



VPP “Enerģētika”
Projekts “INGRIDO”
VPP-EM-INFRA-2018/1-0006

Elastīgums pārtraukumaino energoavotu integrācijai

Nodevums D2.1

Pētījuma pasūtītājs: Ekonomikas ministrija

Pētījumu veica Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas institūts sadarbībā ar Ventpils Augstskolas inženierzinātņu institūtu "Ventpils Starptautiskais Radioastronomijas Centrs"

06.12.2021.

Saturs

ATTĒĻU SARAKSTS.....	4
TABULU SARAKSTS.....	5
IEVADS.....	6
1. NEPIECIEŠAMĪBA PĒC ELASTĪGUMA	8
1.1. VĒJA ĢENERĀCIJAS PROGNOZĒŠANA	11
1.2. SAULES PANEĻU ĢENERĀCIJAS PROGNOZĒŠANA	12
2. ELASTĪGUMA AVOTI UN TO IZMANTOŠANA.....	13
2.1. ĢENERĀCIJA	13
2.2. AKUMULĀCIJA	14
2.3. PATĒRIŅA ELASTĪBA	15
2.4. AGREGATORI	16
2.5. ELASTĪGUMA IZMANTOŠANA	16
3. VES IZSTRĀDES PROGNOZĒŠANA UN TEHNOĻOĢIJU ATTĪSTĪBA	18
3.1. VES IZSTRĀDES PROGNOŽU METODIKAS.....	18
3.2. VES IZSTRĀDES PROGNOZĒŠANAS PRECIZITĀTES ANALĪZE	19
3.3. VES ATTĪSTĪBA LATVIJĀ	22
3.4. VES JAUDAS IZMANTOŠANAS KOEFICIENTA PIEAUGUMA PROGNOZES	25
4. VES POTENCIĀLA LATVIJĀ IZVĒRTĒŠANA	27
4.1. MAZJAUDAS VĒJA ĢENERATORU PAREDZAMĀS EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒJUMS LATVIJAI RAKSTURĪGOS VĒJA APSTĀKĻOS	27
4.2. VĒJA ELEKTROSTACIJU IZSTRĀDES PROGNOZE LATVIJAI DALĪJUMĀ PA REĢIONIEM.....	28
5. VĒJA MĒRĪJUMI LATVIJĀ, PIELIETOJOT MOBILO SAKARU MASTUS.....	31
5.1. MĒRĪŠANAS SENSORU UZSTĀDĪŠANA UZ MOBILO SAKARU MASTIEM.....	31
5.2. REZULTĀTU ANALĪZE	33
5.3. NODAĻAS KOPSAVILKUMS	35
SECINĀJUMI.....	36

Attēlu saraksts

1.1. att. Mainīgas AER ietekme uz elastīgumu dažādos plānošanas periodos	8
1.2. att. Īstermiņa elastīguma virzītājspēki	9
1.3. att. Saules paneļu nesegta slodze Kalifornijā tipiskā pavasara dienā.....	10
1.4. att. AER mainīguma ietekme uz dažādām energosistēmām (a) Pireneju pussalā, (b) Vācijā.....	11
1.5. att. VES un patēriņa prognozētā un faktiskā raksturlīkne Dānijā.....	11
2.1. att. Elastīguma avotu klasifikācija.....	13
3.1. att. OPS Prievento algoritms vēja enerģijas prognozēšanai	19
3.2. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (stundu intervāliem), sadalījums pa gadiem	20
3.3. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (stundu intervāliem), sadalījums pa mēnešiem.....	20
3.4. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (dienas intervāliem), sadalījums pa gadiem.....	21
3.5. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (dienas intervāliem), sadalījums pa mēnešiem.....	21
3.6. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (mēneša intervāliem), sadalījums pa gadiem.....	21
3.7. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (mēneša intervāliem), sadalījums pa mēnešiem	21
3.8. att. VES uzstādītā jauda Latvijā, Lietuvā un Igaunijā (MW) laika perioda no 2014. līdz 2020. gadam	22
3.9. att. VES izstrāde Latvijā, Lietuvā un Igaunijā (GWh) laika perioda no 2014. līdz 2020. gadam	23
3.10. att. Sauszemes VES uzstādītās jaudas (MW) prognozes attiecīgajos scenārijos.....	24
3.11. att. Selgas VES uzstādītās jaudas (MW) prognozes attiecīgajos scenārijos	24
3.12. att. Kopējās VES uzstādītās jaudas (MW) prognozes attiecīgajos scenārijos	24
3.13. att. Sauszemes un jūras vēja elektrostaciju jaudas izmantošanas koeficienta pieauguma prognozes	26
3.14. att. VES jaudas izmantošanas koeficients Latvijā 2019. gadā pa mēnešiem.....	26
4.1. att. Ce un AEP prognozētās vērtības Ventspils novadā dažādu veidu un jaudas SWTG	28
4.2. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā pārsniedz 380 W/m ²	28
4.3. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā pārsniedz 420 W/m ²	29
4.4. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā pārsniedz 480 W/m ²	29
4.5. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 200 m augstumā pārsniedz 520 W/m ²	29
4.6. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 200 m augstumā pārsniedz 560 W/m ²	30
4.7. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 200 m augstumā pārsniedz 640 W/m ²	30
5.1. att. Režģa trīsstūrveida masts 3. vietā – Rozēnos, Ainažos.....	32
5.2. att. Vēja virziena sensora S_{Dir} izvietojuma vektorshēma	32
5.3. att. Metroloģisko sensoru un Symphonie PLUS3 mērīšanas kompleksa izvietošana.....	32
5.4. att. Apmērota karte ar mobilo sakaru mastu izvietojumiem.....	33
5.5. att. Vēja augstuma modeļi, kas atbilst vidējam vēja ātrumam.....	34

Tabulu saraksts

2.1. tab. Vēja turbīnu jaudas izmantošanas koeficients C_e Latvijas reģionos dažādiem SWTG.....	27
2.2. tab. Potenciālās lietderīgās vēja turbīnu jaudas ar masta augstumiem ar 100, 150 un 200 m	30
3.1. tab. Datu bāzes struktūras piemērs.....	33

Ievads

Ar **energosistēmas elastīgumu** saprot tās spēju droši un efektīvi pielāgoties elektroenerģijas patēriņa un ģenerācijas mainīgumam un nenoteiktībām jebkurā laika brīdī¹. Savukārt individuālas ģenerācijas vai patēriņa **iekārtas elastīgums** ir pievadītās jaudas vai patēriņa izmaiņas, reaģējot uz ārēju (piemēram, cenas vai vadības) signālu, lai sniegtu pakalpojumu energosistēmai². Tradicionāli energosistēmai nepieciešamo elastīgumu nodrošinājušas viegli vadāmas ģenerācijas iekārtas, proti, elektrostacijas, kuru ģenerēto jaudu var īsā laikā palielināt vai samazināt un/vai kuru ģeneratorus iespējams ātri iedarbināt vai atslēgt, – piemēram, rezervuāru hidroelektrostacijas, gāzturbīnu elektrostacijas un vadāmas atjaunīgo energoresursu (AER) elektrostacijas (biomasas, ģeotermālās u. tml.)³, kā arī akumulācijas hidroelektrostacijas.

Energosistēmai nepieciešamais elastīguma apjoms pēdējā laikā strauji aug sakarā ar notiekošo energosistēmu dekarbonizāciju un transformāciju, pārejot no fosiliem uz videi draudzīgākiem energoavotiem nolūkā mazināt klimata pārmaiņas. Galvenās elektroenerģijas ģenerācijas tehnoloģijas, kas arvien vairāk aizstāj tradicionālās elektrostacijas, ir vēja turbīnas un saules paneļi. Tomēr to ģenerācijas raksturs ir pārtraukumains un ļoti atkarīgs no laikapstākļiem, tādējādi rada nozīmīgu **nenoteiktību** avotu gan energosistēmas ilgtermiņa plānošanā, gan īstermiņa darbības režīmu vadībā. Lai sistēmā integrētu šādus mainīgus lieljaudas atjaunīgos energoavotus, ir nepieciešami papildu elastīguma avoti. Vienlaikus energosistēmas vadības filozofija pakāpeniski transformējas no pielāgošanās slodzei uz pielāgošanos mainīgajai ģenerācijai, jo īpaši ņemot vērā to, ka AER, darbojoties elektroenerģijas tirgū, nereti pirmām kārtām aizstāj tieši elastīgos tradicionālos ģeneratorus⁴. Detalizēts pārskats par dažādiem elastīguma avotiem un to izmantošanas iespējām sniegts projekta “INGRIDO” nodevumā D1.1⁵, kur tostarp aplūkotas arī dažādas enerģijas akumulācijas iespējas, elektroenerģijas un siltumenerģijas sistēmu sasaistes iespējas papildu elastīguma radīšanai un citas potenciālās inovācijas. Savukārt nodevumos D4.1⁶, uD4.1⁷ un D4.2⁸ detalizētāk analizēta pieprasījuma elastīguma izmantošana un dažādi agregatoru pakalpojumu modeļi, kā arī veikts to ekonomiskais novērtējums. Izklaidētā ģenerācija var kalpot gan kā elastīguma avots, gan

¹ IEA, Status of Power System Transformation 2018: Advanced Power Plant Flexibility, IEA, Paris, doi: 10.1787/9789264302006-en.

² L. Sadoviča, K. Marcina, V. Lavrinovičs and G. Junghāns, “Facilitating energy system flexibility by demand response in the Baltics — Choice of the market model,” *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON)*, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/RTU CON.2017.8124834.

³ O. M. Babatunde, J. L. Munda, and Y. Hamam, “Power system flexibility: A review,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 101–106, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.11.048.

⁴ P. Neetzow, “The effects of power system flexibility on the efficient transition to renewable generation,” *Appl. Energy*, vol. 283, p. 116278, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116278.

⁵ Projekta “INGRIDO” nodevums D1.1 “Literatūras apskats par prognozētajām inovāciju tendencēm līdz 2050. gadam”

⁶ Projekta “INGRIDO” nodevums D4.1 “Elektroenerģijas agregatori: risinājumu analīze un priekšlikumi to integrācijai pakalpojumu tirgū”

⁷ Projekta “INGRIDO” nodevums uD4.1 “Elektroenerģijas agregatori: regulējuma izmaiņas virzībai uz neatkarīgiem agregatoriem”

⁸ Projekta “INGRIDO” nodevums D4.2 “Elektroenerģijas agregatori: biznesa modelis dalībai nākamās dienas tirgū”

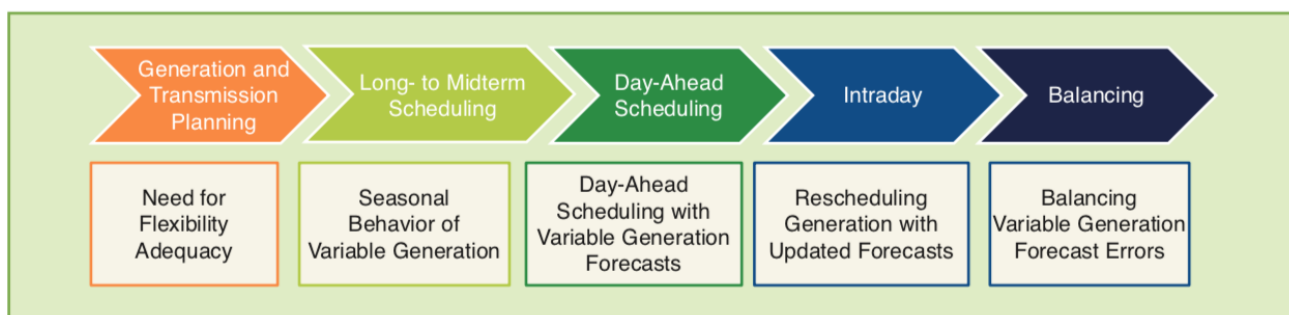
izraisīt nepieciešamību pēc energosistēmas papildu balansēšanas, tāpēc nodevumā D3.1–2⁹ apkopotas rekomendācijas veiksmīgākai ražotājlietotāju integrācijai tīklā un sadarbībai ar sistēmas operatoru.

Šajā nodevumā novērtētas papildu elastīguma vajadzības, ko rada pārtraukumainie AER, apzināti izmantojamie elastīguma avoti, kā arī aplūkota vēja enerģētikas attīstība, potenciāls un pētniecība Latvijā, tostarp eksperimentāli mērījumu dati un vēja ģenerācijas prognožu rādītāji.

⁹ Projekta “INGRIDO” nodevums D3.1–2 “Ražotājlietotāju ietekmes uz tīklu modelēšana un rekomendācijas turpmākai attīstībai”

1. Nepieciešamība pēc elastīguma

Augot AER īpatsvaram energosistēmā, elastīguma nepieciešamība mainās atšķirīgi atkarībā no konkrētā **plānošanas perioda** (1.1.att.)¹⁰. Ja tradicionāli sistēmas jaudu pietiekamības ilgtermiņa novērtējumam īstermiņa ģenerācijas mainīgums nebija tik būtisks, šobrīd sistēmas operatoram ir jāparedz jau laicīgi (pat gadiem uz priekšu) AER balansēšanai vai aizstāšanai nepieciešamās rezerves. Jāievēro arī tas, ka AER piemīt sezonālitate, kas jo īpaši izteikti ir saules, bet raksturīgs arī vēja ģenerācijai. Nākamās dienas darba režīmu plānošanai ļoti svarīgas ir AER ģenerācijas īstermiņa prognozes, savukārt jau tekošās dienas tirgus ietvaros jāveic darba režīmu pārplānošana atbilstoši precizētajām AER prognozēm. Galu galā pārvades operatoram jānodrošina energobalance ikkatrā laika brīdī, kam nepieciešami balansēšanas resursi pietiekamā apjomā, kas spēj pilnībā kompensēt AER ģenerācijas prognožu kļūdas, turklāt abos virzienos – pēc vajadzības gan palielinot, gan samazinot ģenerāciju, izmantojot rezerves avotus.



1.1. att. Mainīgas AER ietekme uz elastīgumu dažādos plānošanas periodos

Pieaugošo nepieciešamību pēc **īstermiņa** elastīguma avotiem galvenokārt nosaka: AER (saules, vēja) u. c. ģenerācijas avotu prognožu kļūdas vai izstrādes novirzes no plānotā grafika, patēriņa prognožu kļūdas, ko pastiprina pieaugošā elektrifikācija, starpvalstu savienojumu un citu energosistēmas elementu potenciālie atslēgumi u. tml. (1.2. att.)¹¹.

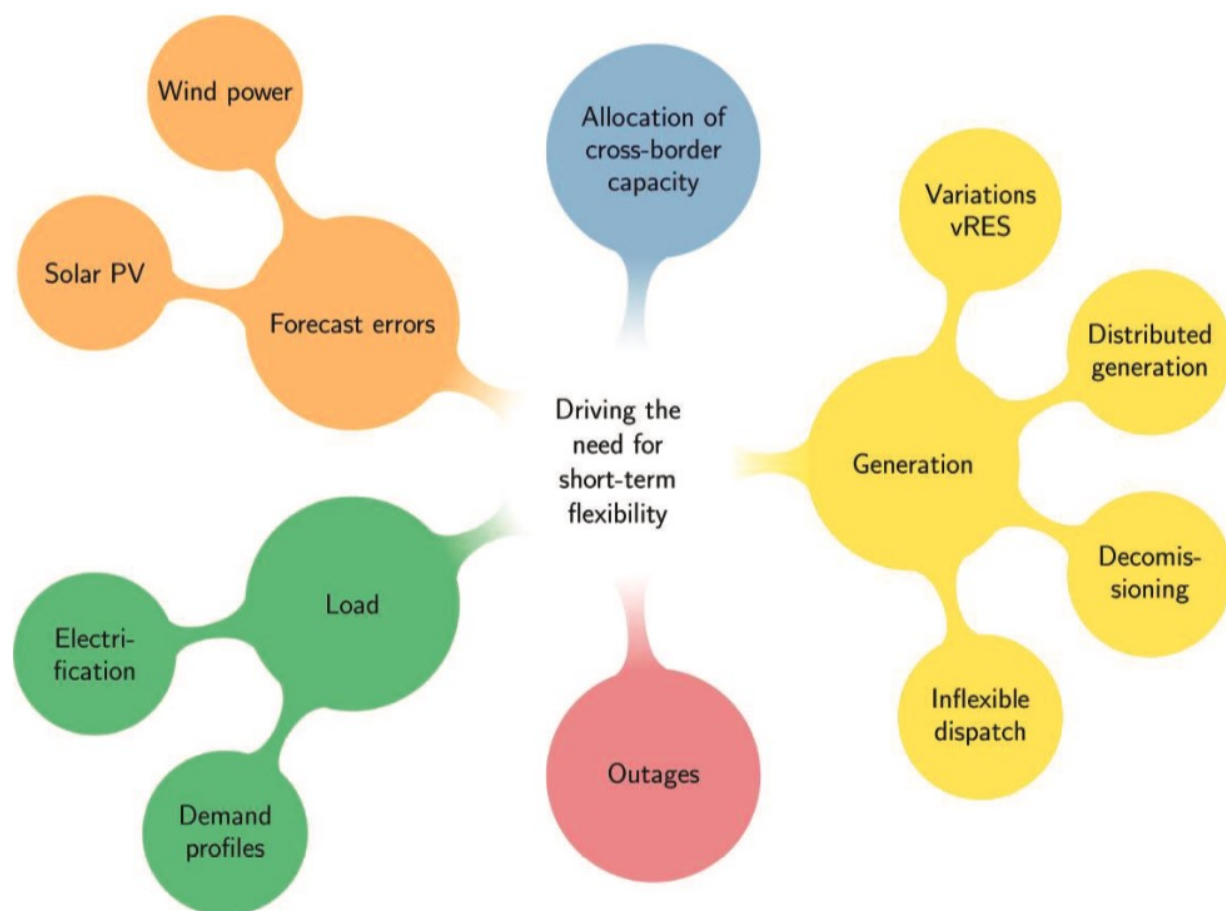
Lai gan gandrīz visa veida elektrostacijām raksturīgas noteikta līmeņa ģenerācijas svārstības, vairums termoelektrostaciju un hidroelektrostaciju ir vadāmas, un to ģenerāciju ierasti var prognozēt daudzas stundas uz priekšu. Energosistēmas jau sākotnēji veidotas tā, lai spētu kompensēt šīs nelielās variācijas.

Vēja ģenerācija ir proporcionāla vēja ātrumam 3. pakāpē, kurš turklāt laika gaitā mainās. Turklāt vēja turbīnu uzbūves dēļ to ģenerācija tiek pārtraukta ārpus noteiktā vēja ātruma diapazona (tātad gan pie pārāk zema, gan augsta vēja ātruma). Tā rezultātā vēja elektrostaciju (VES) tīklā nodotā jauda mainās izteikti nelineāri. Parasti uzskata, ka vēja ģenerācijai piemīt mazas svārstības īstermiņā (0,1% sekundes ietvaros), taču tās būtiski pieaug lielākos laika intervālos (3% 10 minūtēs un jau 10% 60 minūtēs), tāpēc pārvades sistēmas operatoram ir

¹⁰ H. Holttinen et al., "The Flexibility Workout: Managing Variable Resources and Assessing the Need for Power System Modification," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 11, no. 6, pp. 53-62, Nov.-Dec. 2013, doi: 10.1109/MPE.2013.2278000.

¹¹ CIGRE, Short-term flexibility in power systems: drivers and solutions. Reference: 808, 2020

būtiska informācija par vēja ģenerācijas prognozēm, lai varētu nodrošināt sistēmas vadību un pastāvīgi nodrošināt tās energobilanci.

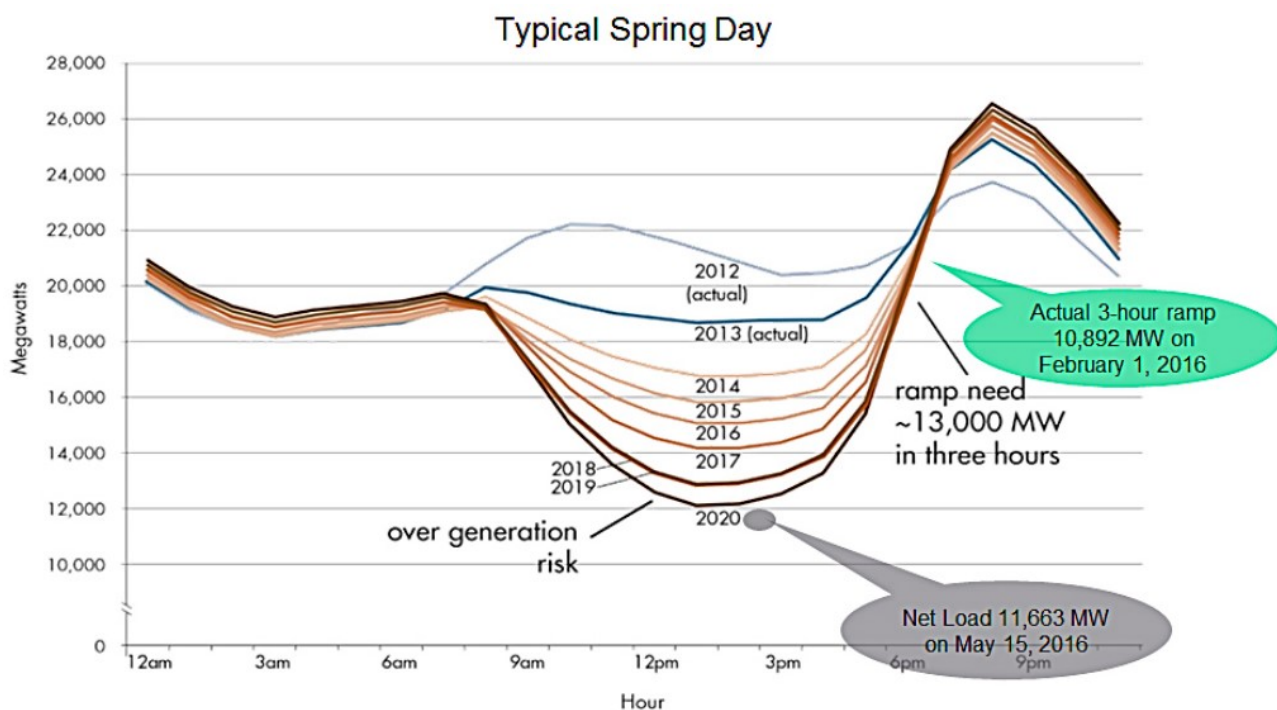


1.2. att. Īstermiņa elastīguma virzītājspēki

Liels ģenerācijas mainīgums raksturīgs arī energosistēmās ar nozīmīgu **saules elektrostaciju** (SES) īpatsvaru. Lai raksturotu gan saules, gan citu pārtraukumaino ģenerācijas avotu svārstību ietekmi uz energosistēmas kopējo raksturlīkni, ieviests jēdziens **AER nesegtā slodze** (angļu val. *net load*, *residual load*), kas raksturo to patēriņa apjomu jebkurā laika momentā, ko nespēj apmierināt AER ģenerācija un kas jāsedz ar citiem avotiem. Liels saules paneļu īpatsvars rada ievērojamas svārstības vienas dienas ietvaros, ko lieliski raksturo Kalifornijas sistēmas operatora veidotā raksturlīkne 1.3. att.¹², kuras forma atgādina pili. Tā ilustrē gan elektroenerģijas pārpalikuma riskus dienas vidū, gan arī nepieciešamību pēc straujas ģenerācijas palielināšanas vai samazināšanas, lai pielāgotos saules paneļu izstrādei.

Kamēr VES ir noteicošais faktors elastīguma vajadzību pieaugumam pārvades tīkla līmenī, pasaulē kopumā izklīdētas, pārsvarā dzīvojamā sektorā uzstādītas SES visvairāk sarežģījumus rada savukārt sadales tīklā.

¹² California ISO, Fast Facts. Pieejams: https://www.caiso.com/documents/flexibleresourceshelprenewables_fastfacts.pdf



1.3. att. Saules paneļu neseģtā slodze Kalifornijā tipiskā pavasara dienā

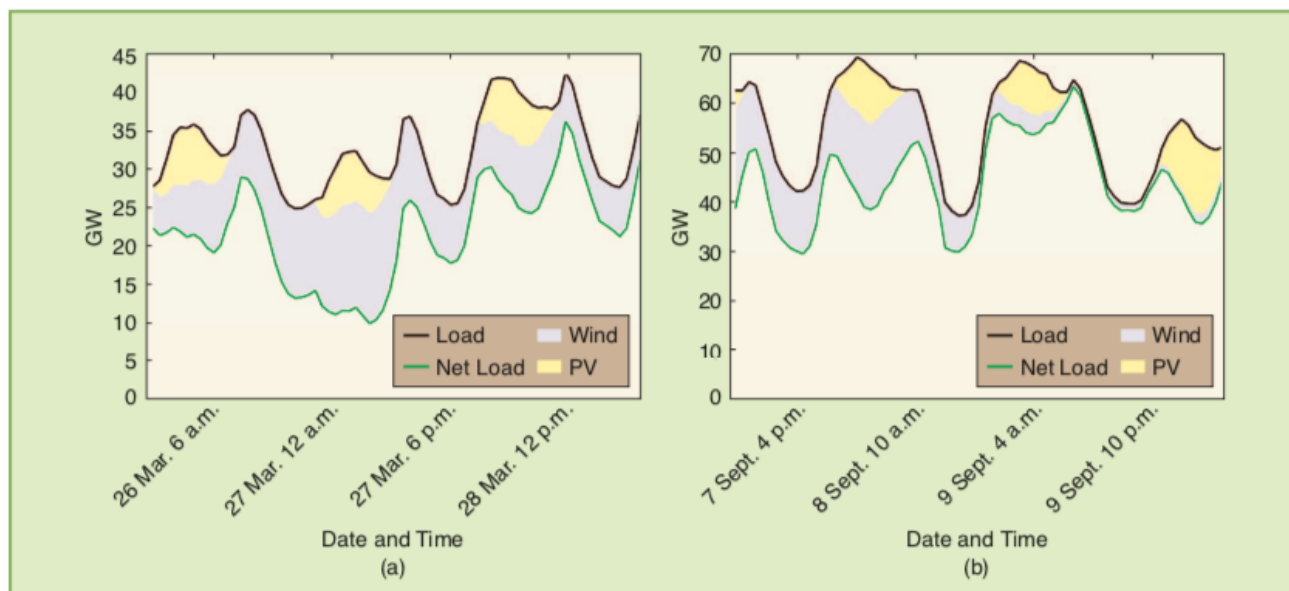
Tieši AER neseģtās slodzes (starpības starp patēriņu un mainīgo AER ģenerāciju) svārstības ir daudz būtiskākas un sliktāk prognozējamas nekā viss patēriņš kopumā. Tiklīdz enerģosistēmā integrēts liels īpatsvars AER, to neseģtā slodze var mainīties no negatīvām vērtībām līdz pat pilnam enerģosistēmas patēriņa apjomam.

Acīmredzami, ka kopējā patēriņa raksturlīkne (brūnas krāsas līkne 1.4. att.¹³) ievērojami atšķiras no AER neseģtā slodzes grafika (zaļās krāsas līkne). Turklāt dažādās enerģosistēmās AER neseģtās slodzes līkne var būtiski atšķirties, ko ietekmē gan sākotnējais patēriņa mainīgums, gan arī konkrētie uzstādītie AER elektrostaciju veidi un AER īpatsvars kopējā ģenerācijā. Tā 1.4. att. salīdzināta situācija Pireneju pussalā (Spānijā un Portugālē) un Vācijā. Abos gadījumos mainīgo AER īpatsvars ikgadējā ģenerācijā veido 25%. Grafiks attēlo situāciju Pireneju pussalā 2011. gadā, kur uzstādīti 25,6 GW sauszemes VES un 12,1 GW SES, un raksturlīknes Vācijai, kur uzstādīti 53,6 GW sauszemes VES un 39,7 GW SES. Var novērot gan SES mainīgumu diennakts ietvaros, gan arī izteiktas vēja svārstības, kur VES ģenerācija divu dienu laikā mainās no pāris desmitiem GW līdz pat gandrīz nullei.

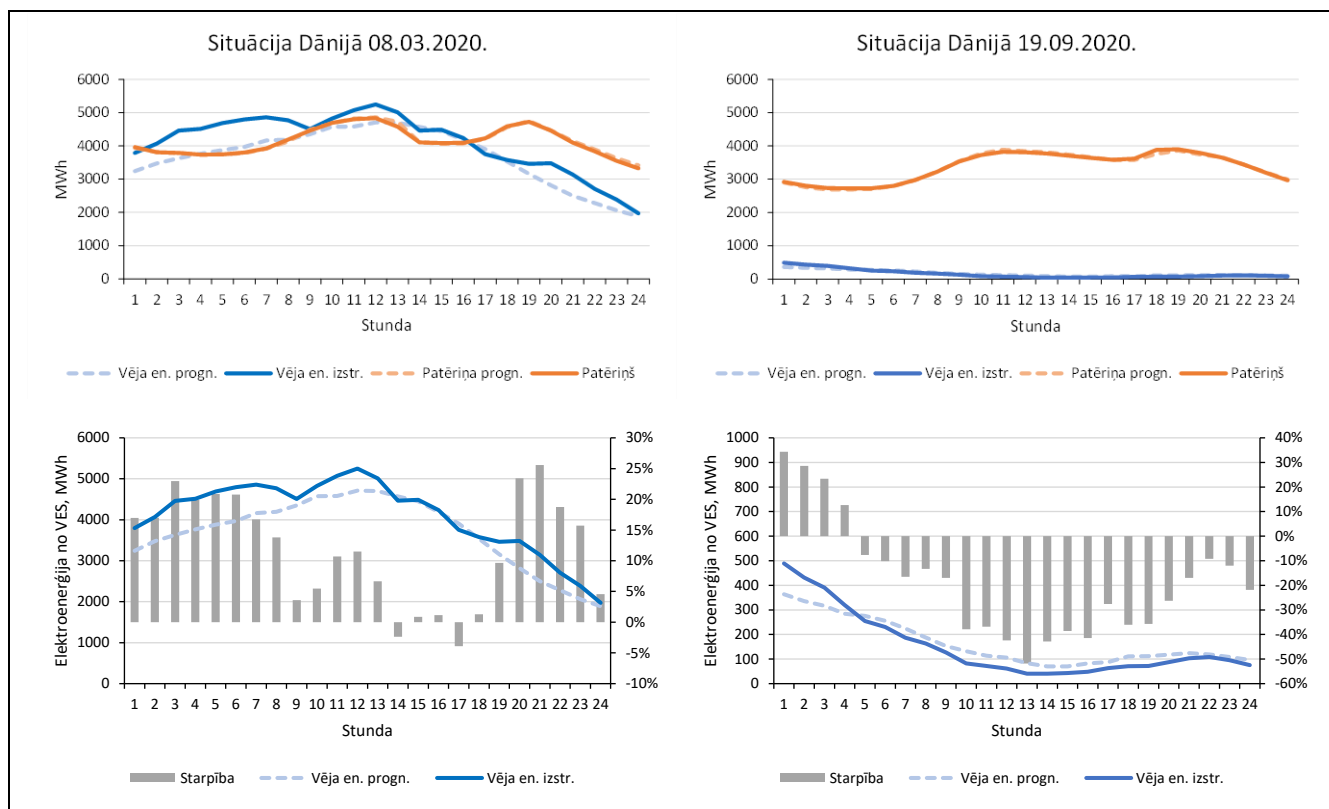
Savukārt 1.5. attēlā¹⁴ ilustrētas prognozētās un faktiskās vēja ģenerācijas raksturlīknes divās 2020. gada dienās Dānijā, kur VES prognožu kļūda pārsniegusi +25% (08.03.2020.) un noslīdējusi arī zem -50% (19.09.2020.), reizēm veidojot pat simtiem MWh novirzi vienā stundā.

¹³ H. Holttinen et al., "The Flexibility Workout: Managing Variable Resources and Assessing the Need for Power System Modification," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 11, no. 6, pp. 53-62, Nov.-Dec. 2013, doi: 10.1109/MPE.2013.2278000.

¹⁴ Nord Pool dati



1.4. att. AER mainīguma ietekme uz dažādām energosistēmām (a) Pireneju pussalā, (b) Vācijā



1.5. att. VES un patēriņa prognozētā un faktiskā raksturlīkne Dānijā

1.1. Vēja ģenerācijas prognozēšana

Lai gan vēja enerģētikā notikusi liela izaugsme reāllaika datu (laikapstākļu, ģenerācijas) un pilnveidotu prognozēšanas metožu izmantošanā, **prognožu kļūdas** ir neizbēgamas, jo īpaši tad, ja prognoze ietver tikai vienu vērtību katram laika intervālam. Viena punkta prognozes

iespējams papildināt ar varbūtiskām prognozēm, riska indeksiem un uzticamības intervāliem, lai detalizētāk atspoguļotu prognozes piemērotību un potenciālo kļūdas diapazonu¹⁵.

Prognožu kļūdas negatīvi iespaido arī ražotāju dalību tirgū, jo nereti faktiskajai ģenerācijai rodas novirzes no iepriekš nosolītā apjoma. Tā rezultātā tiek iespaidots arī sistēmas operatora darbs, kas var ietekmēt arī energosistēmas stabilitāti kopumā.

Tā kā vēja ģenerācijas apjomu ietekmē arī dažādi lokāli ģeogrāfiskie u. tml. apstākļi, tad nenoteiktību mazināšanai vēja parku attīstītāji jau plānošanas posmā prognozē enerģijas ražošanas apjomu vismaz stacionāros apstākļos (neiekļaujot turbulenci). Izmanto šādus galvenos prognozēšanas paņēmienus¹⁶: **deterministiskas** prognozes, kas balstītas uz meteoroloģiskiem datiem un reāliem mērījumiem (šādu Latvijā veiktu mērījumu piemēri un rezultāti doti 5. nodaļā); **statistiskas** prognozes un laikrindu analīze, balstoties uz vēsturiskajiem datiem (skat. 3.2. apakšnodaļu); **hibrīdas** un **ansambla** prognozes. Tā kā komplicētas skaitliskās laikapstākļu prognozēšanas metodes ir ļoti laikietilpīgas ar vairākas stundas ilgu skaitļošanas laiku, īstermiņa prognozēšanai VES režīmu plānošanai un piedāvājuma iesniegšanai tirgū izmanto reāllaika mērījumus, kas ietver faktisko ģenerēto jaudu un vēja ātrumu, kombinācijā ar ilgtermiņa modeļiem. Šādām prognozēm ir augstāka precizitāte laika periodā, sākot no vienas sekundes līdz vienai stundai, jo īpaši tad, ja prognozes tiek arī koriģētas ar īpašiem mašīnmācīšanās algoritmiem, balstoties uz vēsturiskajām prognožu kļūdām. Vēl augstāku precizitāti var iegūt, veidojot kombinētu prognozi vairākiem vēja parkiem, kas izvietoti plašākā ģeogrāfiskā apgabalā. Salīdzinot ar individuālu turbīnu prognozēm, prognožu kļūdas plašākam reģionam savstarpēji izlīdzinās. Līdz ar to atkarībā no konkrēta risināmā uzdevuma ir vajadzīgas prognozes ar dažādu agregācijas līmeni, lai fokusētos uz lokālu iespaidu (piemēram, jaudu plūsma reģionālā tīklā) vai visas sistēmas mēroga ietekmi (piemēram, iespaids uz starpsavienojumu darbību).

1.2. Saules paneļu ģenerācijas prognozēšana

Prognozējot SES ģenerāciju, primāri nepieciešama ir precīza informācija par saules starojumu. To savukārt nosaka saules trajektorija debesīs (pilnībā izsekojama), kā arī mākoņi u. c. meteoroloģiskās parādības, kas ir grūtāk prognozējamas. Ietekmi atstāj pat debesu dzidrums. Tāpat kā VES, pieaugot prognozēšanas periodam, samazinās precizitāte. Izmanto deterministiskas, varbūtiskas un hibrīdas prognozēšanas metodes, kas ievēro gan saules starojumu, gan mākoņu pārvietošanās datus no satelīta un videokameru novērojumiem¹⁷.

Prognozēto SES ģenerācijas apjomu nosaka, ņemot vērā meteoroloģisko prognozi un konkrētās elektrostacijas parametrus (ģeogrāfisko izvietojumu, paneļu un aprīkojuma tipu, noēnojumu, āra temperatūru u. c.). Līdzīgi kā vēja gadījumā, plašāka reģiona prognozēs kļūdas savstarpēji izlīdzinās par spīti lielām potenciālajām svārstībām vienas konkrētas SES ietvaros.

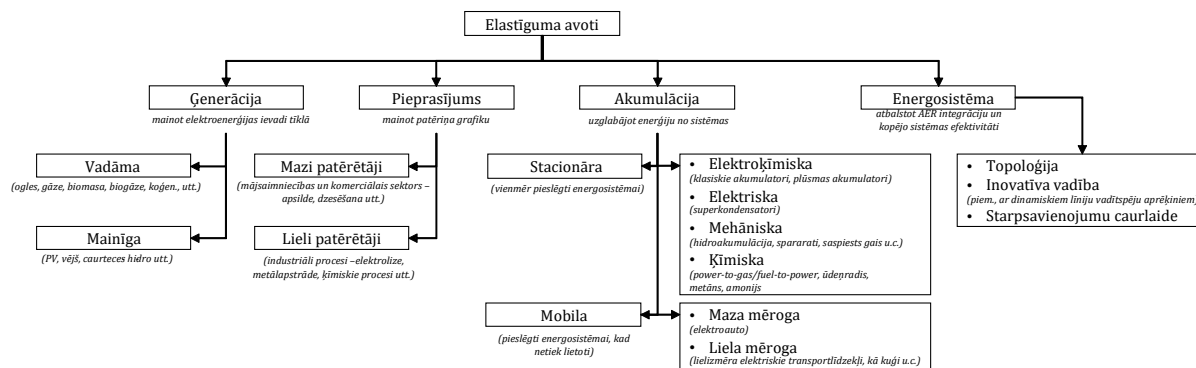
¹⁵ CIGRE, Short-term flexibility in power systems: drivers and solutions. Reference: 808, 2020

¹⁶ Turpat

¹⁷ CIGRE, Short-term flexibility in power systems: drivers and solutions. Reference: 808, 2020

2. Elastīguma avoti un to izmantošana

Pastāv virkne gan tradicionāli izmantotu, gan inovatīvu elastīguma avotu, kurus sistēmas operatori būtu iespējams iesaistīt dažādu sistēmas palīgpakalpojumu sniegšanā AER ģenerācijas svārstību izlīdzināšanai un balansēšanai (2.1. att.)¹⁸.



2.1. att. Elastīguma avotu klasifikācija

2.1. Ģenerācija

Starp termoelektrostacijām visplašāk izmantotais elastīguma avots ir **gāzturbīnu elektrostacijas** (OCGT, CCGT)¹⁹, kurām ir īsa palaišana un maksimālā jauda tiek sasniegta 15 min laikā. Šādas stacijas kā kurināmo var izmantot dabasgāzi, dīzeļdegvielu vai naftu. To kapitālizmaksas ir salīdzinoši zemas, bet darbības izmaksas un emisijas (jo īpaši ar naftas kurināmo) – augstas. Tomēr šie trūkumi nav nozīmīgi, ja šīs stacijas tiek darbinātas nelielu stundu skaitu gada ietvaros. Salīdzinājumā ar gāzturbīnām, ogļu elektrostaciju devums īstermiņa elastīgumam ir neliels.

Arī **atomelektrostacijas** var izmantot nelielu svārstību kompensēšanai, piemēram, frekvences regulēšanai un kā īstermiņa rezervju avotu. Piemēram, 1 GW elektrostacija ierasti var nodrošināt līdz pat 20 MW primārās rezerves un 50 MW sekundārās rezerves.

Hidroelektrostaciju (HES) un **hidroakumulācijas elektrostaciju** (HAES) piedāvātais elastīguma apjoms atkarīgs no to ietilpības: ar nelielu rezervuāru iespējams nodrošināt balansēšanu dienas ietvaros (piemēram, maksimumsodzes stundās), taču lielas ietilpības HAES rezervuāri spēj nodrošināt pat sezonālu balansēšanu. Kopumā HES ir viselastīgākais lieljaudas ģenerācijas avots, kura viena agregāta jauda var būt līdz pat 700 MW. Lielākās HES, kas atrodas Dienvidamerikā un Āzijā, ir ar vairāk nekā 20 GW jaudu, bet ierasti HES uzstādītā jauda ir 5–1000 MW diapazonā.

Tiek attīstīti arī inovatīvi projekti, piemēram, **HAES integrācija ar saules paneļiem**, kur SES ģenerētās elektroenerģijas pārpalikums tiek izmantots ūdens sūkņēšanai, lai to uzkrātu

¹⁸ Projekta “INGRIDO” nodevums D1.1 “Literatūras apskats par prognozētajām inovāciju tendencēm līdz 2050. gadam”.

¹⁹ CIGRE, Short-term flexibility in power systems: drivers and solutions. Reference: 808, 2020

rezervuārā. Šāda tipa pilotprojekts tiek īstenots arī Lietuvā Kroņu HAES, kur uz augšējā rezervuārā virsmas sākotnēji plānots uzstādīt 60 kW peldošus saules paneļus, nākotnē potenciāli to izvēršot līdz pat 250 MW²⁰.

Lai gan **vēja un saules elektrostacijas** rada pieaugošu vajadzību pēc elastīguma, arī tās var pašas zināmā mērā nodrošināt energosistēmas regulēšanu. Pieaugot AER īpatsvaram, šo potenciālu būs nepieciešams izmantot arvien vairāk. Sistēmas lejupregulēšanu VES var nodrošināt, attiecīgi ierobežojot savu ģenerāciju un tīklam pievadīto jaudu, bet iespējams nodrošināt arī augšupregulēšanu, ja VES darbojas ar nepilnu jaudu, saglabājot iespēju to palielināt pēc vajadzības. Lai gan šādu pakalpojumu sniegšanu ierobežo pašreizējais tirgus regulējums, VES iespējas piedalīties regulēšanā varētu palielināties līdz ar tirgus piedāvājumu iesniegšanas termiņu pagarināšanu uz tādu, kas tuvāks reāllaikam, un rezervju jaudas iepirkšanu dažas stundas, nevis vairākas dienas uz priekšu, kā tas mēdz būt pašlaik. VES dalību jaunos tirgos veicinās arī tas, ka arvien mazāk jaunas VES tiks subsidētas un līdz ar to būs ieinteresētas jaunos ienākumu avotos, kā arī senāk uzbūvētas VES meklēs jaunas tirgus iespējas.

2.2. Akumulācija

Visa veida akumulācijas iekārtas var izmantot kā elastīguma avotus, tomēr tām piemīt zudumi, kas paaugstina šo resursu elastīguma izmaksas.

Liels potenciāls sagaidāms **elektroķīmiskiem akumulatoriem**, kuru izmaksas pēdējos gados ievērojami samazinājušās, lai arī joprojām ir pietiekami augstas. Šos akumulatorus iespējams izvietot jebkurā elektrotīkla vietā un mazjaudas baterijas – arī dzīvojamās ēkās. Lieljaudas akumulatoru baterijas iespējams integrēt arī pārvades tīklā. Tā, piemēram, savulaik lielākā iekārta bija 100 MW akumulators Dienvidaustrālijā (uzstādīts 2017. gadā), kurš 10 min spēj nodrošināt 70 MW jaudu un vēl 3 h – 30 MW jaudu. Elektroķīmiskie akumulatori var nodrošināt sākot no primārajām rezervēm (sekunžu garumā) līdz pat tekošās dienas tirgus produktiem (vairāku stundu garumā). Tomēr līdz šim augsto izmaksu dēļ tos pārsvarā izmanto īstermiņa pakalpojumiem.

Arvien turpinās dažādu **power-to-x** risinājumu attīstība, piemēram, *power-to-gas* nozīmē elektroenerģijas pārveidi uz gāzi (metānu vai ūdeņradi), ko varētu izmantot, piemēram, VES pārpalikuma akumulācijai, kad to nav iespējams pievadīt tīklam periodos ar daudz vēja. Uzkrāto gāzi var uzkrāt, pievadīt gāzes tīklam un pārveidot atpakaļ elektroenerģijā, izmantojot ģeneratoru. Tomēr šim procesam ir daudz zudumu, kas gan nākotnē varētu uzlaboties. Tāpat šo gāzi varētu izmantot dažādu ražošanas procesu vajadzībām, lai izvairītos no papildu zudumiem, kas neizvēršami rastos *power-to-hydrogen-to-power* procesā. Pateicoties *power-to-gas*, būtu iespējams ciešāk sasaistīt elektroapgādes un gāzapgādes sistēmas, tomēr būtiska ietekme sagaidāma tikai pie plašas šādu risinājumu ieviešanas un integrācijas. Turklāt, izmantojot lieljaudas *power-to-gas* sistēmas, būtu iespējama arī sezonāla akumulācija.

²⁰ Floating solar power plant in Kruonis PSHP: <https://ignitisinnovation.com/projects/floating-solar-power-plant-in-kruonis-pshp/>

Ar atbilstošu vadības sistēmu aprīkoti **elektroauto** arī uzskatāmi par potenciālu elastīguma avotu, ņemot vērā to, ka privātie auto vidēji 95% laika atrodas stāvvietā. Tādējādi to uzlāde vai pat enerģijas pievade atpakaļ uz tīklu varētu notikt plašā laika diapazonā. Vienlaikus gan ir virkne šķēršļu: nepieciešams nodrošināt savienojumu ar elektrotīklu, virkne tehnisku priekšnosacījumu (viedie skaitītāji, vadības infrastruktūra), regulējums (dinamiski tarifi), kā arī lietotāju uzvedība un paradumi, kas būtu jārisina ar piemērotiem jauniem biznesa modeļiem un stimuliem.

Pirmām kārtām elektroauto būtu nepieciešama **vieda uzlāde** pretstatā situācijai, kad visi auto tiek uzlādēti vakarā, atgriežoties no darba. Ieviešot atbilstošas viedās uzlādes stratēģijas, varētu izvairīties no patēriņa pieauguma maksimumslodzes periodos un augstu cenu gadījumā, tā vietā uzlādi veicot tad, kad patēriņš un cenas ir zemas, kā arī tad, kad nepieciešams lietderīgi izmantot AER ģenerācijas pārpalikumu. Pieaugot elektroauto skaitam, viedā uzlāde būs absolūti nepieciešama.

Elektroauto varētu piedalīties arī sistēmas palīgpakalpojumu sniegšanā, piemēram, balansēšanas tirgos: piemēram, tikai regulējot uzlādes ātrumu vai nodrošinot arī enerģijas pievadi atpakaļ tīklā (*vehicle-to-grid*). Potenciālā negatīvā ietekme uz akumulatoru būtu jāizsver ar ieguvumiem energosistēmai un atbilstoši jākompensē auto īpašniekiem.

2.3. Patēriņa elastība

Patēriņa elastība (*demand response*, DR) jau ilgstoši tiek uzskatīta par vērtīgu energosistēmas elastīguma resursu, sākot ar dažādām vēsturiskām DR programmām, kas paredzēja slodzes samazināšanu ārkārtas gadījumos vai maksimumslodzes periodos. Pamatā izšķir tā saukto netiešo un tiešo pieprasījuma reakciju. Netiešā pieprasījuma reakcija izpaužas tā, ka elektroenerģijas lietotāji maina savu patēriņa grafiku, pieskaņojot to ārējiem signāliem. Visizplatītākais netiešās pieprasījuma reakcijas veids ir laikā mainīgu elektroenerģijas tarifu izmantošana. Ja katrā stundā elektroenerģijas cena ir citāda, turklāt piesaistīta elektroenerģijas tā brīža tirgus cenai, tad tas ļauj lietotājiem optimizēt savu patēriņa grafiku, minimizējot izmaksas par elektroenerģiju. Savukārt, ja energosistēmā ir pietiekami liels skaits lietotāju ar dinamiskiem tarifiem, tad tas veicina kopējo patēriņa grafika izlīdzināšanos. Protams, jo līdzīgāks ir kopējais patēriņa grafiks, jo mazākas būs elektroenerģijas cenu svārstības un līdz ar to mazināsies jēga pielāgot patēriņu cenu izmaiņām. Tomēr šo kanibālisma efektu var mīkstināt liels saules un vēja enerģijas īpatsvars energosistēmas ģenerācijas portfeli, jo laikos, kad prognozēta liela šo resursu izstrāde, cenām vajadzētu samazināties, ļaujot lietotājiem gūt no tā labumu²¹.

Savukārt tieša pieprasījuma reakcija īstenojama tad, ja elektroenerģijas lietotāja elektroietaisies reaģē uz tiešu ārēju signālu. Piemēram, ja pārvades sistēmas operators energosistēmas balansa noturēšanai vēlas šīs elektroietaisies atslēgt. Dažādu gan tehnoloģisko,

²¹ Projekta "INGRIDO" nodevums D1.1 "Literatūras apskats par prognozētajām inovāciju tendencēm līdz 2050. gadam"

gan algoritmisku risinājumu attīstībai būs ļoti liela nozīme pieprasījuma reakcijas iespēju efektīvai izmantošanai nākotnē. Šis ir jautājums, kas tiek ļoti aktīvi pētīts, tostarp arī Latvijā.

2.4. Agregatori

Agregatori ir nozīmīgi efektīvai mazu elektroenerģijas patērētāju elastīguma izmantošanai pieprasījuma reakcijas pakalpojumu nodrošināšanā. Agregators ir elektroenerģijas tirgus dalībnieks, kas apkopo dažādu tādu lietotāju elastību, kuri atsevišķi būtu pārāk mazi, lai piedalītos elektroenerģijas vai palīgpakalpojumu tirgos, jo neatbilstu to noteiktajām minimālajām prasībām, vai arī nesniegtu nekādu vērtību ņemamu efektu energosistēmas darbības uzlabošanā. Vispārīgā gadījumā agregatori neapkopo tikai pieprasījuma reakciju (t. i., patēriņa elastību), bet arī izklaidētās ģenerācijas resursus vai pat kombinē patēriņa un ģenerācijas elastību. Savukārt neatkarīgie agregatori ir agregatoru tips, kuri var izmantot elektroenerģijas lietotāju elastību, neprasot šai darbībai atļauju no lietotāja esošā elektroenerģijas tirgotāja vai balansatbildības nodrošinātāja. Ar agregatoru ieviešanu saistītie problēmjautājumi sīkāk iztirzāti projekta INGRIDO nodevumos D4.1²², uD4.1²³ un D4.2²⁴.

2.5. Elastīguma izmantošana

Ņemot vērā straujo tehnoloģiju attīstību, dažādu inovatīvu elastīguma resursu iekļaušana palīgpakalpojumu sniegšanā un ar to saistītās tirgus regulējuma inovācijas ir joma, kurā sagaidāma strauja un ilgstoša attīstība viscaur Eiropā, tostarp arī Latvijā. Zemāk uzskaitīti vairāki energosistēmu operatoru darbības virzieni, kuros elastīguma resursi varētu būt ļoti noderīgi. Šajās jomās elastīguma izmantošana kaut kādā mērā jau notiek vai arī vēl sagaidāma turpmāka izpēte un attīstība attiecīgajā virzienā.

Energosistēmas balansēšana. Lai aizvietotu sarūkošos balansēšanai pieejamos resursus no ģenerācijas puses ar pieprasījuma pusē esošiem resursiem, nepieciešams, lai tie būtu vienmēr pieejami. Tas sevī ietver ne tikai iespējas palielināt, samazināt vai pārbīdīt laikā elektroierīču elektroenerģijas patēriņu, bet arī pie lietotājiem uzstādītu mikroģenerācijas iekārtu (tostarp rezerves ģeneratoru) un enerģijas akumulācijas iekārtu izmantošanu šiem nolūkiem.

Vidējā termiņā un ilgtermiņā paredzams, ka nozīmīga daļa balansēšanas resursu būs izvietota tieši sadales tīklu līmenī, lai gan atbildība par pašas energosistēmas balansēšanu joprojām gulsies uz PSO. Tas nozīmē, ka nepieciešami risinājumi gan tam, kā izklaidētos resursus integrēt balansēšanas tirgus produktos, gan arī iespējamām problēmām, kas varētu rasties sadales tīklos, ja pārvades sistēmas operators sāktu masveidīgi izmantot šīs izklaidētās ģenerācijas, akumulācijas un patēriņetaises savām vajadzībām.

²² Projekta "INGRIDO" nodevums D4.1 "Elektroenerģijas agregatori: risinājumu analīze un priekšlikumi to integrācijai pakalpojumu tirgū"

²³ Projekta "INGRIDO" nodevums uD4.1 "Elektroenerģijas agregatori: regulējuma izmaiņas virzībai uz neatkarīgiem agregatoriem"

²⁴ Projekta "INGRIDO" nodevums D4.2 "Elektroenerģijas agregatori: biznesa modelis dalībai nākamās dienas tirgū"

Pārslodzes vadība. Pārtraukumaino AER dēļ mainīgās enerģijas plūsmas, kā arī ģeogrāfiski nevienmērīga un koncentrēta AER avotu attīstība var izraisīt dažādas pārslodzes problēmas visu sprieguma līmeņu tīklos. Tās pamatā var risināt ar trīs panēmieniem.

Pirmkārt, nepieciešama laba resursu pārredzamība un veiksmīga nepieciešamo datu apmaiņa, lai varētu pēc iespējas efektīvāk risināt pārslodzes problēmas ar tirgus mehānismu palīdzību, it īpaši tad, ja šīs problēmas nav pēc savas būtības sistēmiskas. Līdz ar to nepieciešama cieša PSO un SSO koordinācija, kā arī jāpanāk, lai būtu precīzi zināma katra elastīguma resursa atrašanās vieta energosistēmā.

Otrkārt, lai risinātu problēmas pārvades tīkla līmenī, izklaidēto elastīguma resursu jauda ir pārāk maza, tāpēc nepieciešams attīstīt tehnoloģiskās iespējas to agregēšanai (t. i., apvienotai vadībai).

Treškārt, starpsavienojumu jaudas palielināšana novērš sastrēgumu rašanās iespējas tajos un paver durvis arī dažādu elastīguma avotu pārrobežu izmantošanai.

Jaudu nepietiekamības problēma. Jaudu pietiekamības novērtējuma principi tiek pārskatīti, ņemot vērā aizvien pieaugošo dinamiku energosistēmās, ko izraisa saules un vēja elektrostaciju integrācija tajās un tam sekojošā tradicionālo bāzes ģenerācijas vienību iziešana no tirgus. Tiek lēsts, ka starpsavienojumi var nodrošināt līdz trešdaļai nepieciešamā elastīguma līdz 2025. gadam, taču atlikušais apjoms jāpanāk ar dažādiem ģenerācijas avotiem, pieprasījuma reakciju un enerģijas akumulāciju. Dažādi pētījumi Eiropā un pasaulē apstiprina elastīguma nozīmīgumu jaudu pietiekamības nodrošināšanā. Dažādu elastīguma pakalpojumu un produktu loma strauji aug, un tie tiek integrēti tirgos arvien plašāk²⁵.

Jaudu pietiekamībai nozīmīgu devumu varētu sniegt elektroenerģijas lietotāju aktīva iesaistīšana dažādos elektroenerģijas tirgos (nākamās dienas, tekošās dienas, palīgpakalpojumu u. c.). Ja lietotāji, kam ir elastīgi resursi, varētu piedāvāt savus pakalpojumus energosistēmai jaudu deficīta gadījumos, tas ievērojami samazinātu nepieciešamību pēc tradicionālām ģenerētājiem vienībām un arī investīcijām papildu starpsavienojumos.

Energosistēmas aukstā palaišana. Lai pēc vērēnīgas energosistēmas avārijas atjaunotu tās darbību, ir nepieciešams kāda sākotnēja jaudas padeve, lai elektrostacijas atsāktu strādāt. Nereti šim mērķim tiek izmantoti dīzelģeneratori, taču ir arī dažādi pilotprojekti ASV un citviet, kuros demonstrēta elektroķīmisko akumulatoru sistēmu spēja iedarbināt kombinētā cikla ģāzturbīnu. Šis varētu būt viens no vairākiem palīģpakalpojumiem, ko iespējams sniegt ar dažādām akumulācijas sistēmām.

Elektroenerģijas kvalitātes uzturēšana. Sprieguma kvalitāte, tā krituma un mirgošanas novēršana un harmoniku kompensācija ir svarīgi sadales sistēmas operatora uzdevumi. CEER savās konsultācijās ar sadales sistēmu operatoriem noskaidrojis, ka līdz ar pārslodzes vadību arī dažādu elektroenerģijas kvalitātes uzturēšanas problēmu risināšanā nākotnē liela loma varētu būt tieši elastīguma resursiem.

²⁵ Projekta "INGRIDO" nodevums D1.1 "Literatūras apskats par prognozētajām inovāciju tendencēm līdz 2050. gadam"

3. VES izstrādes prognozēšana un tehnoloģiju attīstība

3.1. VES izstrādes prognožu metodikas

Vēja enerģijas resursa galvenā specifika ir saistīta ar tā plūsmas svārstībām laikā. Šis apstāklis rada nenoteiktību saražotās elektroenerģijas apjomā, kas samazina tās vērtību. Tas skaidrojams ar to, ka energosistēmā līdzsvars starp elektroenerģijas patēriņu un ražošanu ir jā saglabā jebkurā laikā – pretējā gadījumā var rasties elektroenerģijas kvalitātes pazemināšanās vai piegādes pārtraukumi. Vēja enerģijas izstrāde ir tieša vēja ātruma funkcija, un atšķirībā no tradicionāliem elektroenerģijas avotiem to nav viegli prognozēt.

Vēja enerģijas izstrādes prognozi laika periodos var aplūkot no dažādām perspektīvām atkarībā no paredzētā lietojuma. Turbīnas aktīvai uzraudzībai var izmantot prognozes no milisekundēm līdz vairākām minūtēm uz priekšu. Šāda veida prognozes parasti sauc par ļoti īstermiņa prognozēm²⁶.

Energosistēmas vadībai un enerģijas tirdzniecībai ir nepieciešamas prognozes 24-72 stundām uz priekšu. Tās izmanto, lai noteiktu elektrostaciju darba režīmus (agregātu optimāla izvēle) un optimizētu to noslodzi (ekonomiskais slodzes sadalījums). Skaidrība par tirgū sniedzamajiem elektroenerģijas pārdošanas piedāvājumiem par tekošo dienu parasti ir nepieciešami jau iepriekšējās dienas rītā (dalībai nākamās dienas tirgū). Šāda veida prognozes ir īstermiņa prognozes. Skaitliskā laikapstākļu prognozēšanas modeļa (*Numerical Weather Prediction model, NWP*) izmantošana ļauj iegūt rezultātus attiecīgā vēja parka ģeogrāfiskajam punktam vai apkārtējo punktu tīklam. Pirmajā gadījumā modeļus varētu raksturot kā “uzlabotus jaudas līknes modeļus”, otrajā gadījumā kā “statistiskās mērogošanas” modeli. Piemēram, *LocalPred* izmanto galveno komponentu analīzi un mākslīgā intelekta metodes no apkārtējiem *NWP* režģa punktiem^{27,28}.

Nākamais solis ir tā sauktā mērogošanas (“*downscaling*”) procedūra. Vēja ātrums un virziens no attiecīgā *NWP* līmeņa tiek mērogots līdz turbīnas masta augstumam. Tas ietver vairākus soļus, vispirms atrodot vislabāko *NWP* veikspēju – bieži vien pie vēja ātruma 10 m virs zemes līmeņa vai vienā no zemākajiem modeļa vai spiediena līmeņiem^{29,30} [9, 10].

Piemēram var aplūkot operacionālās prognozēšanas sistēmas (*OPS*³¹) Previento algoritmu³², kas parādīts 3.1. attēlā. Precīzas vēja enerģijas prognozes pamatā parasti ir laba

²⁶ D. Bezrukovs (2019): The Study of Wind Energy Resource and the Assessment of the Economic Feasibility of Wind Energy Projects, Riga Technical University, Institute of Power Engineering, *RTU Press*. 140 p.

²⁷ Martí Perez, I., (2002): Wind Forecasting Activities. *Proceedings of the First IEA Joint Action Symposium on Wind Forecasting Techniques*, Norrköping, Sweden, pp. 11-20. Published by FOI - Swedish Defence Research Agency.

²⁸ Frías, L., E.Pascal, U.Irigoyen, E.Cantero, Y.Loureiro, S.Lozano, PM. Fernandes, I.Martí (2009): Support Vector Machines in the wind energy framework. A new model for wind energy forecasting. *Proc. Of the 2009 European Wind Energy Conference EWE'09*, Marseille (FR).

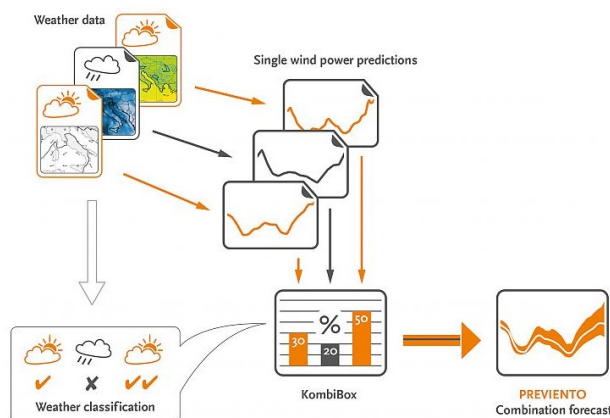
²⁹ Giebel G., Brownsword R., Kariniotakis G., Denhard M., Draxl C. (2011): The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power: A Literature Overview, 2nd edition. *ANEMOS.plus*, 2011. 109 p.

³⁰ Pinson P.; Chevallier C., Kariniotakis G. (2007): Trading Wind Generation From Short-Term Probabilistic Forecasts of Wind Power. *IEEE Transactions on Power Systems* (Volume: 22, Issue: 3, Aug. 2007). p. 1148 – 1156.

³¹ no angļu val. – *Operational Prediction System*

³² https://www.energymeteo.com/products/power_forecasts/wind-solar-power-forecasts.php

laika prognoze. Algoritms izmanto laikapstākļu datus no visiem vadošajiem laikapstākļu dienestiem un izmanto savu patentēto algoritmu vēja enerģijas prognozēšanai. Sarežģītais aprēķinu modelis dod iespēju veikt prognozes ar augstu precizitātes pakāpi.



3.1. att. OPS Prievento algoritms vēja enerģijas prognozēšanai

Aprēķina pamatā ir dažādu meteodienestu laikapstākļu dati. Pirmajā solī tiek izveidota sākotnējā vēja enerģijas prognoze, pamatojoties uz pieejamajiem laikapstākļu datiem. Otrajā solī prognozes optimizē tā sauktais *KombiBox*. *KombiBox* procedūra piešķir lielāku nozīmi tām prognozēm, kas pie attiecīgajiem laikapstākļiem ir devušas vismazāko prognozēšanas kļūdu. Procedūras rezultāts nodrošina uzlabotu vēja enerģijas prognozi.

3.2. VES izstrādes prognozēšanas precizitātes analīze

VES izstrādes prognožu kļūdu novērtējumiem dažādos periodos (stundas, dienas un mēneša intervāliem) Latvijai, Lietuvai un Igaunijai balstās uz *Nord Pool* datiem. Kā papildus informācijas avoti datu kvalitātes pārbaudei un validācijai izmantots Lietuvas oficiālais statistikas portāls³³, Igaunijas statistikas birojs³⁴, Latvijas oficiālais statistikas portāls³⁵ un AS "Augstsprieguma tīkls" publiski pieejamie dati³⁶.

Par pamatu ņemti elektroenerģijas ģenerācijas dati un elektroenerģijas ģenerācijas prognožu dati, kuri tiek izmantoti *Nord Pool* elektroenerģijas cenas noteikšanai. Elektroenerģijas izstrādes prognozes sastāda katru dienu nākošajam 24 stundu intervālam ar vienas stundas izšķirtspēju.

Lai novērtētu prognozes datu kvalitāti stundas, dienas un mēneša intervāliem salīdzinājumam izmantots determinācijas koeficients R^2 . Determinācijas koeficients ir atkarīgā mainīgā dispersijas proporcija, ko izskaidro aplūkojamais atkarības modelis, t.i., skaidrojošie mainīgie. Mūsu gadījumā mums ir divas kopas – elektroenerģijas izstrāde un tās prognozes.

Lai novērtētu R^2 izmantota šāda formula:

³³ Lietuvas oficiālais statistikas portāls. <https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?indicator=S1R097#/>

³⁴ Igaunijas statistikas birojs: https://andmed.stat.ee/en/stat/majandus_energeetika_energia-tarbimine-ja-tootmine_aastastatistika/KE032/table/tableViewLayout2

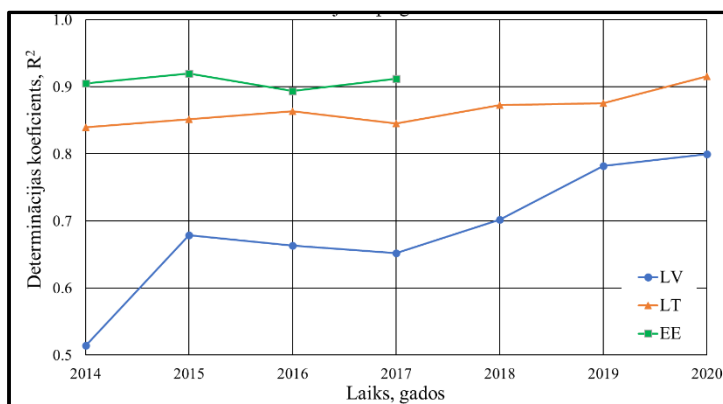
³⁵ Latvijas oficiālais statistikas portāls: <https://stat.gov.lv/lv>

³⁶ AS "Augstsprieguma tīkls": www.ast.lv

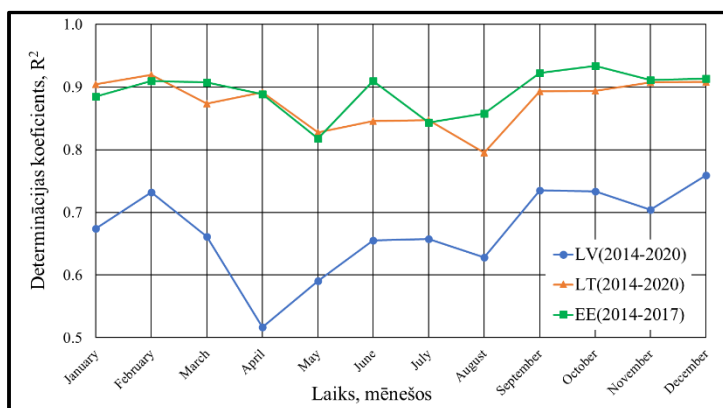
$$R^2 = \left(\frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \right)^2, \quad (1)$$

kur x – izstrādātā elektroenerģija atbilstoši stundas, dienas vai mēneša intervālam;
 $\bar{x}$ – vidējā izstrādātā elektroenerģija atbilstoši stundas, dienas vai mēneša periodam;
 y – izstrādātās elektroenerģijas prognozes atbilstoši stundas, dienas vai mēneša intervālam;
 $\bar{y}$ – vidējās izstrādātās elektroenerģijas prognozes atbilstoši stundas, dienas vai mēneša periodam.

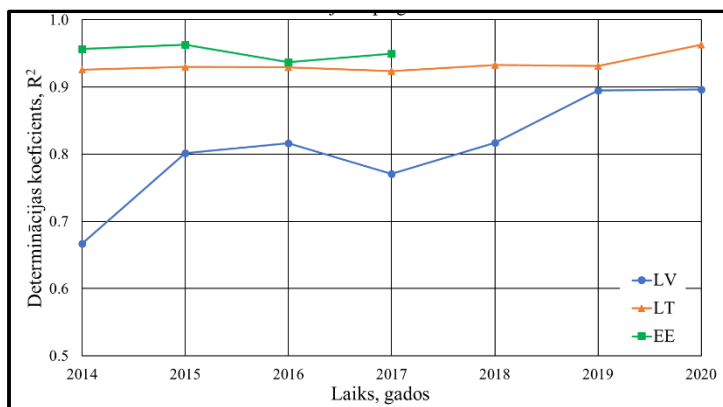
Vēja elektroenerģijas izstrādes prognozēšanas precizitātes novērtējumu dažādiem intervāliem ar prognožu un vēsturisku datu determinācijas koeficientu R^2 var skatīt sadalījumā pa gadiem (3.2., 3.4, 3.6. attēls) un atsevišķi katram mēnesim (3.3., 3.5., 3.7. attēls). Šeit Latvijai un Lietuvai paņemts periods 2014.–2020. gads, bet Igaunijai 2014.–2017. gads. Igaunijai pēc 2017. gada mainījās prognozēšanas metodika, attiecīgi par periodu 2018.–2020. dati nav lietojami prognozes datu kvalitātes novērtējumam stundas un dienas intervālos. Taču mēneša intervāla griezumā (attēls 12) prognožu dati Igaunijai ir derīgi, attiecīgi šajā attēlā atainots aprēķins par visu periodu. Par 2021. gadu vēl nav pieejami visi dati, tāpēc tas nav analizēts.



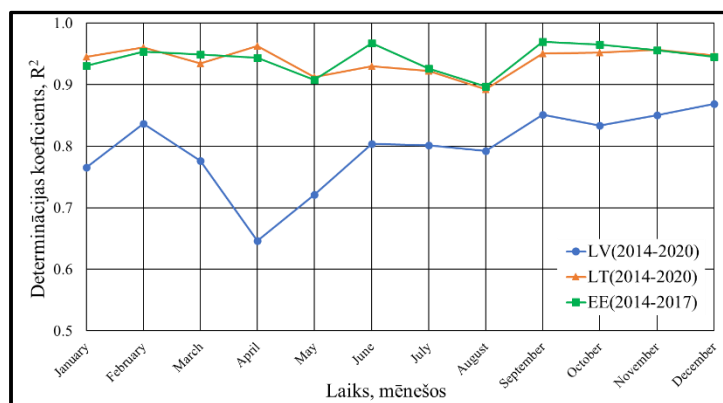
3.2. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (stundu intervāliem), sadalījums pa gadiem



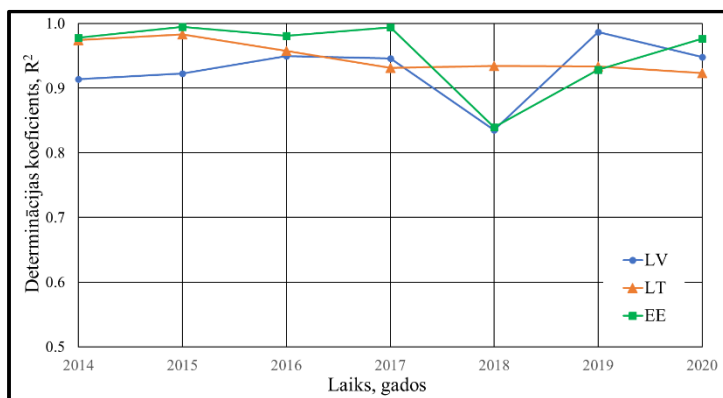
3.3. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (stundu intervāliem), sadalījums pa mēnešiem



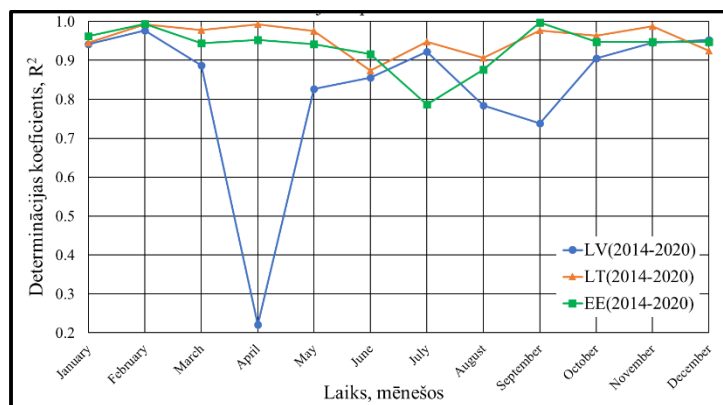
3.4. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (dienas intervāliem), sadalījums pa gadiem



3.5. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (dienas intervāliem), sadalījums pa mēnešiem



3.6. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (mēneša intervāliem), sadalījums pa gadiem



3.7. att. VES izstrādes prognožu un vēsturisko datu R^2 (mēneša intervāliem), sadalījums pa mēnešiem

Lielākās VES izstrādes prognožu kļūdas (mazākais R^2) Latvijā skaidrojamas ar daudzkārt mazāko uzstādīto VES jaudu un mazāku dažādību vēja turbīnu ģeogrāfiskajā izvietojumā. VES esot izvietotām dažādos apgabalos, ir vieglāk prognozēt to kopējo izstrādi, jo katras individuālās turbīnas prognožu neprecizitātēm ir tendence izlīdzināties³⁷.

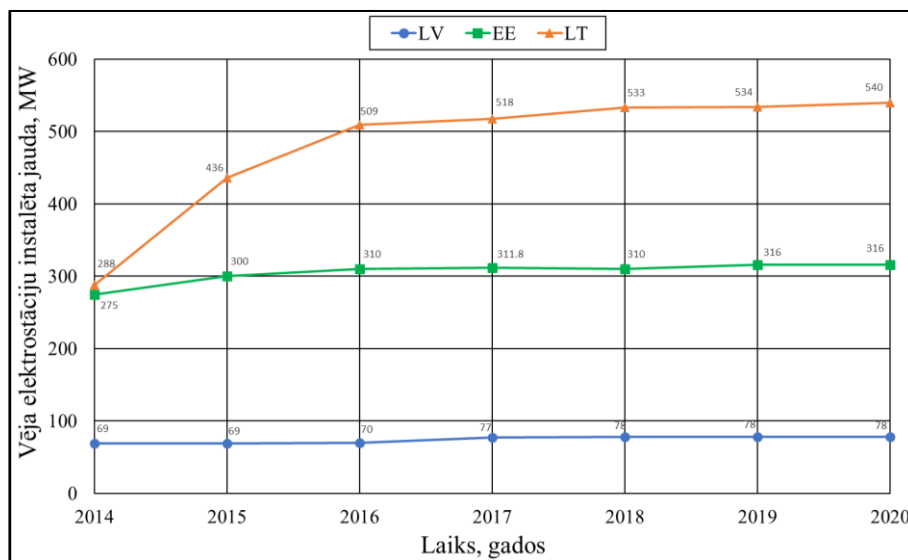
Labvēlīgas cenas iegūšana par saražoto enerģiju ir priekšnoteikums vēja elektrostaciju ekonomiskās efektivitātes uzlabošanai. Tāpēc elektroenerģijas ražošanas prognozēšana, kā arī prognozēšanas ierīču izmantošana ir perspektīvas jomas konkurētspēju paaugstinošu vēja enerģijas ražošanas metožu uzlabošanai.

Uz šī fona var secināt, ka mūsdienās aktuāli ir risināt jautājumus par vēja parku tehniskās un ekonomiskās efektivitātes uzlabošanu. Vienlaikus var atzīmēt, ka šo uzdevumu risināšanas rezultātus var sasniegt, palielinot uzstādīto vēja turbīnu jaudu (līdz 13-15 MW), palielinot masta augstumu (līdz 180-200 m), izmantojot enerģijas uzkrāšanu ierīces (līdz 10 GW), attīstot jūras un sauszemes vēja elektroenerģijas parkus, izmantojot vēja enerģijas ražošanas prognozēšanas metodes un meklējot citus risinājumus.

3.3. VES attīstība Latvijā

Vēja elektrostaciju uzstādītā jauda Baltijas valstīs pēdējos gados nav pieredzējusi lielas izmaiņas un pēc IRENA datiem³⁸ kopēja vēja turbīnu jauda 2020. gadā Latvijā ir 78 MW, Igaunijā 316 MW, bet visvairāk Lietuvā 540 MW (3.8. att.). Pārsvara tās ir sauszemes VES.

Vēja elektroenerģijas izstrādes svārstības bijušas saistītas ar laika apstākļu izmaiņām. Kopējās izstrādes ziņā tikai Lietuvā redzams būtisks pieaugums no 514 GWh 2014. gadā līdz 1503 GWh 2020. gadā (3.9. att.)³⁹.

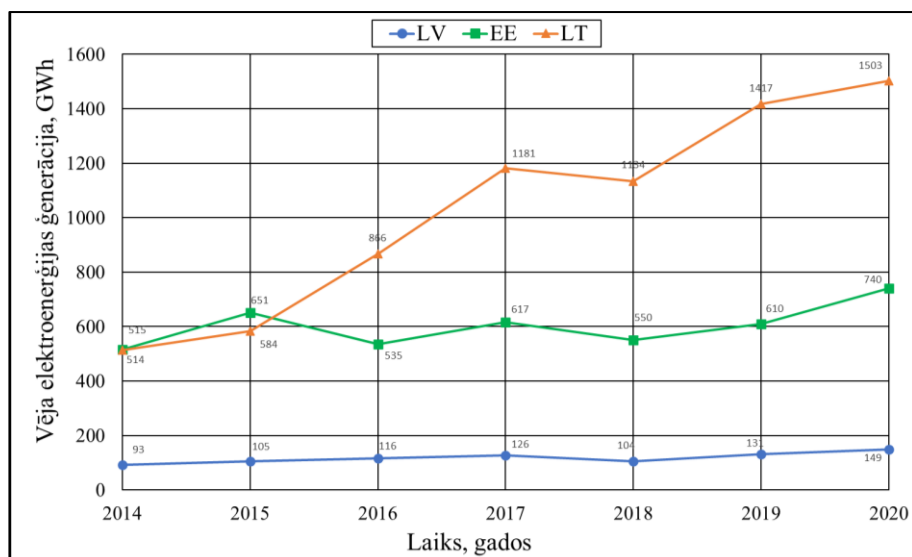


3.8. att. VES uzstādītā jauda Latvijā, Lietuvā un Igaunijā (MW) laika perioda no 2014. līdz 2020. gadam

³⁷ Tāpēc, ka vienā vietā konkrētā brīdī var būt nosliece uz pozitīvu prognozes kļūdas, kamēr citā – uz negatīvu, summējot prognozes līdz ar to kopējā kļūda būs mazāka, nekā skatoties katrai atsevišķi.

³⁸ Irena, Wind Energy Data: <https://www.irena.org/wind>

³⁹ Nord Pool: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table>



3.9. att. VES izstrāde Latvijā, Lietuvā un Igaunijā (GWh) laika periodā no 2014. līdz 2020. gadam

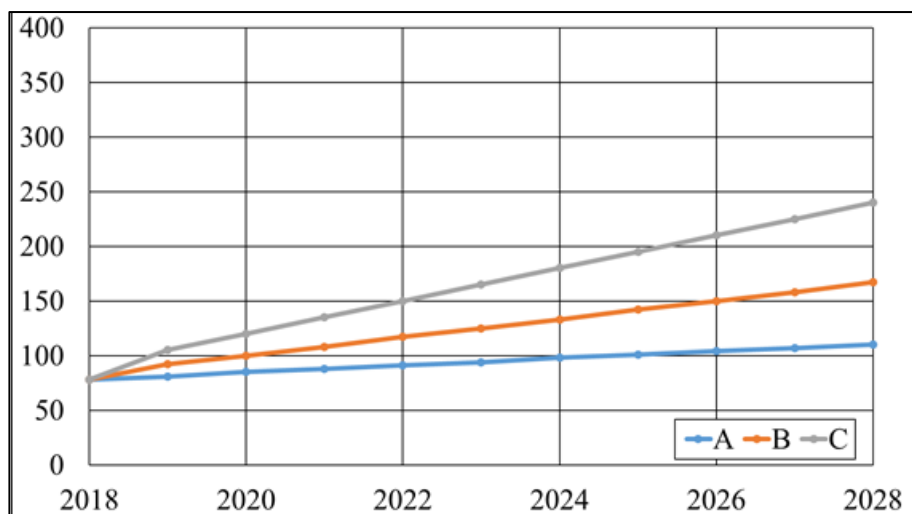
Attiecīgi, arī vēja elektroenerģijas ģenerācijas svārstības bija saistīti ar laika apstākļu izmaiņām. Tikai Lietuvā redzams būtisks pieaugums no 514 GWh, 2014. gadā līdz 1503 GWh 2020. gadā (3.9. att.).

Savukārt šajā apakšnodalā atainotā prognoze par situācijas attīstību Latvijas enerģētikas sektorā balstās uz informatīvo ziņojumu par Latvijas Enerģētikas ilgtermiņa stratēģiju 2030. gadam un Ekonomikas ministrijas izstrādāto Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021. – 2030. gadam. Atbilstoši prognozēm Baltijas valstīs elektroapgādes jaudas būs pietiekamas līdz 2023. gadam, lai segtu maksimālo slodzi un rezerves tikai ar Baltijā esošo ģenerāciju bez importa no kaimiņvalstu energosistēmām. Jaudu deficīts pīķa slodzes segšanai varētu parādīties pēc 2025. gada, kad plānots atslēgties no *IPS/UPS*⁴⁰ energosistēmas un uzsākt sinhronu darbu ar kontinentālas Eiropas sinhrono energosistēmu. Atbilstoši pašreizējai ģenerācijas jaudu attīstības prognozei pēc 2030. gada Baltijas valstis nespēs nodrošināt drošu energosistēmas darbu, jo Baltijā esošo elektrostaciju jauda kopā ar importa kapacitāti vairs nebūs pietiekoša, lai segtu pīķa pieprasījumu⁴¹.

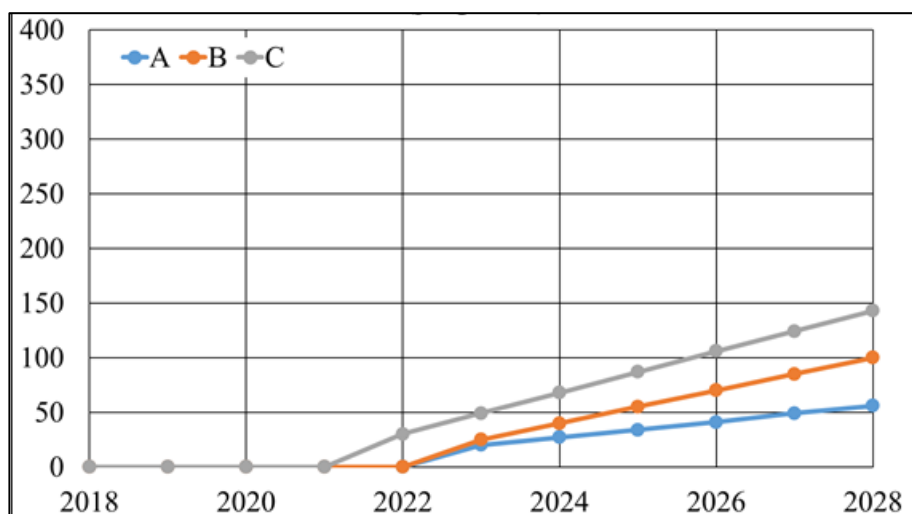
Vēja sauszemes un atkrastes elektrostaciju uzstādītās jaudas attīstība Latvijā, laikā periodā līdz 2028. gadam AST ziņojumos tiek pieņemta atbilstoši trim attīstības scenārijiem: **Scenārijs A “Konservatīva attīstība”**, **Scenārijs B “Bāzes scenārijs”** un **Scenārijs EU2030 “Optimistiska attīstība”**. No tiem izrietošie pieņēmumi par uzstādītās VES jaudas attīstību (atbilstoši 2018. gadā veiktajām speciālistu aplēsēm) parādīti 3.10.–3.12. attēlos. Pēc Centrālās statistikas pārvaldes datiem Latvijā VES kopēja jauda šobrīd 2021. gadā ir 78 MW, kas ir vistuvāk scenārija A „Konservatīva attīstība” prognozēm.

⁴⁰ *Integrated Power System / Unified Power System of Russia* – Krievijas un Baltkrievijas apvienotā energosistēma

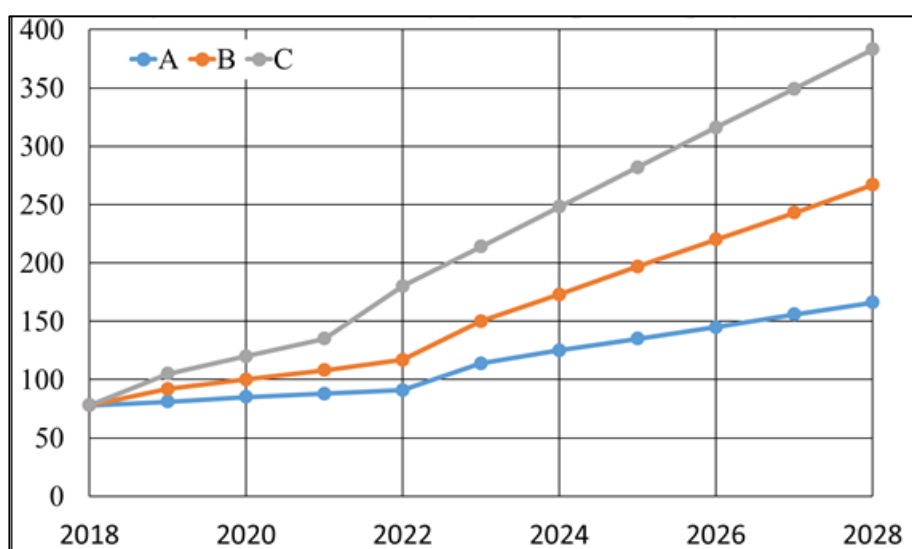
⁴¹ AS “Augstsprieguma tīkls” (AST), Pārvaldes sistēmas operatora ikgadējais novērtējuma ziņojums, 2018



3.10. att. Sauszemes VES uzstādītās jaudas (MW) prognozes attiecīgajos scenārijos



3.11. att. Selgas VES uzstādītās jaudas (MW) prognozes attiecīgajos scenārijos



3.12. att. Kopējās VES uzstādītās jaudas (MW) prognozes attiecīgajos scenārijos

Atbilstoši AST izmantotajai metodoloģijai šo energosistēmas attīstības scenāriju raksturojums ir šāds:

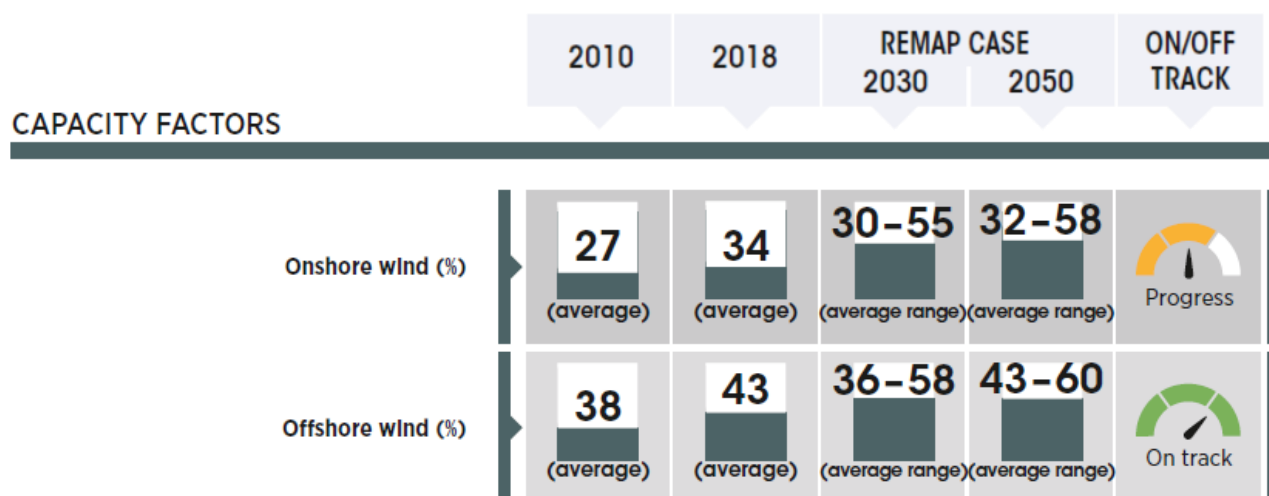
- **Scenārijs A „Konservatīva attīstība”:** Energosistēmas slodzes prognoze balstīta uz Latvijas sadales sistēmas operatoru iesniegto informāciju par slodzes un elektroenerģijas patēriņa attīstību.
- **Scenārijs B „Bāzes scenārijs”:** Elektroenerģijas sistēmas slodzes prognoze balstīta uz Ekonomikas ministrijas izsniegto IKP pieauguma prognozi Latvijas valstij, enerģētikas nozarēs iesaistītājiem sistēmas dalībniekiem, kā arī uz Latvijas sadales sistēmas operatoru iesniegto informāciju par slodzes un elektroenerģijas patēriņa attīstību.
- **Scenārijs EU2030 „Optimistiska attīstība”:** Ģenerējošo jaudu attīstības prognoze un elektroenerģijas sistēmas slodzes pieaugums balstīts uz Ekonomikas ministrijas izsniegto IKP pieauguma prognozi Latvijas valstij, ņemot vērā vēlamo ģenerācijas un slodzes attīstības tempu, lai sasniegtu Eiropas Savienības nospraustos mērķus 2030. gadam, par pamatu izmantotas Latvijas Republikas Ministru Kabineta 2016. gada 9. februārī apstiprinātās (MK Rīkojums Nr. 129) „Enerģētikas attīstības pamatnostādnes 2016-2020. gadam” un informatīvais ziņojums par Latvijas Enerģētikas ilgtermiņa stratēģiju 2030. gadam.

3.4. VES jaudas izmantošanas koeficienta pieauguma prognozes

Pašlaik inovācijas un tehnoloģiju uzlabojumi, kas virzīti uz vēja turbīnu lielākiem izmēriem (masta augstuma un rotora diametra palielinājumu), atļauj būtiski uzlabot VES jaudas izmantošanas koeficientu pat esošiem vēja elektrostaciju parkiem. Individuālu sauszemes vēja turbīnu jaudas pieaug no vidēji 2,6 MW 2018. gadā līdz 4–5 MW turbīnām, kas tiks nodotas ekspluatācijā līdz 2025. gadam. Attiecībā uz VES atklātā jūrā un selgā lielākā turbīnas jauda ir aptuveni 9,5 MW. Paredzams, ka projektos, kas tiks nodoti ekspluatācijā 2025. gadā, būs turbīnas ar jaudu 12 MW un vairāk (lai gan atsevišķiem iepriekš uzsāktiem projektiem ar ilgu ieceres realizācijas laiku var būt arī zemākas nominālās jaudas). Visticamāk sagaidāmi arī vēl ievērojamāki turbīnu jaudas palielinājumi līdz 15...20 MW tuvāko divdesmit gadu laikā.

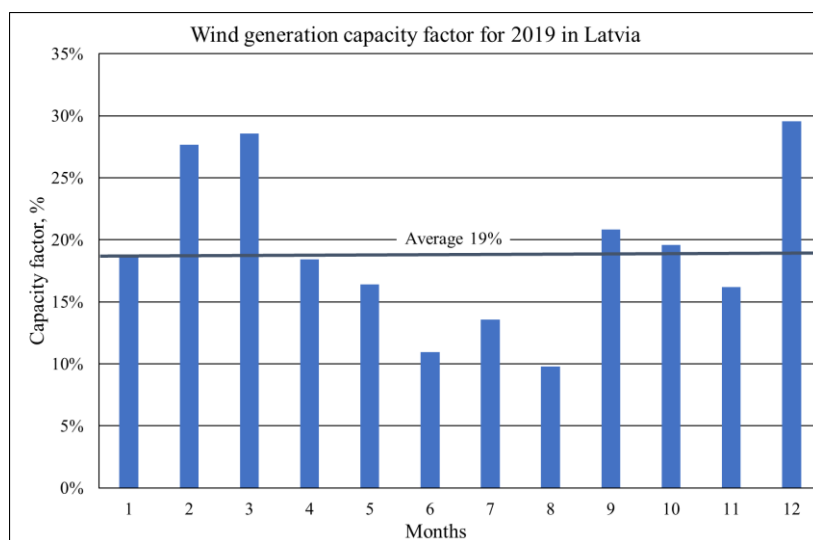
Uzlabotu vēja turbīnu tehnoloģiju, augstāku masta augstumu un garāku lāpstiņu ar lielākām aptveres zonām kombinācija ļauj palielināt tā paša apjoma vēja resursa jaudas izmantošanas koeficientus. Sauszemes vēja elektrostacijām globālās vidējās svērtās jaudas izmantošanas koeficients 2018. gadā bija 34%. Paredzamais jaudas izmantošanas koeficienta diapazons būs robežās no 30% līdz 55% 2030. gadā un 32% līdz 58% 2050. gadā. Jūras vēja parkiem prognozēts vēl lielāks progress, jaudas izmantošanas koeficientam esot robežās no 36% līdz 58% 2030. gadā un 43% līdz 60% 2050. gadā, salīdzinot ar vidējo svērto koeficientu 43% 2018. gadā (3.13. att.⁴²).

⁴² IRENA, Future of Wind. Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects, pieejams: <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>



3.13. att. Sauszemes un jūras vēja elektrostaciju jaudas izmantošanas koeficienta pieauguma prognozes

Pašlaik Latvijā vēja elektrostaciju uzstādītas jaudas izmantošanas koeficients svārstās ap 22%. Piemēram, 2019. gadā tas sasniedza tikai 19%, balstoties uz AST un *Nord Pool*⁴³ datiem un pieņemot ka 2019. gadā Latvijā vēja elektrostaciju kopējā jauda bija 78 MW (3.14. att.).



3.14. att. VES jaudas izmantošanas koeficients Latvijā 2019. gadā pa mēnešiem

⁴³ *Nord Pool*, Historical market data, pieejams: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>

4. VES potenciāla Latvijā izvērtēšana

4.1. Mazjaudas vēja ģeneratoru paredzamās efektivitātes novērtējums Latvijai raksturīgos vēja apstākļos

Vairumā gadījumu mazo vēja turbīnu ģeneratorus (SWTG⁴⁴) izmanto, lai darbinātu autonomu slodzi vai kalpotu kā rezerves enerģijas avots lauku iekārtās. SWTG veikspējas izpēte ir balstīta uz divu veidu jaudas līknēm: horizontālās ass vēja turbīnām (HAWT⁴⁵) ar nominālo jaudu 0,75, 2,5, 5,0, 20,0 kW un vertikālās ass vēja turbīnām (VAWT⁴⁶) – ar jaudu 0,75, 2,5, 6 kW.

SWTG darbības efektivitātes prognožu rezultāti atkarībā no vēja turbīnas veida, ģeneratora nominālās jaudas un tā uzstādīšanas vietas izvēlētajām meteoroloģisko novērojumu stacijām: Ainažos, Daugavpilī, Priekullos, Saldū un Ventspilī apkopoti 4.1. tabulā.

4.1. tab. Vēja turbīnu jaudas izmantošanas koeficients C_e Latvijas reģionos dažādiem SWTG

Mērījumu vieta	Jaudas izmantošanas koeficients, C_e , %						
	HAWT				VAWT		
	0,75 kW	2,5 kW	5,0 kW	20,0 kW	0,75 kW	2,5 kW	6,0 kW
Ainazi	9,89	16,77	11,27	5,94	4,56	3,07	3,41
Daugavpils	3,08	5,53	3,84	1,87	1,60	0,67	1,10
Priekuli	8,06	13,67	9,25	4,88	3,79	2,49	2,82
Saldus	5,08	8,91	6,11	3,02	2,46	1,24	1,76
Ventspils	13,33	21,24	14,56	8,49	6,45	5,24	4,96

Jaudas izmantošanas koeficienta C_e un AEP ⁴⁷ aprēķinu kopsavilkums Ventspils novadam HAWT un VAWT tipa vēja ģeneratoriem ir parādīts 4.1. attēlā⁴⁸. Salīdzinājums atklāj, ka neatkarīgi no vēja turbīnas tipa, tās darbības efektivitāte samazinās, palielinoties pārveidotāja nominālajai jaudai. Pētījuma rezultāti liecina, ka HAWT tipa SWTG vēja enerģijas pārveidotāji, kas atrodas vismaz 10 m augstumā virs zemes, ir piemērotāki darbam Latvijas vēja apstākļos, salīdzinot ar VAWT tipa ģeneratoriem. Turklāt sagaidāms, ka no pētījumā aplūkotojām HAWT tipa vēja enerģijas pārveidotājiem ar augstāko efektivitāti būs darbosies ģeneratori ar nominālo jaudu 2,5 kW.

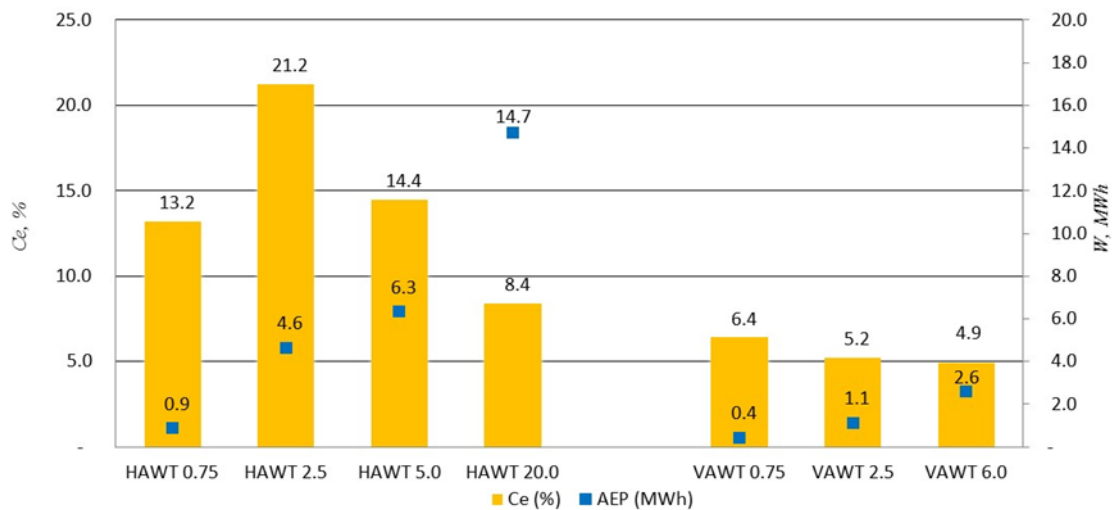
⁴⁴ Small Wind Turbine Generator

⁴⁵ Horizontal Axis Wind Turbines

⁴⁶ Vertical Axis Wind Turbines

⁴⁷ ikgadējās elektroenerģijas izstrādes prognozētā vērtība (no angļu val. – Annual Energy Production)

⁴⁸ D.Bezrukovs, V.Bezrukovs, V.Bezrukovs, M.Konuhova, S.Aniskevich (2020): The comparison of the efficiency of small wind turbine generators with horizontal and vertical axis under low wind conditions, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 2020, N 5 (Vol. 57) pp. 61-72.



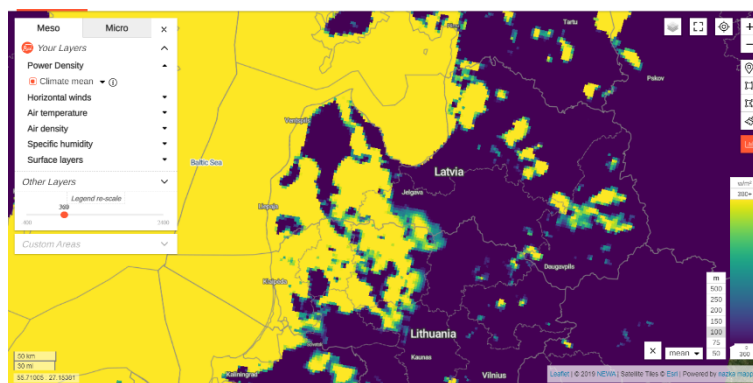
4.1. att. Ce un AEP prognozētās vērtības Ventspils novadā dažādu veidu un jaudas SWTG

4.2. Vēja elektrostaciju izstrādes prognoze Latvijai dalījumā pa reģioniem

Vēja enerģijas sadalījuma modelēšana 100 - 200 m augstumā Latvijas teritorijā paveikta, pielietojot NEWA⁴⁹ geoinformācijas sistēmu, kas ir publiski pieejama.

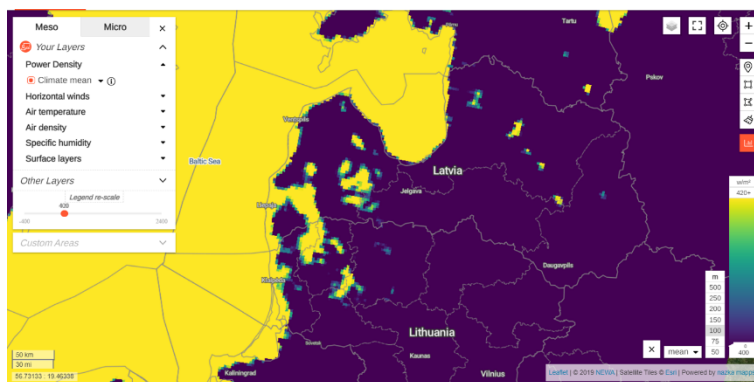
Vēja enerģijas blīvuma vērtība, kas noteikta 100, 150 un 200 m augstumam, ļauj aprēķināt vēja turbīnas maksimālo jaudu, ko var uzstādīt dzeltenā krāsā iezīmētajās vietās (4.2.–4.4. att.). Tajā pašā laikā, palielinoties augstumam, palielinās lieljaudas vēja turbīnu uzstādīšanai ieteicamo teritoriju platība.

Kartēs redzams, ka Latvijas teritorijas austrumu daļā vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā nekāpj virs 380 W/m^2 (4.2. att.). Savukārt rietumu daļā šis enerģijas blīvuma līmenis dažos apgabalos sasniedz 420 W/m^2 (4.3. att.). Vēja enerģijas blīvums 480 W/m^2 ir tikai Baltijas jūras piekrastē (4.4. att.).

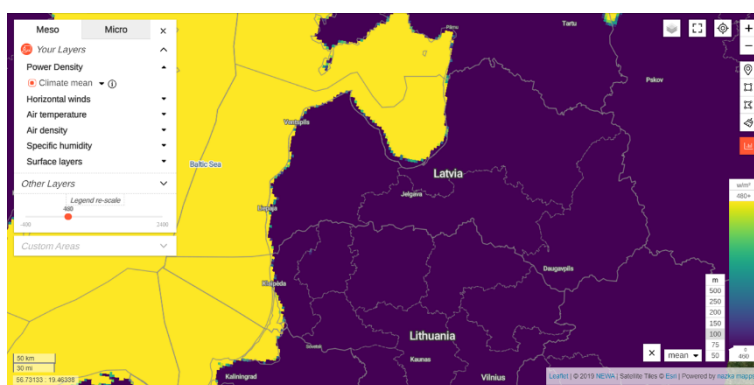


4.2. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā pārsniedz 380 W/m^2

⁴⁹ New European Wind Atlas: <https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>



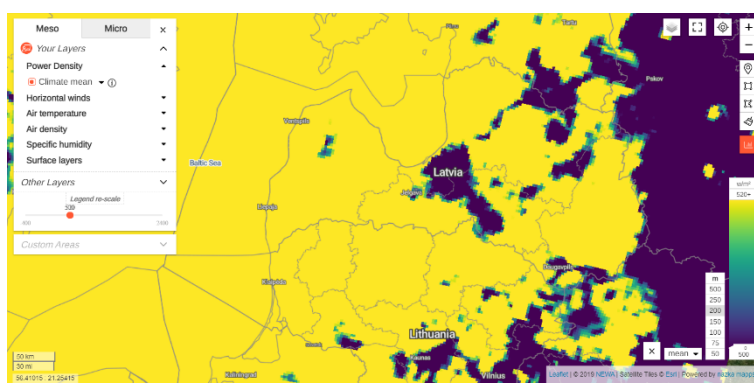
4.3. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā pārsniedz 420 W/m^2



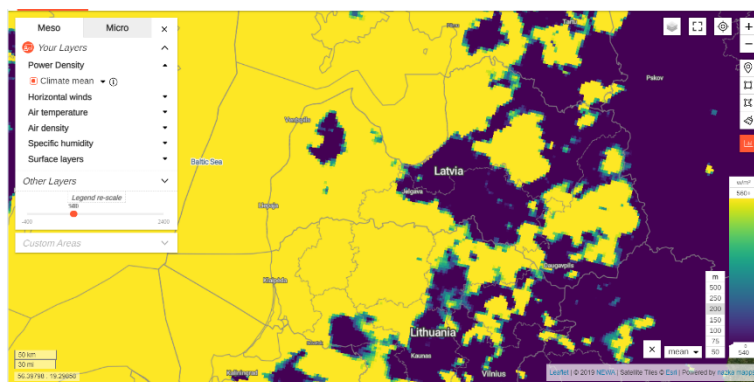
4.4. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 100 m augstumā pārsniedz 480 W/m^2

Salīdzinājumam, 4.5.–4.7. attēlos var redzēt vēja enerģijas blīvuma sadalījumu Latvijas teritorijā 200 m augstumā. Var ievērot, ka lielā daļā Latvijas teritorijas vēja enerģijas blīvums sasniedz 520 W/m^2 . Tajā pašā laikā vēja enerģijas blīvums sasniedz pat 640 W/m^2 ierobežotās teritorijās piekrastē un atsevišķās vietās Latvijas rietumu daļā.

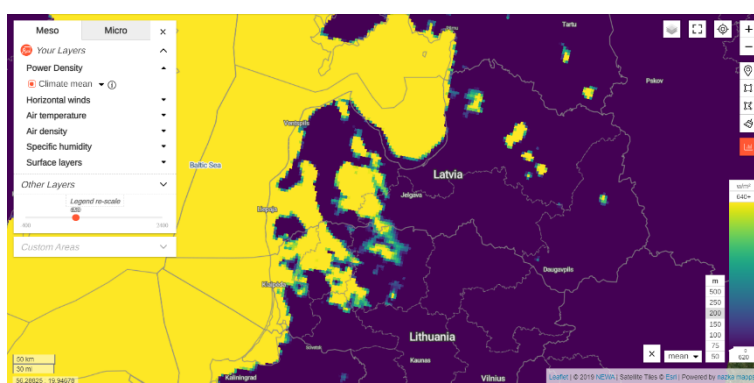
Ir zināms, ka vēja turbīnas projektētā jauda ir tieši proporcionāla vēja enerģijas blīvumam. Pamatojoties uz pašlaik paejamiem un prognozētiem vēja turbīnu rotoru diametriem un to mastu augstumiem, ir iespējams aprēķināt uzstādāmā ģeneratora jaudu. Jau tagad mūsdienu tehnoloģijas ļauj ražot vēja turbīnas ar diametru pat 210 m.



4.5. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 200 m augstumā pārsniedz 520 W/m^2



4.6. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 200 m augstumā pārsniedz 560 W/m^2



4.7. att. Teritorijas (ar dzeltenu), kur vēja enerģijas blīvums 200 m augstumā pārsniedz 640 W/m^2

Lai novērtētu vēja enerģijas iespējamās izmantošanas koeficientus, xx. tabulā ir parādīta aprēķinātā vēja turbīnu jauda, kuras varētu uzstādīt 4.2.–4.7. attēlos dzeltenā krāsā atzīmēto teritoriju robežās. Jaudas aprēķini tiek veikti vēja turbīnām ar masta augstumiem 100, 150 un 200 m.

4.2. tab. Potenciālās lietderīgās vēja turbīnu jaudas ar masta augstumiem ar 100, 150 un 200 m

Masta augstums, m	Turbīnas diametrs, m	Vēja plūsmas jauda, W/m^2	Vēja turbīnas uzstādītā jauda, MW		
			4.2., 4.5. att.	4.3., 4.6. att.	4.4., 4.7. att.
100	100	380	1,19		
		420		1,32	
		480			1,5
150	150	420	2,96		
		480		3,39	
		520			3,67
200	200	520	6,53		
		560		7,03	
		640			8,04

Vēja enerģijas projekti Latvijā kļūst komerciāli pievilcīgi, izmantojot vēja enerģiju augstumā virs 100 metriem. VES parki ar mastu augstumiem 150 – 200 m var dot lielas jaudas izmantošanas koeficientus arī Latvijas austrumu teritorijās, kas iepriekš netika uzskatītas par pievilcīgām vēja elektrostaciju būvniecībai. Turklāt zema iedzīvotāju blīvums šajās teritorijās var atvieglot šādu projektu plānošanu un apstiprināšanu. AER attīstība šajos rajonos var arī veicināt jaunu darba vietu izveidošanu un industriālu attīstību.

5. Vēja mērījumi Latvijā, pielietojot mobilo sakaru mastus

Šajā nodaļā izklāstīti Latvijas mobilo sakaru operatoru izmantoto vēja mērīšanas sensoru uzstādīšanas darbu rezultāti uz augstiem mobilo sakaru mastiem. Šajā gadījumā 10, 64 un 84 m līmenī tika uzstādīti WindSensor P2546A-OPR tipa anemometri, savukārt 40 m augstumā uzstādīti trīs šādi sensori. Vēja mērījumi šajās vietās uzsākti šādos datumos: Ventspils – 2017.12.21., Pāvilosta – 2018.01.11., Ainaži – 2018.01.21. Eksperimentālajiem pētījumiem tika izvēlēti trīsstūrveida režģa masti, kuru augstums ir aptuveni 100 m ar sānu izmēriem 1,2 un 1,4 m un kas atrodas esošo desmit metru augstuma meteoroloģisko mastu staciju tuvumā.

5.1. Mērīšanas sensoru uzstādīšana uz mobilo sakaru mastiem

Metroloģisko sensoru un mērīšanas kompleksa izvietojšanai bija izmantots rievota tipa režģa trīsstūrveida masts ar augstumu ap 100 m un malas garumu 1,4 m. Līdzīgs masts parādīts 5.1. attēlā (Mērījumu vieta 3, Rozēni, Ainaži).

Anemometru un vēja virziena sensoru uzstādīšanas izkārtojums 40 m augstumā parādīts 5.2. attēlā⁵⁰. Šajā vektorshēmā vēja virziena sensora S_{Dir} izvietojums uz 1,6 m garas izlices ar nobīdes leņķi β attiecībā pret Ziemeļiem (N), anemometri SA, SB, SC uz 2,8 m garām stieniem. Ņemot vērā, ka anemometrs ir uzstādīts uz 2,8 m garas izlices, tā attālums no masta centra O ar masta sānu platumu $L = 1,2$ m ir 3,2 m.

Metroloģisko sensoru un *Symphonie PLUS3* mērīšanas kompleksa uzstādīšana uz mastiem tiek veikta saskaņā ar shēmu 5.3. attēlā⁵¹, kur pieci līmeņi atbilst atskaites augstumiem 2, 10, 40, 64 un 84,5 m⁵². Atsauces augstumi ir augstumi, ko mobilo sakaru operators piešķir projekta apstiprināšanas stadijā.

Reljefa karte un mobilo sakaru mastu izvietojums, kas norāda vēja virziena sensora S_{Dir} leņķisko stāvokli attiecībā pret ziemeļu virzienu N Staļdzenes, Tebras un Rozēnu vietās, ir parādīts 5.4. attēlā⁵³.

⁵⁰ Vēja virziena sensora S_{Dir} uz 1,6 m garas izlices ar nobīdes leņķi β attiecībā pret ziemeļu vektoru N un anemometru SA, SB, SC uz 2,8 m garām stieniem, kas atrodas 3,2 m attālumā no trīsstūrveida masta centrs O ar malas garumu $L = 1,2$ m izvietojuma vektorshēma.

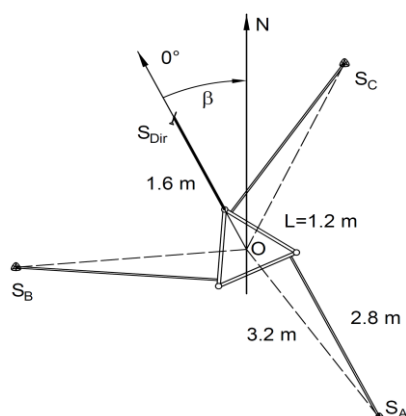
⁵¹ Metroloģisko sensoru un *Symphonie PLUS3* mērīšanas kompleksa izvietojšana uz trīsstūrveida režģu mastiem 100 m augstumā, kas atrodas Ventspils, Pāvilostas un Ainažu novadā, kur pieci līmeņi atbilst atskaites augstumiem 2, 10, 40, 64 un 84,5 m.

⁵² V. Bezrukovs, V. Bezrukovs, L. Gulbe, D. Bezrukovs, M. Konuhova. The experience of installing wind-measuring sensors on cellular communication tall masts, *Space Research Review*, 2018, volume 5. pp 106-127.

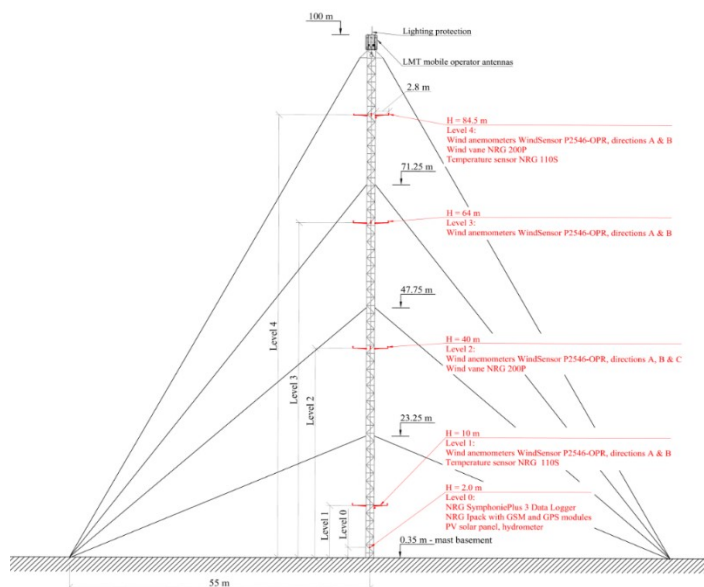
⁵³ Apvidus karte ar mobilo sakaru mastu izvietojumiem, kas norāda vēja virziena sensora S_{Dir} leņķisko stāvokli attiecībā pret ziemeļu virzienu N, attiecīgi pie Staļdzenes: -26°, Tebras: 51° un Rozēnos -54° no N.



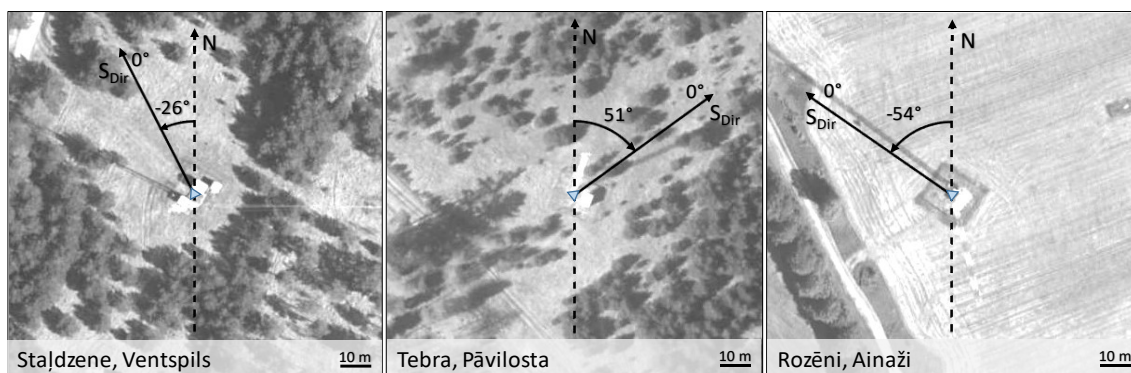
5.1. att. Režģa trīsstūrveida masts 3. vietā – Rozēnos, Ainažos



5.2. att. Vēja virziena sensora S_{Dir} izvietojuma vektorshēma



5.3. att. Metroloģisko sensoru un Symphonie PLUS3 mērīšanas kompleksa izvietošana



5.4. att. Apvidus karte ar mobilo sakaru mastu izvietojumiem

5.2. Rezultātu analīze

Datu pārsūtīšana no mērīšanas kompleksiem tiek veikta reizi dienā pa GSM mobilo sakaru kanāliem. Kopumā ikdienas datu iegūšanas process visiem 10 minūšu vēja parametru mērījumiem nesagādāja problēmas. Saņemtā informācija tiek glabāta datu bāzē, kas ļauj ātri uzraudzīt kompleksu darbību no attāluma un analizēt saņemto informāciju.

Datubāzes daļas piemērs pievadīts 5.1. tab. Katrs ieraksts satur laiku un 15 sensoru mērījumus: divas temperatūras mērījumi, 9 vēja ātruma mērījumi, 2 vēja virziena mērījumi, mitruma sensors un logera baterijas statuss. Katras sensoram ir saglabāta 10 min vidēja vērtībā ar standartu novirzi un par to periodu maksimāla un minimāla vērtības.

5.1. tab. Datu bāzes struktūras piemērs

Laiks	84 metru līmenis, Rozēnu tornis.								
	Vēja ātrums 84A, m/s				Vēja virziens 84DL, grādos		Gaisa temperatūra, 84TEMP, C°		
	CH5 MIN	CH5 AVG	CH5 MAX	CH5 SD	CH8 AVG	CH12 MIN	CH12 AVG	CH12 MAX	CH12 SD
20.01.2018 0:00	2.7	3.6	4.6	0.4	126	-3.2	-3	-3	0
20.01.2018 0:10	2.7	3.8	4.6	0.4	123	-3.2	-3.1	-3	0
20.01.2018 0:20	3.3	3.9	4.6	0.3	123	-3.2	-3	-3	0.1
20.01.2018 0:30	2.7	3.8	4.6	0.4	121	-3.2	-3.1	-3	0.1
20.01.2018 0:40	2.7	3.8	4.6	0.4	118	-3.2	-3.1	-3	0.1
20.01.2018 0:50	2.7	4.1	5.8	0.5	122	-3.2	-3.1	-3	0.1
20.01.2018 1:00	2.1	3.5	4.6	0.4	119	-3.2	-3.1	-3	0.1
20.01.2018 1:10	2.1	3.3	4.6	0.5	123	-3.2	-3.1	-3	0
20.01.2018 1:20	1.5	2.9	3.9	0.5	124	-3.2	-3.1	-3	0
20.01.2018 1:30	1.5	3.1	4.6	0.6	123	-3.2	-3.1	-3	0
20.01.2018 1:40	1.5	2.8	4.6	0.6	125	-3.2	-3.2	-3	0
20.01.2018 1:50	2.1	3.2	4.6	0.5	124	-3.2	-3.2	-3.2	0
20.01.2018 2:00	2.7	3.9	5.2	0.4	133	-3.2	-3.2	-3.2	0
20.01.2018 2:10	1.5	2.6	3.9	0.5	132	-3.2	-3.2	-3.2	0.1
20.01.2018 2:20	1.5	2.5	3.9	0.5	125	-3.2	-3.2	-3.2	0.1
20.01.2018 2:30	2.1	3.2	4.6	0.5	129	-3.2	-3.3	-3.2	0
20.01.2018 2:40	2.1	3.4	4.6	0.5	137	-3.2	-3.3	-3.2	0
20.01.2018 2:50	2.1	3.4	4.6	0.5	125	-3.5	-3.3	-3.2	0
20.01.2018 3:00	2.1	3.4	5.2	0.6	138	-3.5	-3.3	-3.2	0.1
20.01.2018 3:10	1.5	2.6	3.9	0.6	132	-3.5	-3.3	-3.2	0.1
20.01.2018 3:20	1.5	2.6	3.3	0.4	126	-3.5	-3.3	-3.2	0.1
20.01.2018 3:30	0.8	1.9	2.7	0.5	128	-3.5	-3.3	-3.2	0.1
20.01.2018 3:40	0.8	2.6	3.3	0.4	129	-3.5	-3.4	-3.2	0.1
20.01.2018 3:50	1.5	2.7	3.3	0.4	136	-3.5	-3.4	-3.5	0
20.01.2018 4:00	0.8	1.9	3.3	0.5	127	-3.5	-3.4	-3.5	0
20.01.2018 4:10	0.8	1.6	2.7	0.4	126	-3.5	-3.5	-3.5	0
20.01.2018 4:20	0.8	2.2	2.7	0.4	121	-3.5	-3.5	-3.5	0.1
20.01.2018 4:30	0.8	1.9	2.7	0.3	124	-3.5	-3.5	-3.5	0.1
20.01.2018 4:40	0.8	1.8	2.7	0.4	116	-3.5	-3.6	-3.5	0

V. Bezrukova publikācijā⁵⁴, kurā tika apspriesti rezultāti par gaisa plūsmas modelēšanu ap trīsstūrveida režģa mastu, redzams, ka, mērot vēja ātrumu, izmantojot divus vai trīs sensorus ar nobīdi par 120° vienam no otra, masta ēnā katrā brīdī var atrasties tikai viens sensors. Līdz ar to, ja vidējā vēja ātruma aprēķinos no datu bāzes tiek izslēgti mērījumi, kas veikti ar sensoru, kas atrodas masta ēnā, tad vajadzētu būt iespējai palielināt aprēķinu rezultāta ticamību.

Pamatojoties uz vēja ātruma mērījumiem, salīdzinoši īsam mērījumu periodam no 01.2018. līdz 05.2018. tika aprēķināti vēja augstuma profila modeļi Ventspils, Pāvilostas un Ainažu rajoniem, kas parādīti 5.5. attēlā⁵⁵. Lai ekstrapolētu izmērītās vēja ātruma vērtības, tiek izmantota jaudas likuma funkcija, kas tuvinā vidējā vēja ātruma vērtības ar pietiekami augstu R^2 koeficientu⁵⁶. Iegūtās vēja ātruma vērtības var tuvināti aprakstīt ar :

$$V_{avg} = V_{avg\ hr} \left(\frac{h}{h_r} \right)^\alpha = \frac{V_{avg\ hr}}{h_r^\alpha} h^\alpha = \gamma h^\alpha, \quad \left(\frac{h}{h_r} \right)^\alpha = \frac{V_{avg\ hr}}{h_r^\alpha} h^\alpha = \gamma h^\alpha, \quad m/s, \quad (2)$$

kur V_{avg} – vidējais vēja ātrums augstumā h , m,

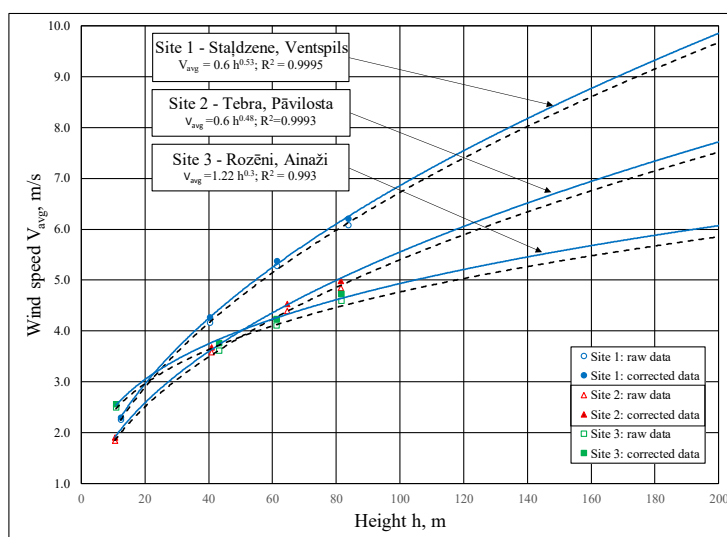
h_r – vēja ātruma mērīšanas augstums, m,

h – pētāmais augstums, m,

$V_{avg\ hr}$ – vidējais vēja ātrums, mērot augstumā h_r , m/s,

γ vienāds ar: 0,6 — 1. un 2. vietai un 1,22 — 3. vietai.

α – vai aproksimācijas koeficienti ir vienādi ar: 0,53; 0,48; 0,3, kas atbilst 1., 2. un 3. mērījumu vietām.



5.5. att. Vēja augstuma modeļi, kas atbilst vidējam vēja ātrumam

⁵⁴ Bezrukova V., Bezrukova V., Upnere S., Gulbe L., Bezrukova D. (2018). The use of cellular communication masts for wind shear research. 2018. *ENERGETIKA*, 2018. Vol 64, Issue 2, p. 64 -73.

⁵⁵ Vēja augstuma modeļi, kas atbilst vidējam vēja ātrumam V_{avg} Ventspils, Pāvilostas un Ainažu objektiem, kas aprēķināti, izmantojot neapstrādātus mērījumus (punktētās līnijas) un koriģētos datus (pilnas līnijas), salīdzinoši īsam mērījumu periodam no 01.2018. līdz 05.2018.

⁵⁶ Bezrukova V., Zacepins A., Bezrukova V., Komashilovs V. (2016). Comparison of methods for evaluation of wind turbine power production by the results of wind shear measurements on the Baltic shore of Latvia. *Renewable Energy*, Vol 96, Part A, October 2016, pp 765–774 doi:10.1016/j.renene.2016.05.007

5.5. attēlā parādīti vidējā vēja ātruma V_{avg} modeļi ar attiecību pret augstumu, kas aprēķināti no neapstrādātiem mērījumiem un koriģētajiem datiem. Šajā gadījumā vēja ātruma modeļos nav ņemts vērā reljefa nelīdzenums, kura īpašības redzamas 4. att.

Vērts salīdzināt vēja īpatsvara līknes, kas iegūtas vienlaicīgu vēja ātruma mērījumu rezultātā trīs vietās Baltijas jūras krastā. Redzams, ka parametriem γ un α spēka likuma funkcijas vienādojumā 1. un 2. reģioniem ir līdzīgas vērtības un līknēm ir līdzīga forma. Tomēr 3. vietai vēja nobīdes līkne atšķiras pēc nogāzes rakstura un krustojas ar 1., 2. vietas līknēm, kas atspoguļo atšķirīgus vēja apstākļus Ziemeļlatvijas piekrastē salīdzinājumā ar Latvijas dienvidrietumu piekrasti.

5.3. Nodaļas kopsavilkums

Lai pētītu gaisa plūsmas mijiedarbību ar režģa trīsstūrveida mastu, tika izmantota fiziska vēja ātruma mērīšanas metode, izmantojot divus vai trīs sensorus ar 120° nobīdi vienam pret otru četros līmeņos. Katrā līmenī tika uzstādīti 2 anemometri, vienlaikus 40 m augstumā virs zemes tika uzstādīti trīs anemometri. Papildus 40 un 84 m līmenī tika uzstādīti vēja virziena sensori. Uz masta tika uzstādīti *WindSensor P2546A-OPR* tipa vēja anemometri, izmantojot stieņu garumu 2,8 m un nostiprināti ar trim vītnēm un skrūvēm. Eksperimentu vietas atrodas Baltijas jūras krastā pie Staļdzenes, Tebras un Rozēniem Ventspils, Pāvilostas un Ainažu novados.

Stacionāro mobilo sakaru mastu izmantošana vēja ātruma mērījumiem sniedz derīgu iespēju būtiski samazināt laiku un materiālos resursus, kas nepieciešami vēja enerģijas potenciāla izpētei augstumā līdz 100 metriem virs zemes līmeņa.

Secinājumi

Galvenie apstākļi, kas daudzviet pasaulē rada pieaugošu vajadzību pēc energosistēmas elastīguma ir vēja elektrostaciju uzstādītās jaudas pieaugums (lielākoties pārvades tīkla līmenī) un saules elektrostaciju attīstība (galvenokārt sadales tīkla līmenī). Šo pārtraukumaino atjaunīgo energoresursu integrācijas rezultātā palielinās energosistēmas procesu prognozēšanas kļūdas, pieaug nenoteiktība, kā arī var samazināties sistēmas līmeņa datu pieejamība reāllaikā par visu elektrotīklu kopumā, ņemot vērā izklaidēto ģenerācijas avotu skaita pieaugumu sadales tīklā.

Nozīmīgākie nākotnē izmantojamie elastīguma avoti būs hidroelektrostacijas, akumulācijas iekārtas un rūpnieciska mēroga patēriņa elastība. Elastīguma nodrošināšanai izmantojamas arī gāzturbīnu termoelektrostacijas, tomēr katrai energosistēmai jāpiemeklē individuāli pielāgoti risinājumi, ņemot vērā līdzšinējo ģenerācijas portfeli, patēriņa un AER raksturlīkņu mainību un svārstības laikā, kā arī citus vietējos apstākļus.

Jaunu elastīguma risinājumu ieviešanu veicina tīkla vadības risinājumu attīstība, pieejamo resursu dažādība, kā arī energosistēmas darba režīmu vadības uzlabojumi. Attīstās arī jauni tirgus mehānismi un stimulu veidi, kas var palīdzēt ieviest jaunus un līdz šim maz izmantotus pakalpojumus par nelielām izmaksām. Lai gan katra atsevišķa, piemēram, patēriņa reakcijas resursa ieguldījums ir šķietami neliels, tie visi kopumā veicina energosistēmas transformāciju uz tādu sistēmu, kas spēj ātri pielāgoties jaunajām vajadzībām, tehnoloģijām un apstākļiem.

Dažādi elastīguma avoti savstarpēji konkurēs: piemēram, AER nesegtās slodzes balansēšanu var veikt gan konvencionālās elektrostacijas, gan akumulācijas iekārtas, gan patēriņa elastība vai jebkuru šo resursu kombinācija. Nozīmīgu elastīgumu nodrošina arī starpsavienojumi ar kaimiņvalstīm. Lai gūtu reālistisku priekšstatu par visatbilstošākajiem elastīguma avotiem konkrētā energosistēmā, būtiski nodrošināt, ka tirgus cenas un arī tirgus regulējums kopumā atspoguļo faktiskās elastīguma vajadzības, tādējādi kalpojot kā atbilstošs un precīzs investīciju signāls jaunu elastīguma resursu veiksmīgai ieviešanai.