

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Jūlija GUŠČA
Vides zinātnes programmas doktorante

**LATVIJAS ENERGOAVOTU ATTĪSTĪBA. OGLEKĻA DIOKSĪDA
UZGLABĀŠANAS PROCESU IETEKMES IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr. habil. sc. ing., profesore
D.BLUMBERGA

Rīga 2011

UDK 621. 311 (043)
Gu 885

**Gušča J. Latvijas energoavotu
attīstība. Oglekļa dioksīda
uzglabāšanas procesu ietekmes
izpēte**

Promocijas darba kopsavilkums. –
R.: RTU, 2011. – 34 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma
sistēmu institūta 2011.gada 26. aprīļa lēmumu,
protokols Nr. 8

ISBN 978-9934-10-174-8

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011. gada 16.septembrī plkst.14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. hab. chem. Māris Kļaviņš
Latvijas Universitāte

Profesors, Dr. ing. Gatis Bažbauers
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. tech. Ron Zevenhoven
Åbo Akademi universitāte, Somija

APSTIPRINĀJUMS

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

Jūlija Gušča(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tam ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 10 tabulas, 31 attēls un ilustrācijas, kopā 117 lapas. Literatūras sarakstā ir 126 nosaukumi.

Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros. Darbs izstrādāts, pateicoties „Nordic Energy Research” programmas „NoCO₂” projektam.

Satura rādītājs

Darba aktualitāte	5
Darba mērķis.....	5
Izpētes metodika	6
Darba zinātniskā nozīme	6
Darba praktiskā nozīme.....	7
Darba aprobācija	9
Darba struktūra un apjoms.....	12
1. Latvijas enerģijas ražošanas sektora attīstības modelis.....	12
2. Energosistēmu raksturojošo datu statistiskā apstrāde. Empīriskā modeļa izveide	12
3. Enerģijas ražošanas sektora attīstības scenāriji	16
3.1. Inženiertehniskais vērtējums.....	19
3.2. Ekonomiskais vērtējums.....	22
3.3. Klimata un vides faktoru vērtējums.....	25
Rezultātu vērtējums.....	26
Secinājumi.....	32

Darba aktualitāte

Šobrīd Latvijas energoapgādes sistēmā var novērot pretrunu: enerģētiskās koksnes potenciāls ir augsts, bet siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanā dominē fosilo energoresursu, īpaši dabasgāzes, izmantošana. Saskaņā ar izstrādātajām energosektora attīstības stratēģijām arī nākotnē Latvija plāno pieturēties pie fosilo kurināmo izmantošanas enerģētikas sektorā, neskatoties uz valsts saistībām klimata pārmaiņu mazināšanas un atjaunojamo energoresursu plašākas izmantošanas jomā. Lai gan valstij nav grūtību izpildīt savas saistības attiecībā uz Kioto protokola 2012. gada mērķi (rūpnieciskās aktivitātes samazināšanās dēļ kopš 1990. gada siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju daudzums ir samazinājies vairāk nekā divas reizes), Latvijai ir liels tehniskais potenciāls palielināt energoefektivitāti un samazināt SEG emisijas enerģētikas nozarē.

Viens no instrumentiem SEG emisiju apjomu stabilizācijai un samazināšanai atmosfērā ir oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas (OUU) tehnoloģiju izmantošana enerģijas ražošanas sektorā. OUU sistēma ietver enerģijas ražošanas procesā radīto CO₂ emisiju uztveršanu no dūmgāzēm, to apstrādi, transportēšanu un iesūkņšanu ģeoloģiskajos rezervuāros. Atšķirībā no Lietuvas un Igaunijas Latvijas teritorijā ir pieejamas ģeoloģiskās struktūras, kas ir piemērotas CO₂ uzglabāšanai. Tas nozīmē, ka OUU tehnoloģijas ir ne tikai tehniski realizējamas valsts līmenī, bet tās arī piedāvā CO₂ emisiju „importa” iespējas – Latvija var nodrošināt kaimiņvalstu radīto CO₂ emisiju uzglabāšanu šajos rezervuāros.

Pasaulē realizētie OUU projekti lielākoties koncentrējas uz CO₂ emisiju uztveršanu no lielo jaudu fosilo energoresursu spēkstacijām, ko var pamatot ar augstiem fosilo energoresursu CO₂ emisiju faktoriem un ekonomiskiem apsvērumiem. Tomēr OUU ir iespējams tehniski nodrošināt arī mazo jaudu un biokurināmo spēkstacijās.

Lai panāktu OUU tehnoloģiju veiksmīgu integrēšanu Latvijas energoapgādē, ir nepieciešama izpēte, kas noteiktu, kādi tehniskie, ekonomiskie, klimata un vides faktori ir jāņem vērā.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt vairākkritēriju vērtējuma metodiku, ko varētu izmantot Latvijas energoapgādes sistēmas pārejai uz zemo oglekļa dioksīda emisiju tehnoloģijām.

Darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Izstrādāt Latvijas energoapgādes sistēmas attīstības scenārijus 2012.–2020. gadam, ietverot CO₂ uztveršanas un uzglabāšanas tehnoloģijas, un izanalizēt tos no inženiertehniskiem, ekonomiskiem, vides un klimata aspektiem.
2. Izstrādāt ekonomiskos, vides un klimata indikatorus oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas sistēmas ieviešanai un noteikt to vērtības Latvijas energoapgādes sistēmas gadījumā.

Izpētes metodika

Enerģijas ražošanas attīstības scenāriju modelēšanai un to tehniskai, ekonomiskai un klimata novērtēšanai ir izmantota dinamiskās modelēšanas metode. Promocijas darba izstrādes laikā iegūtie enerģijas ražošanas uzņēmumu dati matemātiski analizēti, izmantojot matemātiskās statistikas metodi – regresijas analīzi. Analizētas CO₂ emisiju faktoru vērtības, saražotais elektroenerģijas un siltumenerģijas daudzums un energoavotu efektivitātes rādītāji. Pārbaudīti regresijas analīzes pareizas piemērošanas nosacījumi, veicot korelācijas pārbaudi, adekvātuma pārbaudi un autokorelāciju. Iegūts empīriskais vienādojums CO₂ emisiju optimizācijai atkarībā no iekārtas lietderības koeficienta, saražotās enerģijas daudzuma un CO₂ emisiju faktora energoavotos bez OUU.

Izpētes metodika ietver energoresursu izmantošanas iespēju izpēti, pamatojoties uz hipotēzēm, ka tiek būtiski izmainīta energoresursu struktūra un ieviesta CO₂ uzglabāšana.

Metodikā integrēta dzīves cikla analīze, lai novērtētu vides faktoru ietekmi. Metodikas algoritms ir ilustrēts darba 2. nodaļā.

Darba zinātniskā nozīme

Darbā ir izstrādāta metodika CO₂ uztveršanas un uzglabāšanas procesu novērtēšanai Latvijas energoapgādes sistēmā. Lai izvēlētos optimālo CO₂ uztveršanas un uzglabāšanas sistēmas risinājumu, ņemot vērā inženiertehniskos, ekonomiskos, klimata un vides aspektus, ir izveidots vairākkritēriju dinamiskais vērtējuma modelis. Veicot enerģijas ražošanas uzņēmumu datu matemātisko analīzi, iegūts empīriskais vienādojums un pārbaudīts tā adekvātums. Vienādojumu var izmantot CO₂ emisiju optimizācijai energoavotos bez OUU. OUU tehnoloģiju darbības vērtējumam ir izstrādāti indikatori un noteiktas sakarības.

Darba praktiskā nozīme

Darba laikā izstrādātās un darbā aprakstītās metodikas ir nozīmīgas dažādās līmeņos:

1. Eiropas Savienība: iegūti pirmie rezultāti, kas skaidro par OUU procesu ieviešanu enerģijas ražošanas sektorā saistībā ar Eiropas Savienības Klimata paketes prasībām par oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas procesu integrēšanu enerģijas ražošanas un rūpnieciskajās nozarēs.
2. Valsts iestādes
 - a. Latvijas valdība gūst pirmos rezultātus no darbā izstrādātajiem Latvijas energotirgus attīstības scenārijiem par OUU procesu ieviešanu saistībā ar Eiropas Savienības Klimata paketes prasībām par oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas procesu integrēšanu enerģijas ražošanas un rūpnieciskajās nozarēs.
 - b. Par enerģētikas stratēģijas izstrādi atbildīgās valsts institūcijas varēs izmantot energosektora attīstības metodiku valsts energosektora plānošanai un OUU tehnoloģiju izveidei. Kurināmā bilances izmaiņu rezultāti sniedz informāciju par ergoapgādes drošības un enerģijas pašnodrošinājuma prognozēm atjaunojamo enerģijas resursu un OUU tehnoloģiju gadījumos un ir izmantojami enerģētikas politikas stratēģiju izstrādei.
 - c. Valsts institūcija (piemēram, Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija), kas atbild par CO₂ uztveršanas un uzglabāšanas direktīvas ieviešanu, izstrādāto metodiku un iegūtos rezultātus varēs izmantot nacionālās CO₂ uztveršanas un uzglabāšanas programmas izstrādei. Darbā noteiktos OUU tehnoloģiju efektivitāti raksturojošos indikatorus (īpatnējās izmaksas uz novērsto vai uztverto CO₂ tonnu) var izmantot, lai definētu valsts nostāju OUU direktīvas ieviešanā.
 - d. Valsts institūcijas (piemēram, Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija un Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs), kas atbild par SEG emisiju uzskaiti, emisiju kvotu tirdzniecību un klimata pārmaiņu procesu uzraudzību, varēs izmantot metodiku, kas vērtē CO₂ emisiju apjomu no OUU sistēmas, SEG emisiju apjomu prognozēšanai, Kioto mērķa sasniegšanai un emisiju kvotu sadales plāna izstrādei. Ministrijai būtu jāņem vērā iegūtās sakarības un atzinumi par CO₂ emisiju apjomu samazināšanas iespējām, izstrādājot vai mainot normatīvos tiesību aktus klimata pārmaiņu un SEG tirdzniecības jomā.

- e. Par vides piesārņojuma noteikšanu un piesārņojuma procesu uzraudzību atbildīgā valsts institūcija (piemēram, Vides pārraudzības valsts birojs) varēs izmantot inženiertehnisko un vides faktoru novērtējuma metodikas, ietekmes uz vidi novērtējumā sniedzot atzinumus par vides piesārņojuma noteikšanu no OUU procesiem un izsniedzot piesārņojuma atļaujas plānotās darbības uzsākšanai CO₂ uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas procesu īstenošanai.
3. Uzņēmumos:
 - a. izstrādātie inženiertehniskie risinājumi par CO₂ uztveršanas tehnoloģiju integrēšanu dažādu kurināmā veidu, tehnoloģiju un jaudu ergoavotos, sniedz pārskatu par šādu tehnoloģiju ieviešanas ekonomiskajiem, klimata un vides rādītājiem un dalību OUU projektos.
 - b. CO₂ transportēšanas pa cauruļvadiem modulis sniedz potenciālajiem cauruļvadu ražotājiem un operatoriem informāciju par CO₂ cauruļvadu infrastruktūras izveidošanas, uzturēšanas un ekspluatācijas nosacījumiem un saistītajām izmaksām.
 - c. Izveidotais CO₂ emisiju empīriskais vienādojums ļauj novērtēt un prognozēt CO₂ emisiju apjomu izmaiņu dinamiku atkarībā no kurināmā patēriņa, lietderības koeficienta un kurināmā emisiju faktora vērtību izmaiņām un salīdzināt uzņēmuma CO₂ emisiju līmeni ar vidējiem rādītājiem valstī.
 4. Bankas un investori
 - a. Ekonomisko faktoru vērtējuma metodika un iegūtās sakarības investoriem ļauj izvērtēt OUU energoprojektus un izvēlēties izdevīgākos tehnoloģiskos risinājumus. Definētā CO₂ emisiju kvotu ietekme uz OUU tehnoloģiju atmaksāšanas laiku palīdz izstrādāt piemērotākās stratēģijas darbībai CO₂ emisiju tirdzniecības shēmā.
 - b. Iegūtie enerģijas ražošanas tehnoloģiju indikatori (īpatnējās izmaksas uz novērsto un uztverto CO₂ emisiju tonnu un nacionālie CO₂ emisiju faktori) ļauj klimata pārmaiņu un enerģētikas finanšu atbalsta fondiem definēt OUU tehnoloģiju ieviešanas skaitliskos indikatīvos mērķus projekta pieteicējiem.
 5. Zinātnieki un pētnieki: darbā veiktā Latvijas ergoapgādes attīstības analīze ar OUU tehnoloģiju ieviešanu ieskicē turpmākās izpētes jomas enerģētikas, vides un ekonomikas pētniekiem un adaptēt metodiku citu valstu ergosistēmās.
 6. Sabiedrība: darbā veiktā Latvijas ergoapgādes attīstības analīze ar OUU tehnoloģiju ieviešanu informē sabiedrību par OUU sistēmu

radīto ietekmi uz elektroenerģijas tarifa izmaiņām, vides un klimata aspektiem un valsts attīstībai kopumā.

Darba aprobācija

Par darba rezultātiem ir ziņots un diskutēts:

1. Reģionālajā seminārā „CO₂ Capture and Storage – Response to Climate Change” ar referātu „Introduction of CCS - Effects on Latvian Energy Sector”, Viļņā, Lietuvā, 2011. gada 13.–14. aprīlī.
2. 6. starptautiskajā konferencē „WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development” ar referātu „Modelling of a Carbon Capture and Storage System for the Latvian Electricity Sector”, Timișoarā, Rumānijā, 2010. gada 21.–23. oktobrī.
3. 10. starptautiskajā konferencē „International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies” ar referātu „Simplified Dynamic Life Cycle Assessment Model of CO₂ Compression, Transportation and Injection Phase within Carbon Capture and Storage”, Amsterdamā, Nīderlandē, 2010. gada 19.–23. septembrī.
4. 2. starptautiskajā konferencē „Environmental Best Practices Conference” ar referātu „The Analysis of Resources within the LCA of CO₂ Injection in Saline Aquifers”, Krakovā, Polijā, 2009. gada 14.–18. septembrī.
5. 49. RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Geological Storage of Carbon Dioxide Emissions: Energy Consumption”, Rīgā, Latvijā, 2008. gada 13.–15. oktobrī.
6. Starptautiskajā konferencē „Trondheim CCS conference” ar referātu „Decomposition Analysis of CO₂ Emissions Scenarios for Latvian Energy Sector”, Trondheimā, Norvēģijā, 2007. gada 16.–17. oktobrī.
7. 48. RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Geological Mineralization of Carbon Dioxides for CO₂ Storage in Latvia”, Rīgā, Latvijā, 2007. gada 13.–14. oktobrī.
8. 48. RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Applying CO₂ Capture Technologies for Small Scale Cogeneration Plants in Latvia”, Rīgā, Latvijā, 2007. gada 13.–14. oktobrī.
9. Starptautiskajā konferencē „EcoBalt’ 2005” ar referātu „Ekoindikatoru analīze enerģētikas sektorā Latvijā”, Rīgā, Latvijā, 2005. gada 5.–6. maijā.
10. Latvijas Vides ministrijas un Lielbritānijas padomes organizētā konference "Klimata politikas attīstība un ieviešana” ar referātu „Oglekļa dioksīda uzglabāšanas saimniecības izvērtējums Liepājas reģionam”, Rīgā, Latvijā, 2005. gada 11. novembrī.

11. 46. RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Geological Carbon Dioxides Sequestration - a Tool for Emissions Reduction in Latvian Energy Sector”, Rīgā, Latvijā, 2005. gada 11.–13. oktobrī.
12. 4. starptautiskajā simpozijā “Nordic Minisymposium on Carbon Dioxide Capture and Storage” ar referātu „Modelling of sequestration of CO₂ in underground storage in Liepaja”, Espo, Somijā, 2005. gada 8.–9. septembrī.

Autores publikācijas

1. Simplified Dynamic Life Cycle Assessment Model of CO₂ Compression, Transportation and Injection Phase within Carbon Capture and Storage. Gušča J., Blumberga D. // Energy Procedia, Volume 4, 2011, p. 2526–2532.
2. Evaluation of CO₂ Emissions from Energy Sources in Latvia. Blumberga D., Veidenbergs I., Gusca J., Rošā M. // Latvijas Fizikas un tehnisko zinātņu žurnāls, 47. sējums, 2010. –30–39. lpp.
3. Carbon Capture and Storage: Cost Analysis of Electricity Production for Latvia. Gušča J., Naroznova I., Blumberga D., Volkova A. International Journal of Energy, Issue 3, Volume 4, 2010, p. 37–45.
4. Modelling of a Carbon Capture and Storage System for the Latvian electricity sector. Gusca J., Naroznova I., Blumberga D., Volkova A. // Selected Topics in Energy, Environment, Sustainable Development and Landscaping. – Proceedings of the 6th International Conference “WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable development”. – Politehnica University of Timisoara, Romania. – October 21-23, 2010. – p. 415-421.
5. Classification of Used Wood in European Solid Biofuel Standard: Fuel Specification and Classes (EN 14961-1). Alakangas E., Wiik C., Rautbauer J., Sulzbacher L., Baumbach G., Kilgus D., Blumberga D., Guscha J., Grammelis P., Malliopoulou A. // Proceedings of the 18th European Biomass Conference (ISBN 978-88-89407-56-5). - 3–7 May 2010, Lyon, France.
6. Modeling of Installed Capacity of Landfill Power Station. Blumberga D., Kuplais G., Veidenbergs I., Dace E., Gusca J. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 13. sērija, 3. sējums, 2009. – 19. – 26. lpp.
7. Geological Storage of Carbon Dioxide Emissions: Energy Consumption Model for Injection Phase. Gusca J., Demidko J.,

- Blumberga D. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 13. sērija, 1. sējums, 2008. – 18. – 23. lpp.
8. Is CO₂ Compressing and Piping Environmentally Feasible? Djomo S. N., Romagnoli F., Gusca J., Blumberga D. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 13. sērija, 1. sējums, 2008. – 24. – 32. lpp.
 9. Applying CO₂ Capture Technologies for Small Scale Cogeneration Plants in Latvia. Gušča J., Blumberga D., Blumberga M., Bērziņš Z. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 4. sērija, 17. sējums, 2006. – 221. – 226. lpp.
 10. Geological Mineralization of Carbon Dioxides for CO₂ Storage in Latvia. Gušča J., Blumberga D., Valtere S., Baško A. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 4. sērija, 17. sējums, 2006. – 265. – 272. lpp.
 11. Ekoindikatoru analīze enerģētikas sektorā Latvijā. Blumberga D., Blumberga M., Gušča J. //Starptautiskā konference „Eco – Balt 2005”, Rīgā, Latvijā, 2005. gada . 5.–6. maijā – 58. – 59. lpp.
 12. Modeling of Pellet Stoves for Dynamic Simulation of System and Estimation of Environmental Performances. Rochas C., Gusca J. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 4. sērija, 14. sējums, 2005. – 258. – 270. lpp.
 13. Geological Carbon Dioxide (CO₂) Sequestration – a Tool for Emission Reduction in Latvian Energy Sector. Gusca J., Blumberga D., Blumberga M. // Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 4. sērija, 14. sējums, 2005. – 250. – 257. lpp.
 14. Kļiedētās enerģijas ražošanas indikatori. Mazās koģenerācijas stacijas. Blumberga D., Veidenbergs I., Gušča J., Blumberga M., Kamenders A.//Latvijas Fizikas un tehnisko zinātņu žurnāls, 6. sējums, 2005. – 16. – 23. lpp.
 15. Modelling of Sequestration of CO₂ in Underground Storage in Liepāja. Gušča J., Blumberga D.// “Nordic Minisymposium on Carbon Dioxide Capture and Storage”, Espo, Somijā, 2005. gada 8.–9. septembrī.
 16. Ekoindikatoru analīze enerģētikas sektorā Latvijā. Gušča J., Blumberga D., Blumberga M., Innuss K.// Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti, 4. sērija, 12. sējums, 2004. – 10. – 17. lpp.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu valodā, un tajā ir ievads, četras nodaļas), secinājumi un literatūras saraksts. Ievadā ir aplūkota darba aktualitāte, pētījuma mērķis un metodes, kā arī sasniegto rezultātu nozīmīgums.

Promocijas darba 1. nodaļā ir apskatīti oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas procesu teorētiskie pamati un līdz šim veiktie pētījumi. Nodaļas noslēgumā ir definēts darba mērķis un uzdevumi.

2. nodaļā ir aprakstīta metodika, kā modelēt Latvijas enerģijas ražošanas sektora attīstību, ņemot vērā tehniskos, ekonomiskos un klimata faktoros. Ar matemātiskās statistikas metodi izveidots un pārbaudīts empīriskais vienādojums CO₂ emisiju optimizācijai atkarībā no saražotās enerģijas daudzuma, kurināmā CO₂ emisiju faktora un energoavota darbības efektivitātes.

Darba 3. nodaļā ir parādīti energosektora attīstības scenāriju rezultāti un noteiktas OUU tehnoloģiju ieviešanas ekonomisko, tehnisko un klimata indikatoru vērtības.

4. nodaļā ir sniegta vides faktoru vērtējuma metodika CO₂ transportēšanai pa cauruļvadiem un noteiktas vides faktoru vērtības dažādās vides ietekmju kategorijās.

Promocijas darbā ir 117 lapas, t.sk. 31 attēls, 10 tabulas un literatūras saraksts ar 126 literatūras avotiem. Kopsavilkumā netiek aplūkots literatūras apskats.

1. Latvijas enerģijas ražošanas sektora attīstības modelis

Darbā izstrādātais modelis ir valsts mēroga energomodelis, ar kura palīdzību var noteikt sakarības par kurināmo struktūru, CO₂ emisiju apjomiem, jaunu tehnoloģiju apgūšanas tendencēm, enerģijas ražošanas izmaksām un vides faktoriem laika periodā no 2012. līdz 2020. gadam. Modelis ir veidots, pamatojoties uz tiešo saikni starp enerģijas patēriņu un enerģijas nodrošinājumu konkrētos ekonomiskos un likumdošanas nosacījumos enerģijas tirgū.

2. Energosistēmu raksturojošo datu statistiskā apstrāde. Empīriskā modeļa izveide

Energosistēmas darbību ietekmējošo faktoru savstarpējās sakarības var definēt, izmantojot reālu energoiekārtu datus. Promocijas darbā ir apstrādāti un analizēti 72 energoavoti, kas piedalās 2. perioda Latvijas emisiju tirdzniecības sistēmā un veido modeļa statistisko datu kopu. Enerģijas ražošanas sektora pašreizējās situācijas vērtējumā ir izmantoti statistiskie dati un dati, kas tiešu un netiešu mērījumu ceļā ir iegūti no emisiju kvotu tirdzniecībā iesaistītajiem

uzņēmumiem. Datu statistiskā apstrāde un vairākfaktoru empīriskā modeļa izveide tika veikta ar datorprogrammas „STATGRAPHICSPlus” palīdzību.

Tā kā pastarpinātais darba mērķis ir zemo CO₂ emisiju tehnoloģiju attīstības modelēšana Latvijā, darbā ir izstrādāts empīriskais modelis, kas raksturo Latvijas energoapgādes uzņēmumu CO₂ emisiju rašanos. Analīzē ir izmantoti šādi lielumi:

- enerģiju ražojošo iekārtu uzstādītās jaudas (N_e , MW);
- iekārtu lietderības koeficienti (η_i , %);
- enerģijas ražošanai izmantotais kurināmais;
- ar katru kurināmo saražotā enerģija (E_{ei} , MWh/gadā);
- enerģijas ražošanas procesā radītās CO₂ emisijas no katra kurināmā veida (C_i t CO₂/gadā).

Empīriskā modeļa izmantošana ir ierobežota noteiktajos datu intervālos, kas raksturo konkrēto datu izlasi. Darbā modelētās kopas izlasi raksturo 1. attēlā definētās pazīmes.

Kurināmā patēriņa struktūra:

dabaszāze, enerģētiskā koksne, dīzeļdegviela (pīķa vai rezerves katliem), mazuts (pīķa vai rezerves katliem)

Kurināmā CO₂ emisiju faktors:

dabaszāze – 0,202 tCO₂/MWh
enerģētiskā koksne – 0 tCO₂/MWh
dīzeļdegviela – 0,269 tCO₂/MWh
mazuts – 0,278 tCO₂/MWh

Uzstādītā nominālā jauda:

10,5 – 320 MW

Enerģijas ražošanas efektivitāte:

dabaszāzes tehnoloģijām – 78-93 %
enerģētiskās koksnes tehnoloģijām – 78-82 %

Energoavota darbināšanas ilgums gadā:

390 – 6500 stundas/gadā

Klimatiskie apstākļi:

2006./2007.gadam raksturīgās apkures grādu dienas

1. attēls. Empīriskā modeļa lietojuma robežas

Ja pazīmes atšķiras, empīriskā modeļa lietojums būs nekorekts un kļūdainš.

Izpētes rezultātā tika iegūts regresijas vienādojums (1.), kas nosaka energoavotu CO₂ emisiju atkarību no iekārtu energoefektivitātes, kurināmā veida un saražotās enerģijas daudzuma.

$$C = 4432,4 + 0,2427 \cdot E_e + 39526,9 \cdot c_{CO_2}^0 - 16058 \cdot \eta_e \quad (1)$$

kur

C – radītais emisiju daudzums, t CO₂/gadā;

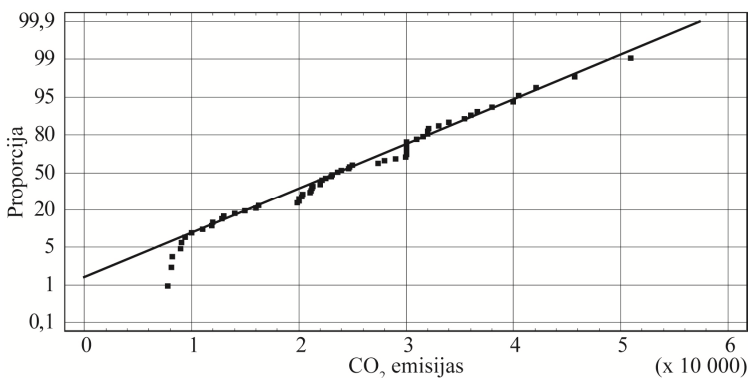
E_e – saražotās enerģijas daudzums, MWh/gadā;

$c_{CO_2}^0$ – kurināmā CO₂ emisiju faktors, t CO₂/MWh;

η_e – enerģijas ražošanas efektivitāte, %.

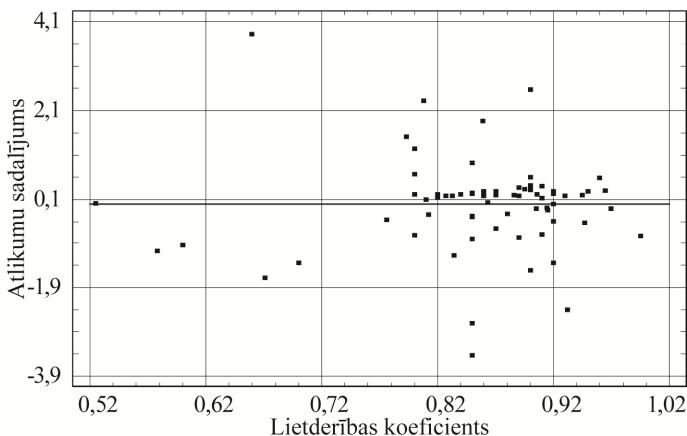
Statistiski apstrādājot empīriskā modeļa datus, tika noteikta korelācijas koeficienta kvadrātā (R^2) vērtība – $R^2=0,94$. Tas nozīmē, ka normālā sadalījuma gadījumā matemātiskais modelis (1. vienādojums) skaidro 94% no visiem korelācijas diagrammas punktiem atbilstošajā regresijas zonā. Izveidotā empīriskā vienādojuma lietojuma adekvātums ir pārbaudīts, ievērojot regresijas analīzes nosacījumus:

- Autokorelācijas pārbaude ir veikta, izmantojot Darbina–Vatsona testu un datu statistiskās apstrādes, un datu analīzes gaitā ir noteikts DW kritērijs. Tā vērtība ir 1,67, kas ir lielāka par 1,4, un tas nozīmē, ka būtiska atlikumu autokorelācija nav vērojama un analīzes gaitā ar mazāko kvadrātu metodi veiktie lielumu vērtējumi nav izkropļoti.
- Atkarīgais mainīgais lielums (energoavotu CO₂ emisijas) pakļaujas normālam sadalījuma likumam (sk. 2. attēlu).



2. attēls. Energoavotu CO₂ emisiju vērtību sadalījums

- Heteroscedasticitātes pārbaude darbā veikta, attēlojot grafiski kļūdu sadalījumu pēc energoavotu energoefektivitātes (sk. 3. attēlu).

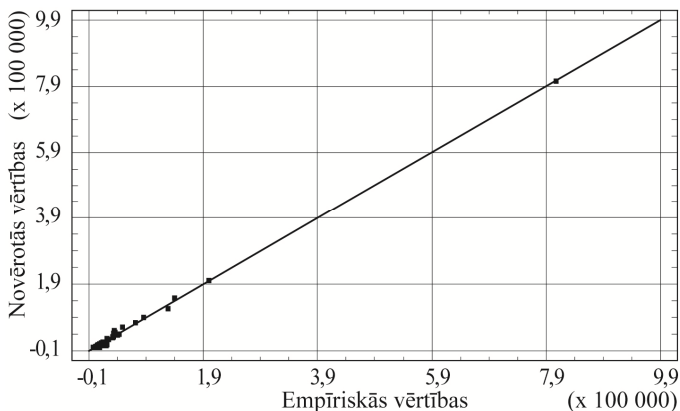


3. attēls. Atlikumu sadalījums pēc energoavotu energoefektivitātes

Datu kopai nav būtisku atlikuma sadalījuma izmaiņu atkarībā no lietderības koeficienta (η_e), un atlikumu vērtības ir līdzīgas visā lietderības koeficientu izmaiņu diapazonā.

- Multikolinearitātes pārbaude veikta, analizējot regresijas vienādojuma aprēķināto koeficientu korelācijas matricu, un rezultāti rāda, ka starp koeficientiem un tātad arī neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem korelācija ir nebūtiska. Par to liecina korelācijas koeficienta zemās vērtības (no 0,0473–0,35) – tās nepārsniedz 0,5, tātad regresijas vienādojuma koeficientu vērtējums ir korekts.

Empīrisko un aprēķināto datu analīze (sk. 4. attēlu) norāda uz labu korelāciju starp abām datu kopām un apliecina izveidotā modeļa pareizu lietojumu.



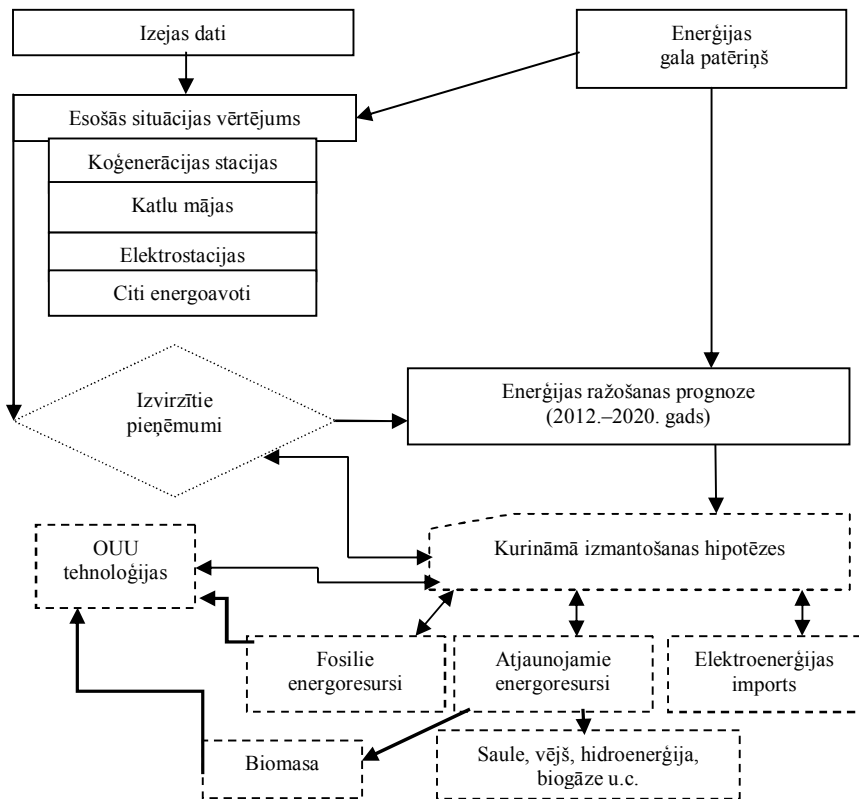
4. attēls. Energoavotu CO₂ emisiju vērtību empīrisko un novēroto datu salīdzinājums

Empīriskais modelis ir izstrādāts, pamatojoties uz elektrostacijas bez OUU datu kopas bāzi, tā izmantošana ir iespējama tikai līdzīga veida stacijās un modeļa pazīmju robežās. Tā kā Latvijā OUU tehnoloģijas nav ieviestas un līdz ar to nav pieejami šādu tehnoloģiju statistiskie (vai mērījumu) dati, nav iespējams izstrādāt empīrisko modeli, kas raksturotu spēkstacijās ar CO₂ uztveršanu radīto CO₂ emisiju apjomu atkarību no citiem energoavotu faktoriem.

3. Enerģijas ražošanas sektora attīstības scenāriji

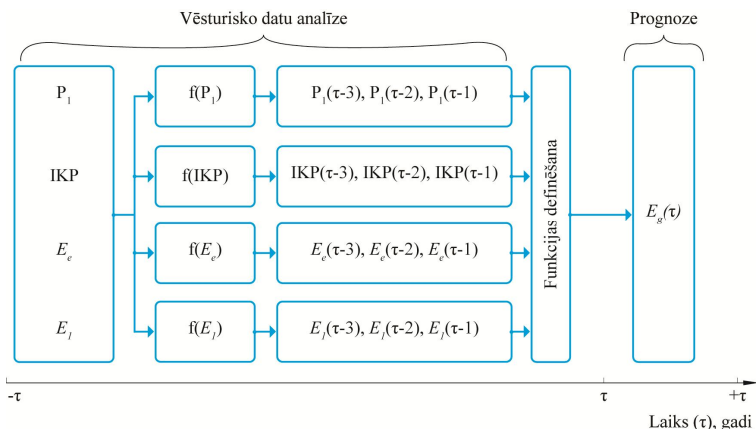
Energoavotu attīstības modelis ietver četrus savstarpēji saistītus aprēķinu moduļus: inženiertehnisko, ekonomisko, klimata un vides faktoru aprēķinu moduli. Inženiertehnisko, ekonomisko un klimata aprēķinu moduļu risinājumi ir veidoti ar dinamiskās lineārās programmēšanas metodes palīdzību. Savukārt vides faktoru analīzei tika izmantota dinamiskās dzīves cikla analīzes metode.

Darbā lietotā modeļa algoritms ir parādīts 5. attēlā.



5. attēls. Energoapgādes sektora modelēšanas algoritms

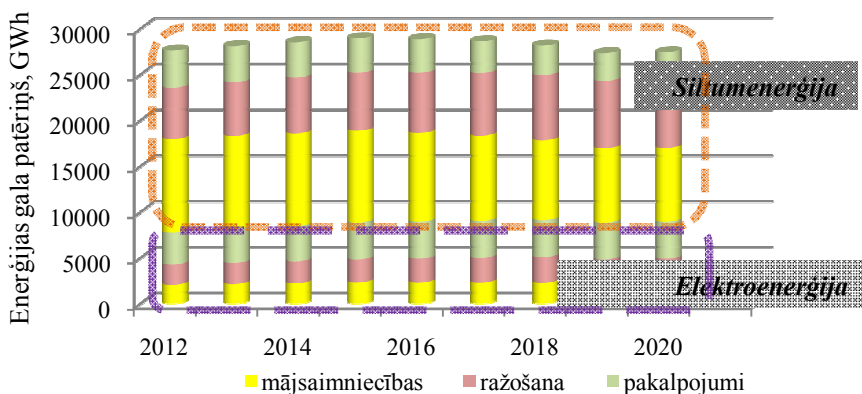
Analīzes pamatā ir pieņēmums, ka noteicošais enerģētikas sektora attīstības faktors ir patērētāju pieprasījums pēc enerģijas. Enerģijas gala patēriņa aprēķina algoritms ir ilustrēts 6. attēlā. Izstrādāto modeli var uzskatīt par uz mērķi orientētu modeli, kura uzdevums ir piedāvāt alternatīvas enerģijas pieprasījuma nodrošināšanai, ja tehnoloģisko risinājumu izvēlē priekšroka dota energotehnoloģijām, kas samazina enerģijas ražošanas sektora CO₂ emisijas un vides piesārņojumu atmosfērā.



6. attēls. Enerģijas gala patēriņa prognozes modelis

(P_1 – iedzīvotāju skaits, cilvēki; IKP – iekšzemes kopprodukts, tūkst. Ls; E_e – saražotā enerģija, MWh/gadā; E_1 – importētā enerģija, MWh/gadā; E_g – enerģijas gala patēriņš, MWh/gadā; τ – laiks, gadi)

Enerģijas gala patēriņa prognozes ir veidotas, pamatojoties uz statistisko datu analīzi un prognozēm par demogrāfiskajām, ekonomiskajām un īpatnējā enerģijas patēriņa izmaiņu tendencēm. Prognozes ir sadalītas trīs tautsaimniecības nozarēs – mājsaimniecības, ražošana un pakalpojumi (sk. 7. attēlu).



7. attēls. Elektroenerģijas un siltumenerģijas gala patēriņa prognozes no 2012. līdz 2020. gadam

Lai vērtētu energoavotos radīto CO₂ emisiju atkarību no tehniskajiem un klimata faktoriem, tika izmantotas matemātiskās statistikas metodes – korelācijas un regresijas analīze (skat. 2. nodaļu).

Promocijas darbā enerģijas ražošanas sektora attīstība ir aplūkota četros scenārijos:

- **A scenārijs** – enerģijas ražošanā dominē fosilie energoresursi;
- **B scenārijs** – enerģijas ražošanai tiek maksimāli izmantoti atjaunojamie energoresursi;
- **C scenārijs** – enerģijas ražošanā dominē fosilie energoresursi, tomēr, sākot ar 2015. gadu, fosilo kurināmo energoavotos (esošajos un plānotajos), kuru uzstādītā jauda pārsniedz 20 MW, tiek ieviestas OUU tehnoloģijas.
- **D scenārijs** – enerģijas ražošana maksimāli balstās uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu, un energoavotos (esošajos un plānotajos), kuru uzstādītā jauda pārsniedz 20 MW, tiek uzstādītas OUU iekārtas neatkarīgi no ražotnēs izmantotajiem kurināmā veidiem (fosilie vai biomasas resursi).

Darbā tiek pieņemts, ka katlu mājās un mazo jaudu elektrostacijās netiek ieviestas OUU tehnoloģijas, līdz ar to radītās emisijas nonāk gaisā.

3.1. Inženiertehniskais vērtējums

Enerģijas ražošanas modeli apraksta šādi matemātiskie vienādojumi:

- enerģijas pieprasījuma – nodrošinājuma struktūra

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum E_p \cdot \zeta_{ee} \leq \frac{\sum E_r}{\eta_p} \\ \sum J_p = \left(\sum_{\tau-q}^{\tau} (J_n^{AER} + J_n^F) + \sum_{\tau}^{\tau+q} (J_n^{AER} + J_n^F) \right) \cdot \sigma_n \end{array} \right. \quad (2)$$

kur

E_p – pieprasījums pēc enerģijas, GWh/gadā;

E_r – enerģijas nodrošinājums, GWh/gadā;

J_p – pieprasījuma pēc enerģijas nodrošināšanas jaudas, GW/gadā;

J_n^{AER} – atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju jaudas, GW;

J_n^F – fosilo energoresursu tehnoloģiju jaudas, GW;

ζ_{ee} – energoefektivitātes pasākumu ietekmes faktors uz enerģijas pieprasījumu patērētāju galā;

η_p – enerģijas padeves no ražotājiem līdz patērētājiem efektivitāte, %;

σ_n – energoražojošo tehnoloģiju nolietojuma koeficients, %;

q – spēkstacijas darbības mūžs, gadi;

τ – laika vienība.

- enerģijas ražošanas avotu efektivitāte

$$\begin{cases} \sum E_k \geq \frac{\sum E_{rez}}{\eta_e} \\ \sum E_k + \sum E_{rez} \geq \sum E_p \end{cases} \quad (3)$$

kur

E_k – kurināmā patēriņš pieprasītās enerģijas ražošanai, GWh/gadā;

E_{rez} – enerģijas nodrošinājuma rezerve (rezerves jaudas vai imports), GWh/gadā;

η_e – enerģijas ražošanas efektivitāte.

- CO₂ uztveršana

$$\begin{cases} C_e \leq \sum N_u \\ E_{p,u} = \sigma_{p,u1} \cdot C_e + \sigma_{p,u2} \cdot N_u \\ E_{s,u} = \sigma_{s,u1} \cdot C_e + \sigma_{s,u2} \cdot N_u \end{cases} \quad (4)$$

kur

C_e – energosektora radītās CO₂ emisijas τ . gadā, t CO₂;

N_u – visu energosektorā uzstādīto uztveršanas tehnoloģiju ražība (uztveršanas spēja), t CO₂/gadā;

$E_{p,u}$ – primārās enerģijas patēriņš (p) visām uztveršanas tehnoloģijām, MWh/gadā;

$E_{s,u}$ – sekundārās enerģijas patēriņš (s) visām uztveršanas tehnoloģijām, MWh/gadā;

$\sigma_{p,u1}$, $\sigma_{p,u2}$ – īpatnējais primārās enerģijas patēriņš CO₂ uztveršanas tehnoloģiju ekspluatācijai, MWh/t CO₂;

$\sigma_{s,u1}$, $\sigma_{s,u2}$ – īpatnējais sekundārās enerģijas patēriņš CO₂ uztveršanas tehnoloģiju ekspluatācijai, MWh/t CO₂;

u – uztveršanas posmu raksturojošs indekss;

p – primārās enerģijas indekss;

s – sekundārās enerģijas indekss.

- CO₂ saspiešana un transportēšana pa cauruļvadiem

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{s,k} = k_k \cdot \ln \frac{p_{k2}}{p_{k1}} \cdot C_k^1 \\ N_k \geq C_e \\ N_c - N_k \leq \lambda_c \\ N_c \geq \frac{A_c}{w_c} \cdot C_c \end{array} \right. \quad (5)$$

kur

$E_{s,k}$ – sekundārās enerģijas patēriņš (s) CO₂ saspiešanai, MWh/gadā;

k_k – īpatnējais elektroenerģijas patēriņš vienas CO₂ tonnas saspiešanai, kWh_e/tCO₂;

p_{k1} – CO₂ spiediens, ieplūstot kompresorā, MPa;

p_{k1} – CO₂ spiediens, izplūstot no kompresora, MPa;

N_k – CO₂ kompresoru ražība, t CO₂/gadā;

C_k^1 – līdz kompresoram nogādāto CO₂ emisiju daudzums, t CO₂/gadā;

C_e – energosektora radītās CO₂ emisijas gada laikā, t CO₂/gadā;

C_c – pa cauruļvadiem transportējamo CO₂ emisiju apjoms, t CO₂/gadā;

N_c – cauruļvada ražība, t CO₂/gadā;

λ_c – CO₂ emisiju zudumi CO₂ transportēšanas pa cauruļvadiem laikā, t CO₂/gadā;

w_c – CO₂ caurplūde cauruļvadā, km · tCO₂/gadā;

A_c – cauruļvada garums (no CO₂ uztveršanas vietas līdz CO₂ kompresoram), km;

k – indekss, kas raksturo saspiešanas kompresoros posmu;

c – indekss, kas raksturo transportēšanas pa cauruļvadu posmu.

- CO₂ iesūkņēšana un uzglabāšana

$$\left\{ \begin{array}{l} C_k^2 - N_{ie,j} \leq \lambda_{ie,j} \\ N_{ie,j} \leq V_r \\ V_r = C_n^\tau - C_n^{\tau-1} \\ \lambda_r = \frac{C_n^\tau - C_n^{\tau-1}}{A_r} \\ \lambda_r \cdot A_r \geq \lambda_{ie,j}, \lambda_r \neq const_r \\ E_{k\&ie,s} = \sigma_{s,k1} \cdot E_{k,z} + \sigma_{s,k2} \cdot \frac{p_k}{A_r} + \sigma_{s,k3} \cdot \frac{p_r}{d_r} \end{array} \right. \quad (6)$$

kur

$N_{ie,j}$ – CO₂ iesūkņēšanas ražība no j akām, t CO₂/gadā;

C_k^2 – no kompresora iznākušo CO₂ emisiju apjoms, t CO₂/gadā;

$\lambda_{ie,j}$ – CO₂ emisiju zudumi no iesūkņēšanas akām, t CO₂ /gadā;

V_r – rezervuārā iesūkņējama CO₂ daudzums konkrētajā rezervuāra izmantošanas gadā, t CO₂/gadā;

j – iesūkņēšanas aku skaits, gabali;

C_n – uzglabātais CO₂ emisiju daudzums τ gadā, t CO₂/gadā;

λ_r – CO₂ emisiju zudumi no rezervuāra, t CO₂ /gadā·km;

A_r – CO₂ iesūkņēšanas dziļums, km;

$E_{k&ie,s}$ – sekundārās enerģijas patēriņš saspiešanai un iesūkņēšanai, MWh/gadā;

$E_{k,z}$ – kompresorā ienākošais CO₂ emisiju apjoms no z cauruļvadiem, t CO₂ /gadā;

l_c – cauruļvada garums (no CO₂ uztveršanas vietas līdz CO₂ kompresoram), km;

p_k – CO₂ spiediens, ienākot kompresorā, MPa;

p_r – spiediens ģeoloģiskajā rezervuārā, MPa;

$\sigma_{s,k1}$ – īpatnējais sekundārās enerģijas patēriņš CO₂ saspiešanai, MWh/t CO₂;

$\sigma_{s,k2}$ – īpatnējais sekundārās enerģijas patēriņš spiediena zudumu kompensēšanai uz transportēšanas attālumu, MWh · km/MPa;

$\sigma_{s,k3}$ – īpatnējais sekundārās enerģijas patēriņš spiediena zudumu kompensēšanai uz iesūkņēšanas dziļumu, MWh · km/MPa;

i_e – indekss, kas raksturo iesūkņēšanas rezervuāros posmu;

r – ģeoloģisko rezervuāru raksturojošais indekss.

3.2. Ekonomiskais vērtējums

Darbā aprakstīto scenāriju ekonomisko aspektu vērtējums tiek veikts, aprēķinot un salīdzinot primāro energoresursu (PER) kopējās izmaksas un kopējās kapitālizmaksas, ko rada jauno elektrisko un koģenerācijas staciju jaudas laikā no 2012. līdz 2020. gadam. Papildu ekonomisko indikatoru kopu var noteikt, analizējot ar CO₂ emisiju tirdzniecību saistīto naudas plūsmu.

- Enerģijas ražošanas un uztveršanas izmaksas

$$I_{\partial} = \sum_{x,\tau} (B_{\partial} \cdot i_{kur,\partial}) + (W \cdot i_{kap,\partial}) + (E_e \cdot i_{eks,\partial}) + (E_e \cdot i_{a,\partial}) + (A_p \cdot i_{zt,\partial}) \quad (7)$$

kur

I_{∂} – elektroenerģijas ražošanas izmaksas standarta (bez OUU) elektrostacijā, Ls/gadā;

B_{∂} – kurināmā patēriņš enerģijas ražošanai standarta (bez OUU) elektrostacijā, MWh_k¹;

¹ MWh_k – enerģijas daudzums kurināmā izteiksmē.

i_{kur} – kurināmā cena, Ls/MWh_k;
 W – enerģijas ražošanas iekārtas jauda, MW;
 i_{kap} – kapitālieguldījumu apjoms uz uzstādītās jaudas vienību, Ls/MW;
 E_e – saražotās enerģijas daudzums, MWh;
 i_{eks} – ekspluatācijas un apkalpošanas izdevumu apjoms uz katru saražoto enerģijas vienību, Ls/MWh;
 i_a – blakusproduktu (pelni, izdedži, emisijas) apsaimniekošanas izdevumi uz katru saražoto enerģijas vienību, Ls/MWh;
 A_p – attālums no enerģijas ražošanas uzņēmuma līdz patērētājam, km;
 i_{zt} – īpatnējie izdevumi enerģijas pārvades zudumu novēršanai, Ls/km;
 δ – standarta elektrostaciju (bez OUU) raksturojošs indekss.

OUU tehnoloģiju gadījumā (C un D scenāriji) papildu izmaksas rada CO₂ uztveršanas, saspiešanas, transportēšanas un iesūkņēšanas posmu īstenošanas izmaksas. Tādēļ 7. formula tiek papildināta ar papildu izmaksu rādītājiem.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_u = \sum_{x,\tau} (B_u \cdot i_{kur,u}) + (W_u \cdot i_{kap,u}) + (C_u \cdot i_{eks,u}) + (C_u \cdot i_{a,u}) + (C_u \cdot i_{dz,u}) \\ I_k = \sum_{x,\tau} (W_k \cdot i_{kap,k}) + (C_u \cdot i_{eks,u}) + ((C_c - C_u) \cdot i_{z,k}) \\ I_c = \sum_{x,\tau} (C_c \cdot i_{kur,c}) + (W_c \cdot A_c \cdot i_{kap,c}) + (C_c \cdot i_{eks,c}) + ((C_{ie} - C_c) \cdot A_c \cdot i_{z,c}) \\ I_{ie} = \sum_{n=1,\tau}^j (v \cdot (i_{pl} + (i_{kap,ie} \cdot A_r)) + (p_{ie} \cdot C_{ie} \cdot i_{eks,ie}) + (c_{ie} \cdot i_{z,ie}), \quad C_{ie} < C_u \\ I_r = \sum_{x,\tau} I_{eks,m} \end{array} \right. \quad (8)$$

kur

I_q – elektroenerģijas ražošanas izmaksas OUU elektrostacijā, Ls/gadā;
 I_u – CO₂ uztveršanas posma izmaksas, Ls/gadā;
 I_c – CO₂ transportēšanas pa cauruļvadiem posma izmaksas, Ls/gadā;
 I_k – CO₂ saspiešanas posma izmaksas, Ls/gadā;
 I_{ie} – CO₂ iesūkņēšanas ģeoloģiskajos rezervuāros posma izmaksas, Ls/gadā;
 I_r – CO₂ uzglabāšanas ģeoloģiskajos rezervuāros posma izmaksas, Ls/gadā;
 B_u – kurināmā patēriņš CO₂ uztveršanai, MWh_k/gadā; $B_\delta > B_u$;
 W_u – uztveršanas tehnoloģijas uzstādītā jauda, MW, $W_u = f(E_f; \eta_e)$;
 C_u – uztvertais emisiju daudzums, t CO₂/gadā;
 $i_{kur,u}$ – īpatnējās izmaksas CO₂ uztveršanai uz saražoto enerģijas vienību, Ls/MWh_k;

$i_{kap,u}$ – ģpatnējās kapitālieguldījumu izmaksas uz uztveršanas sistēmas uzstādītās jaudas vienību, Ls/MW;
 $i_{eks,u}$ – ģpatnējās izmaksas uztveršanas posma ekspluatācijas izdevumiem, Ls /t CO₂;
 $i_{a,u}$ – ģpatnējās izmaksas uztveršanas posma blakusproduktu apsaimniekošanai, Ls /t CO₂;
 $i_{dz,u}$ – ģpatnējās izmaksas uztvertā CO₂ dzesēšanai, Ls /t CO₂;
 v – CO₂ caurplūdes ātrums, m/s;
 W_k – kompresora/sūkņa jauda, kW;
 C_u – uztvertais emisiju daudzums, t CO₂;
 C_c – pa cauruļvadiem transportējamais emisiju daudzums, t CO₂;
 $i_{kap,k}$ – ģpatnējās kapitālieguldījumu izmaksas kompresoram, Ls/kW;
 $i_{eks,u}$ – ģpatnējās izmaksas kompresora/sūkņa darbināšanai, Ls/t CO₂;
 $i_{z,k}$ – ģpatnējās izmaksas CO₂ zudumu saspiešanas procesā novēršanai, Ls/t CO₂;
 W_c – cauruļvadu jauda, t CO₂, $W_c = f(C_c)$;
 C_{ie} – iesūkņējamais emisiju daudzums, t CO₂;
 $i_{kur,c}$ – ģpatnējās izmaksas CO₂ transportēšanai, Ls/t CO₂;
 $i_{kap,c}$ – ģpatnējās kapitālieguldījumu izmaksas uz transportēšanas sistēmas vienību, Ls/t CO₂ · km;
 $i_{eks,c}$ – ģpatnējās izmaksas transportēšanas posma ekspluatācijas izdevumiem, Ls/t CO₂;
 $i_{z,c}$ – ģpatnējās izmaksas CO₂ zudumu cauruļvadu tīklos novēršanai, Ls/t CO₂ · km.
 i_{pl} – iesūkņēšanas aku izveides izmaksas (vietas apsekošana, plānošana, zemes iegāde, licenču izņemšana u.c.), Ls;
 $i_{kap,ie}$ – ģpatnējās kapitālieguldījumu izmaksas uz iesūkņēšanas akas izveidi (t.sk. urbšanas darbi un aku cementēšanas un aprīkošanas darbi), Ls/km;
 $i_{eks,ie}$ – ģpatnējās izmaksas iesūkņēšanas posma ekspluatācijas izdevumiem, Ls/t CO₂·MPa;
 $i_{z,ie}$ – ģpatnējās izmaksas CO₂ zudumu no iesūkņēšanas akām novēršanai, Ls/t CO₂;
 p_{ie} – CO₂ iesūkņēšanas spiediens, MPa;
 c_{ie} – CO₂ zudumi iesūkņēšanas procesa īstenošanā, tCO₂;
 $I_{eks,m}$ – CO₂ uzglabāšanas vietu monitoringa izmaksas, Ls/gadā;
 q – OUU procesus raksturojošs indekss.

Lai detalizēti vērtētu OUU tehnoloģiju ieviešanas ekonomiskos aspektus, promocijas darbā ir izstrādāta metodika un veikts elektroenerģijas

tarifu aprēķins pilna cikla OOU ieviešanas gadījumā sešām enerģijas ražošanas tehnoloģijām:

1. **tehnoloģija** – pulverveida ogļu sadedzināšanas sistēma ar uztveršanu pēc kurināmā sadedzināšanas ar MEA metodi;
2. **tehnoloģija** – ogļu integrētās gazifikācijas kombinētais cikls ar pirms sadedzināšanas metodes MDEA sorbenta absorbcijas bloku;
3. **tehnoloģija** – dabasgāzes turbīnu kombinētais cikls ar pēc sadedzināšanas metodes MEA sorbenta absorbcijas bloku;
4. **tehnoloģija** – gāzes turbīnu kombinētā cikla oksidācijas sadedzināšanas OOU metodes CLC tehnoloģija;
5. **tehnoloģija** – integrētas gazifikācijas kombinētajā ciklā biomasas tehnoloģija ar pirms sadedzināšanas metodes MDEA sorbenta absorbciju;
6. **tehnoloģija** – biomasas tvaika turbīnu sistēma ar pēc sadedzināšanas metodes MEA sorbenta absorbcijas bloku.

3.3. Klimata un vides faktoru vērtējums

Papildu klimata vērtējuma analīze tika veikta ar IPAT metodi, kas raksturo energosistēmas CO₂ emisiju bilances atkarību no ekonomiskajiem, demogrāfiskajiem un likumdošanas faktoriem.

IPAT sakarības pamatā ir apgalvojums, ka cilvēku darbības ietekmi uz vidi stimulē trīs faktori – iedzīvotāju skaits, īpatnējais resursu patēriņš, ko izsaka ar pārticību, un tehnoloģiju radītie posti videi.

$$C = P_1 \cdot \left(\frac{IKP}{P_1} \cdot \frac{E_p^*}{IKP} \right) \cdot \left(\frac{E_f}{E_p^*} \cdot \frac{C}{E_f} \right) \quad (10)$$

kur

E_p^* – primāro enerģijas resursu patēriņš, MWh_k/gadā;

E_f – fosilo enerģijas resursu patēriņš, MWh_k/gadā.

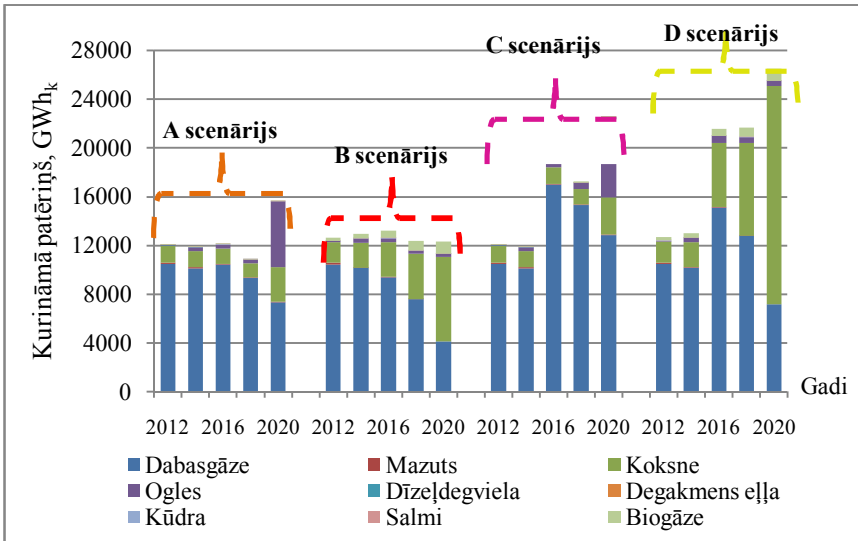
Darba ietvaros ir izstrādāts pieņēmums, ka OOU tehnoloģijas tiek ieviestas Latvijas energoavotos, sākot ar 2015. gadu. OOU gadījumā fosilo kurināmo sadedzināšanas rezultātā radītām CO₂ emisijām tiek piešķirts CO₂ emisiju faktors, kas skaitliski ir vienāds ar nulli, bet CO₂ emisijām no attiecīgo jaudu biomasas energoavotiem tiek piešķirts negatīvais emisiju faktors (-397) t CO₂ uz 1 GWh kurināmā.

Rezultātu vērtējums

Darbā iegūtie rezultāti ir sagrupēti divos līmeņos:

1. pēc tehnoloģiskā principa - energosistēma bez un ar oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas tehnoloģijām (attiecīgi A un B scenāriji un C un D scenāriji);
2. pēc vērtējuma aspekta – inženiertehniskie, ekonomiskie, klimata un vides aspekti.

Attīstības scenāriju inženiertehniskā vērtējuma rezultāti atspoguļo elektroenerģijas nodrošināšanas un kurināmā patēriņa izmaiņas plānošanas periodā.

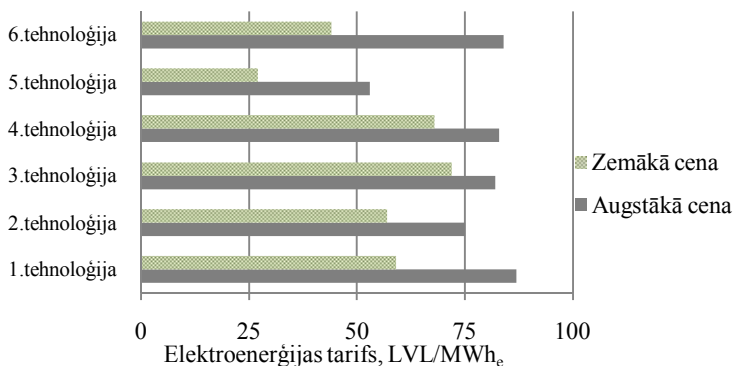


8. attēls. Energoresursu patēriņš pārveidošanas sektorā

OUU tehnoloģiju gadījumā lielākais energoresursu patēriņa pieaugums uz saražotās enerģijas vienību atbilst biomasas sadedzināšanas tehnoloģijām: biomasas elektrostacijas ar CO₂ uztveršanu pašlaik atrodas agrīnajā attīstības fāzē, un tām ir raksturīgs augsts enerģijas patēriņš CO₂ uztveršanai, kas samazina kopējo energosistēmas darbības efektivitāti par 30 – 43%. Tomēr šo tendenci nedrīkst uzskatīt par nemainīgu, jo ir iespējams, ka tuvāko desmit gadu laikā tieši šajā jomā būs lielākā attīstība saistībā ar biomasas un OUU tehnoloģiju iespējām panākt negatīvo CO₂ emisiju potenciālu.

OUU tehnoloģiju ieviešana maina elektroenerģijas tarifu diapazonus, bet nespēj mainīt kopējo tarifu tendenci – OUU aprīkotās sistēmās

elektroenerģijas izmaksas parasti atbilst cenu sadalījumam pēc kurināmā veida standarta stacijās. Biomasas modeļu elektroenerģijas tarifa kritums (salīdzinājumā ar standarta elektrostaciju) rodas gadījumā, kad OUU ieviešanas papildu izmaksas nepārsniedz ienākumus no piešķirto kvotu pārdošanas. Savukārt fosilo kurināmo modeļos tarifa kritums ir iespējams tad, kad OUU ieviešanas un ekspluatācijas izmaksas nepārsniedz naudas summu, ko enerģijas ražotājs ir ieguldījis emisiju kvotu iegādē pirms CO₂ emisiju uzglabāšanas uzsākšanas.



9. attēls. Elektroenerģijas ražošanas tarifi OUU ieviešanas gadījumā

9. attēlā ir redzams, ka biomasas modeļos līdz ar OUU ieviešanu ir novērojams elektroenerģijas tarifu samazinājums (4–47% 5. tehnoloģijas izmantošanas gadījumā un līdz 33% 6. tehnoloģijai).

CO₂ emisiju kvotu cenu prognozes Eiropas tirgū liecina par kvotu cenu pieaugumu nākotnē. Palielinoties biomasas īpatsvaram kopējā pārveidošanas sektora bilancē, pieaug CO₂ ietaupījums un līdz ar to uz emisiju kvotu tirdzniecības rēķina samazinās OUU īstenošanas izmaksas. OUU sistēmu gadījumā (ievērojot darbā pieņemtus CO₂ emisiju tirdzniecības nosacījumus OUU sistēmām) šo tendenci var uzskatīt par OUU tehnoloģiju atbalsta mehānismu un veicina tehnoloģiju ātrāku atmaksāšanos un tarifu samazinājumu. 1. tabulas dati parāda kvotu tirdzniecības mehānisma spēju motivēt ražotājus izmantot OUU tehnoloģijas (aprēķins ir veikts vienādos apstākļos: kapitāla atdošanas procenta likme (12,2%) un kapitāla atdeves termiņš (10 gadi).

1. tabula

OUU gada izmaksu salīdzinājums ar emisiju kvotu ienākumiem un izdevumiem

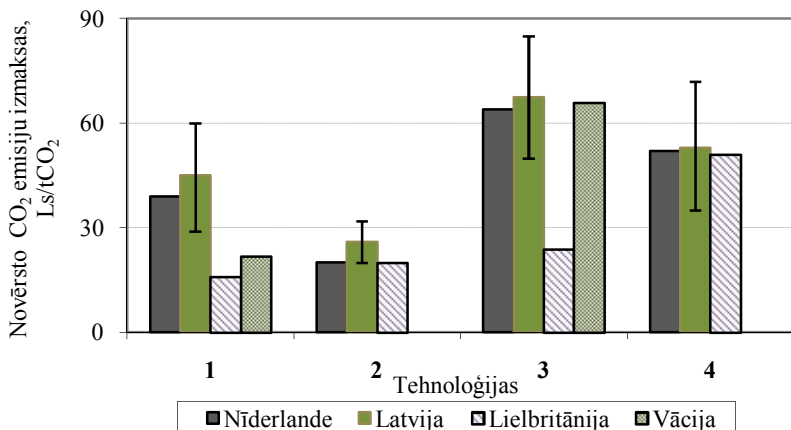
OUU tehnoloģija	OUU gada izmaksas, Ls/Wh	Ikgadējie kvotu iepirkšanas izdevumi (-)/ ienākumi (+), Ls/Wh
1. tehnoloģija	20–40	- (19–21)
2. tehnoloģija	14–23	- (20–22)
3. tehnoloģija	15–21	- (10–11)
4. tehnoloģija	12–23	- (10–11)
5. tehnoloģija	17–27	+(30–41)
6. tehnoloģija	45–56	+(37–79)

Ir redzams, ka 5. tehnoloģijas gadījumā ar ienākumiem no kvotu pārdošanas ir iespējams panākt pilnu OUU izmaksu kompensēšanu. 5. tehnoloģijas izmantošanas modelī ienākumi no kvotu pārdošanas var būt pat divreiz lielāki par izmaksām. To var izskaidrot ar modeļa relatīvi zemajām lietderības (14–30%) koeficienta vērtībām, pie kurām palielinās kurināmā patēriņš ražošanas procesa nodrošināšanai un saražotais emisiju daudzums. 6. tehnoloģijas modeļa augstās OUU cenas dēļ (aptuveni divarpus reizes lielāka nekā 5. tehnoloģijas modelim) minimālās diapazona robežas ienākumi no kvotu pārdošanas ne vienmēr spēj pilnīgi kompensēt OUU izdevumus, līdz ar to ir novērojams līdz pat 11% liels elektroenerģijas tarifa pieaugums. Tika aprēķināts, ka, lai pilnībā kompensētu 6. tehnoloģijas modeļa OUU gada perioda maksimālās robežas izmaksas (pieņemot, ka OUU ieviešanas kapitālieguldījumu aizdevuma atdošanas laiks ir 10 gadi), ir nepieciešams paaugstināt CO₂ emisiju kvotu cenu no 28 Ls/tCO₂ līdz 34 Ls/tCO₂.

Lielākajā daļā Eiropas pētījumu CO₂ ekonomiskie vērtējumi ir izstrādāti fosilo energoresursu spēkstacijām, jo OUU tehnoloģiju primārais mērķis ir novērst CO₂ emisiju nonākšanu atmosfērā no fosilo energoresursu sadedzināšanas (sk. 10. attēlu).

Novērsto CO₂ emisiju īpatnējo izmaksu atšķirības fosilo kurināmo energoavotos nosaka īpatnējie emisiju faktori, kas attiecināti uz patērētājiem nodoto elektroenerģijas vienību:

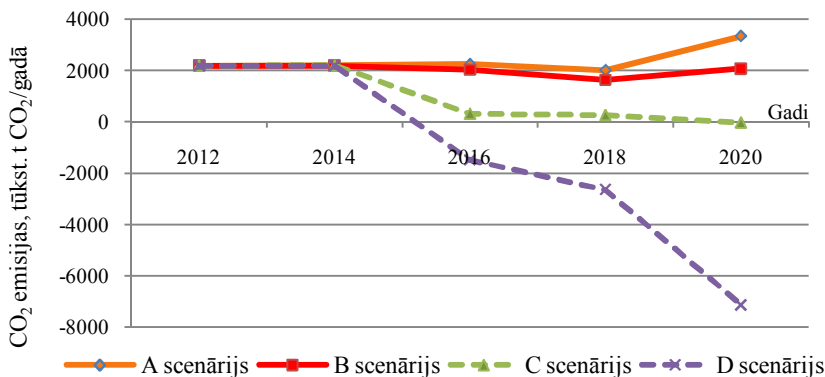
- 0,624 t CO₂/MWh_e Vācijai;
- 0,543 t CO₂/MWh_e Lielbritānijai;
- 0,435 t CO₂/MWh_e Nīderlandei;
- 0,109 t CO₂/MWh_e Latvijai.



10. attēls. Novērsto CO₂ emisiju izmaksu salīdzinājums fosilo kurināmo tehnoloģijām ar OUU

Latvijas elektroenerģijas tirgum ir raksturīgs zems emisiju faktors, kas sadārdzina OUU tehnoloģiju ieviešanas izmaksas, rēķinot uz vienu novērsto CO₂ tonnu.

Energotehnoloģiju klimata vērtējumā tiek aprēķināti SEG emisiju apjomi dažādos energosistēmas attīstības scenārijos. Analizēto scenāriju CO₂ emisiju izmaiņu dinamika ilustrēta 11. attēlā.



11. attēls. CO₂ emisiju apjomu izmaiņu dinamika

Pamatojoties uz inženiertehniskajā un klimata vērtējuma daļā veiktajiem aprēķiniem, t.i., attiecinot energoresursu patēriņu uz radītajām CO₂ emisijām, ir

noteikti īpatnējie CO₂ emisiju faktori Latvijas pārveidošanas sektorā no 2012. līdz 2020. gadam.

2. tabula

Īpatnējie CO₂ emisiju faktori pārveidošanas sektorā Latvijā
2010.–2020. gadam

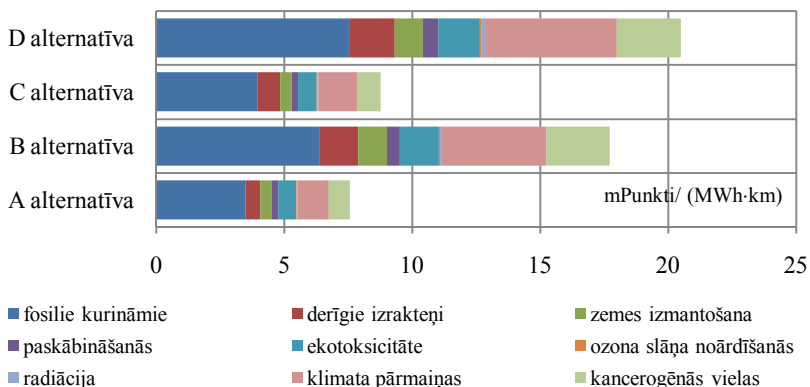
Gads	CO ₂ emisiju faktori, t CO ₂ /MWh _k			
	A scenārijs	B scenārijs	C scenārijs	D scenārijs
2012. gads	0,180	0,173	0,180	0,172
2014. gads	0,183	0,169	0,183	0,168
2016. gads	0,184	0,154	0,016	-0,069
2018. gads	0,184	0,132	0,015	-0,122
2020. gads	0,212	0,168	-0,002	-0,269

Oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas tehnoloģijas ar noteiktiem tehniski-ekonomiskiem pieņēmumiem spēj nodrošināt SEG emisiju apjomu samazināšanu Latvijas enerģētikas sektorā līdz negatīvajai CO₂ emisiju ainai. Tomēr šādi klimata instrumenti negatīvi ietekmē kurināmā patēriņa struktūru – samazinās enerģijas ražošanas efektivitāte un pieaug īpatnējais kurināmā patēriņš uz saražotās enerģijas vienību. Līdz ar to var apstrīdēt apgalvojumu, ka OUU sistēma ir „nulles emisiju” tehnoloģiskais risinājums.

Lai lēmumu pieņēmējiem un tehnoloģiju potenciālajiem lietotājiem sniegtu pilnvērtīgāku pārskatu par OUU tehnoloģiju vides priekšrocībām, darbs ir papildināts ar dzīves cikla analīzi (DCA) CO₂ transportēšanas pa cauruļvadiem posmam. Vides faktoru analīze CO₂ saspišanas, transportēšanas un iesūkņēšanas posmiem ir veikta, izmantojot DCA un dzīves cikla izmaksu analīzes ar „Ecoindicator – 99” metodi. Analizējamie modeļi ir šādi:

- A alternatīva – jaunajā gāzes turbīnu kombinētā cikla elektrostacijā ($\eta_e = 43\%$) radīto un uztverto CO₂ emisiju transportēšana pa cauruļvadu 100 km attālumā;
- B alternatīva – jaunajā gāzes turbīnu kombinētā cikla elektrostacijā ($\eta_e = 43\%$) radīto un uztverto CO₂ emisiju transportēšana pa cauruļvadu 400 km attālumā;
- C alternatīva – esošajā gāzes turbīnu kombinētā cikla elektrostacijā integrēts CO₂ uztveršanas bloks (kopējais $\eta_e = 39\%$). Uztvertās emisijas transportē 100 km attālumā.
- D alternatīva – esošajā gāzes turbīnu kombinētā cikla elektrostacijā integrēts CO₂ uztveršanas bloks (kopējais $\eta_e = 39\%$). Uztvertās emisijas transportē 400 km attālumā.

Pamatojoties uz DCA metodiku, darbā ir definētas četru modeļu īpatnējās slodzes uz vidi (sk. 12. attēlu) un noteikts, ka enerģijas ražošanas avots un tā darbības efektivitāte atstāj ietekmi uz transportēšanas posmu: CO₂ transportēšana garākos attālumos palielina kopējo enerģijas patēriņu sistēmas uzturēšanai un samazina lietderības koeficientu. Šo procesu ietekmē pieaug vides faktoru ietekmes vērtības. DCA pieņemtā vides ietekmes mērvienība ir milipunkts (mPunkts).



12. attēls. CO₂ transportēšanas un iesūkņēšanas procesu īpatnējās ietekmes uz vidi no atkarībā no transportēšanas attāluma

No vides ekonomisko rādītāju viedokļa CO₂ emisiju transportēšanas pamatotība ir noteikta, attiecinot vides ietekmes faktoru grupu vērtības uz CO₂ transportēšanas, saspiešanas un iesūkņēšanas izmaksām, un sniedz priekšstatu par to, cik izmaksā vides ietekmju samazināšana (sk. 3. tabulu).

3. tabula

Ietekmes uz vidi samazināšanas izmaksas no CO₂ transportēšanas un iesūkņēšanas procesiem

Ietekmes kategorija	Vides izmaksu indikators, Ls/mPunkts			
	A alternatīva	B alternatīva	C alternatīva	D alternatīva
Fosilie kurināmie	6,96	3,34	1,78	0,85
Derīgie izrakteņi	1,56	0,78	0,28	0,21
Zemes izmantošana	0,78	0,43	0,21	0,14
Paskābināšanās	0,43	0,28	0,14	0,07
Ekotoksicitāte	1,28	0,71	0,36	0,21

3. tabulas turpinājums

Ietekme uz ozona slāņa noārdīšanos	0,07	0,00	0,00	0,00
Radiācija	0,07	0,07	0,00	0,00
Klimata pārmaiņas	2,70	2,27	0,64	0,50
Kancerogēnās vielas	1,56	1,07	0,43	0,28

Kā redzams 3. tabulā, vislielākās vides ietekmju novēršanas izmaksas rada klimata pārmaiņu kategorija. Tas nozīmē, ka OUU sistēmas „nulles” emisiju definīcija ir jāpārskata, pamatojoties uz pilna cikla OUU vides faktoru vērtējumu.

Vides faktoru vērtējuma rezultāti parāda, ka no vides un vides izmaksu viedokļa CO₂ transportēšanas un iesūkņēšanas posma darbības nodrošināšanai nav lietderīgi izmantot elektroenerģiju, kas saražota esošajos, ar CO₂ uztveršanu aprīkotajos energoavotos to zemās efektivitātes dēļ. Gadījumos, kad tiek ieviesta pilna cikla OUU, transportēšanas, saspiešanas un iesūkņēšanas posmu darbību nodrošināšanai ir ieteicams izmantot elektroenerģiju, kas saražota spēkstacijās bez OUU vai no atjaunojamiem energoresursiem, lai samazinātu ietekmi uz vidi un palielinātu sistēmas darbības efektivitāti.

Secinājumi

- ES emisiju tirdzniecības dalībnieku divu gadu darbības datu regresijas analīze devusi iespēju iegūt empīrisku vienādojumu, kas rāda neatkarīgo mainīgo ietekmi uz CO₂ emisiju apjomu. Matemātiskā apstrāde liecina, ka SEG emisiju apjomu būtiski ietekmē trīs neatkarīgie mainīgie: energoavota darbības efektivitāte, saražotās enerģijas daudzums un emisiju faktors, kas raksturo kurināmā veidu. Empīriskā vienādojuma lietojuma adekvātums ir pārbaudīts ar regresijas analīzes nosacījumiem. Vienādojumu var izmantot konkrētajā datu kopas diapazonā un lietot diapazonā iekļauto uzņēmumu CO₂ emisiju prognozēm atkarībā no enerģijas ražošanas apjoma, energoavota darbības efektivitātes un kurināmā emisiju faktora.
- Izstrādāta valsts energosektora attīstības un plānošanas metodika, kas pamatojas uz divām atšķirīgām hipotēzēm:
 - līdz 2020. gadam netiek mainīta energosektora primāro energoresursu struktūra;
 - tiek paaugstināts atjaunojamo energoresursu īpatsvars līdz 40% no kopējā enerģijas patēriņa.
- Uztvertā oglekļa dioksīda uzglabāšanas iespēju analīzes metodika parāda,

ka abu hipotēžu realizēšanas gadījumā, ieviešot OUU tehnoloģijas, kurināmā izmantošanas efektivitāte uz saražoto enerģijas vienību samazinās. Kurināmā izmantošanas efektivitātes indikatori laika posmam no 2012. līdz 2020. gadam atrodas šādos intervālos:

- A scenārijā – 3,4–2,5 GWh_k/GWh;
- B scenārijā – 2,09–1,26 GWh_k/GWh;
- C scenārijā – 2,01–2,38 GWh_k/GWh;
- D scenārijā – 2,11–3,09 GWh_k/GWh.

Šādu kurināmā izmantošanas efektivitātes indikatoru vērtību pamatā ir OUU tehnoloģiju zemie lietderības koeficienti.

4. Pilna cikla OUU tehnoloģiju ekonomiskā analīze rezultējas ar tarifu noteikšanas metodiku. Metodika ir aprobēta, un iegūtie rezultāti salīdzināti ar Pasaules Enerģētikas aģentūras Siltumnīcefekta gāzu izpētes un attīstības programmas, Pasaules Ogļu institūta un Utrehtas Universitātes zinātnieku pētījumu rezultātiem. Teorētiskā aprobācija parāda, ka iegūtie rezultāti ir ticami un metodiku var lietot OUU tarifu noteikšanai. Tas ļauj apgalvot, ka metodiku var izmantot citu valstu OUU sistēmu izveidē.
5. Rezultāti, kas iegūti, meklējot tiešo sakarību starp kvotu cenām un OUU izmaksām, liecina, ka OUU tehnoloģijas ieviešanu biomasas energoavotos var pilnībā kompensēt, ja CO₂ kvotu cena ir 28 Ls/t CO₂. Dabaszāzes energoavotiem emisiju kvotu pārdošana ļauj panākt izmaksu kompensāciju 35–47% apmērā, bet akmeņogļēm – 50–100% apmērā (atkarībā no uztveršanas tehnoloģijas). Maksimālā kritiskā CO₂ emisiju kvotas cena, kad OUU tehnoloģiju ieviešana pilnībā atmaksājas, ir 70 Ls/t CO₂.
6. OUU tehnoloģiju izmantošanas izmaksu vērtēšanas indikators – īpatnējās izmaksas uz vienu uztverto CO₂ tonnu rāda, ka izmaksu ziņā oglekļa dioksīda uztveršana ir lētākā ražošanas sistēmās, kurās izmanto kurināmo ar lielāko emisiju faktoru. Rēķinot OUU izmaksas uz vienu uztverto tonnu CO₂, lētāki ir biomasas modeļi, kur vienas CO₂ tonnas uztveršana maksā 12–26 Ls/t CO₂ un 20–34 Ls/t CO₂. Iegūtās īpatnējo izmaksu vērtības atbilst citos pētījumos definētajam izmaksu diapazonam un apliecina darbā izstrādātās ekonomiskās vērtējuma metodikas adekvātumu.
7. Pamatojoties uz klimata moduli, ir izstrādāta atmosfērā emitēto CO₂ emisiju apjomu prognoze. Rezultāti liecina, ka energosektora pāreja uz atjaunojamajiem energoresursiem un OUU ieviešana fosilajos un biomasas energoavotos ļautu sasniegt negatīvu CO₂ ainu 2016. gadā, panākot -1,488 Mt CO₂ ietaupījumu 2016. gadā un -7,124 Mt CO₂ 2020. gadā.
8. Pamatojoties uz inženiertehniskajā un klimata vērtējuma modulī veiktajiem aprēķiniem un empīrisko modeli, ir prognozēti īpatnējie CO₂ emisiju faktori Latvijas pārveidošanas sektorā no 2012. līdz 2020. gadam.
 - fosilo energoresursu scenārijā (A scenārijā) – no 0,180 t CO₂/MWh_k līdz

- 0,212 t CO₂/MWh_k;
- atjaunojamo energoresursu scenārijā (B scenārijā) – no 0,173 t CO₂/MWh_k līdz 0,168 t CO₂/MWh_k;
 - fosilo energoresursu scenārijā ar OUU (C scenārijs) – no 0,180 t CO₂/MWh_k līdz -0,002 t CO₂/MWh_k.
 - atjaunojamo energoresursu scenārijā ar OUU (D scenārijs) – no 0,172 t CO₂/MWh_k līdz -0,269 t CO₂/MWh_k.
9. Vides faktoru vērtējuma metodika CO₂ transportēšanai pa cauruļvadiem un iesūkņēšanai ģeoloģiskajā rezervuārā ļauj izvērtēt procesu izraisītās vides ietekmes. Metodikas pamatā ir dzīves cikla analīze. Metodika ir pārbaudīta, analizējot divus tehnoloģiskos parametrus – cauruļvada garumu un elektroenerģijas ražošanas avota lietderības koeficientu alternatīvas. Konstatēts, ka energoavots ar elektroenerģijas patēriņu rada netiešu ietekmi uz CO₂ transportēšanas un iesūkņēšanas posma vides vērtējumu.
10. Ar dzīves cikla izmaksu analīzes metodi ir definēts un skaitliski noteikts vides ietekmju novēršanas izmaksu indikators. Atkarībā no ietekmes kategorijas un energosektora attīstības scenārija indikatora vērtības variē plašā diapazonā: no 7 Ls/mPunktu līdz 0,07 Ls/mPunktu.