u. tml.



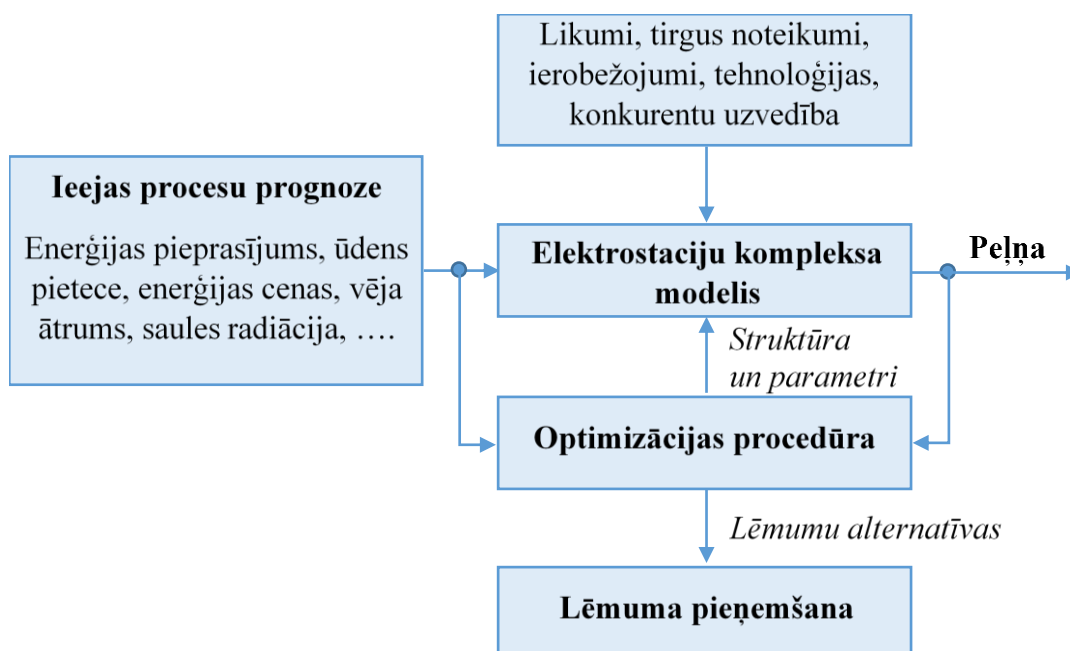
1.2. att. Lēmumu pieņēmēji enerģētikas attīstības plānošanā

Lai varētu izvēlēties labāko attīstības variantu, jāveic attīstības plānošanas uzdevuma matemātiska formulēšana, aprakstot attīstības optimizācijas mērķus un ņemot vērā tehniskos, ekonomiskos un juridiskos ierobežojumus, kā arī pieejamās vai plānotās tehnoloģijas. Uzdevuma nostādne ir ļoti atkarīga no lēmuma pieņēmēja līmeņa un konkrētiem mērķiem. Dažādiem lēmumu pieņēmējiem raksturīgi uzdevumi ir redzami 1.3. att.



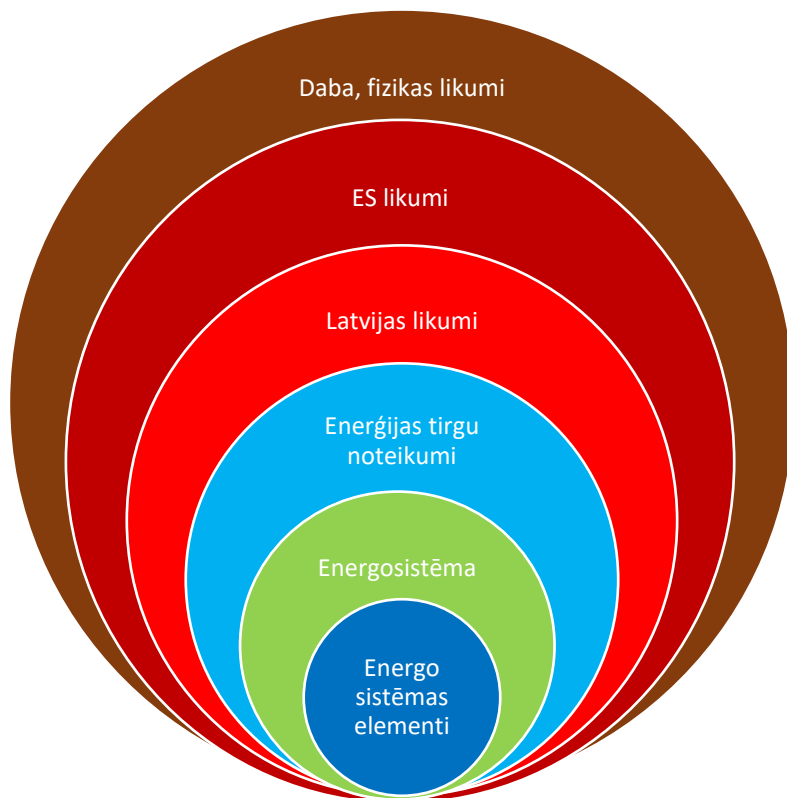
1.3. att. Attīstības uzdevumu risinātāji un uzdevumu risināšanas mērķi

Attīstības lēmumu pieņēmēji un iespējamie uzdevumi ir daudzveidīgi, bet tajā pašā laikā vairākumā gadījumu nepieciešams novērtēt ekonomiskos radītājus, piemēram, naudas plūsmas neto pašreizējo vērtību (NPV) un jebkura gada ieņēmumus/izdevumus, kas ļauj dažādiem uzdevumiem izmantot vienotu pieeju un līdzīgus algoritmus. Vispārināta algoritma struktūra elektroenerģijas ražošanas optimizācijas gadījumā dota 1.4. attēlā.



1.4. att. Attīstības plānošanas uzdevuma risināšanas algoritma struktūras piemērs

Meklējot labākos attīstības variantus, ir jāņem vērā virkne ierobežojumu (1.5. att.) Pirmām kārtām nedrīkst pārkāpt fizikas likumus. Tāpat jāievēro lēmumi, kas pieņemti Eiropas Savienības un valsts līmenī. Jāņem vērā arī tirgus noteikumi, kā arī energosistēmas un tās tīklu tehniskie ierobežojumi.



1.5. att. Galvenie ierobežojumu veidi energosistēmas attīstības uzdevumos

1.2. Scenāriju metode

Ilgttermiņa prognozēšana, vairāku lēmuma pieņemēju esamība un citi apsvērumi izraisa nenoteiktības, kuru ietekmes novērtēšanai un analīzei plaši tiek izmantota **scenāriju metode**. Šajā gadījumā ietekmējošo procesu (parasti gadījumprocesu) dinamika tiek uzdots scenāriju veidā, un uz to pamata tiek meklēti labākie attīstības varianti (alternatīvas) katrā scenārijā. Lai nodrošinātu labākā attīstības varianta izvēli, tiek formulēti optimizācijas uzdevumi, kurus atrisinot tiek iegūtas vairākas attīstības alternatīvas. Rezultātā tiek iegūti daudzi “labākie” risinājumi, bet nav zināms konkrēts attīstības scenārijs. Galīgo izvēli veic lēmuma pieņēmējs, novērtējot nepareizas scenārija izvēles sekas (riskus). Energosistēmu attīstības plānošanā šis uzdevums sarežģās vairāku mērķu un milzīga lēmuma pieņemēju daudzuma esamības dēļ (piemēram, jebkurš enerģijas lietotājs var ietekmēt energosistēmas attīstību). Lēmumu pieņemēju mērķi un uzdevumi parasti ir dažādi un savstarpēji atkarīgi.

Tādējādi scenāriju metode ietver kā kvalitatīvu, tā kvantitatīvu analīzi. Šī pieeja ļauj ne tikai analizēt notikumu attīstības iespējas nākotnē, bet arī novērtēt konkrēta risinājuma (alternatīvas) izvēles sekas. Parasti uzdevuma risināšanai tiek izveidoti vairāki scenāriji, kuros

tiek ņemta vērā dažādu ārējās un iekšējās vides faktoru ietekme. Izmantojot scenāriju metodi energosistēmas nākotnes attīstības modelēšanā, var nošķirt piecus galvenos soļus:

- 1) galveno pieņēmumu, parametru un procesu, kā arī to nenoteiktību identifikācija;
- 2) energosistēmas modelēšanas metodikas izstrāde;
- 3) potenciālo nākotnes attīstības scenāriju definēšana;
- 4) energosistēmas attīstības modelēšana izvēlētajos scenārijos;
- 5) modelēšanas rezultātu analīze, kuras rezultātā var tikt pieņemts lēmums modificēt modelējamās scenārijus vai mainīt izmantojamās pieņēmumus un parametrus un veikt atkārtotu modelēšanu.

Kā tika secināts projekta "FutureProof" nodevumā D1.1, izstrādājot valsts elektroenerģētikas nozares attīstības plānus, būtiski ir ņemt vērā gan pasaules ekonomikas prognozes un enerģētikas attīstības tendences, gan kaimiņvalstu un citu tuvāku valstu pašreizējo situāciju un nākotnes attīstības plānus. Jo īpaši svarīgi tas ir tāpēc, ka mūsdienās Eiropas valstu elektroenerģijas tirgi lielākoties ir labi integrēti un paredzams, ka Latvijas elektroenerģijas tirgus integrācija ar Baltijas jūras reģiona un citām Eiropas valstīm kļūs arvien ciešāka. Latvijas un citu Baltijas valstu elektroenerģijas pārvades attīstību šobrīd virza pieņemtais lēmums par sinhronizāciju ar kontinentālās Eiropas elektrosistēmu, kas jāuzsāk ne vēlāk kā 2025. gadā. Projekts ietver jaunu starpsavienojuma izbūvi, iekšējo pārvades tīklu uzlabojumus un jaunu iekārtu izbūvi, kas nepieciešamas stabilas un sabalansētas elektrosistēmas darbības nodrošināšanai. Desinhronizācijas projekta kontekstā īpaši nozīmīgs ir Baltijas valstu energosistēmas jaudu nodrošinājums turpmākajos gados un spēja darboties arī izolētā režīmā. Līdz šim Baltijas valstu salīdzinoši mazo energosistēmu stabilitāti nodrošināja Krievijas energosistēma.

1.3. Energosistēmas attīstības plānošanas uzdevuma specifika

Pieņemot attīstības lēmumus, ir jāņem vērā visi četri nodaļas sākumā minētie globālie energosistēmu attīstības mērķi. No tā izriet **pirmā svarīgā īpatnība: energosistēmas attīstības plānošana ir daudzkritēriju uzdevums**. Jāpiebilst, ka globālie mērķi var būt dažādi formulēti, katra mērķa aprakstam izmantojot vairākus indikatorus. Tā rezultātā galīgā lēmuma pieņemšana sarežģās vēl vairāk.

Daudzkritēriju uzdevumu risināšanai izmanto dažādas metodes¹. Trīs visplašāk izmantotās pieejas:

- 1) viena kritērija izvēle optimizācijas uzdevuma mērķfunkcijas formulējumā. Pārējos kritērijus izmanto optimizācijā kā ierobežojumus;
- 2) integrālas mērķfunkcijas formulējums. Šajā gadījumā optimizācijas mērķfunkcijā visi kritēriji tiek apvienoti, izmantojot svāra koeficientus. Tieši šo koeficientu izvēle rada vislielākās grūtības;
- 3) Pareto (kompromisu) kopas noteikšana, ko pēc tam var izmantot lēmumu pieņēmēji.

¹ Iljina, Inga. *Ierobežojumu un atbalsta ietekme uz elektroenerģijas tirgu, cenām un režīmiem*. Promocijas darbs. Rīga: [RTU], 2017. 197 lpp.

Šajā pētījumā turpmāk paredzēts izmantot pirmo un trešo pieeju. Turklāt īpaša uzmanība tiks veltīta ierobežojumiem, kuru vērtības var uzdot ar scenāriju palīdzību.

1.3.1. Optimizācijas mainīgie un parametri

Risinot energosistēmas optimizācijas uzdevumus, ir jāizvēlas daudzi energosistēmas struktūru un režīmu noteicošie parametri, piemēram: nodokļu apmērs, primārie energoresursi, ģeneratoru aktīvā un reaktīvā jauda, transformatoru nominālā jauda, sprieguma līmeņi, rezervju sastāvs un jauda u. c. Šie parametri ir laikā mainīgi, tostarp atkarīgi no enerģijas pieprasījuma un citiem ietekmējošiem apstākļiem. Rezultātā pat nelielas energosistēmas gadījumā ir jāizvēlas vairāki tūkstoši optimizācijas mainīgo.

Bez jau minētajiem parametriem, no kuriem daļa ir nepārtraukti lielumi, energosistēmas vadības procesā var tikt mainīta tās struktūra, būvējot vai demontējot, ieslēdzot vai atslēdzot tādas iekārtas kā ģeneratori, transformatori, reaktori. Ieslēgšanu/atslēgšanu var aprakstīt ar loģiskajiem (Būla) mainīgajiem, kuri var pieņemt tikai divas vērtības, proti 0 vai 1. Rezultātā mainās arī uzdevuma matemātiskais apraksts. Gadu gaitā parādās jaunas tehnoloģijas, mainās pieejamo iekāru parametri. Pat nelielas energosistēmas gadījumā, ņemot vērā, ka mainīgie var būt atšķirīgi dažādos laika momentos, ir jāveic milzīgs skaits struktūru un to kombināciju darbības iespēju novērtējumu. Piemēram, 30 ģeneratoru gadījumā, plānojot režīmu 168 stundām (nedēļai), struktūru skaits teorētiski ir $N = 5040!$ (faktoriāls).

Tādējādi varam formulēt **otro īpatnību – energosistēmas vadība ir daudzparametru uzdevums ar lielu nepārtraukto un loģisko mainīgo skaitu**. Loģisko mainīgo kombināciju skaits ir milzīgs. Uzdevumu iespējams vienkāršot, izmantojot scenāriju metodi.

1.3.2. Nenoteiktie un varbūtiskie mainīgie

Energosistēmu darbību būtiski ietekmē daudzi faktori, kuriem piemīt varbūtisks raksturs (aprakstāms ar mainīgo ar varbūtību sadalījuma funkciju) vai nenoteiktība (nav informācijas sadalījuma funkcijas pamatotai izvēlei). Šādu faktoru esamību lielā mērogā izraisa tas, ka režīmu plānošana, vadība un optimizācija daudzos gadījumos notiek, ņemot vērā nākotnes stāvokli. Nākotnes enerģijas pieprasījums, ūdens pieplūde, ārgaisa temperatūra, energoiesēju cenas var prognozēt tikai ar ierobežotu precizitāti. No tā izriet **trešais apgalvojums – energosistēmas vadība ir stohastisks optimizācijas uzdevums**, kura risināšanai plaši izmanto scenāriju metodi.

1.3.3. Energosistēmas vadība kā spēle

Mūsdienu energosistēmas strādā apstākļos, kuri ietver sevī daudzus lēmuma pieņēmējus/spēlētājus. Elektrostacijas pieder dažādām kompānijām. Tirgu ietekmē enerģijas tirgotāju lēmumi. Lietotāji apzināti var izvēlēties sev izdevīgu režīmu vai pat kļūt par ražotājlietotāju, izveidojot izkliedētas ģenerācijas avotu.

Konkurentu lēmumi var būt citiem spēlētājiem labvēlīgi vai nelabvēlīgi. Informācija par pieņemtajiem lēmumiem kļūst zināma tikai *post factum*. Atsevišķos gadījumos spēlētājiem var

rašties iespēja apvienoties – veidot koalīciju (kooperatīvu), apmainīties ar informāciju, saskaņot lēmumus, lai tādējādi gūtu papildu peļņu vai ietaupījumus. Kā piemēru tam var minēt ražotājlietotāju un/vai lietotāju veidotas energokopienas.

Būtiski piebilst, ka apskatāmās situācijas aprakstam, ņemot vērā cilvēka darbības un ietekmi, daudzos gadījumos nav iespējams tiešā veidā izmantot varbūtisko pieeju. Tādējādi varam formulēt **ceturto apgalvojumu: energosistēmas vadība notiek apstākļos, kurus būtiski ietekmē konkurentu un partneru rīcība**, kuras aprakstu var veidot scenāriju veidā.

1.3.4. Ietekmējošo procesu dimensionalitāte un korelācija

Kā jau norādīts, apskatāmo uzdevumu ietekmē daudzi nenoteikti vai varbūtiski (stohastiski) laikā mainīgi parametri. Šīs izmaiņas var aprakstīt, izmantojot gadījumprocesus. Turklāt, to darot, jāņem vērā saikne starp dažādiem procesiem (korelācija). Piemēram: āra temperatūras sasaiste ar slodzi dažādos mezglos, ūdens pieplūdi upēs vai siltuma pieprasījumu. Aprakstot procesus, ir jāņem vērā arī savstarpējā atkarība starp viena procesa vērtībām dažādos laika momentos (paškorelācija). No tā izriet **piektā īpatnība: energosistēmas režīmus ietekmē daudzdimensionāli, laikā un mainīgo telpā sarežģīti saistīti gadījumprocesi**. Arī šādu procesu vienkāršotam aprakstam var izmantot scenāriju pieeju.

1.3.5. Lēmumu pieņemšana laika intervālos

Plānojot attīstību, nepieciešams sastādīt nākotnes plānu, kura izveidošanas un realizācijas gaitā var veikt izmaiņas. Plānošana prasa ietekmējošo procesu prognozēšanu gadiem uz priekšu. Atbilstoši elektroenerģijas tirgus darbības pamatprincipiem enerģijas cenas kopā ar ģenerācijas un pieprasījuma apjomiem mainās katru stundu, atkarībā no kā ik stundu mainās energosistēmas režīms. Tamdēļ nepieciešamas mainīgo prognozes ar stundas vai augstāku izšķirtspēju. Šīs prasības realizēšana būtiski ietekmē optimizācijas uzdevumu, padarot to sarežģītāku. Tādējādi varam noformulēt **sesto apgalvojumu: energosistēmas vadība ir daudzsoļu uzdevums**.

1.3.6. Ierobežojumi

Optimizācijas uzdevumos ir sastopami dažādu veidu ierobežojumi, piemēram:

- 1) juridiski ierobežojumi, ko nosaka ar ES vai valsts nacionālie normatīvi un standarti;
- 2) tehniski ierobežojumi, ko nosaka izmantojamo tehnoloģiju darbības principi un dažādu rādītāju robežvērtības;
- 3) ekonomiski ierobežojumi.

Juridiskos ierobežojumus var uzdot dažādos lēmumu pieņēmēju līmeņos. Tehniskos ierobežojumus parasti var aprakstīt ar vienādībām vai nevienādībām, kuru skaits, parametru nenoteiktība un sarežģītība var prasīt scenāriju metodes izmantošanu. Ir iespējami gadījumi, kad ierobežojumu izpildes pārbaude veido atsevišķu sarežģītu problēmu. Kā piemēru var minēt augstsprieguma līniju pieļaujamās jaudas plūsmas ierobežojumus, kuru pārbaude prasa visas sistēmas darbības modelēšanu un imitāciju. Vēl sarežģītāka ir stabilitātes ierobežojumu

pārbaude, jo ir nepieciešams modelēt ne tikai pamatiekārtu darbību, bet arī energosistēmas vadības automātiku (regulatorus, relejaizsardzību, pretavārijas automātiku).

1.3.7. Dimensionalitātes lāsts²

Energosistēmas vadības optimizācijas uzdevumu teorētiski var atrisināt ar daudzu zināmu algoritmu palīdzību. Diemžēl praktiski daudzos gadījumos tas prasītu pārlietu lielus resursus gan laika, gan skaitļošanas jaudas ziņā. Skaitļošanas resursu pieprasījuma pieaugumu nosaka šādi apstākļi:

- milzīgs iespējamo energosistēmas struktūru skaits;
- gadījumprocesa dimensionalitāte un nepieciešamība ņemt vērā to korelāciju un paškorelāciju;
- uzdevuma nelinearitāte un liels optimizācijas mainīgo skaits;
- liels ierobežojumu skaits un to pārbaudes sarežģītība.

Arī dimensionalitātes problēmas risināšanai var izmantot scenāriju metodi.

² Angļu val. – *course of dimensionality*.

2. Latvijas energosistēmas nākotnes attīstības scenāriju modelēšana

Projekta līdzšinējās izpildes gaitā identificētas divas pieejas energosistēmas modelēšanai un tās attīstības scenāriju analīzei, kuru paralēls lietojums ļautu gan savstarpēji validēt iegūtos rezultātus, gan institūtam turpmāk attīstīt savu modelēšanas rīku bāzi. Šis aspekts ir īpaši nozīmīgs projekta turpmākajās izpildes stadijās, bet vēl lielākā mērā – tā rezultātu izmantošanas veicināšanā pēc projekta beigām, sagatavojot pieteikumus jauniem pētījumiem kā nacionālā mērogā, tā starptautisku pētniecības institūciju sadarbības kontekstā. Turpmāk šajā nodaļā ir dots abu iecerēto pieeju konspektīvs apraksts, tostarp izceļot to kopīgās un nozīmīgi atšķirīgās iezīmes.

2.1. Energosistēmu modelēšanas vide Backbone

*Backbone*³ ir atvērta koda (*Open Source*) energosistēmu modelēšanas vide un programmatūra, kuru pēdējos gados ir izstrādājuši un turpina attīstīt pētnieki no *VTT Technical Research Centre of Finland* Somijā un *University College Dublin* Īrijā. *Backbone* pirmkods ir brīvi pieejams *VTT GitLab* repozitorijā⁴.

Tiesa gan, modeļa kods ir rakstīts *GAMS*⁵ modelēšanas valodā, kuras pilnvērtīgai lietošanai ir nepieciešams iegādāties licenci. Brīvpieejas versijā *GAMS* var izmantot ar ierobežotu matemātisko mainīgo skaitu, kas ir energosistēmu modelēšanu apgrūtināošs ierobežojums. Tāpēc, lai varētu pilnvērtīgi izmantot *Backbone*, RTU Enerģētikas institūtā ir iegādāta *GAMS* licence akadēmiskās izpētes veikšanai.

Backbone ir specifiskām izpētes vajadzībām viegli pielāgojams energosistēmu modelēšanas ietvars, kas ļauj veidot modeļus gan energosistēmu darbības, gan to attīstības pētniecībai. Turklāt tajā iespējams realizēt gan tā saucamos režīmu plānošanas (*unit commitment*), gan ilgtermiņa investīciju plānošanas modeļus. Turklāt, lai gan primāri *Backbone* veidots elektroenerģijas sistēmu modelēšanai, tā labi vispārinātā uzbūve un struktūra ļauj definēt un modelēt daudzu dažādu enerģijas veidu sistēmas un to savstarpējo mijiedarbību (piemēram, siltumapgādi, gāzapgādi, transportu utt.). Tajā iespējams iekļaut lielu skaitu dažādu nozīmīgu parametru un pēc vajadzības pielāgot un variēt modeļa detalizācijas pakāpi, tostarp paredzot stohastiskus mainīgos, dažāda veida rezervju nodrošināšanu, enerģijas akumulācijas tehnoloģijas un dažāda veida enerģijas pārveidi un pārnesi. *Backbone* matemātiskais formulējums ir balstīts uz jaukto veselo skaitļu (*mixed integer*) programmēšanu.

³ Helistö, N.; Kiviluoma, J.; Ikäheimo, J.; Rasku, T.; Rinne, E.; O'Dwyer, C.; Li, R.; Flynn, D. Backbone—An Adaptable Energy Systems Modelling Framework. *Energies* 2019, 12, 3388.

Pieejams: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3388>

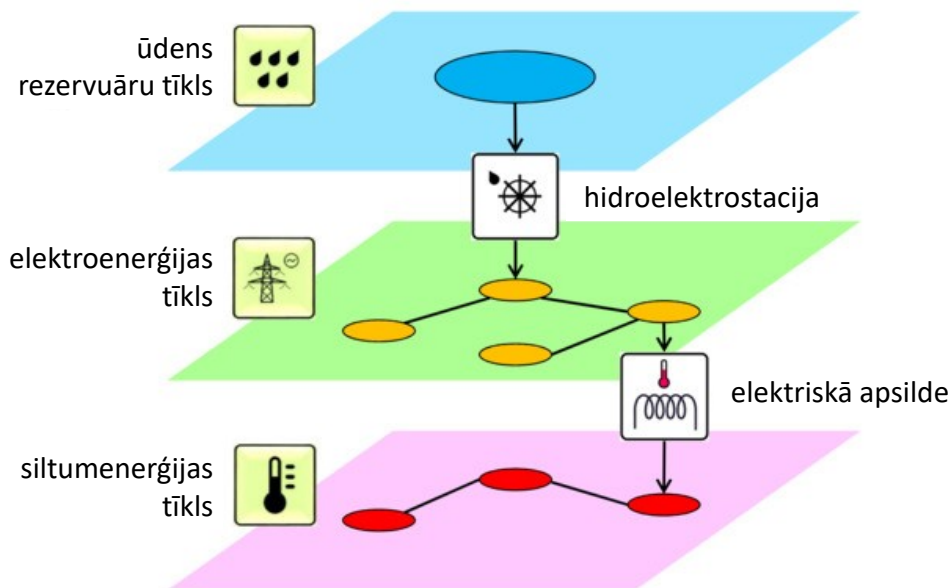
⁴ Pieejams: <https://gitlab.vtt.fi/backbone/backbone>

⁵ *GAMS – General Algebraic Modeling System* – Vispārējā algebriskās modelēšanas sistēma. Vairāk informācijas pieejams: <https://www.gams.com/>

Backbone modelēšanas vidē enerģētikas infrastruktūru un tās komponentus attēlo ar tādiem modeļa struktūras elementiem kā tīkli (*grids*), mezgli (*nodes*), zari (*lines*) un vienības (*units*). Turpmāk īsi paskaidrota šo dažādo elementu nozīme un lietojums.

- **Tīkli** – dažādu mezglu kopums, kuriem visiem piemīt kāds vienojošais faktors, piemēram, enerģijas veids (kā elektroenerģija elektriskajam tīklam). Starp mezgliem, kas pieslēgti atšķirīgiem tīkliem, nav iespējama tieša enerģijas pārnese. Taču, ja viens un tas pats mezgls ir vienlaicīgi pieslēgts vairākiem tīkliem, tajā ir iespējama enerģijas pārveide, ja ir pieejama vienība, kas attiecīgo konversiju spējīga veikt. Piemēram, ja kādam mezglam pievienota koģenerācijas stacija un šis mezgls savukārt ir pieslēgts gan elektriskajam, gan siltumapgādes, gan gāzapgādes tīklam, tad tajā var modelēt enerģijas pārveidi no gāzes uz elektrību un siltumu. Tādējādi iespējams realizēt enerģijas pārnesi starp dažāda veida tīkliem.
- **Mezgli** – modeļa struktūras svarīgākie elementi, kuros katrā ir jāizpildās enerģijas balansam (t. i., pievadītās un aizvadītās enerģijas summai ir jābūt nulle, tostarp ņemot vērā pārveides zudumus). Mezgliem ir iespējami dažādi svarīgi papildu parametri un iespējas, piemēram, enerģijas akumulācija, rezervju nodrošināšana un arī enerģijas “pārplūde” jeb izvadīšana ārpus modeļa (lietderīgi, piemēram, ja nepieciešams ņemt vērā iespēju izmantot HES aizsprosta pārgāznes liekā ūdens aizvadīšanai).
- **Zari** jeb līnijas – savienojumi starp diviem mezgliem. Tiem piemīt vairākas modelēšanā nozīmīgas īpašības. Vadāma enerģijas pārnese (vienpusēja vai divpusēja) ļauj modelēt enerģijas plūsmu starp mezgliem, turklāt, izmantojot dažādus parametrus, var modelēt enerģijas pārneses spēju robežas. Nepieciešamības gadījumā zaros var modelēt arī difūziju jeb nekontrolētu enerģijas pārnesi starp mezgliem.
- **Vienības** – modeļa struktūras elementi, kuros tiek “radīta” vai patērēta enerģija, kā arī notiek tās pārveide no viena veida tīkla uz citu. Var modelēt gan tādas vienības, kas spēj enerģiju ražot bez degvielas/kurināmā, gan tādas, kurām nepieciešams kurināmais, kuram savukārt ir nepieciešams izmaksu parametrs. Enerģijas patēriņš modelī ir īstenots kā enerģijas izvadīšana ārpus modeļa robežām. Attiecīgi patēriņš ir jānorāda kā negatīvs lielums. Kurināmo iespējams modelēt gan kā pilnībā ārpus modeļa esošu lielumu (tad tas, piemēram, pieejams neierobežotā apjomā), gan kā no cita modelī iekļauta tīkla ņemtu lielumu (tad jāievēro balanss šī tīkla mezglos), piemēram, ja gāze koģenerācijas stacijām tiek piegādāta pa ierobežotas caurlaides spējas gāzapgādes tīklu.

Backbone vidē realizējamo modeļu struktūru ilustratīvi ataino 2.1. attēls. Šajā piemērā dažādās plaknēs attēloti trīs dažādi tīkli – ūdens rezervuārs, elektroenerģijas sistēma un siltumenerģijas sistēma. Katrā tīklā ar ovāliem atzīmēti mezgli, kas savienoti ar zariem (līnijām). Mezgliem pievienotās enerģijas pārveides vienības nodrošina enerģijas pārnesi no viena tīkla uz citu. Piemēram, hidroelektrostacija pārveido enerģiju no ūdens rezervuāra tīkla mezgla uz elektroenerģijas tīkla mezglu. Analogiski elektroapsildes vienība modelī pārvada enerģiju no elektroenerģijas uz siltumenerģijas tīklu.



2.1. att. Backbone modeļa struktūras piemērs ar tīkliem, mezgliem, zariem un vienībām

Salīdzinot ar citiem energosistēmu analīzes paņēmieniem (piemēram, tādiem, kas realizēti ar *MARKAL/TIMES* grupas modeļiem), divas nozīmīgas *Backbone* modeļa priekšrocības ir (1) stohastiska pētāmā uzdevuma uzstādījuma iespējamība (tradicionāli ar dažiem izņēmumiem iepriekšminētie modeļi ir deterministiski) un (2) variējama modelējamā perioda izšķirtspēja laikā, tostarp iespējams izmantot pavisam mazus aprēķina soļus. Šis otrais aspekts ir svarīgs modelētās energosistēmas darbības režīmu pārbaudei, jo nereti tikai konkrētos laika brīžos var atklāties dažādas modelēto sistēmu īpatnības un ierobežojumi, kas var palikt neievēroti, ja aprēķinu solis ir vairāku nedēļu, mēnešu vai pat gadu garš. Turklāt, piemēram, lai veiksmīgi un ticami modelētu elektroenerģijas tirgu darbību un attīstību, minimālais modeļa aprēķinu solis (jeb izšķirtspēja) ir vismaz viena stunda, kas atbilst pašlaik izmantotajam norēķinu periodam nākamās dienas tirgū.

Vēl viena nozīmīga *Backbone* priekšrocība ir tas, ka, izmantojot to pašu modeļa struktūru un ieejas datus, ir iespējams veikt aprēķinus gan ar režīmu plānošanas uzdevumu (kad tiek optimizēta pieejamo enerģijas pārveides iekārtu darbība), gan tā saucamo investīciju plānošanas uzdevumu (kurā modelis ilgākā laika posmā drīkst “investēt” nepieciešamajos infrastruktūras uzlabojumos un jaunu ģenerācijas jaudu attīstībā ar noteiktiem nosacījumiem).

Modeļa mērķfunkciju iespējams izteikt šādi (ar p apzīmēti parametri, bet ar v – no optimizācijas mainīgajiem atkarīgie modeļa mainīgie):

$$v^{\text{obj}} = \sum_{\{f,t\} \in FT} p_{f,t}^{\text{probability}} \times (v_{f,t}^{\text{vomCost}} + v_{f,t}^{\text{fuelCost}} + v_{f,t}^{\text{startupCost}} + v_{f,t}^{\text{shutdownCost}} + v_{f,t}^{\text{rampCost}} + v_{f,t}^{\text{penalties}}) + v^{\text{stateValue}} + v^{\text{fomValue}} + v^{\text{unitInvestValue}} + v^{\text{lineInvestValue}},$$

kur pirmais saskaitāmais (ar summatoru) ietver sevī realizācijas varbūtību un dažādas izmaksas – mainīgās darbības un uzturēšanas izmaksas, kurināmā izmaksas, iekārtu palaišana, apturēšana, režīma maiņa un soda sankcijas par ierobežojumu pārkāpšanu, ja tāda ir atļauta; otrais saskaitāmais $v^{\text{stateValue}}$ ir mainīgais, kas ņem vērā izmaiņas mezglu stāvoklī (piemēram,

uzkrātās enerģijas samazinājumu), bet pēdējie trīs mainīgie tiek izmantoti investīciju modeļa aprēķinos un apzīmē fiksētās uzturēšanas izmaksas, kā arī investīciju izmaksas jaunu enerģijas pārveides vienību vai modeļa zaru (līniju) izveidē.

Lai gan *Backbone* modelēšanas vide ir samērā jauna, tā jau ir tikusi aprobēta vairākos pētījumos, modelējot, piemēram:

- Somijas energosistēmu līdz 2050. gadam⁶, lai novērtētu viedās elektriskās termoakumulācijas potenciālo ietekmi uz to;
- elektriskās apsildes un energoefektivitātes uzlabojumu ietekmi uz Somijas energosistēmu 2030. gadā⁷;
- Ziemeļvalstu energosistēmas⁸, lai novērtētu 15 dienu prognozēšanas ietekmi uz hidrotermālo režīmu izvēli;
- Īrijas energosistēmu⁹, lai aplēstu potenciālos notekūdeņu attīrīšanas staciju pieprasījuma reakcijas sniegtos ieguvumus;
- kā arī *IEEE* izstrādāto pārvades tīklu drošuma aplēses testa tīklu RTS-GMLC¹⁰.

Projekta “FutureProof” ietvaros modelēšanas vide *Backbone* izvēlēta kā perspektīva un noderīga scenāriju analīzes pieeja vairāku iemeslu dēļ. Daži no svarīgākajiem aspektiem ir tas, ka *Backbone* ir atvērtā koda programmatūra, turklāt tās brīvpiekļuves licence (*GNU Lesser General Public Licence version 3*) ļauj lietotājiem kodā brīvi veikt nepieciešamās modifikācijas savām vajadzībām, lai pielāgotu modeli konkrētam uzdevumam. Tāpat nozīmīgs faktors ir ciešā sadarbība starp modeļa autoriem *VTT*, *UCD* un *RTU* Enerģētikas institūta pētniekiem gan iepriekšējos, gan pašreizējos izpētes projektos, kas nodrošina iesākto iestrādņu turpinātību un tiešu saikni ar izstrādātājiem. No vienas puses, tas ļauj nepieciešamības gadījumā saņemt tehniskās konsultācijas no partneriem, un, no otras puses, *RTU* pētniekiem ietekmēt modeļa turpmāko attīstību un lietojamību Baltijas energosistēmu analīzei.

Projektā “FutureProof” paredzētais modeļa tvērums Baltijas energosistēmu analīzei ietver detalizētu Baltijas valstu elektroenerģijas sistēmu modelēšanu ar vienkāršotu ārējo starpsavienojumu reprezentāciju, kā arī siltumapgādes un gāzapgādes aspektu ievērošanu.

⁶ O'Dwyer, C., Anwar, M., Dillon, J., Bakhtvar, M., Buttitta, G., Andrade Cabrera, C., Baltputnis, K., Broka, Z., Kozadajevs, J., Sauhats, A., Rasku, T., Kiviluoma, J., Schill, W.-P., & Zerrahn, A. (2018). H2020 RealValue D3.6 Cost benefit analysis of SETS and alternative local small-scale storage options.

⁷ Rasku, T., & Kiviluoma, J. (2019). A comparison of widespread flexible residential electric heating and energy efficiency in a future Nordic power system. *Energies*, 12(1), 5. Brīvi pieejams: <https://doi.org/10.3390/en12010005>

⁸ Rasku, T., Miettinen, J., Rinne, E., & Kiviluoma, J. (2020). Impact of 15-day energy forecasts on the hydro-thermal scheduling of a future Nordic power system. *Energy*, 192, 116668.

Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116668>

⁹ Kirchem, D. Exploring demand-side flexibilities from wastewater treatment facilities in an integrated energy system. ESIPP Research Symposium 2018.

Pieejams: <https://esipp.ie/images/upload/1.4%20Dana%20Kirchem.pdf>

¹⁰ Helistö, N.; Kiviluoma, J.; Ikäheimo, J.; Rasku, T.; Rinne, E.; O'Dwyer, C.; Li, R.; Flynn, D. Backbone—An Adaptable Energy Systems Modelling Framework. *Energies* 2019, 12, 3388.

Brīvi pieejams: <https://doi.org/10.3390/en12173388>

2.2. RTU Enerģētikas institūta modelēšanas rīku komplekss

Otra Latvijas energosistēmas attīstības scenāriju analīzes metodoloģija, kas tiek realizēta projekta "FutureProof" energosistēmu attīstības, tirgus analīzes un risku novērtējuma darba posmu (WP1, WP3, WP4) ietvaros, ir bāzēta uz RTU Enerģētikas institūta līdzšinējo plašo pieredzi energosistēmu modelēšanā, kā arī uz pilnveidotiem un specifiskajiem mērķiem pielāgotiem institūtā izstrādātajiem modelēšanas rīkiem.

Galveno izmantojamo rīku kopums ir šāds:

- hidroelektrostaciju optimizācijas modelis *OptiBidus-HES*¹¹;
- termoelektrostaciju režīmu aprēķina modelis *OptiBidus-TEC*;
- vispārināts enerģijas akumulācijas modelis¹², kas pielāgojams dažāda veida tehnoloģijām, kā arī konkrēti Kroņu hidroakumulācijas elektrostācijas modelis¹³;
- elektroenerģijas tirgus (līdzsvara) cenas aprēķina metodika¹⁴;
- prognozēšanas modeļi, piemēram, ūdens pietecei¹⁵ un siltumslodzei¹⁶, u. c.

Dažādajos rīkos ietvertie matemātiskie modeļi tiek kombinēti vienotā reģiona energosistēmu modelī (REM). Šis modelis aptver Somiju, Zviedriju, Poliju un Baltijas valstis. Taču tikai Baltijas valstis tiek modelētas detalizēti, ņemot vērā lielāko elektrostaciju un patērētāju/ražotājlietotāju īpatnības, siltumenerģijas pieprasījumu un tamlīdzīgus faktoros. Pārējās reģiona valstis tiek modelētas, ņemot vērā starpsavienojumu ierobežojumus un prognozēto elektroenerģijas cenu dinamiku attiecīgajos tirdzniecības apgabalos. REM telpiskā struktūra ilustratīvi atainota 2.2. attēlā.

¹¹ A. Sauhats, R. Petrichenko, K. Baltputnis, Z. Broka and R. Varfolomejeva, "A multi-objective stochastic approach to hydroelectric power generation scheduling," *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Genoa, 2016, pp. 1-7. Pieejams: <https://doi.org/10.1109/PSCC.2016.7540821>

¹² A. Sauhats, H. H. Coban, K. Baltputnis, Z. Broka, R. Petrichenko, R. Varfolomejeva, "Optimal investment and operational planning of a storage power plant," *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 29, 2016, Pages 12443-12453, ISSN 0360-3199. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.078>

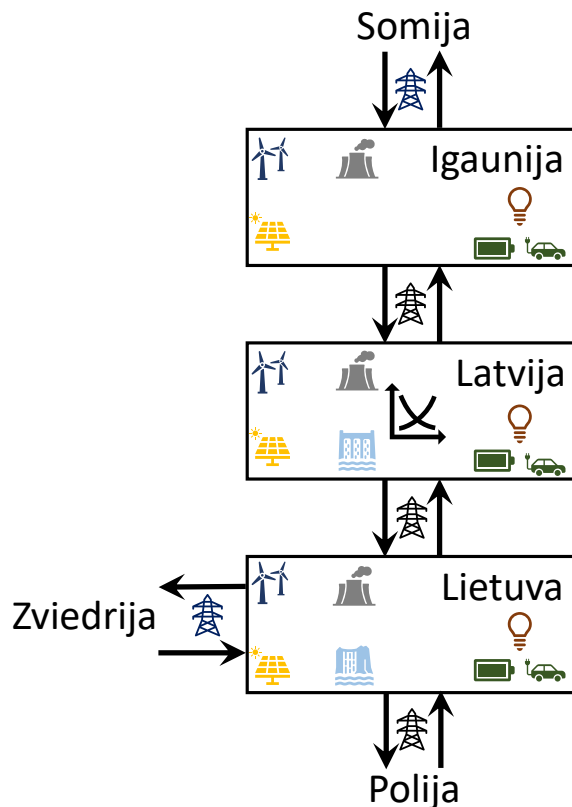
¹³ R. Petrichenko, L. Petrichenko, K. Baltputnis, A. Sauhats, S. Gudzius, A. Slivikas, "Selection of the initial state and duration of the planning period in the tasks of managing energy storage systems," *IEEE 61st International Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCon)*. (raksts pieņemts)

¹⁴ K. Baltputnis, "Decision-Making support methods, algorithms and tools for electricity market participants," promocijas darbs, RTU izdevniecība, 2020.

Pieejams: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/31253/attachments/6010>

¹⁵ A. Sauhats, R. Petrichenko, Z. Broka, K. Baltputnis and D. Sobolevskis, "ANN-based forecasting of hydropower reservoir inflow," *IEEE 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCon)*, Riga, 2016, pp. 1-6. Pieejams: <https://doi.org/10.1109/RTUCon.2016.7763129>

¹⁶ K. Baltputnis, R. Petrichenko and D. Sobolevsky, "Heating Demand Forecasting with Multiple Regression: Model Setup and Case Study," *IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Vilnius, 2018, pp. 1-5. Pieejams: <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2018.8592144>



2.2. att. REM telpiskās struktūras ilustratīva shēma

Vienotā modeļa pamatmērķis – Latvijas energosistēmas (un Baltijas valstu kopumā) attīstības ilgtermiņa scenāriju analīze un plānošana.

Attiecīgi REM kā kompleksam modelim ir virkne apakšmodeļu:

- 1) dažāda veida elektrostacijas (hidroelektrostacijas, tostarp Daugavas HES kaskāde, koģenerācijas stacijas (dabāsgāzes, biomasas, biogāzes), termoelektrostacijas, pārtraukumainie enerģijas avoti – vējš un saule);
- 2) dažādas veida enerģijas akumulācijas stacijas (tostarp hidroakumulācija);
- 3) enerģijas lietotāju un ražotājlietotāju patēriņa/izstrādes modeļi, kas izriet no prognozēšanas metodikas, ņemot vērā apkārtējās vides faktoru ietekmi;
- 4) pārvades elektrotīklu modeļi, taču vismaz pirmajās iterācijās katra valsts tiek atainota ar vienu mezglu, starp kuriem pastāv pārvades ierobežojumi. Pamatots pieņēmums par pietiekamu iekšējo elektrotīklu pārvades spēju ļauj šajā posmā neveikt detalizētu iekšējo tīklu modelēšanu;
- 5) dažādu laikrindu un parametru prognozēšanas modeļi, tostarp tādi, kas iepriekš jau aprakstīti nodevumā D2.1.
- 6) optimizācijas uzdevumu risinātāji jeb “solveri”.

REM tiek realizēts *MATLAB* programmēšanas vidē, tostarp izmantojot tajā pieejamos optimizācijas uzdevumu risinātājus. Savukārt datu ievade un izvade tiek īstenota, izmantojot *xlsx* failus, kurus iespējams rediģēt un nolasīt, cita starpā, ar plaši izplatīto lietojumprogrammu *Excel*.

Kopējais optimizācijas modelis REM sastāv no diviem apakšmodeļiem ar atšķirīgu temporālo struktūru – vidēja termiņa (divas nedēļas uz priekšu¹⁷) un ilgtermiņa (30 gadi uz priekšu). Ilgtermiņa modelēšana norit ar slidošu optimizācijas periodu (*rolling horizon*), izmantojot vidējā termiņa optimizācijas apakšmodeļi un ilgtermiņa datu kopas, proti, vidējā termiņa aprēķins tiek periodiski atkārtots, pakāpeniski virzoties laikā uz priekšu. Nav ne racionāli, ne nepieciešami veikt ilgtermiņa aprēķinu visam 30 gadu periodam pilnībā. Tā vietā jāizvēlas atsevišķi interesējoši gadi, kuriem veikt pilna gada aprēķinu ar stundas izšķirtspēju (piemēram, 2030., 2040. un 2050. gads).

Modeļa ieejā nepieciešamas gan dažādas ikstundas laiktrendas, gan sistēmu ietekmējoši parametri ar retāku izmaiņu raksturu, piemēram:

- elektroenerģijas tirgus cenas;
- apkārtējās vides temperatūra;
- vēja ātrums (noteiktās koordinātās/augstumā);
- ūdens pietece;
- siltumenerģijas pieprasījums pilsētās ar centralizēto siltumapgādi, kur izmanto koģenerācijas stacijas;
- saules staciju enerģijas izstrāde / saules radiācija;
- dabasgāzes un citu primāro energoresursu cenas;
- oglekļa emisiju cenas.

REM ietvaros esošo apakšmodeļu mērķfunkcijas ir balstītas galvenokārt uz:

- elektrostaciju peļņas maksimizēšanu;
- elektroenerģijas lietotāju izdevumu minimizēšanu.

Ideāla elektroenerģijas tirgus apstākļos abas šīs mērķfunkcijas būtu iespējams izpildīt vienlaicīgi, aizvietojot tās ar vienu mērķfunkciju, kas maksimizē tirgus dalībnieku kopējo labumu (vispārīgā gadījumā – minimizējot enerģijas izmaksas). Tomēr praksē dažādas tirgus nepilnības un tā dalībnieku darbība nepilnīgas informācijas apstākļos neļauj pilnībā atteikties no dažādo dalībnieku mērķu individuālas modelēšanas.

Modelim ir stundas izšķirtspēja. Attiecīgi kā optimizācijas mainīgie tajā ir visu vadāmo elektroenerģijas ražošanas un akumulācijas staciju katras stundas darba režīmi – izvēlētā stundas jauda¹⁸. Scenārijos ar pieaugošu patēriņa puses elastību arī noteikta daļa no katras stundas elektroenerģijas pieprasījuma kļūst par optimizācijas mainīgajiem.

Optimizācijas uzdevumu atrisināšanai tiek izmantoti *MATLAB* risinātāji, konkrētāk – lineārās programmēšanas procedūra. Taču liela nozīme aprēķinu gaitā ir arī mākslīgo neironu tīklu un polinomu aproksimācijas metodei, kas abas nepieciešamas vidējā termiņa prognožu sagatavošanai slidošā optimizācijas perioda ietvaros.

¹⁷ Šāds optimizācijas perioda izmērs izvēlēts atbilstoši Daugavas HES specifikai, kuru enerģijas akumulācijas spēja ir aptuveni atbilstoša divu nedēļu plānošanas periodam.

¹⁸ Ņemot vērā stundas izšķirtspēju (jeb aprēķinu soli), tas sakrīt ar stundā saražotās vai akumulētās enerģijas apjomu.

2.3. Abu modelēšanas metožu kopējās iezīmes un komplementārās atšķirības

Gan *Backbone* vidē realizētais modelis, gan RTU Enerģētikas institūta izstrādāto rīku komplekss (REM) aprēķinu rezultātā sniedz detalizētas laikrindas (pamatā ar stundas izšķirtspēju) par dažādo ģenerācijas un akumulācijas staciju darbību modelēto gadu griezumā un citus ar to saistītos parametrus. Rezultātu pēcāpstrādē tiek apkopoti svarīgākie lielumi, kas nepieciešami konkrēta apskatāmā jautājuma (vai scenārija) analīzei. Projekta “FutureProof” turpmākajos darba posmos analīzes veikšanai izvēlēti, piemēram, šādi aktuālāki rādītāji¹⁹:

- dažāda veida elektrostaciju un enerģijas akumulācijas staciju summārā izstrāde modelētā gada griezumā;
- šo staciju darbības rentabilitāte;
- elektroenerģijas tirgus cena;
- galalietotāju izdevumi par elektroenerģiju;
- valstu elektroenerģijas importa/eksporta apjomi un to izmaksas;
- oglekļa dioksīda izmešu apjoms.

Lai abu modeļu veiktspēju un aprēķinu rezultātus varētu pilnvērtīgi salīdzināt, tiem abiem iespēju robežās tiek izmantotas tās pašas ieejas datu kopas un ilgtermiņa prognozes. Tas attiecas uz tādiem parametriem kā nevadāmās ģenerācijas laikrindas, primāro energoresursu cenas, oglekļa dioksīda emisijas cenas, starpvalstu enerģijas pārvades ierobežojumi, enerģijas pieprasījums, ārējās vides apstākļi, ūdens pietece u. c.

Vēl viena kopīga modeļu iezīme ir spēja realizēt stohastisku pieeju apskatāmo uzdevumu risināšanā. Tas ļauj ņemt vērā nenoteiktības, kas saistītas ar nākotnes procesu prognozēšanu. Tāpat ir svarīgi ņemt vērā arī neprecizitātes, kas ir neizbēgamas energosistēmu ikdienas darbā, kā, piemēram, nebalanss energosistēmā neprecīzu pārtraukumainās ģenerācijas prognožu dēļ, kuru nepieciešams novērst, izmantojot vadāmās ģenerācijas avotus, akumulāciju vai vadāmo slodzi (balansēšanas procesa vai cita mehānisma ietvaros²⁰).

Jāpiebilst, ka atbilstoši projekta darba posmam WP4 (risku analīze) uzdevumiem atsevišķi optimizācijas modeļu piedāvātie energosistēmas darba režīmi vēlāk tiks padziļināti analizēti arī ar energosistēmas stabilitātes un drošuma aplēses modeļiem, lai pārbaudītu analizētos scenārijus arī no šādu risku viedokļa un aprēķinātu konkrētus drošuma u. c. indikatorus.

Viena no nozīmīgām *Backbone* un REM atšķirībām ir tāda, ka pirmais modelis jau paredz dažādu rezervju veidu modelēšanu energosistēmas režīmu optimizācijas uzdevumu risināšanā. Taču jāņem vērā, ka nepieciešamo rezervju apjoms tajā ir ieejas lielums un tādējādi atkarīgs no modelēšanas pieņēmumiem. Tāpēc padziļināta drošuma apsvērumu analīze būs jāveic abu modeļu piedāvātajos risinājumos.

¹⁹ Darba gaitā konkrēti indikatori var tikt mainīti vai papildināti, piemēram, ja tiek iegūti negaidīti vai būtiskus secinājumus veicinoši starprezultāti kādos citos modeļa aprēķinu posmos vai galarezultātu pēcāpstrādē.

²⁰ Vispārīgā gadījumā nebalansu energosistēmā novērš pārvades sistēmas operators, izmantojot balansēšanas resursu rezerves vai tirgus mehānismus. Taču nākotnē lielāka nozīme varētu būt arī pašbalansējošām darbībām, piemēram, ja pie vēja turbīnām ir uzstādītas enerģijas akumulācijas iekārtas, mazinot pārvades sistēmas operatora iesaisti.

Cita nozīmīga abu metožu atšķirība slēpjas pieņēmumos par tirgus darbību. *Backbone* modelis zināmā mērā paļaujas uz perfekta tirgus ideju, kas ļauj kopīgo energosistēmas dalībnieku režīmu optimizācijas uzdevumu atrisināt ar visai sistēmai vienotu mērķfunkciju, kura minimizē sistēmas kopējās izmaksas. Tā ir populāra un gan zinātniskajā vidē, gan nozarē plaši izplatīta enerģijas tirgus modelēšanas paradigma, taču tā lielā mērā balstās uz pieņēmumu par tādu katra individuālā tirgus dalībnieka rīcību, kas ir vislabākā visas kopējās sistēmas līmenī, pat ja tā nav konkrētajam spēlētājam optimāla. REM pieeja cenšas šo nepilnību ņemt vērā, atsevišķus tirgus dalībniekus modelējot arī individuāli.

Ir skaidrs, ka neviens modelis nekad neatainās reālo situāciju pilnīgi precīzi, tāpēc atšķirīgu modeļu izmantošana tā paša uzdevuma risinājumam ļauj gūt lielāku pārliecību par iegūto rezultātu uzticamību. Šī iemesla dēļ *Backbone* un REM sniegtie rezultāti ļaus iegūt pilnvērtīgāku ainu par aplūkotajiem attīstības scenārijiem. Turklāt šāda duāla pieeja ir ļoti efektīvs un labs veids, kā identificēt iespējamās slēptas kļūdas modeļu struktūrās vai nepilnības pieņēmumos, piemēram, ja abi modeļi pie vienādiem ieejas datiem un nosacījumiem dod pārmērīgi atšķirīgus rezultātus atsevišķos scenārijos vai kopumā. Tādējādi var veikt abu pieeju savstarpēju validāciju.

2.4. Modelējamie nākotnes scenāriji

Projekta izpildes gaitā modelējamie energosistēmas attīstības scenāriji galvenokārt izriet no dažādiem atšķirīgiem pieņēmumiem par nākotnē sagaidāmām izmaiņām energosistēmas struktūrā, ģenerācijas avotu jaudā un pieejamībā, resursu cenās u. tml. Attiecīgi dažādus analizējamus scenārijus var uzdot caur to atšķirīgajiem ieejas datiem aprēķinu modeļos. Tomēr visiem scenārijiem ir nozīmīgi vienoti pamatpieņēmumi. Kā piemērus var minēt šādus galvenos pamatpieņēmumus:

- Latvija ievēro Eiropas Savienības tiesību aktus un nacionālos mērķus klimata izmaiņu mazināšanā;
- no 2025. gada Baltijas energosistēmas ir desinhronizētas no apvienotās Krievijas un Baltkrievijas energosistēmas, tā vietā darbojoties sinhroni ar kontinentālās Eiropas sistēmu;
- elektroenerģijas vairumtirdzniecības pārliecinoši lielākā daļa turpina norisināties elektroenerģijas biržā nākamās dienas tirgū²¹;
- nav paredzama tādu videi nelabvēlīgu enerģijas avotu attīstība, kam piemīt lielas emisijas (piemēram, ogļu vai naftas izmantošana);
- notiek tautsaimniecības turpmāka elektrifikācija un pieaug elektroenerģijas pieprasījums;
- palielinās atjaunīgo energoresursu izmantošanas īpatsvars un apjoms;
- Latvijā tiek arī ilgtermiņā saglabāta esošā Daugavas hidroelektrostaciju kaskāde ar trim hidroelektrostacijām.

²¹ Atbilstoši *Nord Pool* darbības principiem. Būtībā ir iespējama un iedomājama arī citu tirgus operatoru ienākšana reģionā, bet tam nevajadzētu mainīt cenas noteikšanas principus, jo dažādu operatoru vadītie tirgi tomēr tiek savstarpēji integrēti.

Virkne pamatpieņēmumu izriet no iepriekš nodevumā D1.1 apskatītajiem ES dokumentiem, nacionālajiem un kaimiņvalstu attīstības plāniem un politikas uzstādījumiem, piemēram:

- Latvija cenšas izveidot tādu energosistēmu, kura ir spējīga nodrošināt savu elektroenerģijas pieprasījumu un arī pēc iespējas veikt enerģijas eksportu;
- Latvijas energosistēmai jābūt konkurētspējīgai ar citām reģiona valstīm enerģijas cenu ziņā;
- tiek saglabāts vai paaugstināts energoapgādes drošuma līmenis;
- tiek samazināti kaitīgie izmeši atmosfērā;
- tiek saglabāta pilsētu centralizētās siltumapgādes sistēma un koģenerācijas elektrostacijas;
- tiek attīstīti izklaidētie energoavoti, pirmām kārtām tādi, kas izmanto atjaunīgos energoresursus;
- tiek saglabāta gāzes piegādes un uzkrāšanas sistēma. Taču var samazināties dabasgāzes izmantošanas apjoms.

Šādi pamatpieņēmumi ļauj samazināt iespējamo ieejas parametru izmaiņu scenāriju telpu. Tomēr modelēšanā tāpat jāaplūko diezgan liels klāsts dažādu tehnoloģiju, kā

- enerģijas patēriņa pusē: elektroauto, elektriskā apkure, siltumsūkņi, ražotājlietotāji;
- ģenerācijas pusē: saules enerģija, vēja enerģija, konvencionālās spēkstacijas;
- akumulācijas tehnoloģijas: Daugavas HES rezervuāri, siltumakumulācija, elektroauto, elektroķīmiskie akumulatori;
- viedā sistēmu vadība: pretavāriju automātika.

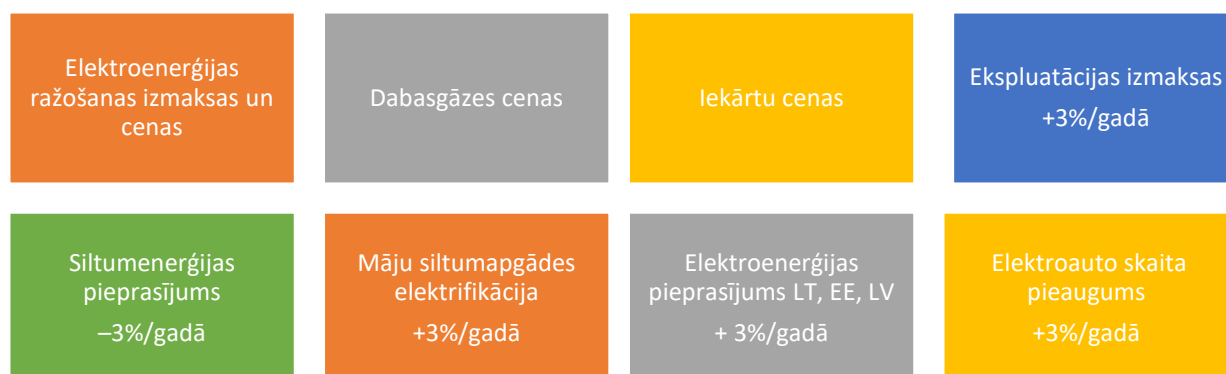
Katrai no pieminētajām tehnoloģiju grupām var būt arī vairākas apakš kategorijas, izšķirot dažādas konkrētas iekārtas vai sistēmas, kuras ražotāji piedāvā pašlaik vai kādas ir paredzamas nākotnē.

Kā tika paskaidrots iepriekš, energosistēmas nākotnes attīstības scenāriju modelēšanai nepieciešama virkne ieejas parametru (un to izmaiņas laikā), kuri iegūstami no iekārtu tehniskajiem rādītājiem, dažādu procesu prognozēm un pieņēmumiem par nākotnes norisēm.

Energosistēmas attīstību ietekmējošos parametrus (izmaiņas laikā), caur kuriem var definēt nākotnes attīstības scenārijus, var iedalīt četrās pamatgrupās:

- 1) izmaksas un cenas: piemēram, elektroenerģijas ražošanas izmaksas un tirgus cenas, gāzes u. c. primāro energoresursu cenas, iekārtu cenas un ekspluatācijas izmaksas;
- 2) tehnoloģiju izplatība un to parametri: hidroelektrostaciju, siltumelektrostaciju, vēja, saules un bioresursu elektrostaciju parametri, to uzstādītās jaudas, elektroauto izplatība, ražotājlietotāju izplatība, elektroapkures īpatsvars mājāsaimniecībās u. c.;
- 3) enerģijas pieprasījums Latvijā un kaimiņvalstīs: elektroenerģijas, siltumenerģija u. tml.;
- 4) dabas faktori: vēja ātrums, saules starojums, ūdens pietece upēs, gaisa temperatūra u. c.

Var secināt, ka izmantojamo ieejas parametru un procesu skaits ir ievērojams. Ja katru no šiem parametriem/procesiem aprakstītu ar vairāku scenāriju palīdzību, galu galā būtu nepieciešams apskatīt visas iespējamās to kombinācijas, kas novestu pie milzīga scenāriju skaita. Lai samazināt modelējamo kombināciju un scenāriju skaitu, pieņemam, ka lielāko daļa no procesiem var uzdot ar vienu scenāriju, kas sintezēts, balstoties uz esošo situāciju un uzdodot šī procesa izmaiņu ātrumu. Šāds piemērs ilustrēts 2.3. attēlā.



2.3. att. Scenāriju veidošanai izmantojamo procesu izmaiņu ātruma pieņēmumi (piemērs)

Augstās nenoteiktības dēļ elektroenerģijas, gāzes un tehnoloģiju cenu prognozes tiek aplūkotas atsevišķi. Palielināta nenoteiktība piemīt arī ģenerācijas jaudu un to izmantošanas faktoru attīstības prognozēm. Šo procesu attīstība tiks uzdota ar vairāku scenāriju palīdzību, kas nepārsniedz 2.4 attēlā atainotās robežvērtības.

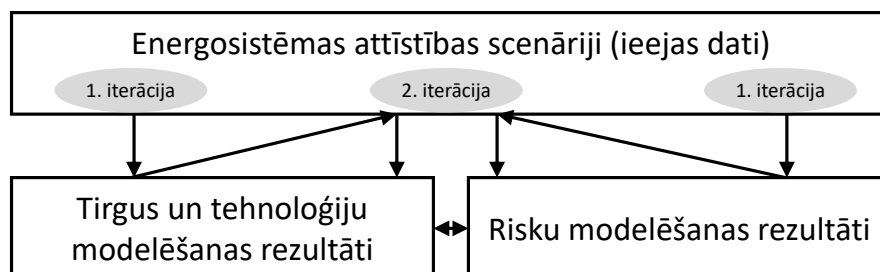


2.4. att. Ģenerācijas avotu uzstādītās jaudas īpatsvara robežvērtības energosistēmas attīstības scenāriju veidošanā

Daugavas HES kaskādes paplašināšana Latvijā netiek plānota, bet prognožu robežas uzdotas, izejot no vēsturiskajiem Daugavas pieteces datiem. Visiem citiem enerģijas ģenerācijas veidiem robežas uzdotas aptuveni un turpmākajā pētījuma gaitā var tikt mainītas.

Jāņem vērā, ka pagaidām šie ir tikai pirmie pirmšķietami izvēlētie attīstības scenāriju varianti. To galvenais mērķis ir kalpot par līdzekli aprēķinu modeļu veikspējas un rezultātu

lietderības pārbaudēm. Modelēšanas procesā, attīstot un pilnveidojot izvēlētās metodes, tiks konkrētāk izvēlēti un definēti tie scenāriji, kas ir ar vislielāko potenciālu sniegt vērtīgas atziņas darba posmu WP3 (tirgus un tehnoloģiju analīze) un WP4 (ilgtermiņa riski) izpildē, kā tas ilustratīvi attēlots 2.5 attēlā. Attiecīgi galīgo atjaunināto attīstības scenāriju kopu paredzēts iesniegt projekta noslēgumā nodevumā D1.3 līdz ar aprēķinu rezultātiem.



2.5. att. Energosistēmas attīstības scenāriju analīzes rezultātu izmantošana tirgus un risku modelēšanas uzdevumos

Kopsavilkums

Projekta darba posma WP1 izpildes gaitā identificētas divas pieejas Latvijas energosistēmas modelēšanai un tās attīstības scenāriju analīzei, kuru paralēls lietojums ļauj savstarpēji validēt iegūtos rezultātus: 1) *Backbone* atvērtā koda energosistēmu modelēšanas vide un 2) RTU Enerģētikas institūta energosistēmu apakšsistēmu modeļu komplekss REM, kurš ietver:

- 1) dažāda veida elektrostacijas (hidroelektrostacijas, tostarp Daugavas HES kaskāde, koģenerācijas stacijas (dabāsgāzes, biomasas, biogāzes), termoelektrostacijas, pārtraukumainie enerģijas avoti – vējš un saule);
- 2) dažādas veida enerģijas akumulācijas stacijas (tostarp hidroakumulācija);
- 3) enerģijas lietotāju un ražotājlietotāju patēriņa/izstrādes modeļus, kas izriet no prognozēšanas metodikas, ņemot vērā apkārtējās vides faktoru ietekmi;
- 4) pārvades elektrotīklu modeļus (tomēr vismaz pirmajās iterācijās katra valsts tiek atainota ar vienu mezglu, starp kuriem pastāv pārvades ierobežojumi; pamatots pieņēmums par pietiekamu iekšējo elektrotīklu pārvades spēju ļauj šajā posmā neveikt detalizētu iekšējo tīklu modelēšanu);
- 5) dažādu laikrindu un parametru prognozēšanas modeļus, tostarp tādus, kas iepriekš jau aprakstīti nodevumā D2.1;
- 6) optimizācijas uzdevumu risinātājus.

Izmantojot REM, scenāriju analīze tiek veikta, detalizēti modelējot Baltijas valstu energosistēmas un ņemot vērā Zviedrijas, Somijas un Polijas ietekmi uz elektroenerģijas tirgus cenām. Modelējot Baltijas valstu energosistēmas, tiek izmantoti siltumenerģijas un gāzes pieprasījuma modeļi.

Divu paralēlo modelēšanas pieeju vienlaicīga izmantošana ļauj, pirmkārt, tās savstarpēji validēt. Taču vēl nozīmīgāka ir šādas metožu sinerģijas sniegtā iespēja izmantot modeļu komplementārās atšķirības plašāka ieskata gūšanai pētāmajā jautājumā.

Energosistēmas attīstības scenāriju izvēlei un analīzei abos gadījumos tiek izmantota virkne pamatpieņēmumu, piemēram:

- Latvija ievēro Eiropas Savienības tiesību aktus un nacionālos mērķus klimata izmaiņu mazināšanā;
- no 2025. gada Baltijas energosistēmas ir desinhronizētas no apvienotās Krievijas un Baltkrievijas energosistēmas, tā vietā darbojoties sinhroni ar kontinentālās Eiropas sistēmu;
- elektroenerģijas vairumtirdzniecības pārliecinoši lielākā daļa turpina norisināties elektroenerģijas biržā nākamās dienas tirgū;
- nav paredzama tādu videi nelabvēlīgu enerģijas avotu attīstība, kam piemīt lielas emisijas;

- notiek tautsaimniecības turpmāka elektrifikācija un pieaug elektroenerģijas pieprasījums;
- palielinās atjaunīgo energoresursu izmantošanas īpatsvars un apjoms;
- Latvijā tiek arī ilgtermiņā saglabāta esošā Daugavas hidroelektrostaciju kaskāde ar trim hidroelektrostacijām;
- scenāriju analīze tiek veikta, ņemot vērā dažādu tehnoloģiju ietekmi:
 - modelējot enerģijas patēriņa pusi, jāņem vērā elektroauto, elektriskās apkures, siltumsūkņu un ražotājlietotāju ietekme;
 - modelējot enerģijas ģenerācijas pusi, jāņem vērā saules enerģijas, vēja enerģijas un konvencionālo spēkstaciju ietekme;
 - modelējot akumulācijas tehnoloģijas, jāņem vērā Daugavas HES rezervuāri, siltumakumulācija, elektroauto, elektroķīmiskie akumulatori.
- Turklāt ir jāņem vērā modelēto nākotnes energosistēmu režīmu iespējamība un pieļaujamība no sistēmas drošuma un stabilitātes viedokļa, tostarp ievērojot pretavāriju automātikas sniegtās iespējas.

Projekta turpinājumā iegūtie rezultāti par modelēto Latvijas energosistēmas attīstību līdz 2050. gadam tiks atspoguļoti turpmākajos nodevumos.