



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Giedrius Stabužis

MIKROTINKLO OPTIMALIOS STRUKTŪROS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Audrius Jonaitis

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

MIKROTINKLO OPTIMALIOS STRUKTŪROS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas

Doc. dr. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Prof. dr. Saulius Gudžius

Projektą atliko

Giedrius Stabužis

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Giedrius Stabužis

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Mikrotinklo optimalios struktūros tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Giedriaus Stabužio** baigiamasis projektas tema „Mikrotinklo optimalios struktūros tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Stabužis, Giedrius. Mikrotinklo optimalios struktūros tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslų kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: mikrotinklas, paskirstytieji generacijos šaltiniai, elektros energijos kaupiklis, optimali struktūra.

Kaunas, 2017. 58 p.

SANTRAUKA

Magistro baigiamajame projekte analizuojama mikrotinklo su paskirstytaisiais energijos šaltiniais optimalios struktūros problematika. Optimali struktūra vertinama aplinkosauginiu, ekonominiu ir techniniu kriterijais. Tiriama mikrotinklo struktūrą sudaro: vėjo elektrinės, saulės elektrinės, energijos kaupiklis ir reguliuojamos galios šaltinis. Siekiant nustatyti mikrotinklo struktūrą įvertinančius parametrus sudaromas tyrimo algoritmas, kurio pagalba atrenkami optimalūs variantai pagal užduotus kriterijus. Algoritme simuliuojamas mikrotinklo energijos srautų pasiskirstymas metų bėgyje su kiekvienu galimu struktūros variantu. Vėjo ir saulės elektrinių prisiderinimo prie apkrovos grafiko, priklausomai nuo apkrovos charakteristikos, vertinimas atliekamas nustatant optimalų šių šaltinių galių santykį, kuris užtikrina didžiausią galimą mikrotinklo energijos poreikio aprūpinimą su mažiausia galima instaliuota galia.

Stabužis, Giedrius. The Study of Optimal Microgrid Structure: Master's thesis / supervisor assoc. dr. Audrius Jonaitis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical power systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: microgrid, distributed generation sources, electrical energy storage, optimal structure. Kaunas, 2017. 58 p.

SUMMARY

Master final project analysis the optimal structure of microgrid with distributed energy sources problems. Optimal structure is evaluated by environmental, economic and technical measures. The analysed microgrid structure is composed of wind power plants, solar power station, accumulator and adjustable energy source. In order to identify parameters of microgrid structure value the algorithm of investigation is being formed. This algorithm helps to sample optimal variations according to task criteria. In this algorithm is being simulated distribution of microgrid energy sources off-year using each possible structure value. Wind and solar power station adjust to load timetable, according to load characteristic is evaluated by identifying optimal relation of these power sources which ensures the biggest possible microgrid energy requirements by lowest possible installed force.

TURINYS

SANTRUMPOS.....	9
ĮVADAS.....	10
1. MIKROTINKLO KONCEPCIJA.....	11
1.1. Mikrotinklo sąvoka.....	11
1.2. Mikrotinklų tipai.....	13
1.3. Techniniai ir ekonominiai mikrotinklo aspektai	18
2. PASKIRSTYTIEJI GENERAVIMO ŠALTINIAI MIKROTINKLE	20
2.1. Vėjo elektrinė	20
2.2. Saulės elektrinė.....	22
2.3. Reguluojamos galios energijos šaltiniai mikrotinkle	23
2.4. Elektros energijos kaupikliai	24
3. MIKROTINKLO OPTIMALIOS STRUKTŪROS TYRIMO METODIKA.....	26
3.1. Struktūros vertinimo kriterijai	26
3.2. Tiriamo mikrotinklo konfigūracija	27
3.3. Elektros energijos poreikio duomenys	29
4. PASKIRSTYTŲJŲ GENERATORIŲ ENERGINIS MODELIAVIMAS	31
4.1. Vėjo elektrinės modelis	31
4.2. Saulės elektrinės modelis	33
4.3. Reguluojamos galios šaltinio modelis.....	34
4.4. Energijos kaupiklio modelis.....	35
5. OPTIMALIOS STRUKTŪROS TYRIMO ALGORITMAS	40
5.1. Energijos valdymo algoritmo sudarymas	40
5.2. Optimalios struktūros nustatymo algoritmo sudarymas.....	42
6. TYRIMO REZULTATAI.....	45
6.1. Optimalaus AEŠ generacijos suderinamumo su apkrovos grafiku nustatymas	45
6.2. Optimalios energijos kaupiklio talpos nustatymas	50
6.3. Mikrotinklo optimali struktūra	52
IŠVADOS	56
LITERATŪRA.....	58
PRIEDAI.....	59
1. Priedas. MT optimalios struktūros algoritmo programa	59
2. Priedas. Optimalūs struktūros variantai su RGŠ.....	63
3. Priedas. Optimalūs struktūros variantai priklausomai nuo AEŠ dalies MT energijos poreikio balanse.....	64
4. Priedas. Saulės spinduliuotės ir vidutinio vėjo greičio duomenys.....	66

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. Mikrotinklo principinė schema	12
2 pav. Kintamos srovės mikrotinklas	14
3 pav. Hibridinis ir nuolatinės srovės mikrotinklas	15
4 pav. Mikrotinklas su paskirstytaisiais generatoriais [2].....	17
5 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė [8]	21
6 pav. Tiriamo mikrotinklo blokinė schema	28
7 pav. Tipinės buitinės apkrovos poros energijos poreikio grafikas [10]	29
8 pav. Tipinės buitinės apkrovos metų energijos poreikio grafikas [10]	29
9 pav. Tipinės pramoninės apkrovos poros energijos poreikio grafikas [10]	30
10 pav. Tipinės pramoninės apkrovos metų energijos poreikio grafikas [10]	30
11 pav. Eocycle EO25 Class IIA vėjo elektrinės galios kreivė	32
12 pav. Dyzelinio generatoriaus efektyvumo kreivė [10].....	34
13 pav. Dyzelinio generatoriaus kuro suvartojimas [10]	34
14 pav. Iškvėrimo lygio ir tarnavimo ciklų skaičiaus priklausomybė [10]	36
15 pav. Išsikrovimo srovės ir maksimalios kaupiklio talpos priklausomybė [10].....	36
16 pav. Kinetinis baterijų modelis	37
17 pav. Energijos valdymo algoritmas.....	41
18 pav. Optimalios struktūros nustatymo algoritmas.....	44
19 pav. Mikrotinklo disbalanso priklausomybės eibė nuo VE ir SE skaičiaus.....	45
20 pav. Balansuojamos energijos priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus	46
21 pav. Optimalus prisiderinimo prie apkrovos grafiko priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus (3D)..	47
22 pav. Optimalus prisiderinimo prie apkrovos grafiko priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus (2D)..	47
23 pav. Vėjo ir saulės elektrinių suderinamumo grafikas	48
24 pav. Optimalus AEŠ prisiderinimas prie MT apkrovos grafiko	49
25 pav. Mikrotinklo su vienu ir dvejais AEŠ palyginimas	50
26 pav. LCOE priklausomybė nuo energijos kaupiklio talpos	51
27 pav. Optimalios struktūros variantai su RGŠ	52
28 pav. Optimalios struktūros variantų su RGŠ energiniai parametrai.....	53
29 pav. LCOE priklausomai nuo instaliuotos VE ir SE galios	53
30 pav. Optimalūs struktūros variantai priklausomai nuo AEŠ pagamintos energijos.....	54
31 pav. VE ir SE galių santykio priklausomybė nuo AEŠ pagamintos energijos mikrotinkle.....	55
32 pav. AEŠ pagamintos elektros energijos mikrotinkle priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Elektros energijos poreikio duomenys	30
4.1 lentelė. Paviršiaus nelygumą įvertinančio parametro reikšmės [7].....	31
4.2 lentelė Saulės modulio techniniai duomenys	33
4.3 lentelė Reguliuojamos galios šaltinio techniniai duomenys	35
4.4 lentelė Energijos kaupiklio techniniai duomenys	35
6.1 lentelė. Optimalaus VE ir SE suderinamumo duomenys	49

SANTRUMPOS

AEŠ	- atsinaujinantys energijos šaltiniai;
AC	- kintama elektros srovė;
DC	- nuolatinė elektros srovė;
DG	- dyzelinis generatorius;
EES	- elektros energetikos sistema;
EK	- energijos kaupiklis;
MT	- mikrotinklas;
MŠ	- mikrošaltinis;
PG	- paskirstytasis generatorius;
RGŠ	- reguliuojamos galios šaltinis;
SE	- saulės elektrinė;
VE	- vėjo elektrinė.

IVADAS

Pastaraisiais metais pasaulyje vyksta esminės permainos energijos gamybos, transportavimo ir vartojimo technologijų srityse. Daug metų trukusią labai stabilią, nusistovėjusiomis technologijomis ir daugiausia iškastinio organinio kuro ištekliais pagrįstą energetikos raidą ištiko didelė krizė. Pagrindinė šios krizės priežastis – vis didėjanti nepageidautina tradicinės energetikos įtaka klimato kaitai. Visuotinai pripažinta, kad būtina kuo sparčiau mažinti iškastinio organinio kuro panaudojimą ir pereiti prie atsinaujinančiais ištekliais pagrįstos energetikos.

Pastaruju metu elektros energijai gaminti ir jai perduoti vartotojams naudojamos naujos technologijos bei kintanti energetikos ekonominė ir reguliavimo aplinka lėmė didėjantį susidomėjimą paskirstytąja (dar kartais vadinama decentralizuotąja) elektros energijos gamyba. Tarptautinė energetikos agentūra (TEA) savo leidinyje pateikia penkias pagrindines priežastis, kurios šiandien lemia didėjantį susidomėjimą paskirstytąja elektros gamyba: elektros rinkų liberalizavimas, paskirstytosios elektros gamybos technologijų plėtra, ribojimai naujoms elektros perdavimo linijoms statyti, išaugęs vartotojų poreikis turėti aukštą elektros tiekimo patikimumą bei stiprėjantis susirūpinimas dėl klimato kaitos.

Pagrindinis darbo tikslas – sudaryti mikrotinklo su paskirstytaisiais generatoriais struktūrą įvertinančių parametrų nustatymo algoritmą. Taip pat naudojantis sudarytu algoritmu įvertinti optimalią mikrotinklo struktūrą ekonominiu ir aplinkosauginiu kriterijais.

Šiam tikslui pasiekti išsikelti šie uždaviniai:

- 1) Sukurti algoritmą, leidžiantį įvertinti mikrotinklo optimalų atsinaujinančių energijos šaltinių kiekį atsižvelgiant į ekonomines charakteristikas ir energijos prieinamumą;
- 2) nustatyti optimalų saulės ir vėjo elektrinių generacijos prisiderinimą prie apkrovos grafiko;
- 3) nustatyti energijos kaupiklio įtaką mikrotinklo ekonominiams, techniniams ir aplinkosauginiams parametrams;
- 4) nustatyti mikrotinklo su nestabilios galios šaltiniais galimybes apsirūpinti energija nepriklausomai nuo išorinio tinklo;
- 5) nustatyti mikrotinklo struktūrą įvertinančių parametrų kitimo charakteristikas priklausomai nuo instaliuotos saulės ir vėjo elektrinių galios.

1. MIKROTINKLO KONCEPCIJA

1.1. Mikrotinklo sąvoka

Mikrotinklo tyrinėjimas vyksta daugelyje šalių, ypač JAV, Europos sąjungos šalyse ir Japonijoje, tačiau bendros mikrotinklo koncepcijos vis dar nėra. Įvairių šalių ekspertai ir organizacijos apibrėžia mikrotinklą pagal vietinius standartus ir nusistovėjusia elektros energetikos sistemos samprata, kuri skiriasi priklausomai nuo išvystyto tinklo architektūros, naudojamų tradicinių elektros generavimo šaltinių tipų, jų galingumo ir t.t.

Mikrotinklo sąvokos apibrėžimas Lietuvos aiškinamuosiuose terminologijos žodynuose nepateiktas. Išanalizavus užsienio autorių ir organizacijų pateiktus mikrotinklo apibūdinimus, galime išskirti pagrindinius kriterijus pagal kurius nustatome kokią sistemą galima vadinti mikrotinklu:

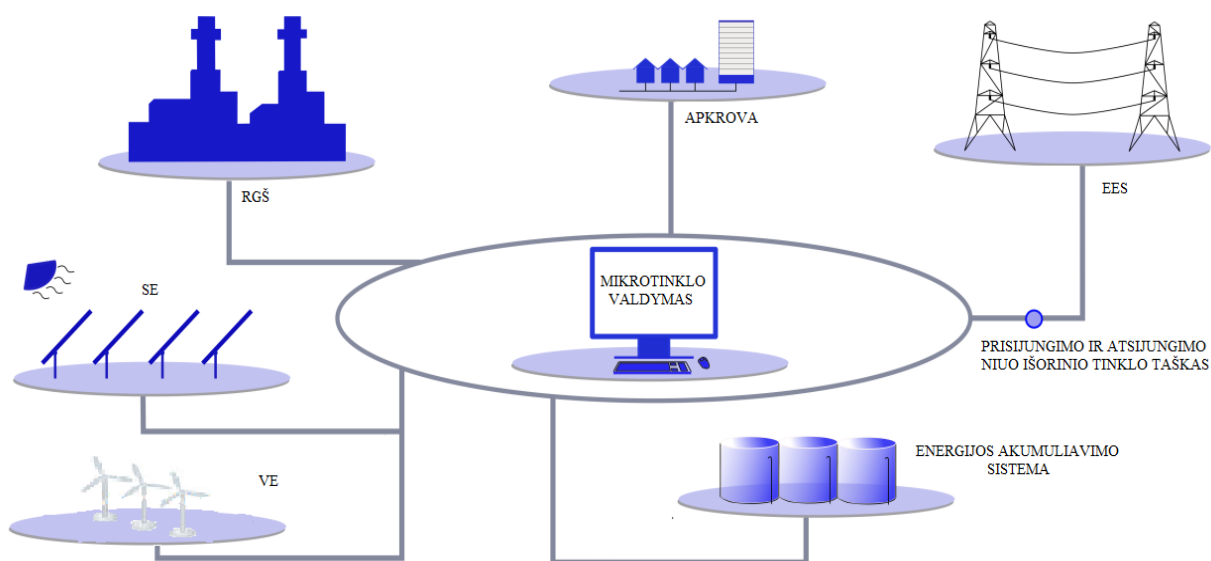
- 1) sistemos galia;
- 2) naudojami energijos šaltinių tipai;
- 3) šaltinių atstumas iki apkrovos;
- 4) šaltinių ir apkrovos valdymas (centralizuotas ar decentralizuotas);
- 5) sistemos ryšys su išorine energetikos sistema;
- 6) energijos gamybos planavimas;
- 7) tinklo įtampa;
- 8) apkrovų aprūpinimo energija patikimumas.

Apibendrinus skirtingų organizacijų ir autorių pateikiamus MT apibrėžimus, mikrotinklais galime vadinti nedidelės galios energetikos sistemas (dažniausiai iki 1 MW), kuriose siekiama naudoti visų pirma vietinius atsinaujinančiuosius energijos išteklius ir kuo didesnę pagamintos energijos dalį sunaudoti vietoje (mikrotinklo ribose). Jie gali būti autonominiai (off-grid) arba integruoti į EES (on-grid), kogeneraciniai arba gaminti tik elektros energiją. Ši energetikos platforma jungia energijos generavimo šaltinius, energijos kaupiklius ir apkrovą į bendrą sistemą, kurios ribos yra aiškiai apibrėžtos, todėl energijos generavimo šaltiniai yra netoli apkrovos ir prijungti prie žemos įtampos skirstomojo tinklo. Sistema kur mikrošaltiniai (MŠ) yra fiziškai nutolę nuo energijos vartotojų (pvz. virtuali elektrinė) negali būti vadinama mikrotinklu. Mikrotinklo, lyginant su įprastais elektros tinklais, ypatumai yra šie: mikrotinklo elektrinės yra daug mažesnės galios negu įprastos elektrinės, elektros energija tiesiai perduodama į skirstomąjį tinklą, šaltiniai įrengiami arti vartotojų, siekiant sumažinti energijos perdavimo nuostolius.

Viena pagrindinių mikrotinklų savybių yra skirtingų paskirstytųjų generatorių (PG) sujungimas į vieną sistemą. Paskirstytieji generatoriai yra tokie elektros energijos šaltiniai, kurie yra prijungti prie skirstomojo tinklo netoliau negu per vieną įtampos pakopą nuo apkrovos, dirba normaliomis darbo sąlygomis, galia yra nedaugiau kaip dvigubai didesnė už apkrovų (neatsižvelgiant į rezervą), jei yra

galimybė prisijungti prie sistemos ir, jei nėra galimybės prisijungti prie sistemos galia nedidesnė už apkrovų (neatsižvelgiant į rezervą) ir dalinai arba visiškai padengia apkrovas. Didžiąją dalį PG sudaro nestabilios galios atsinaujinantys šaltiniai, kurių generuojama galia gali staigiai kisti priklausomai nuo vėjo greičio ar saulės spinduliuotės. Tokių šaltinių integravimas į skirstomąjį elektros tinklą plačiu mastu, kai juos balansuoja tinklas yra ribotas ir apibrėžtas tinklo stabilumo galimybėmis. Plečiant paskirstytojo generavimo šaltinių panaudojimą ir siekiant geriau patenkinti elektros vartotojų poreikius būtina spręsti jų balansavimo ir valdymo problematiką. Mikrotinklas – vienas iš būdų kaip nedarant neigiamo poveikio EES plėtoti PG. MT sistemai priklausantys šaltiniai valdomi centralizuotai kaip vienas bendras generavimo šaltinis, kad būtų lengviau balansuoti ir kontroliuoti vietinius generatorius, keisti galios srautų kryptis ir reguliuoti mazgų įtampas.

Mikrotinklo struktūros principinė schema pateikta 1 paveikslėlyje. Pagrindiniai mikrotinklo struktūros elementai: reguliuojamos galios šaltinis (RGŠ), saulės elektrinė (SE), vėjo elektrinė (VE), energijos akumuliacijos sistema, išorinė elektros energetikos sistema, apkrova ir mikrotinklo valdymo sistema, kuri sujungia visus elementus į bendrą sinchroniškai veikiančią sistemą.



1 pav. Mikrotinklo principinė schema

Norint sudaryti sąlygas mikrotinkle naudoti nestabilios galios AEŠ, būtinas reguliuojamos galios šaltinis. Šis šaltinis turi atlikti rezervavimo ir balansavimo funkcijas. Mikrotinklui veikiant autonomiškai, kaip ir EES, būtina balansuoti generuojamą momentinę galią, priklausomai nuo apkrovos, kuri taip pat kinta. RGŠ, kad užtikrintų sistemos dažnį ir įtampą vartotojui priimtinose ribose, privalo pasižymėti geromis dinaminėmis savybėmis, t.y. momentiška reaguoti į galios trūkumą ar perteklių, reguliuojant savo generuojamą galią plačiame diapazone. Reguluojami elektros energijos šaltiniai naudojami mikrotinkluose yra šie: vidaus degimo variklių ir generatorių sistemos, mažosios

hidroelektrinės, kai kurių tipų kuro elementai, įvairių tipų reguliuojamos galios elektros energijos kaupikliai [1].

Siekiant padidinti AES pagaminamos energijos panaudojimą mikrotinkle yra įrengiami energijos kaupikliai. Energijos kaupiklio funkcija yra suakumuliuoti vėjo elektrinių ir saulės modulių generuojamą perteklinę energiją ir panaudoti ją esant jos trūkumui. Ilgalaikiui energijos akumuliacijai MT naudojamos įvairių tipų baterijos, mažosios hidroakumuliacinės elektrinės, suslėgto oro kaupyklos. Momentinės galios pakėčiams gali būti naudojami trumpalaikės iškvos kaupikliai (kai kurių tipų baterijos, superkondensatoriai), kurių iškvos trukmė matuojama sekundėmis. Nedidelės galios mikrotinkle, kur vartotojai yra buitiniai ir neblogina MT energijos kokybės, trumpalaikės iškvos kaupikliai nenaudojami.

Mikrotinklas į bendrą sistemą gali sujungti netik elektros energijos, bet ir šilumos energijos tinklus. Šilumos generacija mikrotinkle gali būti užtikrinama kogeneracinėmis mikroelektrinėmis, kurios tuo pačiu atlieka ir RGŠ vaidmenį. Šiuo atveju, kogeneracinėje jėgainėje pagaminta šilumos energija tiekama vietiniams vartotojams, o ne išmetama į atmosferą. Norint pasiekti aukštą kuro panaudojimo laipsnį kogeneracinėse elektrinėse, būtina užtikrinti, kad pagaminta šiluminė energija bus panaudota naudingai. Tai įmanoma tik esant pakankamam vietiniam šilumos vartojimui. MT struktūros optimizavimo problematika nagrinėjama literatūroje [11],[12],[13] ir [14].

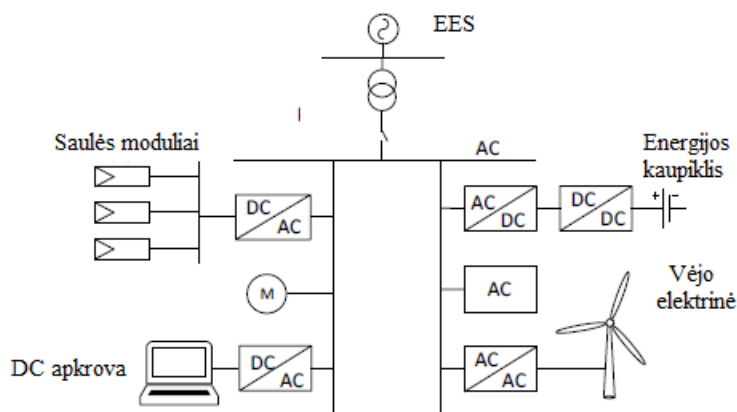
1.2. Mikrotinklų tipai

Pagal sinchronizaciją su išoriniu tinklu, mikrotinklai skirstomi į prisijungusius ir atsijungusius. Taip pat mikrotinklai gali būti skirstomi pagal generuojamą srovę, panaudojimo sritis, apkrovos pobūdį ir t. t. Skirtingi mikrotinklų tipai ir jų veikimo strategijos aptiriamos ir analizuojamos literatūroje [1], [2], [3], pagrindiniai aspektai pateikiami toliau.

Jeigu yra techninės galimybės MT prijungti prie skirstomojo elektros tinklo, MT normaliu darbo režimu veiks sinchroniškai su išoriniu tinklu. Mikrotinklas, kuris veikia sinchroniškai su EES, importuoja arba eksportuoja energiją, priklausomai nuo MT veikimo strategijos. Įvykus trikdžiams išoriniame tinkle MT atsijungia ir dirba salos režimu. MT veikiant salos režimu jis turi užtikrinti patikimą ir stabilų energijos tiekimą prioritetą turinčioms apkrovoms. MT galia, lyginant su EES, sąlyginai maža, todėl, sinchronizacijos metu su EES, mikrotinklas nedaro įtakos išorinio tinklo stabilumui. Tačiau didelis kiekis mikrotinklų su nestabilios galios paskirstytaisiais generatoriais gali įtakoti tinklo stabilumą. Todėl, plėtojant MT koncepciją, būtina pabrėžti, kad būtina MT projektuoti taip, kad būtų užtikrintas AES ir vietinių vartotojų balansas darant kuo mažesnę įtaką išoriniam tinklui. Esant prijungtam prie išorinio tinklo, mikrotinklo operatorius gali priimti ekonominius sprendimus: pirkti arba parduoti elektros energiją priklausomai nuo vietinio generavimo pajėgumo, kuro ir energijos kainos bei kainos rinkoje[1].

Pasauliniu mastu, kai kurie pramonės rajonai, turintys vietinius generatorius, turi atsidalijimo nuo išorinio tinklo galimybę. Tai daroma siekiant optimizuoti technologinį procesą. Pvz., technologiniams procesams reikalingas garas panaudojamas ir turbogeneratoriams sukti – tai padidina elektros tiekimo patikimumą ir sumažina eksploataavimo kainą [1]. Paprastai tokie vietiniai generatoriai padengia gamyklos apkrovas. Tokio mikrotinklo tikslas – elektros energijos tiekimo patikimumas. Gamyklų pavyzdžiai – chemijos pramonės, popieriaus, elektronikos gamyklos, kurioms net trumpalaikis elektros nutrūkimas gali sukelti didelių nuostolių. Kai kurios gamyklos įsirengia nepertraukiamo maitinimo šaltinius (UPS) svarbiems įrenginiams maitinti. Vienas iš didžiausių pavyzdžių – 46 MW galios akumuliatorių sistema, įrengta Fairbanks mieste Aliaskoje [1].

„Salos“ režimas taikomas tada, kai nėra techninių galimybių prisijungti prie išorinio tinklo. Tokio tinklo struktūra ir valdymas turi užtikrinti patikimą ir stabilų darbą nuolatos. Dažniausiai tokiam tinklui reikia daug didesnio reguliuojamos galios šaltinio, kuris rezervuotų nepastovios galios šaltinius, negu tinklui veikiančiam sinchroniškai su EES. „Salos“ mikrotinklai gali būti naudojami ten, kur nėra išplėtoti elektros tinklai arba išorinio tinklo nėra ir investicijos į mikrotinklą yra patraukliausias būdas apsirūpinti elektros energija.

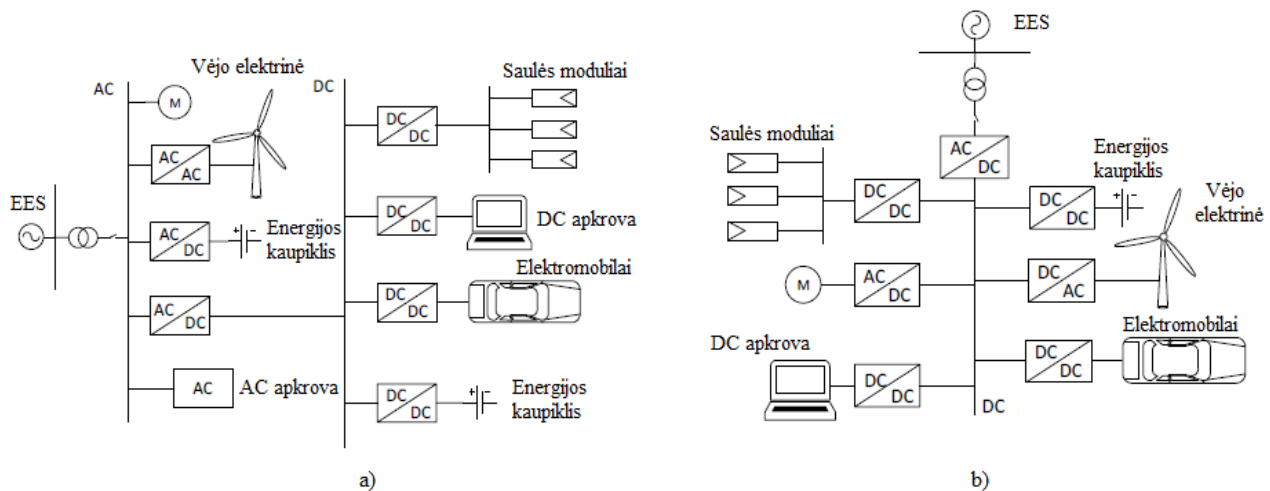


2 pav. Kintamos srovės mikrotinklas

Didžioji dalis dabar egzistuojančių elektros tinklų ir apkrovų yra kintamosios srovės (AC), dėl susiklosčiusių istorinių priežasčių [2]. AC tinklų įtampa gali būti efektyviai transformuojama, dėl to galima sumažinti energijos transportavimo nuostolius. Nuolatinės srovės (DC) PEŠ, tokiai kaip saulės moduliai, reikia DC-AC konverterio, norint juos prijungti prie AC tinklo. DC elektrocheminiai energijos kaupikliai taip pat prie AC sistemos prijungiami naudojant konverterį. Kintamosios srovės apkrovos, tokios kaip AC varikliai, gali būti jungiami tiesiogiai. Nuolatinės srovės apkrovoms reikalingas lygintuvas, išlyginantis AC srovę į DC (šie lygintuvai dažniausiai būna integruoti į DC elektros įrenginius). AC generatoriai, tokie kaip vėjo jėgainės, prie tinklo jungiamos naudojant AC-AC

konverterį. AC mikrotinklų privalumas, kad jie lengvai suderinami su AC elektros tinklais ir apkrovomis. AC mikrotinklo pavyzdys pateiktas 2 pav.

Nuolatinės srovės mikrotinklai siejami su išplitusiomis DC apkrovomis (LED apšvietimas, elektronikos prietaisai, elektromobiliai ir kt.). DC mikrotinkle elektrocheminiai kaupikliai, saulės moduliai gali būti jungiami per vienos pakopos DC-DC konverterius. Tačiau AC generatoriai ir apkrovos jungiamos per AC-DC konverterį. Galima ir hibridinė mikrotinklo architektūra. Toks mikrotinklas turi DC ir AC šynas, kurios jungiamos AC-DC keitikliu. Prie AC tinklo pusės jungiamas išorinis tinklas, AC generatoriai ir apkrovos, o DC tinklo pusėje – energijos kaupimo elementai, nuolatinės srovės šaltiniai ir apkrovos. Tipinis DC mikrotinklas pavaizduotas 2 paveikslėlyje.



3 pav. Hibridinis ir nuolatinės srovės mikrotinklas

Mikrotinklų panaudojimo sritys išskiriamos šios: institucijų, universitetų ir mokyklų miesteliai, pramonės rajonai (gamyklos), karo stovyklos, nuosavų namų, bendrijų ir įmonių mikrotinklai, salos ir nuo centralizuotų elektros tinklų nutolę rajonai. Nuo panaudojimo srities priklauso mikrotinklo įrengimo tinklas ir veikimo strategija. Pramonės ir kariniams objektams mikrotinklai įrengiami siekiant padidinti elektros energijos tiekimo patikimumą. Mikrotinklų įrengiamų bendruomenėse tikslas gali būti neigiamo poveikio aplinkai mažinimas ir energijos gamyba iš nuosavų šaltinių, taip sumažinant vartojamos energijos kainą.

Pagrindiniai mikrotinklo struktūros elementai: nepastovios generuojamos galios atsinaujinantys šaltiniai, pastovios galios šaltiniai, energijos kaupimo sistemos, valdoma apkrova ir mikrotinklo valdymo sistema sujungianti visus elementus į bendrą sinchroniškai veikiančią sistemą. Priklausomai nuo techninės ekonominės veikimo strategijos, galimi ir papildomi mikrotinklo elementai. Kiekvieno MT elemento apibūdinimas pateiktas toliau.

Nepastovios galios atsinaujinantys energijos šaltiniai. Šių šaltinių generuojama galia tiesiogiai priklauso nuo esančių gamtos sąlygų, kurios keičiasi tiek paros tiek sezono atžvilgiu. Dėl teigiamo saulės

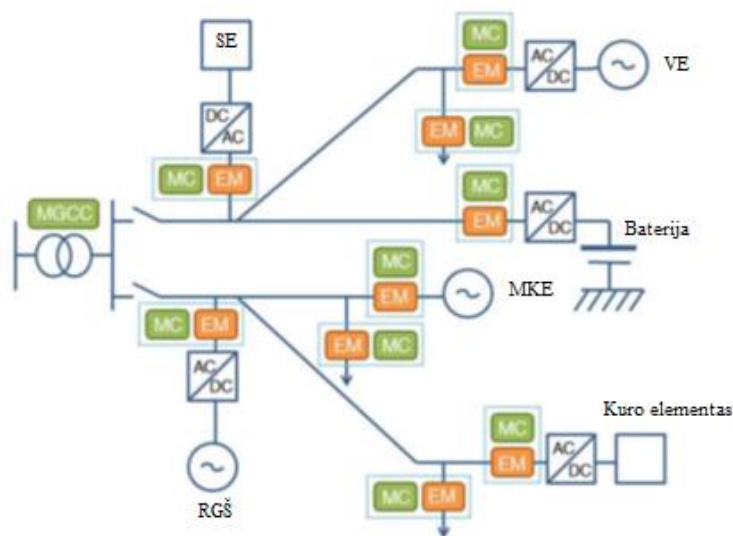
ir vėjo elektrinių poveikio aplinkai jos turi prioritetą gaminti elektros energiją, kuri nebūtinai sutampa su esančia apkrova. Todėl mikrotinkle yra būtini papildomi elementai (energijos kaupimo sistemos, valdoma apkrova, išmani valdymo sistema ir t.t.) šių šaltinių galiai išlyginti. Vienas pagrindinių mikrotinklo valdymo uždavinių yra užtikrinti stabilų tinklo veikimą su nestabilios galios atsinaujinančiais šaltiniais.

Pastovios galios energijos generavimo šaltiniai. Šie šaltiniais gali būti mažos galios kogeneracinės elektrinės, dyzeliniai generatoriai, kuro elementai, mikroturbinos ir t.t. Kogeneracinės elektrinės mikrotinkle netik atlieka atsinaujinančių šaltinių balansavimo vaidmenį, bet taip pat gali aprūpinti esančią šiluminę apkrovą. Tokių elektrinių instaliavimas į mikrotinklus prisideda prie energijos panaudojimo efektyvumo ir mikrotinklo ekonomiškumo didinimo.

Energijos kaupikliai. Mikrotinkluose gali būti naudojami įvairūs elektros ir šiluminės energijos kaupikliai, kurių įkrovos talpa priklauso nuo mikrotinkle veikiančių galių ir vartotojų naudojamos energijos kiekių bei energijos poreikių grafiko. AEI elektrinėms rezervuoti autonominiame mikrotinkle gali būti naudojami didelės energijos iškrovos trukmės kaupyklos: įvairių tipų baterijos, srautinės baterijos, mažosios hidroakumuliacinės elektrinės, nedidelės suslėgto oro energijos kaupyklos. Šios energijos kaupimo priemonės gali būti naudojamos ir tuo atveju, kai mikrotinklas turi jungtį su didžiuoju elektros energetikos sistemos tinklu, jeigu variantas su vietiniais energijos kaupikliais yra ekonomiškai pranašesnis. Apibendrinus, energijos kaupikliai mikrotinkle gali prisidėti prie stabilumo užtikrinimo, AEŠ galių balansavimo ir ekonomiškai pagrįsto dalyvavimo elektros rinkoje (perkant energiją esant mažoms kainoms sistemoje) [1].

Apkrovos valdymas (ang. Demand side integration). Apkrovos valdymas pagrįstas koncepcija, kad vartotojas gali rinktis kada pirkti energiją iš tinklo, priklausomai nuo techninės ekonominės situacijos tinkle. Aktyvūs vartotojai valdydami elektros energijos vartojimą pagal situaciją, esančią rinkoje, gali prisidėti prie atsinaujinančių šaltinių generuojamos galios balansavimo ir užtikrinti energijos vartojimo efektyvumą. Keletas iš apkrovos valdymo strategijų: dviejų tarifų – didžiausia kaina esant dienos valandomis ir mažiausia kaina nakties bei savaitgalių laiku, tai viena paprasčiausių valdymo sistemų, kuri ir dabar gana plačiai naudojama Europos sąjungos šalyse; dinaminės kainos – elektros energijos kaina kinta realiu laiku, priklausomai nuo rinkoje esančios kainos; kritinio piko kaina – tokios pat struktūros strategija, kaip ir dviejų tarifų, tik su daug didesne pikine kaina; tiesiogiai valdoma apkrova – tai apkrova, kuriai perkama energija pastoviu tarifu (mažesniu nei vidutinė rinkos kaina), šią apkrovą gali valdyti tinklo operatorius reguliavimo ir balansavimo tikslais. Vartotojai gali valdyti savo apkrovą rankiniu būdu – vartotojas informuojamas apie esančią kainą rinkoje, gavęs informaciją vartotojas nusprendžia apie energijos vartojimą arba nevartojimą, galbūt net nuotoliniu būdu (pvz. mobiliuoju telefonu). Automatinis apkrovos valdymas – kai vartojimas arba atsijungimas užprogramuojamas pagal vartotojo nustatytas sąlygas (pvz. kaina rinkoje, techninis poreikis ir t.t.).

Mikrotinklo valdymo sistema - valdomi objektai gali būti išskaidyti į tris dalis: prisijungimo prie tinklo valdymas, mikrotinklo valdymas ir generacijos šaltinių vietinis valdymas. Prisijungimo prie tinklo valdymo funkcijos: užtikrinti mikrotinklo dalyvavimą elektros rinkoje, taip pat eksportuoti ir importuoti elektros energiją esant atitinkamoms sąlygoms elektros energetikos sistemoje (pvz. avarija elektros tinkle). Prisijungimo prie tinklo valdymo funkciją gali koordinuoti elektros energetikos sistemos operatorius. Pagrindinės mikrotinklo valdymo funkcijos: apkrovos ir atsinaujinančių energijos šaltinių prognozavimas; apkrovų valdymas, priklausomai nuo prognozavimo ir faktinių duomenų; antrinis įtampos/dažnio valdymas; antrinis aktyviosios - reaktyviosios galios valdymas; „Startas“ po „blackout“. Vietinis valdymo lygis turi visas valdymo funkcijas, prijungiant vieną paskirstytąjį šaltinį, energijos kaupimo įrenginį, valdomą apkrovą, tokias kaip: apsauga; pirminis įtampos - dažnio valdymas; pirminis reaktyviosios ir aktyviosios galios valdymas; baterijų valdymas. Prisijungimo prie išorinio tinklo ir mikrotinklo valdymo funkcijas vykdo centrinis mikrotinklo valdiklis. Vietinio valdymo funkcijas vykdo – mikrošaltinių valdikliai. Pagrindinė mikrotinklo šaltinio valdiklio funkcija yra nepriklausomai kontroliuoti galios srautą ir reaguoti į bet kokius apkrovos pokyčius. Nepriklausomai, reiškia, kad be jokios komunikacijos su centriniu mikrotinklo valdikliu. Centrinio MT valdiklio paskirtis yra valdyti visą mikrotinklo veikimą ir tinklo apsauga, naudojant mikrošaltinių valdiklius. Pagrindiniai centrinio valdiklio valdymo moduliai yra energijos valdymo ir apsaugos koordinavimo. Energijos valdymo modulis – nustato darbo taškus kiekvienam mikrošaltinio valdikliui. Taigi energijos valdymo modulis atsakingas už aktyvios ir reaktyvios galios, įtampos ir dažnio kontroliavimą. Apsaugos koordinavimo modulis – turi užtikrinti sklandų perėjimą į salos režimą įvykus trikdžiams išoriniame tinkle ir sinchroninį prisijungimą prie tinklo. Lokalizuoti avarijos vietą mikrotinkle ir atjungti tik būtinius elementus užtikrinant energijos tiekimą kuo įmanoma didesnei tinklo daliai. Mikrotinklo valdymo principinė schema pateikta 6 pav.



4 pav. Mikrotinklas su paskirstytaisiais generatoriais [2]. (MC – mikrošaltinių valdiklis, EM – elektros energijos apskaita)

1.3. Techniniai ir ekonominiai mikrotinklo aspektai

Šiuo metu skirstomasis elektros tinklas veikia spinduliniu režimu. Atsiradus nestabilios generuojamos galios elektrinėms, esant vėjui ar saulei padaugėja elektros tiekimo šaltinių. Skirstomasis elektros tinklas ima dirbti dvikrypčiu maitinimo režimu. Plečiant paskirstytojo generavimo šaltinių panaudojimą ir siekiant geriau patenkinti elektros vartotojų poreikius, planuojama keisti skirstomojo tinklo architektūrą, pereinant prie mikrotinklų struktūros taip, kad būtų lengviau kontroliuoti vietinius generatorius, keisti galios srautų kryptis ir reguliuoti mazgų įtampas [2]. Mikrotinklų projektai ir bandomieji pavyzdžiai parodė, kad padidėja elektros teikimo patikimumas [1]. Tikimasi, kad sisteminių avarių atvejais daugeliui vartotojų elektros tiekimas nebūtų nutrauktas. Mikrotinklų veikla iš dalies pakeistų arba papildytų dabartinę centralizuotą dažnio valdymo ir reguliavimo sistemas decentralizuotomis sistemomis. Mikrotinklų techniniai ir ekonominiai aspektai nagrinėjami literatūroje [4], [5], [6]. Pagrindinės sąlygos kurias turi atitikti mikrotinklai pateiktos toliau.

Savarankiškumas. Mikrotinklas turi gebėti dirbti tiek prisijungęs prie pagrindinio elektros tinklo tiek atsijungęs. Mikrotinklai apima elektrines, kaupiklius ir apkrovas, ir gali dirbti savarankiškai arba prisijungę prie išorinio tinklo. Dirbant savarankiškai, reikia subalansuoti generavimą ir apkrovas, kad dažnis ir įtampos būtų palaikomos tam tikrose ribose. Dirbant su elektros tinklu, mikrotinklas gali optimizuoti savo elektros gamybą ir vartojimą ir, priklausomai nuo ekonominės situacijos, pirkti arba parduoti savo energiją. Abiem atvejais galima minimizuoti CO₂ išlakas, padidinant atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimą ir mažinant iškastinio kuro naudojimą [1].

Stabilumas. Vietinių generatorių, baterijų ir apkrovų veikimas ir valdymas priklauso nuo dažnio ir įtampų dydžio tų įrenginių gnybtuose. Tai reiškia, kad mikrotinklas turi užtikrinti visų įrenginių stabilaus darbo sąlygas.

Suderinamumas. Mikrotinkluose naudojamiems įrenginiams, dažnio ir įtampų lygiams, elektros kokybei galioja tie patys standartai kaip ir dideliems elektros tinklams ir elektros sistemoms.

Mikrotinklų esminiai privalumai yra šie:

- 1) *Maži teršalų išmetimai energijos gamybos procese.* Mikrotinklas įgalina efektyviai panaudoti perteklinę šilumą gaunama energija gaminant kogeneracinėse jėgainėse, kadangi mikroelektrinės yra arti šilumos vartotojų. Priešingai nei didelėse elektrinėse kurios gamina didelį perteklinės šilumos kiekį, kuris dažnu atveju netgi patenkinus vietinę šiluminę apkrovą išmetamas į atmosferą prisidedamas prie planetos šiltėjimo. Didžiąją mikrotinkle generuojama energija gali sudaryti vietiniai atsinaujinantys šaltiniai, kuriuos mikrotinklas apjungia į vieną sistemą. Lietuvoje yra didelis sezoniškumo faktorius ir išplėtoti šilumos skirstomieji tinklai, todėl mikrošaltinių kogeneracijos taikymas mikrotinkluose reikalauja išsamesnio ekonominio ir techninio vertinimo.

- 2) *Eksplotavimo ir investavimo kaštų mažinimas.* Fizinio atstumo sumažinimas tarp energijos šaltinio ir vartotojo prisideda prie geresnio reaktyviosios galios valdymo visoje sistemoje, mažina nuostolius perdavimo ir skirstymo tinkluose, mažina investicijas į perdavimo ir skirstomąjį tinklą, kadangi auganti energijos paklausa reikalauja investicijų į tinklo plėtrą, mikrotinklai mažina išorinio tinklo apkrovimą, todėl galima plėsti vartojimą neplečiant tinklo. Energijos perdavimo ir skirstymo dedamoji elektros energijos kainoje sumažėja arba išvis yra eliminuojama.
- 3) *Energijos tiekimo patikimumo gerinimas.* Energijos tiekimo patikimumą teigiamai įtakoja šie veiksniai: decentralizuotas energijos tiekimas, didesnė konkurencija tarp pasiūlos ir paklausos, didelio masto avarių, išoriniame tinkle, poveikio vartotojams sumažinimas, valdymo technologijos leidžiančios prognozuoti vartojimą ir generacija ir užtikrinti optimalų energijos valdymą mikrotinkle.
- 4) *Lankstumas.* Mikrotinklai ir mikroelektrinės gali būti įrengiamos per gana trumpą laiką, todėl jų vystymas yra greitesnis, lankstesnis ir paprastesnis. Skirtingai nei didelėms elektros energetikos sistemoms, mikrotinklams vystyti nebūtinos daugiametės plėtros strategijos.

Mikrotinklų plėtojimą stabdantys aspektai:

- 1) *Didelė paskirstytųjų generatorių instaliavimo kaina.* Didelė PG instaliavimo kaina yra svarbus veiksnys stabdantis mikrotinklų plėtojimą. Ši kaina gali būti sumažinama taikant tam tikrą paramos schemą. Ši parama turėtų būti taikoma bent jau pereinamuoju laikotarpiu siekiant pasiekti užsibrėžtų anglies dioksido mažinimo tikslų (Europos sąjungoje iki 2020 m. – AE generacija 20 proc., 2050 m. – 50 proc.)
- 2) *Techniniai sunkumai.* Mikrotinklų plėtojimas vis dar yra eksperimentinėje stadijoje, todėl šis aspektas reikalauja išmanaus valdymo, tinklo ir šaltinių apsaugų, mikrošaltinių parinkimo, vietos nustatymo, PG derinimo tarpusavyje, stabilumo ir kitų tyrimų [3].
- 3) *Standartų ir teisinės bazės nebuvimas.* Mikrotinklai yra sąlyginai nauja platforma, todėl daugelyje šalių nėra standartų kurie apibrėžtų MT apsaugos, eksploatavimo, projektavimo klausimus. Todėl reikalingas teisinės bazės sukūrimas, kuris apibrėžtų suinteresuotų šalių (vartotojų, gamintojų, skirstymo operatoriaus ir kt.) veikimo mikrotinkle ir skirstomajame tinkle modelį.
- 4) *Rinkos monopolio rizika.* Jeigu mikrotinklas turi galimybę atsijungti nuo išorinio tinklo ir tiekti energiją vartotojams savarankiškai, kyla klausimas kas reguliuos elektros energijos kainą kol išorinis tinklas bus neprieinamas. Mikrotinklo energijos gamintojai gali išnaudoti susidariusi monopolį ir tiekti energiją didesne nei rinkos kaina [4]. Todėl būtina sukurti rinkos modelį ir infrastruktūra, kuri būtų paremta sąžiningos konkurencijos principais.

2. PASKIRSTYTIJEI GENERAVIMO ŠALTINIAI MIKROTINKLE

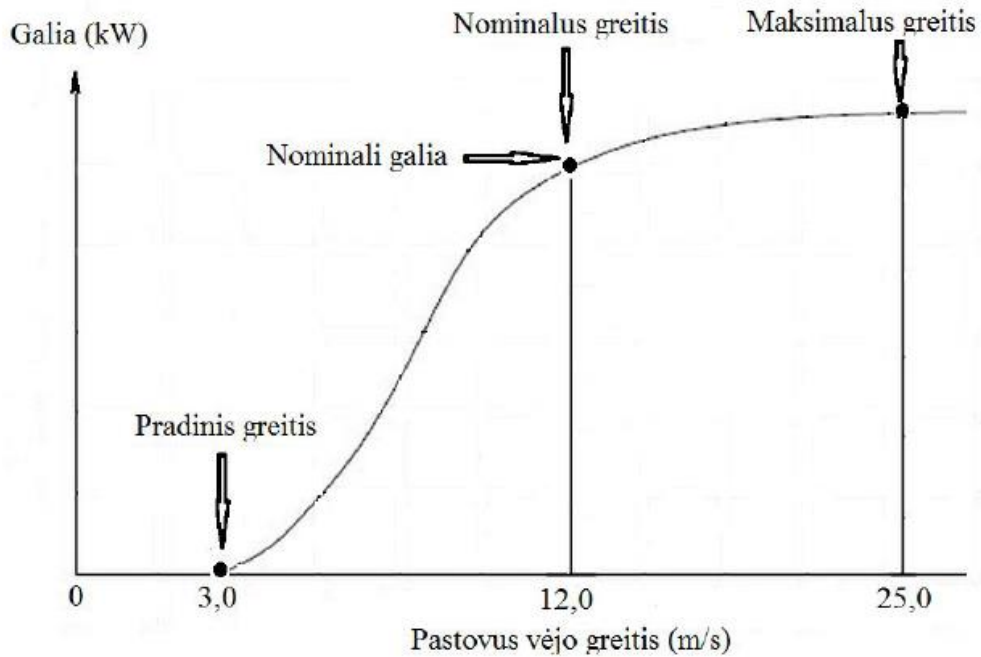
2.1. Vėjo elektrinė

Rajonuose turinčiuose didelius vėjo energijos resursus VE gali būti naudojamos kaip pagrindinis šaltinis aprūpinantis atskirus pastatus, namų grupes ar net miestelius. Techniškai ir ekonomiškai efektyvių VE parinkimas yra viena iš priemonių mikrotinklo efektyvumui gerinti, todėl prieš parenkant vėjo elektrinę būtina įvertinti vėjo energijos potencialą įrengimo vietoje.

Pagrindiniai parametrai apibūdinantys vėjo energijos resursus tam tikro teritorijoje yra vėjo greitis, vėjo pasirodymo tikimybė, vėjo galia ir energija. Vėjo galia, praeinanti pro ploto vienetą, priklauso nuo vėjo greičio ir oro tankio. Vėjo greitis priklauso nuo atstumo virš žemės paviršiaus, metereologinių sąlygų ir paviršiaus šiurkštumo klasės. Prieš statant vėjo elektrines būtina įvertinti pagrindinius vėjo parametrus ir nustatyti atitinkamos vietovės tinkamumą vėjo energetikai.

Vėjo jėgainės gali būti vertikalios ir horizontalios ašies. Vertikalios ašies elektrinės pasižymi tuo kad jos gali veikti pakankamai efektyviai turbulencinėmis sąlygomis ir vėjo kryptie kitimas nesukelia papildomų problemų [7]. Horizontalios ašies elektrinės turi būti nukreiptos vėjo linkme naudojant papildomą sukimo mechanizmą. Šiuo metu rinkoje esančių vertikalios ašies elektrinių naudingumo koeficientas (naudingai panaudotos energijos kiekis pereinantis per elektrinės vėjaratį) siekia iki 30 proc., horizontalios ašies iki 35 proc. [8]. Nors vertikalios ašies elektrinės jau gali lygintis savo efektyvumo su horizontalios ašies elektrinėmis, tačiau jų kainą 2-3 kartus didesnė [1]. Todėl vertikalios ašies vėjo elektrinių įrengimas gali būti vertinimas tik vietovėje kur didelis vėjo energijos turbulentiškumas (turbulentinės sąlygos mažina horizontalios elektrinės naudingumą). Toliau aptariama horizontalios ašies vėjo elektrinių (VE) parametrai ir įrengimo aspektai.

Pagrindiniai vėjo elektrinės apibūdinantys parametrai: stiebo aukštis, vėjaračio plotas, naudingumo koeficientas ir galios kreivė. Didėjant aukščiui virš paviršiaus, didėja ir vėjo greitis. Todėl aukštesnį stiebą turinti vėjo elektrinė pagamins daugiau energijos [8]. Vėjaračio plotas apibūdina koks energijos kiekis bus keičiamas iš kinetinės į mechaninę menčių sukimosi energija. Kuo didesnis plotas tuo daugiau vėjo energijos prateka pro vėjaratį. Naudingumo koeficientas apibūdina kokia dalis energijos pratekėjusi pro vėjaratį paverčiama į elektros energiją. Žemyninės elektrinėms šis koeficientas apie 35 proc. Galios kreivė tai svarbiausia charakteristika apibūdinanti VE. Galios kreivėje atsispindi vėjo greičio ir elektrinės generuojamos galios priklausomybė (4 pav.). Vėjo elektrinės darbas apibūdinamas trimis taškais iš galios kreivės: minimalus vėjo greitis (mažiausias vėjo greitis prie kurio elektrinė pradeda generuoti energija), optimalus vėjo greitis (esant tokiam greičiui vėjo elektrinė dirba nominalia galia), maksimalus vėjo greitis (tai greitis prie kurių yra stabdoma vėjo elektrinė, siekiant išvengti pažeidimų).



5 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė [8]

Siekiant atlikti statomos elektrinės techninį ir ekonominį vertinimą būtina numatyti jos gaminamos energijos kiekius. Pagrindinis veiksnys lemiantis elektrinės pagaminamos energijos kiekius yra vėjo greitis. Todėl būtina nustatyti vėjo greičio pasiskirstymą toje teritorijoje ir aukštyje kuriame įrengiama vėjo elektrinė. Kiek energijos VE gali pagaminti, galima nustatyti dviem metodais, atliekant išsamius vėjo greičio matavimus pasirinktoje vietovėje arba naudojant Weibullo skirstinio tikimybės tankio funkcija. Pirmas metodo privalumas – paprastumas, tačiau jis reikalauja ilgalaikių vėjo matavimų pasirinktoje vietoje, kai nėra galimybės atlikti ilgalaikių matavimų ar norima gauti preliminarius vėjo elektrinės generuojamos energijos kiekius naudojama Weibullo skirstinio tankio funkcija:

$$p(v) = \frac{k_w}{v} \cdot \left(\frac{v}{C_w}\right)^{k_w-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C_w}\right)^{k_w}}; \quad (2.1)$$

čia $p(v)$ – vėjo greičio pasirodymo dažnis;

k_w – Weibullo skirstinio formos parametras;

C_w – Weibullo skirstinio skalės parametras.

Weibullo skirstinio parametrai randami vėjo parametrų atlase [8]. Žinant vėjo pasirodymo dažnį galime apskaičiuoti vėjo elektrinės sugeneruojamos energijos kiekį per metus. Energijos kiekis sugeneruotas prie vėjo greičio, kuris atitinka narį iš vėjo greičių intervalo, apskaičiuojamas jo pasirodymo tikimybę dauginant iš VE išėjimo galios tame greičio intervale ir iš to intervalo valandų skaičiaus per metus.

Susumavę visiems vėjo greičiams skirstinio intervalo apskaičiuotą energijos kiekį gauname bendrą VE pagamintą energijos kiekį.

Mikrotinkle gali būti naudojamos įvairaus galingumo VE, priklausomai nuo esančių vartotojų ir konkrečios vietovės vėjo energijos resursų. Kai naudojamos galingos VE, visos sistemos darbo efektyvumas gali būti didesnis palyginus su mažomis sistemomis, kadangi didžiųjų VE bokštai yra kur kas aukštesni, o didesniame aukštyje pasiekiamas didesnės vėjo energijos potencialas [7]. Vėjo elektrinių kainos gali ženkliai skirtis todėl rekomenduojama prieš parenkant elektrinė konkrečiai vietai ir sistemai atlikti jo techninį-ekonominį vertinimą [1].

2.2. Saulės elektrinė

Saulės elektrinių generacija apima elektros gamyba iš nemokamos ir neišsenkančios saulės energijos. Pagrindiniai saulės modulių privalumai: minimalus poveikis aplinkai, drastiškai sumažinama kuro dedamoji elektros kainoje, ilgas tarnavimo laikas su minimaliomis aptarnavimo išlaidomis, prieinamumas buitiniams vartotojams. Dėl šių privalumų saulės modulių sistemos pripažįstamos vyriausybių, aplinkosaugos organizacijų, komercinių organizacijų kaip vienas pagrindinių ateities darnios ir atsinaujinančios energetikos energijos šaltinių. Saulės modulių sistemos instaliavimo kaina nuolat mažėja, bet vis dar yra sąlyginai brangi.

Saulės elektrinės pasižymi nestabilia metų bėgyje kintančia energijos generacija, todėl jos gali būti efektyviai naudojamos mikrotinkle su elementais kurie rezervuotų jų generuojamą galia sumažėjus ar nutrūkus generacijai. Ypatingą saulės modulių potencialas numatomas nuolatinės srovės mikrotinkluose, kur saulės moduliai gali tiekti energija tiesiogiai, nekonvertuojant nuolatinės srovės į kintamą ir tuo pačiu išvengiant konvertavimo nuostolių [1].

Pagrindiniai saulės elementų tipai: monokristaliniai (gamyboje naudojamas grynas silicis, silicio plokštelė yra auginama aplinkui vieną monokristalą, todėl sukuriamas idealiai orientuotas kristalinis tinklelis, pasižymi aukštu efektyvumu, tačiau gamybos procesas komplikotas ir brangus), polikristaliniai (silicio plokštelė formuojama aplink kelis kristalus, taip gaunami vienas kito atžvilgiu orientuoti monokristalai, gamybos procesas paprastesnis nei monokristalinių), plonasluoksniai (elementai gaminami siliciu padengiant stiklą ar kitą skaidrų paviršių, pasižymi mažu efektyvumu ir pigiu gamybos procesu), hibridiniai (gaminami kombinuojant monokristalinių ir plonasluoksninių elementų gamybos technologijos, taip išgaunant geriausias abiejų technologijų savybes).

Saulės modulių efektyvumas yra matuojamas procentais, kurie nusako kiek saulės energijos krintančios į 1 m² saulės modulio paviršiaus paverčiama elektros energija. Rinkoje jau yra saulės modulių kurių efektyvumas siekia apie 20 proc., tačiau didžiąją dalį rinkos sudaro saulės moduliai kurių efektyvumas apie 16 proc. [9].

Pagrindinis parametras apibūdinantis saulės energijos resursus tam tikroje vietovėje yra apšvieta, matuojama W/m^2 . Ji priklauso nuo metų sezono, paros laiko ir debesuotumo. Didžiausia apšvietos vertė gaunama matuojant ją plokštumoje statmenoje saulės spinduliuotei. Saulės energijos išteklių pasiskirstymas šalies teritorijoje yra kur kas vienodesnis lyginant su vėjo energijos resursais (suminis energijos kiekis per metus tenkantis $1 m^2$ skirtinguose Lietuvos vietovėse svyruoja nuo $950 kWh/m^2$ iki $1050 kWh/m^2$).

Saulės elektrinės savo efektyvumu skiriasi ne tiek daug, tačiau norint, kad SE dirbtų efektyviai būtina užtikrinti, kad modulynas nešešėliuojamas šalia esančių medžių, pastatų ir statinių; pasirinkta optimali saulės modulių orientacijos kryptis ir kampas.

2.3. Reguliuojamos galios energijos šaltiniai mikrotinkle

Reguliuojamos galios energijos šaltiniai mikrotinkluose gali atlikti energijos balansavimo ir rezervavimo funkcijas. Pagrindiniai RGŠ naudojami mikrotinkluose :

- 1) vidaus degimo varikliai;
- 2) mažosios hidroelektrinės;
- 3) kai kurių tipų kuro elementai.

Vidaus degimo variklis degindamas kurą suka elektros generatorių, o šiluma gaunama aušinant variklį ir įrengiant papildomus šilumos atgavimo įrenginius degimo produktų išmetimo sistemoje. Vidaus degimo varikliai – plačiai paplitusi ir puikiai pažįstama technologija, kurios elektrinė galia svyruoja nuo kelių kilovatų iki 10 MW [8]. Šie įrenginiai pasižymi aukštu naudingumo koeficientu, greitu paleidimu ir mažomis eksploatacijos išlaidomis. Naudojamas kuras – benzinas, dyzelinas, biodyzelinas, gamtinės dujos, biodujos ir kt. Vidaus degimo varikliuose kuras gali būti uždegamas nuo kibirkšties (Oto varikliai) arba detonuoti nuo slėgio (Dyzeliniai varikliai). Gamtinės dujos yra švariausias iškastinis kuras, todėl siekiant kuo mažesnių emisijų, didelis dėmesys skiriamas vidaus degimo varikliams varomiems gamtinėmis dujomis. Vidaus degimo variklio – generatoriaus sistemos elektrinis naudingumo koeficientas siekia iki 35 proc. , šiluminis – iki 50 proc. [1].

Mažosios hidroelektrinių galimos instaliavimo vietos priklauso nuo geografinių ir klimato sąlygų. Šio tipo elektrinės turi labai geras dinamines savybes, todėl idealiai tinka mikrotinklo balansavimui. Tačiau gali būti naudojamos tik vietovėse kur yra pakankamas upių energijos resursas, todėl platesnio masto šio tipo elektrinių panaudojimas mikrotinkluose negalimas.

Galios balansuoti mikrotinkle gali būti naudojami specialiai šiam tikslui pritaikyti PEMFC (*angl. Polymer electrolyte membrane fuel cell*) ir SOFC (*angl. Solid oxide fuel cells*) kuro elementai [1]. Šie kuro elementai gali veikti kaip kogeneracinės elektrinės. Abiejų tipų KE varomi gamtinėmis dujomis. Šių kuro elementų techniniai ir ekonominiai duomenys labai geri: aukšti elektrinio naudingumo koeficientai (apie 50 proc.), nedidelė įrengimo kaina (400 eur/kW) ir eksploatacijos išlaidos [1]. Tačiau

jų darbo trukmė tik 3-5 metai . Kuro elementai tik pradeda įsitvirtinti rinkoje ir gali būti vertinami kaip netolimos ateities generacijos šaltinis.

2.4. Elektros energijos kaupikliai

Elektros energijos kaupikliai mikrotinkluose naudojami energijos srautų valdymui. Tai ypatingai aktualu jeigu MT su atsinaujinančiais šaltiniais, kurių generuojama galia priklauso nuo aplinkos veiksnių. Kaupikliai šiuo atveju naudojami AEŠ nestabiliai generuojamai galiai balansuoti, t. y. sumažinti energijos vartojimo ir gamybos priklausomybę. Šiuo metu svarbiausiomis energijos kaupimo technologijomis laikomos hidroakumuliacinės, suslėgto oro, gravitacinės ir įvairių tipų baterijų.

Hidroakumuliacinės, suslėgto oro ir gravitacinės kaupimo technologijos pagrįstos elektros energijos vertimu į mechaninę ir atvirkščiai. Tokios tipo energijos akumuliacijos sistemos galima naudoti dideliems energijos kiekiams valdyti. Tačiau jų įrengimas reikalauja didelių pradinė investicijų ir tinkamos vietovės. Tinkamos vietovės sąlyga esminis šių kaupimo sistemų trūkumas. Suslėgto oro kaupyklos reikalinga dirbtinė arba natūrali talpykla, kurioje spaudžiamas oro energijos kaupimo režimu. Gravitacinių kaupyklų įrengimui būtina kalvota vietovė. Tokio tipo kaupyklose įkrovimo metu, naudojant elektros energiją, traukinys bėgiais stumiamas į įkalnę, išsikrovimo metu traukinys paleidžiamas riedėti žemyn, traukinio sukaupta potencinė energija naudojama elektros generatoriui sukurti. Taigi šių kaupyklų naudojimas tankiai apgyvendintose vietovėse arba mažuose mikrotinkluose yra netikslingas ar net neįmanomas, tačiau jos gali būti įrengiamos keletui mikrotinklų balansuoti arba elektros energetikos sistemoje siekiant balansuoti joje esančius AEŠ. Tokių kaupimo sistemų technologijos nagrinėjamos literatūroje [4].

Elektrocheminė baterijos yra elektrocheminis įrenginys, kuris keičia elektros energiją į potencinę cheminę energiją įkrovimo metu ir cheminę energiją į elektros energiją iškrovimo metu. Baterijų technologijos jau yra pakankamai brandžios ir komercializuotos, tačiau tai vis dar viena brangiausių energijos kaupimo technologijų [1]. Baterijų yra skirstomos pagal jų panaudojimo paskirtį ir pagaminimo technologiją. Pagal panaudojimo paskirtį baterijos gali būti skirstomos į trumpalaikės energijos iškrovos, ilgalaikės energijos iškrovos ir kombinuotus. Trumpalaikės energijos iškrovos baterijų paskirtis balansuoti didelius trumpalaikius galios svyravimus. Tokius galios svyravimus gali sukelti galingų energijos imtuvų įjungimas arba didelis kiekis tuo pačiu metu mažos ir vidutinės galios imtuvų įjungimas.

Mažos galios mikrotinkle, kuriame energijos vartotojai charakteristika nepasižymi trumpalaikiais dideliais galios svyravimais, trumpalaikės iškrovos kaupiklių dažniausiai nereikia, užtenka tik ilgalaikės energijos iškrovos baterijų [1]. Ilgalaikės iškrovos baterijos naudojamos rezervuoti nestabilios galios šaltiniams pasižymi (priklausomai nuo naudojamos technologijos) giliu iškrovimo/įkrovimo ciklu.

Toliau apžvelgiama pagrindiniai ilgalaikiai energijos iškrovimo baterijų tipai ir charakterizuojantys parametrai.

Saulės ir vėjo elektrinių balansavimui pagrinde naudojamos švino – rūgštiniai (skysto elektrolito, želiniai, AGM) ir ličio jonų akumuliatoriai.

3. MIKROTINKLO OPTIMALIOS STRUKTŪROS TYRIMO METODIKA

3.1. Struktūros vertinimo kriterijai

Darbe mikrotinklo struktūra vertinama pagal tris pagrindinius kriterijus: ekonominį, techninį ir aplinkosauginį. Ekonominis kriterijus vertinamas pagal pagamintos elektros energijos kainą. Siekiant nustatyti galima elektros energijos kainą naudojamas fundamentalus pagaminamos energijos įvertinimo parametras LCOE (*angl. Levelized Costs of Electricity*) t.y. palyginamoji elektros energijos kainą. Techninis kriterijus vertinamas pagal elektros energijos tiekimo patikimumą t.y. pagal procentinį apkrovos aprūpinimą per metus laiko ir valandų skaičių kai mikrotinkle esantys generacijos šaltiniai nepajėgūs patenkinti esamo energijos poreikio. Aplinkosauginis kriterijus vertinamas pagal pagamintos atsinaujinančios energijos kiekį ir pagal sudegintą iškastinio kuro kiekį. Žinant sunaudotą kuro kiekį gali būti apskaičiuojamas teršalų kiekis išmetamas į aplinką. Kiekvieno kriterijaus apskaičiavimo metodika pateikta toliau.

Palyginamoji elektros energijos kainą:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{LCC_t}{(1+k)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+k)^t}}; \quad (3.1)$$

čia $LCOE$ – elektros energijos gamybos svartiniai kaštai, eur/kWh;

LCC_t – metinės projekto investicijos, eur;

n – naudingo ekonominio veikimo laikotarpis;

E_t – pagamintas energijos kiekis per metus;

k – diskonto norma.

Metinės projekto investicijos:

$$LCC_t = \left(\frac{K_{VE}}{T_{VE}} + EP_{VE} \right) + \left(\frac{K_{SE}}{T_{SE}} + EP_{SE} \right) + \left(\frac{K_B}{T_B} + EP_B \right) + \left(\frac{K_{GE}}{T_{GE}} + EP_{GE} + KR_{GE} \right); \quad (3.2)$$

čia K – kapitalinės investicijos, eur;

T – įrenginio tarnavimo laikas;

EP – eksploatacinės ir techninės priežiūros išlaidos per metus, eur/metams;

KR – išlaidos kurui per metus, eur/metams.

Pagamintas energijos kiekis:

$$E_t = E_{VE.t} + E_{SE.t} + E_{GE.t}; \quad (3.3)$$

čia $E_{VE.t}$ – vėjo elektrinių pagamintas suminis energijos kiekis per metus, kWh;

$E_{SE.t}$ – saulės elektrinių suminis pagamintas energijos kiekis per metus, kWh;

$E_{GE.t}$ – reguliuojamos galios šaltinio suminis pagamintas energijos kiekis per metus, kWh.

Techninis kriterijus vertinimas mikrotinklo patikimumu. MT elektros energijos tiekimo patikimumas išreiškiamas koeficientu kuris lygus mikrotinklo generavimo šaltinio pagamintai energijai padalintai iš suminio energijos poreikio per metus. Šis koeficientas parodo kokią dalį energijos poreikio patenkina mikrotinkle esantys generavimo šaltiniai:

$$Pat_1 = \frac{E_t}{E_{A.t}}; \quad (3.4)$$

čia Pat_1 – mikrotinklo patikimumas;

$E_{A.t}$ – suminis energijos poreiki per metus, kWh;

Patikimumas taip gali būti išreiškiamas koeficientu, kuris parodo kokia dalį laiko per metus mikrotinklo šaltiniai negalėjo patenkinti energijos poreikio. Šis koeficientas lygus valandų skaičiui per metus, kai nebuvo jaučiamas energijos tiekimo deficitas, padalintam iš suminio valandų skaičiaus per metus:

$$Pat_2 = \frac{8760 - E_{tr.t.}}{E_{A.t}}; \quad (3.5)$$

čia Pat_2 – mikrotinklo patikimumą įvertinantis koeficientas;

$E_{tr.t.}$ – valandų skaičius per metus, kai energijos poreikis viršija generacija, h.

Aplinkosauginis kriterijus įvertinamas apskaičiavus atsinaujinančios energijos pagaminta energijos kiekį bendrame energijos poreikio balanse. Taip pat apskaičiavus

3.2. Tiriama mikrotinklo konfigūracija

Darbe siekiama nustatyti optimalią mikrotinklo struktūros elementų kombinaciją esant Lietuvos klimatinėms sąlygoms ir skirtingai apkrovos charakteristikai. Optimali struktūra vertinama šiais aspektais: ekonominiu, techniniu ir aplinkosauginiu. Kiekvienam aspektui įvertinti naudojami parametrai, kurių aprašymas pateiktas 3.1 skyrelyje. Siekiant iširti optimalia mikrotinklo struktūra priklausomai nuo apkrovos dydžio ir charakteristikos sudaromas algoritmas, kurio funkcija nustatyti visų galimų struktūros variantų įvertinimo parametrus ir pagal užduotus kriterijus pateikti optimalios struktūros variantus. Tyrimas vykdomas su dviem tipų apkrova: buitine (pvz. gyvenamasis kvartalas) ir pramonine (pvz. tam tikrą produkcija gaminantis fabrikas). Skirtingu tipų apkrovų duomenys ir

charakteristikos pateiktos 3.3 skyrelyje. Algoritme vykdoma skirtingų struktūros variantų vienu metų energinė simuliacija (simuliacijos laiko žingsnis 1h). Saulės spinduliuotės, vėjo greičio ir apkrovos vienu metų valandiniai duomenys sugeneruojami naudojantis HOMER atsinaujinančių šaltinių modeliavimo programa (žr. 4 priedas). Atlikus visų struktūros variantų simuliacija ir apskaičiavus kiekvieno varianto įvertinimo parametrus atliekama duomenų analizė. Algoritmas kartojamas pakeitus apkrovos charakteristika. Algoritmas suprogramuotas naudojantis MATLAB programa.

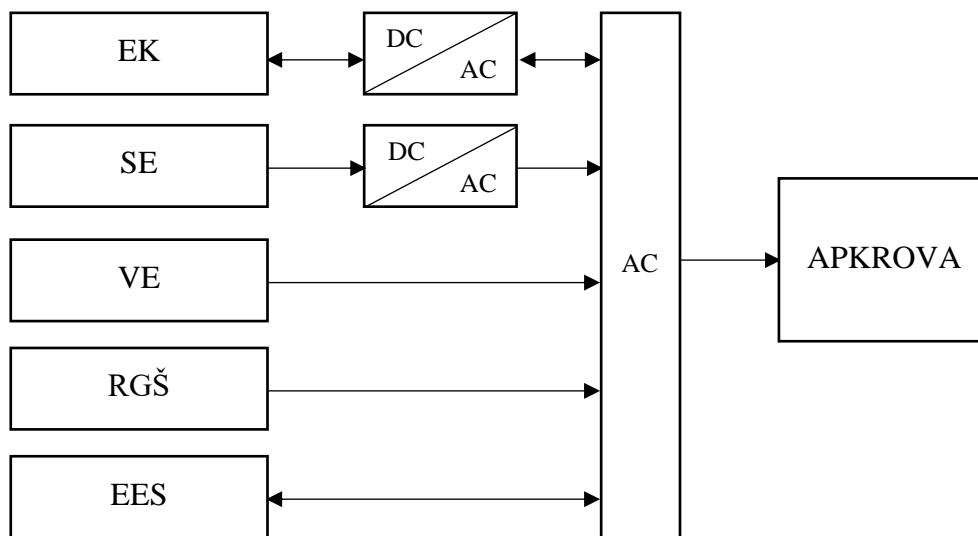
Tiriamo mikrotinklo struktūra sudaro: saulės elektrinė, vėjo elektrinė, elektros energijos kaupiklis, reguliuojamos galios šaltinis ir apkrova. Tiriamo mikrotinklo principinė schema pateikta 6 paveikslėlyje. Schemoje pateiktų elementų aprašymas pateiktas toliau.

Atsinaujinantys energijos šaltiniai. VE ir SE elektros energijos generacija nėra ribojama. Kai AEŠ generacija viršija esama poreikį mikrotinkle, energija kaupiama energijos kaupiklyje. Jeigu nėra galimybės energija panaudoti įkraunant baterija ji laikoma pertekline. Perteklinė energija nėra įtraukiama į mikrotinklo energijos balansą ir vertinama kaip potencialus energijos kiekis, kurį mikrotinklas galėtų perduoti į elektros energetikos sistemą.

Reguliuojamos galios šaltinis. Reguliuojamos galios šaltinis paleidžiamas laiko momentu kai esamas energijos poreikis yra didesnis už AEŠ ir EK tiekiamą energijos kiekį. Šio elemento funkcija užtikrinti patikimą MT darbą, kai nėra galimybės apsirūpinti energija iš AEŠ.

Energijos kaupiklis. Energijos kaupiklyje kaupiama AEŠ perteklinė energija. Sukaupta energija panaudojama, kai AEŠ negali patenkinti esamo poreikio. Jeigu EK sukauptos energijos neužtenka paleidžiamas RGŠ.

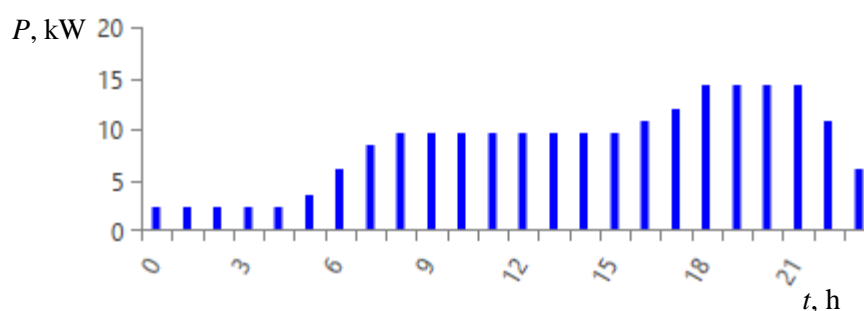
Elektros energetikos sistema. Jeigu mikrotinkle esančių generacijos šaltinių neužtenka esamam energijos poreikiui patenkinti laikome kad energija imama iš EES. AEŠ sugeneruota perteklinė energija, kuri negali būti panaudota mikrotinkle, tiekama į EES.



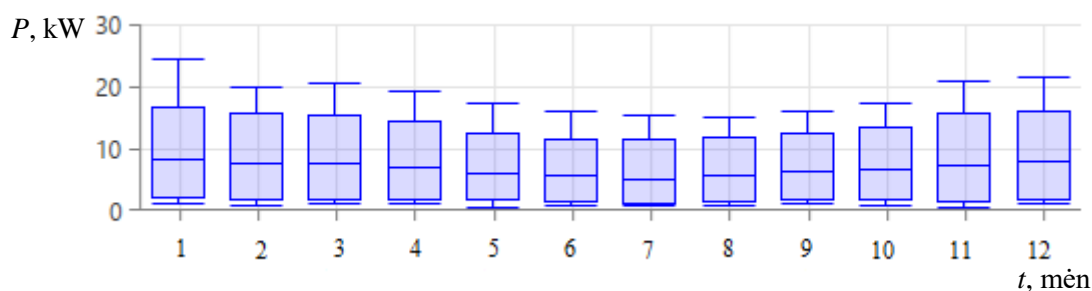
6 pav. Tiriamo mikrotinklo blokinė schema

3.3. Elektros energijos poreikio duomenys

Mikrotinklo simuliacija optimalios struktūros algoritme atliekama su dviejų tipų apkrova. Pirmo tipo apkrova atitinka buitinius vartotojus (gyvenamasis namų kvartalas, daugiabutis namas ir t.t.), antro tipo apkrova atitinka pramoninį vartotoją. Šie elektros energijos vartotojų tipai tarpusavyje skiriasi apkrovos charakteristika. Pramoninio vartotojo charakteristika išlieka sąlyginai stabili paros, savaitės ir mėnesio bėgyje, žymesnis apkrovos kitimas pastebimas tik metų bėgyje. Buitinio vartotojo apkrovos charakteristika kintanti ir priklauso nuo žmonių užimtumo bei įpročių. Tipinių buitinių vartotojų apkrovos charakteristika pateikta 7 ir 8 paveikslėlyje, pramoninio – 9 ir 10 paveikslėlyje.



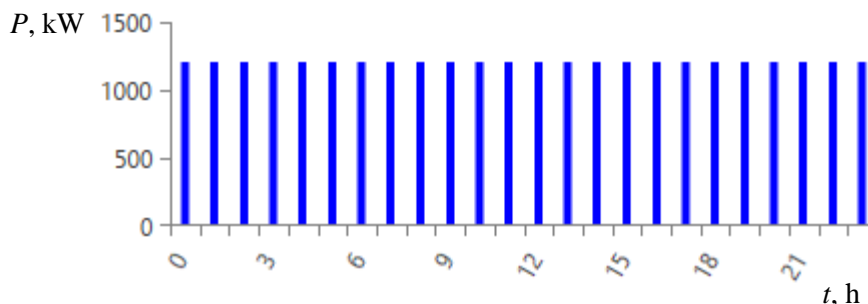
7 pav. Tipinės buitinės apkrovos poros energijos poreikio grafikas [10]



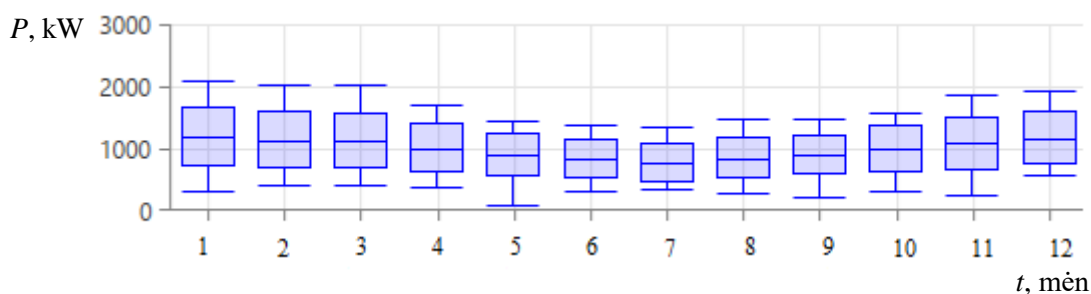
8 pav. Tipinės buitinės apkrovos metų energijos poreikio grafikas [10]

Nustatinėjant mikrotinklo struktūros parametrus elektros energijos disbalansas skaičiuojamas kas valandą laiko. Tokios apimties energijos poreikio duomenys gaunami naudojantis HAUMER atsinaujinančių šaltinių modeliavimo programinę įrangą. Programuoja pagal pasirinkta apkrovos charakteristika, dydį ir kintamumo parametrus sugeneruojami metų trukmės energijos poreikio duomenys. Pasirinktas apkrovos dydis pakeičia tipinės apkrovos mastelį. Apkrovos atsitiktinio kintamumo parametrai modifikuoja tipinę apkrovos charakteristiką valandų ir dienų bėgyje, taip paversdami apkrovos duomenis tikroviškesniais. Pirmas kintamumo parametras naudojamas pakeisti dienų apkrovos duomenis, kad duomenys nebūti vienodi diena iš dienos. Dienų kintamumo parametras apibūdina kiek procentų nuo tipinės apkrovos suminio poreikio galima atsitiktinai padidinti arba sumažinti dienos suminį poreikį. Šio parametro dydis iškraipo tipinių duomenų dydį tačiau grafiko forma išlieka nepakitusi, kadangi yra padidinamos arba sumažinamos visos dienos valandų skaičius proporcingai. Kitas kintamumo parametras apibūdina poreikio paskirstymą paroje. Šio parametras

iškraipo tipinių duomenų dienos grafiko forma, tačiau dydi išlaiko nepakitusi (mažinant tam tikros valandos energijos poreikio reikšmę atitinkamai padidinama vienos iš poroje esančių valandų poreikio reikšmė).



9 pav. Tipinės pramoninės apkrovos paros energijos poreikio grafikas [10]



10 pav. Tipinės pramoninės apkrovos metų energijos poreikio grafikas [10]

Dienų atsitiktinio kintamumo parametras pasirenkamas 10 %, tai reiškia, kad poreikio duomenų padidintų atitinkamu masteliu dienos suminis energijos poreikis atsitiktinai gali kisti 10 % lyginant su tipiniais duomenimis. Valandų kintamumo parametras pasirenkamas 15 % (sugeneruotų duomenų valandos poreikio reikšmė atsitiktinai padidinama arba pamažinama iki 15% išlaikant nepakitusių suminių dienos poreikį). Abiejų tipų apkrovas apibūdinantys parametrai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Elektros energijos poreikio duomenys

Parametras	Matavimo vienetai	Buitinės apkrovos tipas	Pramoninės apkrovos tipas
Elektros energijos suvartojimo vidurkis per dieną	kWh	1200	1200
Vidutinis galios poreikis	kW	50	50
Pikinė galia	kW	164,95	104,76
Apkrovos koeficientas	-	0,3	0,48
Metinis energijos poreikis	MWh	438	438

4. PASKIRSTYTŲJŲ GENERATORIŲ ENERGINIS MODELIAVIMAS

4.1. Vėjo elektrinės modelis

Skirtingos vėjo elektrinės savo pagaminta energija skiriasi priklausomai nuo konkrečios VE techninių parametrų ir instaliavimo vietoje esančių vėjo energijos resursų. Todėl darbe analizuojamos keleto gamintojų VE kurios skiriasi savo nominalia galia ir galios kreivėmis. Pagal vėjo elektrinės pagaminama energijos kiekį per metus parenkama efektyviausia elektrinė, kuri naudojama optimalios struktūros nustatymo algoritme tolimesniems skaičiavimams.

Algoritme vėjo elektrinių generuojama galia skaičiuojama kiekvienu laiko momentu. Generuojamos galios nustatymas susideda iš dviejų pagrindinių etapų. Pirmame etape perskaičiuojamas vėjo greitis, atitinkamu laiko momentu, VE bokšto aukštyje. Antrame etape, žinant vėjo greitį ir VE galios kitimo charakteristika priklausomai nuo vėjo greičio, apskaičiuojama generuojama galia.

Vėjo greitis perskaičiuojamas VE bokšto aukštyje naudojant toliau pateiktą formulę:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^\alpha ; \quad (4.1)$$

čia V_2 – vėjo greitis vėjo elektrinės bokšto aukštyje, m/s;

V_1 – vėjo greitis jo matavimo aukštyje, m/s;

H_2 – vėjo elektrinės bokšto aukštis, m;

H_1 – vėjo greičio matavimo aukštis, m;

α – paviršiaus nelygumą įvertinantis parametras.

Parametro α reikšmė priklauso nuo paviršiaus tipo. Darbe šio parametro reikšmė priimama lygi 0,2, kuri atitinka gyvenamų namų kvartalo, kaimo vietovės paviršiaus tipą. Tai toks paviršiaus tipas kuris labiausiai tikėtinas mikrotinklo įrengimo vietovėje. Nelygumo įvertinimo parametro reikšmės prie skirtingo paviršiaus tipo pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Paviršiaus nelygumą įvertinančio parametro reikšmės [7]

Paviršiaus tipas	α
Vandens paviršius	0,01
Atvira vietovė su lygiu paviršiumi, pvz., keliai, ganyklos ir t.t.	0,077
Atvira, retų kalvų apsupta žemės ūkio vietovė	0,12
Kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 0,125 – 1 km ²	0,145 – 0,2
Nedideli miesteliai, sodai ir miškai	0,28
Dideli miestai su aukštais pastatai	0,375
Dideli miestai su dangoraižiais	0,46

Vėjo elektrinės generuojama galia apskaičiuojama naudojantis VE galios kreive. Konkrečiam vėjo elektrinės modeliui galios kreivė pateikia gamintojas. Skaičiuojant VE generuojama galia priimama, kad tarp dviejų galios kreivės taškų priklausomybė yra tiesinė. Taigi VE elektrinės galia esant tam tikram vėjo greičiui lygi:

$$P_{VE} = \begin{cases} 0, & V < V_1; \\ P_1 + (V_2 - V) \cdot \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1}, & V_1 \leq V \leq V_2; \\ \dots & \\ \dots & \\ P_{n-1} + (V_2 - V) \cdot \frac{P_n - P_{n-1}}{V_n - V_{n-1}}, & V_1 \leq V \leq V_2; \\ 0, & V > V_n; \end{cases} \quad (4.2)$$

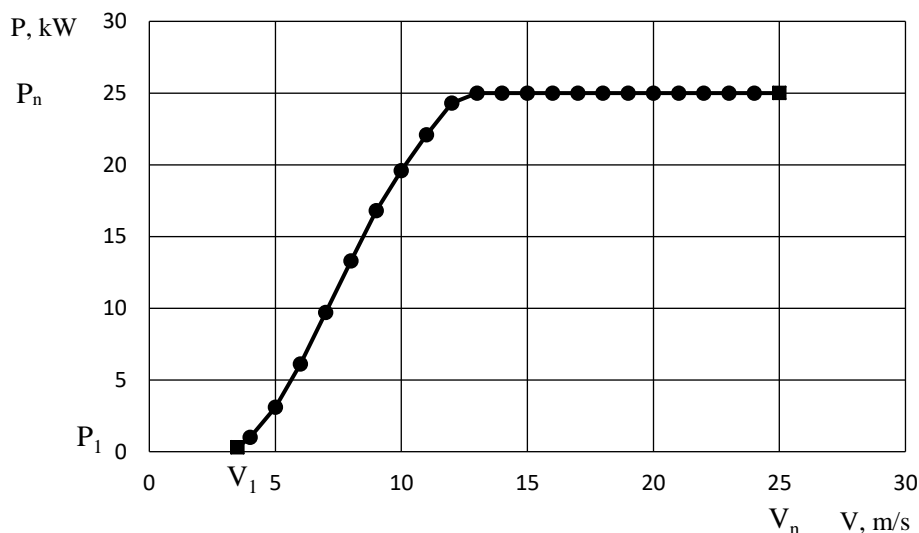
čia P_{VE} – vėjo elektrinės generuojama galia, kW;

V – vėjo greitis vėjo elektrinės bokšto aukštyje, m/s;

P_n – vėjo elektrinės generuojama galia esant vėjo greičiui V_n , kW;

V_n – vėjo greičio reikšmė iš galios kreivės taške n , m/s.

Iš formulės 4.2 matyti, kad VE generuojama galia esant mažesniai vėjo greičiui už VE pradinį vėjo greitį V_1 lygi nuliui, taip pat ji lygi nuliui esant vėjo greičiui didesniai už VE maksimalų galimą vėjo greitį V_n . Vienos iš modelyje naudojamos vėjo elektrinės (Eocycle EO25 Class IIA) galios kreivė su atidėtomis formulėje 4.2 naudojamomis reikšmėmis pateikta 11 pav.



11 pav. Eocycle EO25 Class IIA vėjo elektrinės galios kreivė

4.2. Saulės elektrinės modelis

Skirtingų gamintojų saulės moduliai savo techniniais parametrais ir generuojama galia skiriasi ne taip drastiškai kaip vėjo elektrinėms, todėl optimalios struktūros tyrime naudojamas apibendrintas saulės elektrinės modelis. Darbe priimama, kad saulės elektrinė orientuota į pietus optimaliai kartu su horizontalia plokštuma. (38°). Techniniai vieno saulės modulio parametrai pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė Saulės modulio techniniai duomenys

Parametras	Matavimo vienetai	Parametro reikšmė
Nominali galia	Kw	1
Efektyvumo koeficientas	proc.	17
DC-AC keitiklis	-	integruotas
Galios sumažinimo koeficientas	-	0,8
Užimamas plotas	m ²	6
Saulės sekimo sistema	-	nėra
Eksplotavimo laikas	metai	25

Generuojama saulės elektrinės galia algoritme skaičiuojama kiekvienu laiko momentu SE generuojama galia, kai nevertinamas temperatūros poveikis, lygi:

$$P_{SE} = P_{SM} \cdot k_{SM} \cdot \left(\frac{E_S}{E_{SB}} \right) \cdot n_{SM}; \quad (4.3)$$

čia P_{SE} – saulės elektrinės generuojama galia, kW;

P_{SM} – saulės modulio nominali galia, kW;

k_{SM} – saulės modulio galios sumažinimo koeficientas;

E_S – saulės spinduliuotės krintančios ant saulės elektrinės intensyvumas, kW/m²;

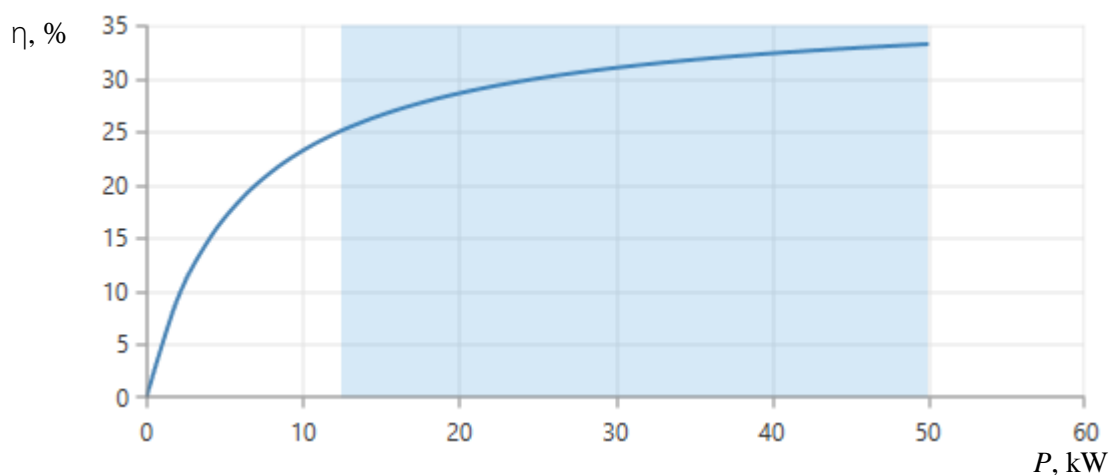
E_{SB} – spinduliuotės intensyvumas esant standartinėms bandymo sąlygoms, kW/m²;

n_{SM} – saulės modulių skaičius.

Galios sumažinimo koeficientas įvertina generuojamos galios nuostolius dėl aplinkos sąlygų (dulkių, rūko, sniego, temperatūros ir t.t.). Šio koeficiento reikšmė, kai nevertinama temperatūros poveikis saulės elektrinės generuojamai galiai gali svyruoti nuo 0,8 iki 0,9. Darbe priimama koeficiento reikšmė lygi 0,8. Spinduliuotės intensyvumas esant standartinėms bandymo sąlygoms E_{SB} lygus 1 kW/m² (esant tokiam spinduliuotės intensyvumui nustatoma modulio generuojama nominali galia). Saulės spinduliuotės krintančios ant SE intensyvumas nustatomas įvertinant saulės modulio orientacija pasaulio šalių kryptimis ir kampą su horizontalia plokštuma.

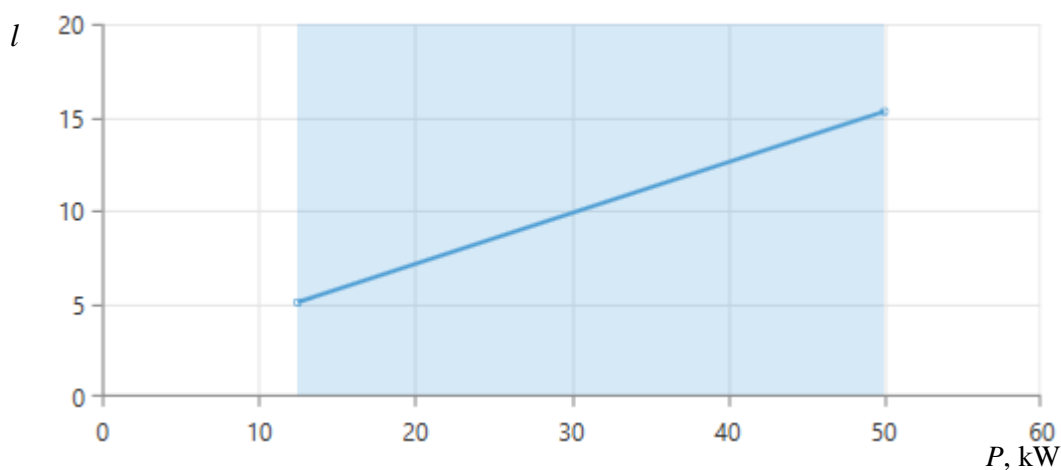
4.3. Reguliuojamos galios šaltinio modelis

Nustatymą elektros tiekimo patikimui mikrotinkle pasiekti parenkamas reguliuojamos galios šaltinis. Kadangi generatoriaus galia kiekvienam struktūros variantui gali būti skirtinga, algoritme naudojamas apibendrintas dyzelinio generatoriaus modelis, kurio techniniai parametrai nustatyti remiantis literatūroje [10] pateikta informacija. Dyzelinio generatoriaus kuro panaudojimo efektyvumo kreivė priklausomai nuo generuojamos galios pateikta 12 paveikslėlyje.



12 pav. Dyzelinio generatoriaus efektyvumo kreivė [10]

Iš 12 paveikslėlio matome, kad DG efektyvumas jam apsikraunant kinta nuo 25 % iki 33 %, o minimalios apkrovos santykis su nominalia galia 25 % (nominali generatoriaus apkrova – 50 kW, minimali generatoriaus apkrova 12,5 kW). Didinant nominalia generatoriaus galia minimali generatoriaus apkrovos galia padidėja proporcingai, t.y. išlieka 25 % skaičiuojant nuo nominalios generatoriaus galios. Efektyvumas didesnės nominalios galios generatorių, lyginat su mažesnės galios generatoriais paprastai būna didesnis tačiau nesiekia 40 %. Darbia priima, kad dyzelinio generatoriaus efektyvumas lygus 25 %, o minimali apkrovos galia lygi ketvirtadaliui nuo nominalios galios.



13 pav. Dyzelinio generatoriaus kuro suvartojimas [10]

Mikrotinklo struktūros įvertinimo parametras nustatyti (pagamintos kWh savikaina, būti nustatyti dyzelinio generatoriaus kuro suvartojimą per metus. 50 kW nominalios galios apibendrinto dyzelinio generatoriaus kuro suvartojimo kreivė pateikta 13 paveikslėlyje. Iš jos matome, kad kuro suvartojimo ir DG galios priklausomybė yra tiesinė. Kreivės statumas priklauso nuo kuro panaudojimo efektyvumo. Atliekant skaičiavimus priimamas vidutinis kuro suvartojimas 1 kWh elektros energijos pagaminti – 0,34 l. Techniniai apibendrinto dyzelinio generatoriaus modelio parametrai pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė Reguliuojamos galios šaltinio techniniai duomenys

Parametras	Matavimo vienetai	Parametro reikšmė
Kuro tipas	-	Dyzelinas
Nominali galia	kW	Automatiškas galios nustatymas
Efektyvumo koeficientas	proc.	25
Minimali apkrova	proc	25
Kuro suvartojimas	l/kWh	0,34
Anglies monoksido išmetimai	g/l	16,34
Kietųjų dalelių išmetimai	g/l	0,098
Azoto oksidų išmetimai	g/l	15,359
Eksplotavimo laikas	H	15000

4.4. Energijos kaupiklio modelis

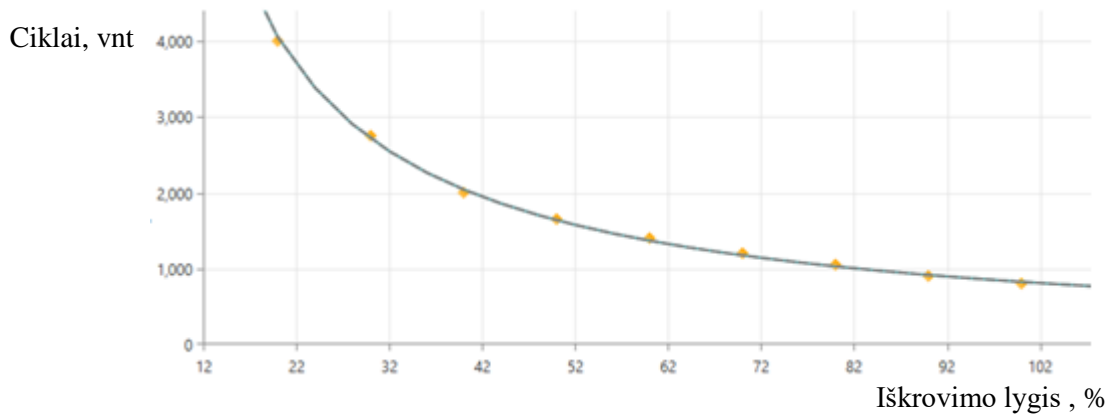
Elektros energijos kaupiklių tipas naudojamas tyrime yra rūgštiniai švino akumulatoriai. Remiantis literatūroje [10] pateikta informacija sudarytas apibendrintas 1 kWh talpos rūgštinio švino akumulatoriaus modelis. Techniniai rūgštinio švino akumulatoriaus duomenys pateikti 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė Energijos kaupiklio techniniai duomenys

Parametras	Matavimo vienetai	Parametro reikšmė
Kaupiklio tipas	-	Rūgštinis švino akumulatorius
Nominali įtampa	V	12
Nominali talpa	kWh	1
Maksimali talpa	Ah	83,4
Prieinamos ir apribotos talpos santykio koeficientas (c)	-	0,403
Greičio konstanta (k)	1/h	0,827
Įsikrovimo efektyvumo koeficientas	-	0,92
Išsikrovimo efektyvumo koeficientas	-	0,92
Maksimali įkrovimo srovė	A	16,7
Maksimali iškrovimo srovė	A	24,3

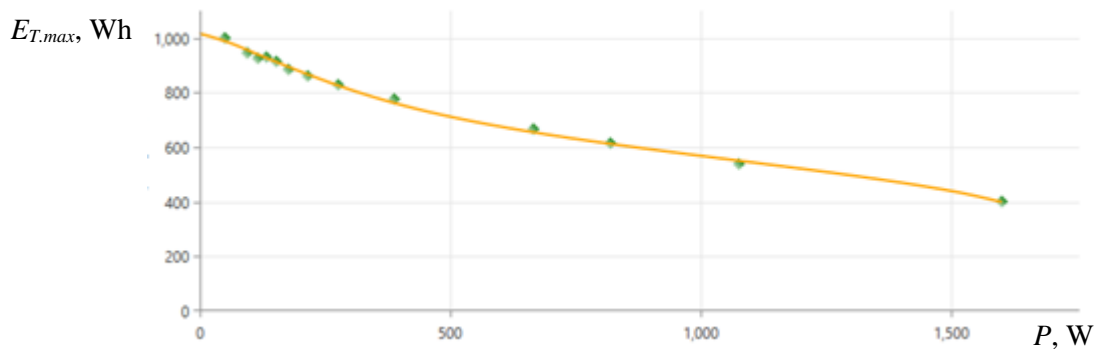
Parametras	Matavimo vienetai	Parametro reikšmė
Minimalus iškrovimo lygis (SOC_{min})	%	40
Maksimalus įkrovimo lygis (SOC_{max})	%	100
Eksploatavimo laikas	metai	10
	kWh	800

Energijos kaupiklio modelio iškrovimo lygio ir ciklų skaičiaus priklausomybė pateikta 14 paveikslėlyje.



14 pav. Iškrovimo lygio ir tarnavimo ciklų skaičiaus priklausomybė [10]

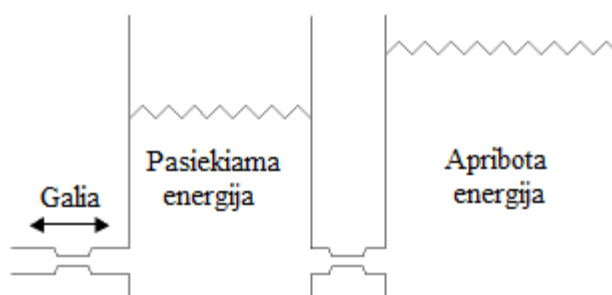
Iškrovimo galios ir maksimalios kaupiklio talpos priklausomybė pateikta 15 paveikslėlyje.



15 pav. Išsikrovimo srovės ir maksimalios kaupiklio talpos priklausomybė [10]

Algoritme kiekvienu laiko momentu (priklausomai nuo energijos disbalanso reikšmės) skaičiuojama energijos kaupiklių įkrovimo ir iškrovimo galia. Įsikrovimo ir išsikrovimo galia yra ribojama trijų sąlygų: talpos (didžiausias galimas energijos kiekis kurį gali priimti arba atiduoti kaupiklis atitinkamu laiko momentu), minimalios (SOC_{min}) ir maksimalios (SOC_{max}) įkrovimo ribos, didžiausios galimos įkrovimo ir iškrovimo srovės.

Didžiausias energijos kiekis kurį energijos kaupiklis gali sukaupti arba atiduoti tam tikru laiko momentu apskaičiuojamas naudojantis kinetiniu baterijų modeliu. Modelis pagrįstas dviejų talpų principu. Pirmą talpą apibūdina prieinama energijos kiekis (energija kuri gali esamu laiko momentu konvertuota į nuolatinės srovės elektros energiją). Sekanti talpa apibūdina energija kuri yra kaupiklyje tačiau yra apribota (energija kuri yra potencinės cheminės energijos pavidalu ir negali iš karto būti paversta į elektros energiją). Šias dvi talpas apibūdinti naudojami trys parametrai. Maksimali (teorinė) energijos kaupiklio talpa. Prieinamos ir apribotos talpos santykio koeficientas, apibūdina abiejų talpų dydžių santykį. Greičio konstanta apibūdina laidumą tarp dviejų talpų ir nusako kaip greitai apribota energija gali būti paversta į pasiekiamą energiją. Kinetinio modelio iliustracija pateikta 16 paveikslėlyje.



16 pav. Kinetinis baterijų modelis

Maksimali įsikrovimo ir išsikrovimo energijos kaupiklio galima galia kiekvienu laiko momentu pagal kinetinio modelio sąlyga apskaičiuojama pagal toliau pateikta metodika. Taigi suminis energijos kiekis esantis energijos kaupiklyje bet kuriuo laiko momentu yra lygus pasiekiamos ir apribotos energijos sumai:

$$E_T = E_{T,P} + E_{T,A}; \quad (4.4)$$

čia E_T – energijos kiekis kaupiklyje laiko momentu t , kWh;

$E_{T,P}$ – pasiekiamas energijos kiekis laiko momentu t , kWh;

$E_{T,A}$ – apribotas energijos kiekis laiku t , kWh.

Prieinamos energijos kiekis laiko momentu t :

$$E_{T,P}(t) = E_{T,P}(t-1) \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(E_T(t-1) \cdot k \cdot c - P) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} + \frac{P \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}; \quad (4.5)$$

čia P – įkrovimo (teigiama) arba iškrovimo (neigiama) galia per laiko žingsnį Δt , kW;

k – greičio konstanta;

c – prieinamos ir apribotos talpos santykio koeficientas;

Apribotos energijos kiekis laiko momentu t :

$$E_{T,A}(t) = E_{T,A}(t-1) \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + E_T(t-1) \cdot (1-c) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t}) + \frac{P \cdot (1-c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}; \quad (4.6)$$

Didžiausia išsikrovimo galia per laiko tarpą Δt :

$$P_{i\check{s}skr.k.m} = \frac{-k \cdot c \cdot E_{T,max} + k \cdot E_{T,P} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + E_T \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}; \quad (4.7)$$

čia $P_{i\check{s}skr}$ – didžiausia galima išsikrovimo galia laiko momentu t , kW;

$E_{T,max}$ – maksimalus energijos kiekis kurį gali sukaupti kaupiklis, kWh;

Didžiausia įsikrovimo galia per laiko tarpą Δt :

$$P_{i\check{s}skr.k.m} = \frac{k \cdot E_{T,P} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + E_T \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}; \quad (4.8)$$

Antras apribojimas apibūdina didžiausia galima iškrovimo ir įkrovimo galią priklausomai nuo įkrovimo lygio. Įkrovimo ir iškrovimo galia pagal lygį (SOC) nepriklauso nuo laiko ir kiekvienu laiko momentu yra vienoda. Maksimalaus ir minimalaus įkrovimo lygio sąlyga išreiškiama sekančiomis formulėm:

$$P_{i\check{s}skr.SOCmin} = SOC_{min} \cdot E_{T,max}; \quad (4.9)$$

čia SOC_{min} – didžiausia galima išsikrovimo riba ;

$$P_{i\check{s}skr.SOCmax} = SOC_{max} \cdot E_{T,max}; \quad (4.10)$$

čia SOC_{max} – didžiausia galima įsikrovimo riba.

Trečias apribojimas suformuluojamas iš maksimalios leidžiamos įkrovimo ir iškrovimo srovės.

Didžiausia įkrovimo ir iškrovimo galia apibrėžiama sekančiomis formulėm:

$$P_{i\check{s}skr.Imax} = \frac{n_B \cdot I_{i\check{s}skr.max} \cdot V_B}{1000}; \quad (4.11)$$

čia $P_{i\check{s}skr.Imax}$ – didžiausia galima išsikrovimo galia skaičiuojant pagal maksimalia išsikrovimo srovę, kW;

n_B – baterijų sudarančių energijos kaupiklį skaičius;

V_B – nominali vienos baterijos įtampa, V;

$I_{išskr.max}$ – maksimali vienos baterijos išsikrovimo srovė, A;

$$P_{išskr.Imax} = \frac{n_B \cdot I_{išskr.max} \cdot V_B}{1000}; \quad (4.12)$$

čia $P_{išskr.Imax}$ – didžiausia galima įsikrovimo galia skaičiuojant pagal maksimalia įsikrovimo srovę, kW;

$I_{išskr.max}$ – maksimali vienos baterijos įsikrovimo srovė, A.

Apibendrinus visas tris sąlygas didžiausia išsikrovimo galia galime apibrėžti taip:

$$P_{išskr.max} = \eta_{išskr} \cdot \text{MIN}(P_{išskr.k.m}, P_{išskr.SOCmin}, P_{išskr.Imax}); \quad (4.13)$$

čia $\eta_{išskr}$ – energijos kaupiklio išsikrovimo efektyvumo koeficientas.

Analogiškai išreiškiama ir įsikrovimo didžiausia galia:

$$P_{išskr.max} = \frac{\text{MIN}(P_{išskr.k.m}, P_{išskr.SOCmin}, P_{išskr.Imax})}{\eta_{išskr}}; \quad (4.14)$$

čia $\eta_{išskr}$ – energijos kaupiklio įsikrovimo efektyvumo koeficientas.

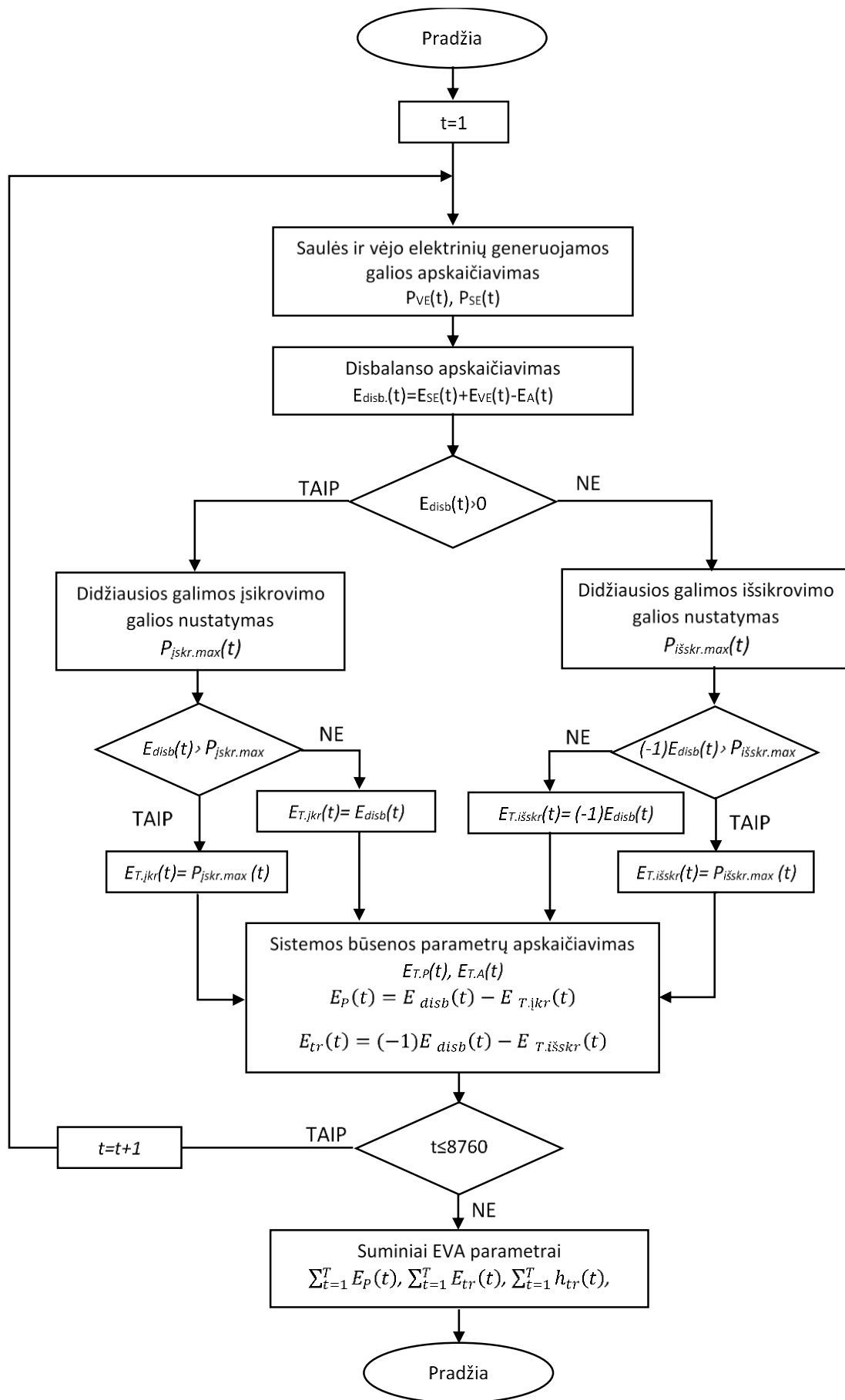
$$\text{MIN}(P_{išskr.k.m}, P_{išskr.SOCmin}, P_{išskr.Imax}); \quad (4.15)$$

5. OPTIMALIOS STRUKTŪROS TYRIMO ALGORITMAS

5.1. Energijos valdymo algoritmo sudarymas

Energijos valdymo algoritmo funkcija yra skirta nustatyti tam tikros struktūros mikrotinklo energinius parametrus. Energijos valdymo algoritmą sudaro laiko ciklas, kurio žingsnis yra 1h, o maksimali vertė, kurią pasiekus ciklas yra stabdomas yra lygi 8760 h. EVA blokinė schema pateikta 17 paveikslėlyje. Kiekvieno elemento, sudarančio energijos valdymo algoritmą, aprašymas pateiktas toliau.

1. *SE ir VE generuojamos galios apskaičiavimas.* Apskaičiuojama saulės elektrinės generuojama galia laiko momentu t pagal 4.2 formulę, taip pat, pagal 4.1 skyrelyje pateiktą metodiką, apskaičiuojama vėjo elektrinės generuojama galia laiko momentu t .
2. *Disbalanso apskaičiavimas.* Pagal apkrovos duomenis ir 1 punkte apskaičiuotas SE ir VE generuojamas galias, apskaičiuojamas poreikio ir generacijos disbalansas laiko momentu t .
3. *Baterijų įkrovimo arba iškrovimo sąlyga.* Jeigu 2 punkte paskaičiuota disbalanso reikšmė laiko momentu t yra teigiama – generacija viršiją poreikį ir galima įkrauti baterijas (vykdomi veiksmai aprašyti 4 punkte), jeigu neigiama – tikrinama kiek energijos galima pasiimti iš baterijų (vykdomi veiksmai aprašyti 5 punkte).
4. *Baterijų įkrovimas.* Esant teigiamai disbalanso reikšmei, apskaičiuojama didžiausia galima baterijų įkrovimo galia, kuri lyginama su disbalanso reikšme. Jeigu disbalansas mažesnis nei apskaičiuota baterijų galia, baterijos įkraunamos galia, lygia disbalanso reikšmei, jeigu disbalansas didesnis už apskaičiuotą didžiausią įkrovimo galią, baterijos įkraunamos apskaičiuotu didžiausiu galimu galingumu.
5. *Baterijų iškrovimas.* Esant neigiamai disbalanso reikšmei, apskaičiuojama didžiausia galima baterijų iškrovimo galia, kuri lyginama su disbalanso reikšme. Jeigu disbalansas mažesnis nei apskaičiuota galia, baterijos iškraunamos galia, lygia disbalanso reikšmei, jeigu disbalansas didesnis už apskaičiuotą didžiausią iškrovimo galią, baterijos iškraunamos apskaičiuotu didžiausiu galimu galingumu.
6. *Sistemos būsenos parametrų apskaičiavimas.* Įkrovus arba iškrovus baterijas apskaičiuojami tokie parametrai: baterijų įkrovimo lygis laiko momentu t (ši reikšmė naudojama skaičiuojant parametrus sekančiame ciklo žingsnyje), trūkstamas energijos kiekis (energijos kiekis, kurio trūksta energijos poreikiui patenkinti), perteklinė energija (energija, kurios, esamu laiko momentu, į baterijas padėti negalima, dėl talpos ir įkrovimo galios apribojimų). Nustačius šiuos parametrus, ciklas sukamas iš naujo padidinus laiko žingsnį 1 (laiko žingsnis algoritme atitinka 1h). Jeigu pasiekta maksimali žingsnių reikšmė (8760), ciklas stabdomas ir apskaičiuojami suminiai EVA parametrai (žr. 7 punktą).



17 pav. Energijos valdymo algoritmas

7. *Suminiai EVA parametrai.* Sustabdžius laiko ciklą apskaičiuojami šie parametrai: suminė perteklinė energija, suminė trūkstama energija, valandų skaičius, kai mikrotinklas negali užtikrinti patikimo energijos tiekimo (tai suma valandų per metus, kai esama mikrotinklo struktūra neaprupina esamo poreikio).

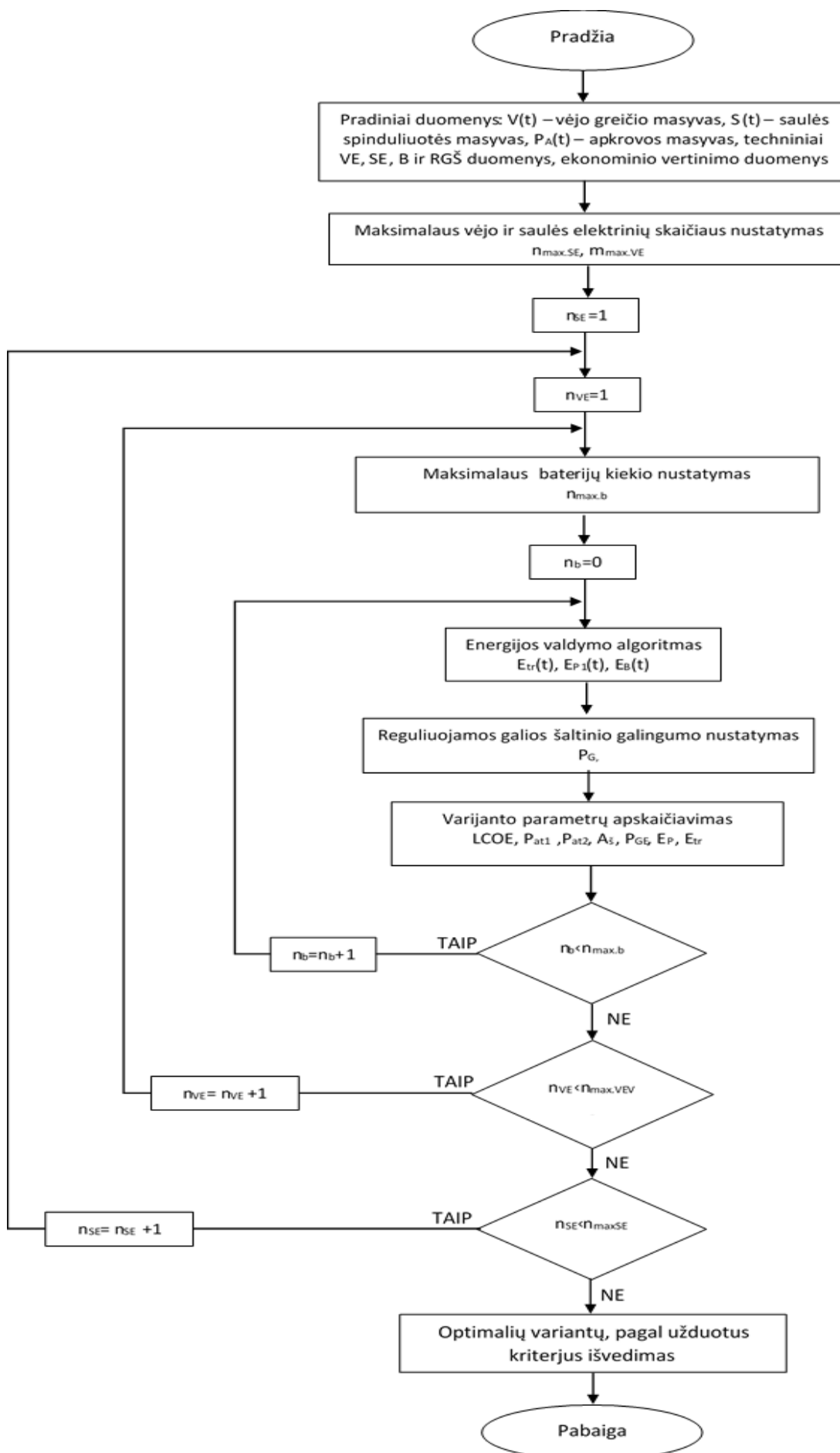
5.2. Optimalios struktūros nustatymo algoritmo sudarymas

Optimalios struktūros nustatymo algoritmą sudaro trys ciklai: saulės elektrinės, vėjo elektrinės ir energijos kaupiklio. Atitinkamo ciklo iteracijų skaičius priklauso nuo užduoto saulės elektrinių, vėjo elektrinių ir baterijų skaičiaus. Algoritme ciklo žingsnis atitinka tam tikro šaltinio galios ar talpos padidinimą. Kiekvienos iteracijos pabaigoje apskaičiuojami mikrotinklo struktūrą įvertinantys parametrai. Algoritmo blokinė schema pateikta 18 paveiksle. Veiksmų atliekamų algoritme paaiškinimai pateikti toliau.

1. *Pradinių duomenų pateikimas algoritmui.* Algoritmui pateikiami pradiniai duomenys: $V(t)$ – vėjo greičio masyvas, E_s – saulės spinduliuotės masyvas, P_A – apkrovos masyvas, techniniai ir ekonominiai VE, SE, baterijų ir RGŠ parametrai.
2. *Maksimalaus SE ir VE skaičiaus nustatymas.* Pagal apkrovos duomenis užduodamas maksimalus vėjo elektrinių ir saulės elektrinių skaičius. Taip pat nustatoma saulės ir vėjo elektrinių didinimo žingsnis. Vėjo ir saulės elektrinės (po kiekvieno ciklo) bus didinamos nustatytu žingsniu, kol pasieks maksimalias reikšmes.
3. *Užduodamas SE skaičius.* Algoritmas pradėdamas pirmu žingsniu, kuris atitinka tam tikrą saulės elektrinės galią, pasibaigus SE ciklui, saulės elektrinės galia padidinama vienu žingsniu (12 punktas).
4. *Užduodamas VE skaičius.* Algoritmas pradėdamas pirmu žingsniu, kuris atitinka tam tikrą vėjo elektrinės galią, pasibaigus VE ciklui, vėjo elektrinės galia padidinama vienu žingsniu (11 punktas).
5. *Maksimalaus baterijų kiekio nustatymas.* Pagal apkrovos, saulės elektrinės ir vėjo elektrinės disbalansą, nustatomas maksimalus baterijų vienetų kiekis. Baterijų skaičius padalinamas iš numatyto žingsnių skaičiaus taip nustatant žingsnio vertę.
6. *Užduodamas baterijų skaičius.* Algoritmas pradėdamas nuo nulio, tai yra apskaičiuojamas struktūros variantas, kuriame baterijų nėra. Pasibaigus baterijų ciklui baterijų talpa padidinama vienu žingsniu.
7. *Energijos valdymo algoritmas.* Energijos valdymo algoritmui pateikiamas tam tikras SE, VE ir baterijų skaičius. Šios kombinacijos energiniai parametrai analizuojami kas valandą t.y. sukamas laiko ciklas kurio žingsnis 1 h, o maksimali reikšmė, kurią pasiekus ciklas stabdomas yra 8760 h. Išsamus energijos valdymo algoritmo aprašymas pateiktas 5.1 skyrelyje.

8. *RGŠ galios nustatymas.* Reguluojamos galios šaltinio galia nustatoma pagal maksimalią trūkstamos energijos reikšmę (trūkstama energija EVA skaičiuojama kas valandą visus metus), gautą iš energijos valdymo algoritmo. Tokio galingumo RGŠ turi užtikrinti metinės trūkstamos energijos sugeneravimą ir tuo pačiu padidinti mikrotinklo patikimumą iki 1. Pagal metinį trūkstamos energijos kiekį ir dyzelinio generatoriaus modelio parametrus (žr. 4.3 skyrelį), apskaičiuojamas kuro suvartojimas ir generatoriaus darbo valandų skaičius (šie duomenys naudojami skaičiuojant mikrotinklo struktūrą įvertinančius parametrus).
9. *Struktūros varianto parametų apskaičiavimas.* Apskaičiuojami šie parametrai: LCOE su ir be generatoriaus, energijos tiekimo patikimumas, kai mikrotinklo struktūrą sudaro tik atsinaujinantys šaltiniai, atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminta procentinė elektros energijos dalis, lyginant su metiniu energijos poreikiu. Taip pat apskaičiuojami papildomi mikrotinklą apibūdinantys parametrai: SE pagaminta energija, VE pagaminta energija, energijos kiekis, paimtas iš baterijų, valandų skaičius, kai mikrotinklas nepajėgus patenkinti esamo poreikio, sugeneruotos perteklinės energijos.
10. *Didinamas baterijų skaičius.* Padidinamas baterijų kiekis vienu žingsniu. Algoritmo atliekami veiksmai kartojami nuo 7 punkto. Pasiekus maksimalų baterijų kiekį pereinama prie 11 punkto.
11. *Didinamas VE skaičius.* Padidinamas VE kiekis vienu žingsniu. Algoritmo atliekami veiksmai kartojami nuo 5 punkto. Pasiekus maksimalų VE kiekį pereinama prie 12 punkto.
12. *Didinamas SE skaičius.* Padidinamas SE kiekis vienu žingsniu. Algoritmo atliekami veiksmai kartojami nuo 4 punkto. Pasiekus maksimalų SE kiekį pabaigiamos visų ciklų iteracijos. Pereinama prie 13 punkto.
13. *Optimalių variantų pagal užduotus kriterijus išvedimas.* Algoritmo rezultatas, tai mikrotinklo struktūros variantų matrica, kurios eilutės atitinka struktūros variantą, o stulpeliai – apibūdinančius parametrus. Iš šios matricos atrenkami tokie struktūros variantai, kurie atitinka užduotus kriterijus: mažiausias LCOE, didžiausias patikimumas, didžiausias kiekis atsinaujinančių šaltinių. Analizuojant struktūros variantus kriterijai keičiami, pvz didžiausias patikimumas su didžiausiu atsinaujinančių šaltinių kiekiu ir t.t.

Algoritmas suprogramuotas naudojantis MATLAB programa. Programos kodas pateiktas 1 priede.



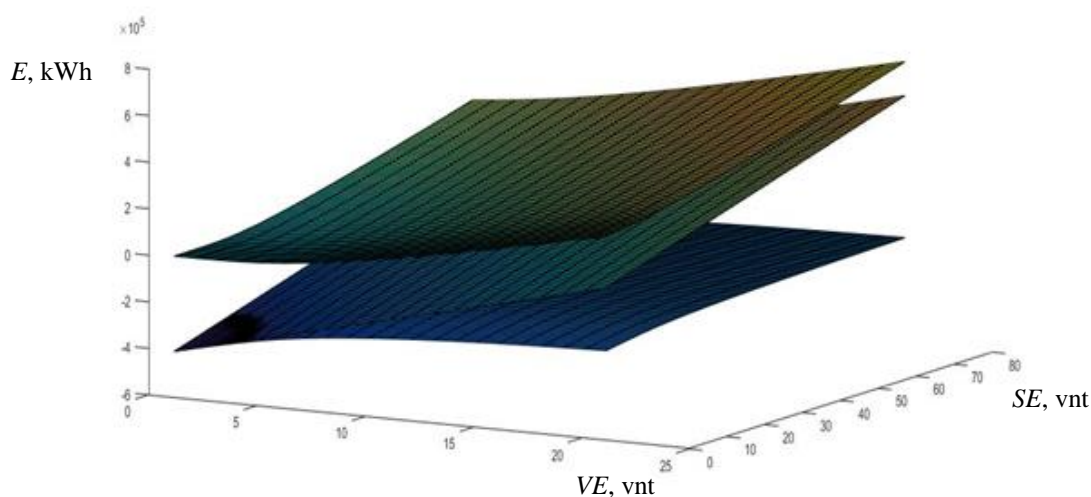
18 pav. Optimalios struktūros nustatymo algoritmas

6. TYRIMO REZULTATAI

6.1. Optimalaus AEŠ generacijos suderinamumo su apkrovos grafiku nustatymas

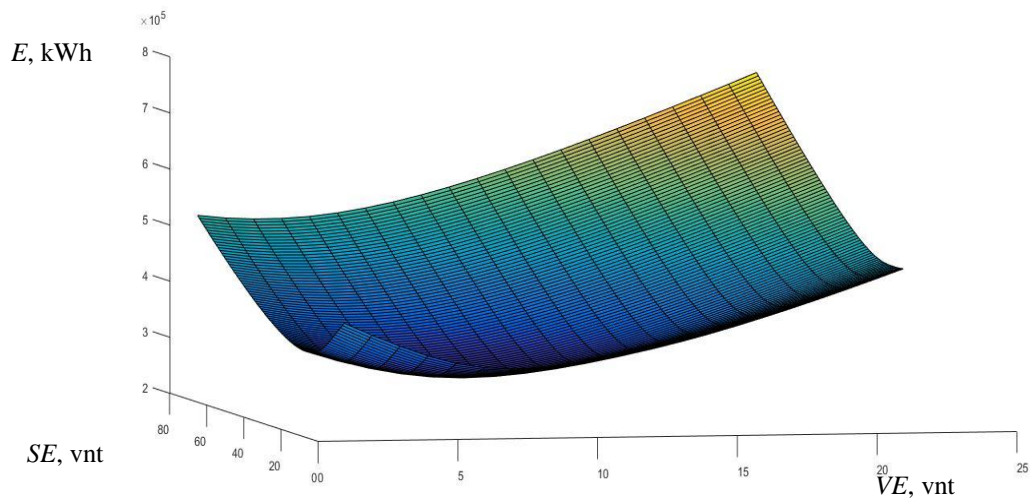
Esminis AEŠ trūkumas – generacijos ir vartojimo nesutapimas. Šis nesutapimas gali būti sumažintas derinant vėjo ir saulės elektrinių galių santykį taip, kad būtų pasiektas kuo didesnis elektros energijos poreikio aprūpinimas iš atsinaujinančios energijos šaltinių, nenaudojant papildomų balansavimo priemonių. Darbe siekiama nustatyti VE ir SE galių santykį, kuris užtikrintų efektyviausią instaliuotos galios panaudojimą. Optimalus VE ir SE derinys turi užtikrinti didžiausią galimą priderinamumą prie apkrovos grafiko, t. y. mažiausią trūkstamos ir perteklinės energijos kiekį.

Metinis MT disbalansas – tai perteklinės ir trūkstamos energijos suma. Perteklinė energija sugeneruojama tuo metu, kai vėjo ir saulės elektrinių generuojama galia viršija energijos poreikį, todėl ši energija negali būti patiekta mikrotinklo vartotojams. Trūkstama energija – tai energijos kiekis, kurio trūksta MT vartotojų elektros energijos poreikio patenkinimui, šis energijos kiekis gali būti sugeneruotas RGŠ arba paimtas iš elektros energetikos sistemos.



19 pav. Mikrotinklo disbalanso priklausomybės eibė nuo VE ir SE skaičiaus

19 paveiksle pateikta MT su vėjo ir saulės elektrinėmis disbalanso, trūkstamos energijos ir perteklinės energijos priklausomybės nuo saulės ir vėjo elektrinių skaičiaus, kai energija tiekama buitiniams vartotojams, o metinis MT energijos poreikis 438 MWh. Paveikslėlyje matome, kad metinio disbalanso reikšmės, esant skirtingoms SE ir VE kombinacijoms, skiriasi ir tolygiai didėja, didinant SE ir VE elektrinių skaičių, tačiau perteklinė ir trūkstama energija kinta netolygiai, tai galime pastebėti iš šių grafikų išlinkimo. Optimaliai subalansuotą vėjo ir saulės elektrinių skaičių atitiks taškas, kur yra trūkstamos ir perteklinės energijos minimumas. 20 paveikslėlyje pateiktas perteklinės ir trūkstamos energijos sumos grafikas, kuris vaizduoja kiekvieno analizuojamo struktūros varianto suminę energiją, kurią reikia balansuoti papildomomis priemonėmis: elektros tinklu, energijos kaupikliais, reguliuojamos galios šaltiniu. Šio grafiko minimumai atitiks optimaliai suderintus struktūros variantus.



20 pav. Balansuojamos energijos priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus

Siekiant apibendrinanti įvertinti optimalų suderinamumą yra naudojami du faktoriai. Pirmasis skirtas įvertinti sugeneruotos perteklinės energijos kiekį, antrasis – trūkstamos energijos kiekį. Pirmasis koeficientas apibūdina AEŠ pagamintos energijos dalį, kuri, dėl generavimo ir vartojimo sutapimo laike, buvo patiekta MT apkrovai. Jeigu k_1 lygus 1, reiškia, kad visa pagaminta energija suvartojama, o sugeneruotos perteklinės energijos kiekis lygus 0. Jeigu $k_1=0$, reiškia, kad generacija visiškai nesutampa su poreikiu ir visą AEŠ pagamintą energiją sudaro perteklinė energija.

Pirmasis koeficientas apskaičiuojamas pagal toliau pateiktą formulę:

$$k_1 = \frac{E_{Pagaminta} - E_P}{E_{Pagaminta}}; \quad (6.1)$$

čia k_1 – AEŠ pagamintos energijos dalis per metus, kuri sutampa su elektros energijos poreikiu;

E_P – perteklinė energija (AEŠ pagamintas energijos kiekis per metus, kuris nesutampa su elektros energijos poreikiu, kWh;

$E_{Pagaminta}$ – suminis AEŠ pagamintas energijos kiekis (šis kiekis lygus perteklinės ir suvartotos energijų sumai per metus), kWh.

Antrasis koeficientas apskaičiuojamas taip:

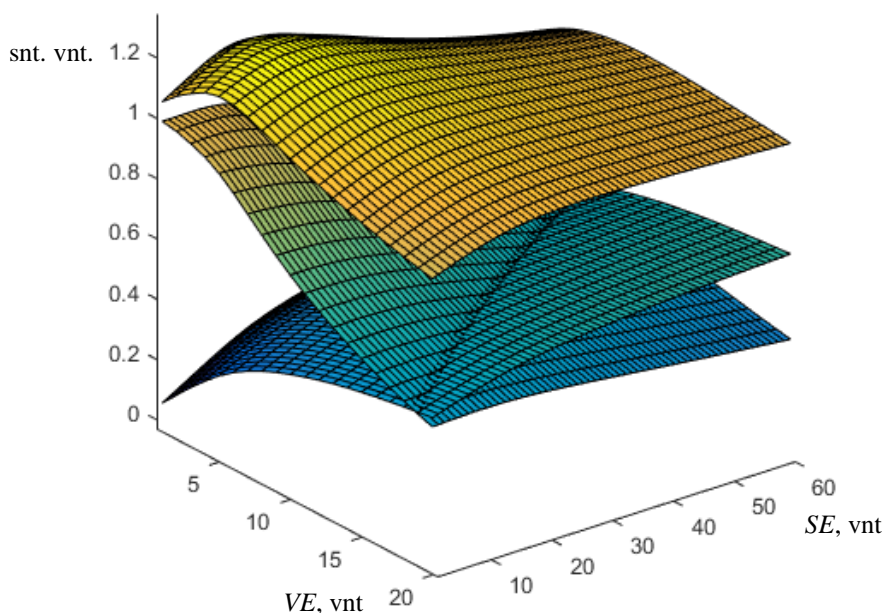
$$k_2 = \frac{E_{Apkrova} - E_{Pateikta}}{E_{Apkrova}}; \quad (6.2)$$

čia k_2 – energijos poreikio dalis per metus, kuri yra gaunama iš AEŠ;

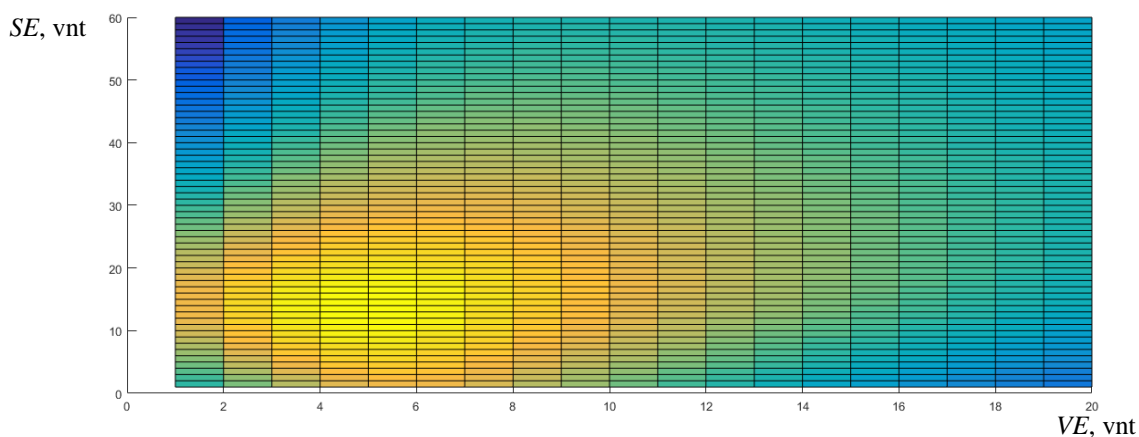
$E_{Apkrova}$ – elektros energijos poreikis, kWh;

$E_{Pateikta}$ – elektros energijos kiekis per metus, kuris patiekiamas vartotojams, kWh.

Paveikslėlyje 21 pateikta koeficientų k_1 ir k_2 ir jų sumos grafikai, priklausomai nuo SE ir VE skaičiaus. K2 grafike pavaizduota elektros energijos poreikio dalis, pagaminta iš atsinaujinančių šaltinių. Iš šio grafiko matome, kad elektros energijos poreikio dalis, pagaminta iš AEŠ (nevertinant perteklinės energijos), didėja netolygiai, didinant SE ir VE skaičių. Nuo tam tikro elektrinių skaičiaus, trūkstamos energijos mažėjimas sulėtėja. K1 grafike pavaizduota atitinkamų struktūros variantų pagamintos energijos dalis, kuri suvartojama nenaudojant balansavimo priemonių. Iš grafiko matyti kad k_1 koeficientas mažėja didinant generaciją, mažėjimas yra netolygus. Optimalių struktūrų variantai nustatomi sudedant abiejų koeficientų reikšmes. Gautos reikšmės atvaizduojamos viršutiniame grafike. Iš grafiko matome susiformavusį maksimumą. Šis maksimumas atitinka SE ir VE kombinacijas, kurių generavimas optimaliai prisiderina prie apkrovos grafiko. Optimalus suderinamumas atvaizduotas iš viršaus pav. 22 (geltona spalva atvaizduoja optimalių variantų sritį).

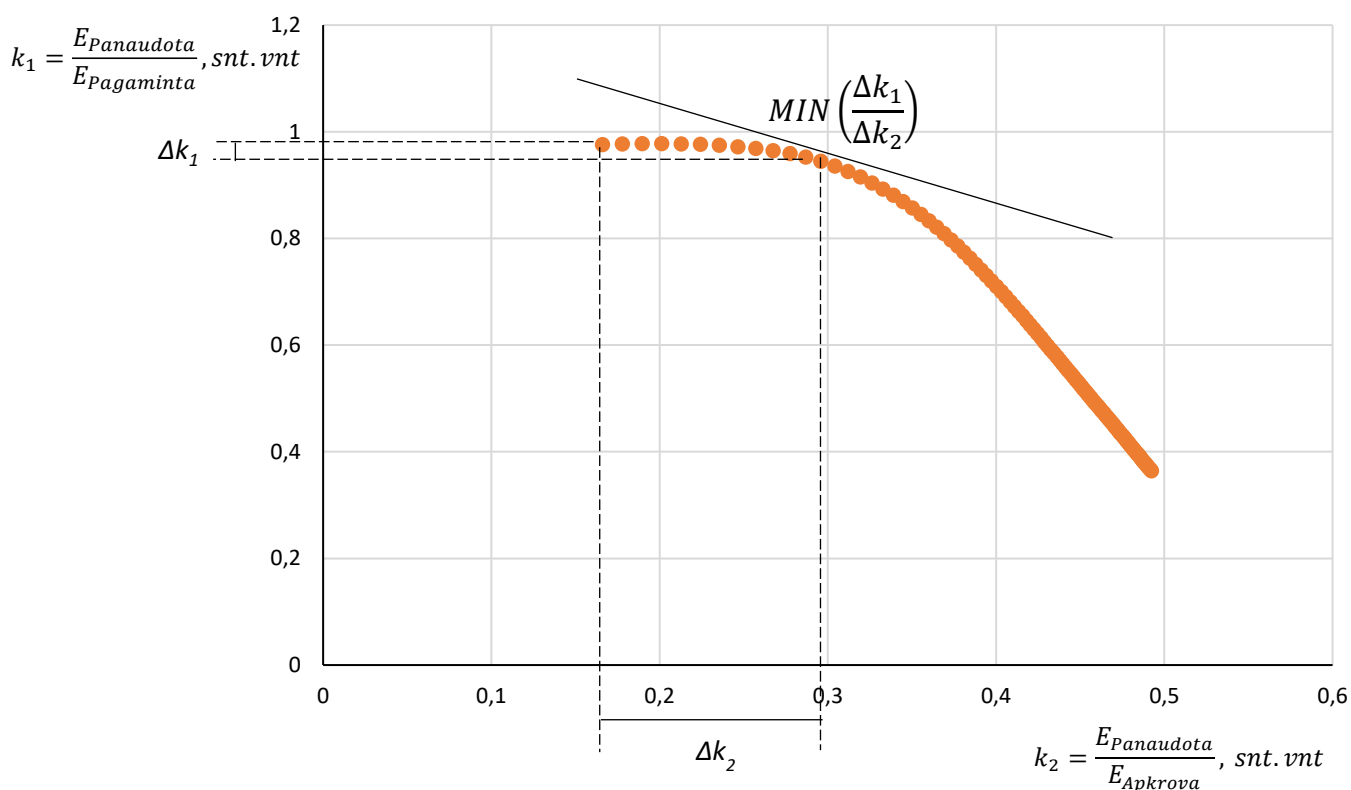


21 pav. Optimalus prisiderinimo prie apkrovos grafiko priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus (3D)



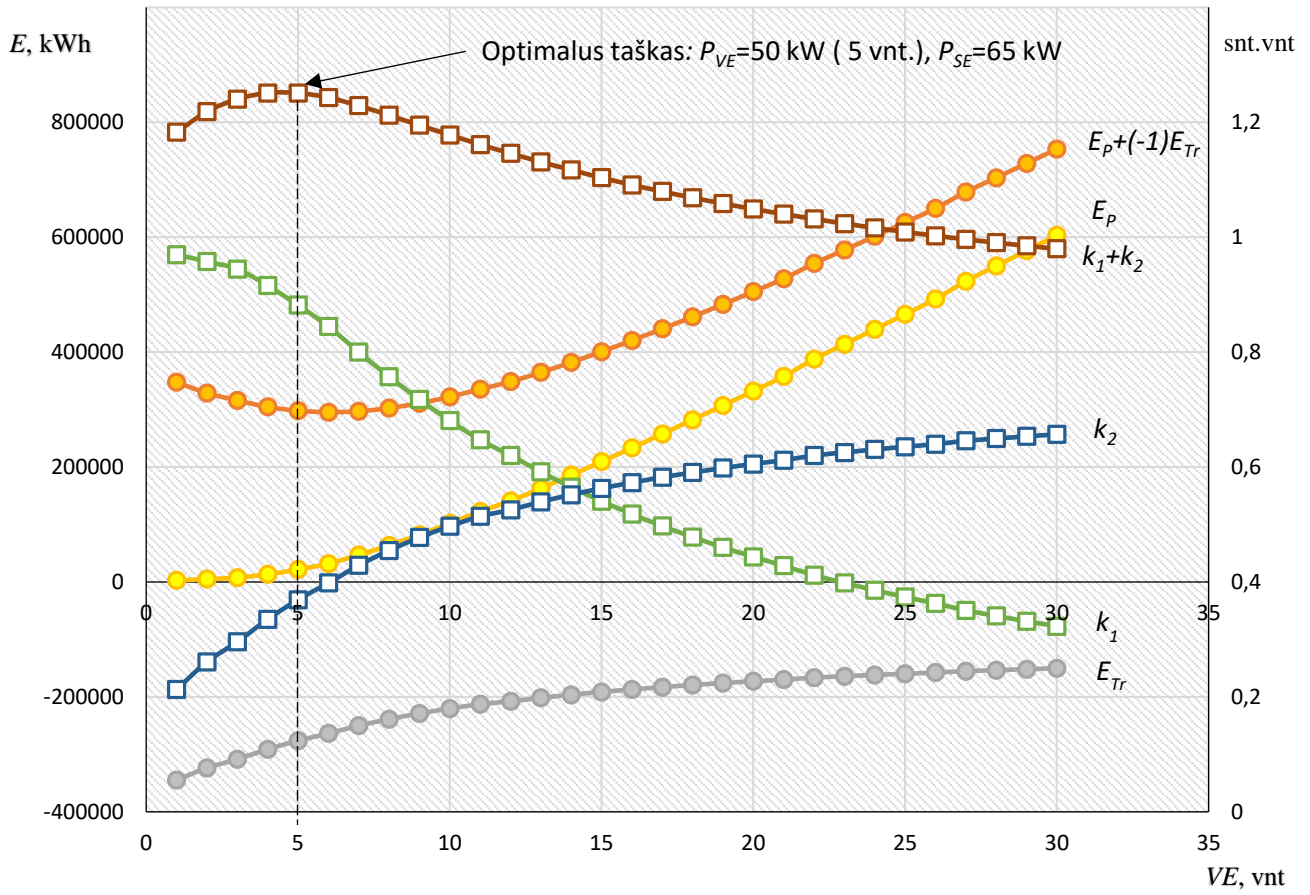
22 pav. Optimalus prisiderinimo prie apkrovos grafiko priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus (2D)

23 paveikslėlyje pavaizduota pavyzdinis grafikas, kuris iliustruoja optimalų SE galios parinkimą, esant 3 instaliuotom vėjo elektrinėms. Grafike matyti koeficientų k_1 ir k_2 tarpusavio priklausomybė, kai MT struktūrą sudaro 3 vėjo elektrinės ir kintantis nuo 1 iki maksimumo saulės elektrinių skaičius (kiekvienas taškas atitinka vienu žingsniu padidintą instaliuotą saulės elektrinės galią). Grafiko taškas, kai k_1 ir k_2 santykis mažiausias, atitinka SE galią, su kuria pasiekiamas optimalus rezultatas – efektyviausias instaliuotos galios išnaudojimas, siekiant aprūpinti kuo didesnę elektros energijos poreikio dalį. Didesnis SE galios instaliavimas sistemoje būtų neefektyvus dėl minimalaus energijos poreikio sumažinimo, pagaminant vis didesnę perteklinės energijos kiekį. Analogiškos formos charakteristikos gaunamos ir su skirtingu kiekiu VE. Didinant VE skaičių grafikas slinktųsi y ašimi žemyn, o x ašimi į dešinę, tai įtakoja padidėjusi instaliuota vėjo elektrinių galia.



23 pav. Vėjo ir saulės elektrinių suderinamumo grafikas

24 paveiksle matome grafiką, kuriame atvaizduotas optimalių struktūros variantų, priklausomai nuo instaliuoto VE skaičiaus, parametrai. Iš šio grafiko matome, kad optimalus suderinamumas pasiekiamas esant 5 VE, tolimesnis VE elektrinių skaičius mažina instaliuotos galios išnaudojimo efektyvumą (pagaminama vis daugiau perteklinės energijos). Optimalus prisiderinimas prie apkrovos grafiko nustatytas su 50 kW instaliuota vėjo elektrinių galia ir 65 kW instaliuota saulės elektrinių galia. Toks struktūros variantas užtikrina didžiausią galimą energijos poreikio aprūpinimą iš atsinaujinančių šaltinių sunaudojant mažiausiai resursų ir tuo pačiu pagaminant minimalų perteklinės energijos kiekį. Instaliuota AEŠ galia pasiskirsto tokiomis dalimis: SE – 57 % , VE – 43 %. Naudingai panaudota AEŠ pagaminta energija siekia 88 %. Tokia instaliuota galia pagamintų 37 % mikrotinklui reikalingo elektros



24 pav. Optimalus AEŠ prisiderinimas prie MT apkrovos grafiko

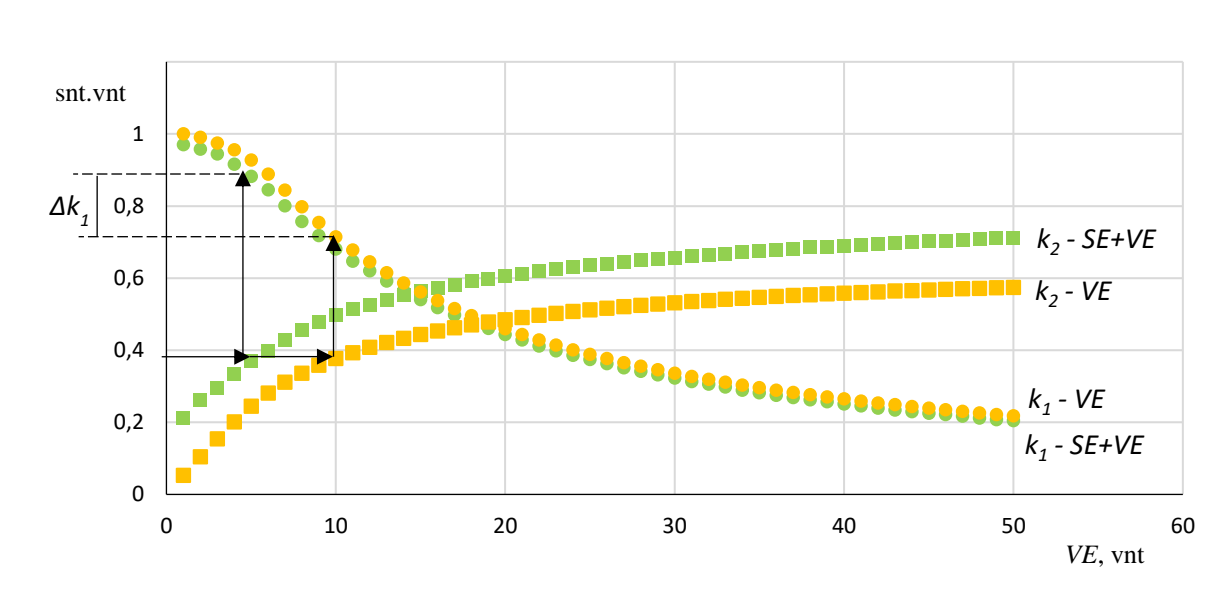
6.1 lentelėje pateikti struktūros variantai su optimaliu prisiderinimu prie apkrovos grafiko, priklausomai nuo apkrovos charakteristikos ir energijos poreikio. Iš lentelėje patektų duomenų matome, kad nepriklausomai nuo energijos poreikio dydžio, optimalus suderinamumas buitinei apkrovai pasiekiamas esant apie 60 % SE ir 40 % VE galių santykiui. Pramoninei apkrovai šis santykis: SE - 53 % ,VE - 47% . Pramoninės apkrovos ypatybė – sąlyginai stabilus energijos poreikis paros atžvilgiu, priešingai nei buitinės apkrovos. Šis skirtumas nulemia mažesnę procentą SE instaliuotos galios pramoniniame mikrotinkle.

6.1 lentelė. Optimalaus VE ir SE suderinamumo duomenys

Energijos poreikis, MWh	Buitinės apkrovos charakteristika				Pramoninės apkrovos charakteristika			
	Panaudota SE ir VE pagaminta energija, %	Poreikio aprūpinimas, %	SE instaliuota galia, %	VE instaliuota galia, %	Panaudota SE ir VE pagaminta energija, %	Poreikio aprūpinimas, %	SE instaliuota galia, %	VE instaliuota galia, %
438	88	37	57	43	93	31	55	45
873	90	35	59	41	92	33	53	47
1311	90	35	60	40	91	34	52	48

	Buitinės apkrovos charakteristika				Pramoninės apkrovos charakteristika			
Energijos poreikis, MWh	Panaudota SE ir VE pagaminta energija, %	Poreikio aprūpinimas, %	SE instaliuota galia, %	VE instaliuota galia, %	Panaudota SE ir VE pagaminta energija, %	Poreikio aprūpinimas, %	SE instaliuota galia, %	VE instaliuota galia, %
1749	90	35	60	40	92	33	53	47

Paveiksle 4 pavaizduotas saulės ir vėjo elektrinių derinimo teigiamas efektas. Geltona spalva pavaizduoti grafikai atvaizduoja sistemos, kurią sudaro tik vėjo elektrinės, žalia – vėjo ir saulės. Kaip matome iš grafiko, derinat SE ir VE, norint aprūpinti tokį patį procentą apkrovos (37 %), galima pasiekti didesnį prisitaikymą prie apkrovos, o tuo pačiu sugeneruoti kur kas mažesnę perteklinės energijos kiekį.



25 pav. Mikrotinklo su vienu ir dvejais AEŠ palyginimas

6.2. Optimalios energijos kaupiklio talpos nustatymas

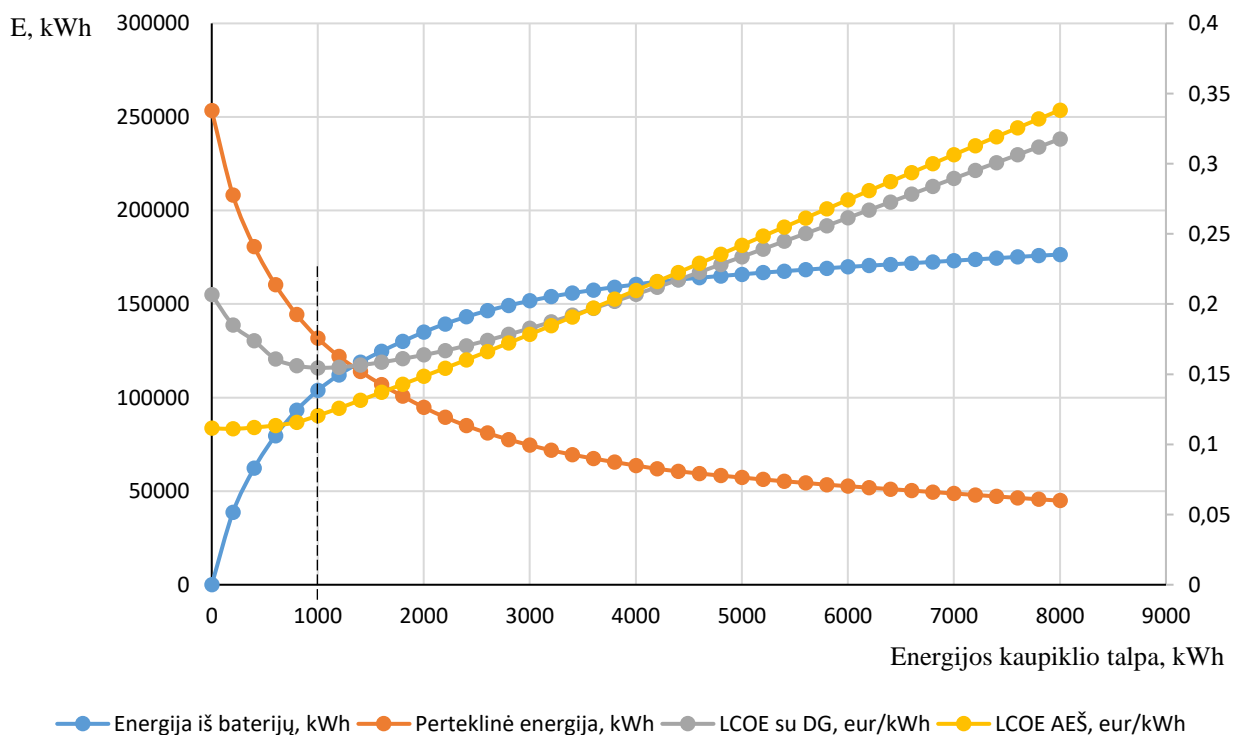
Instaliuojant AEŠ į mikrotinklą svarbu nustatyti tinkamiausią energijos kaupiklio talpą, kuri užtikrintų didžiausią perteklinės energijos subalansavimą su minimalia galima talpa.

26 pav. pateikta instaliuotos energijos kaupiklio talpos mikrotinkle priklausomybė nuo LCOE tik su AEŠ, LCOE su AEŠ ir DG (mikrotinklo prieinamumas 100 %), AEŠ sugeneruotos perteklinės energijos ir iš energijos kaupiklio išėjusios energijos per metus laiko, esant instaliuotai 190 kW vėjo elektrinių galiai ir 80 kW saulės elektrinės galiai. Iš grafiko matoma energijos išėjusios iš baterijų per metus priklausomybė nuo kaupiklio talpos. Didinant kaupiklio talpą iki tam tikros ribos, pasiekiamas taškas, kai didesnis talpos didinimas duoda minimumų rezultatą. Sumažėjusios perteklinės energijos grafikas atvirkščiai proporcingas iš EK išėjusiai energijai, t. y. didinant kaupiklio talpą, perteklinės energijos sumažinimą vis mažiau.

Taškas, iki kurio vis dar tikslinga didinti kaupiklio talpą, priklauso nuo energijos kaupiklių kainos ir šaltinių pagaminamos energijos kainos. Kaupiklio išnaudojimo efektyvumas priklauso nuo jo

tarnavimo trukmės, kuri apibrėžta praėjusiu energijos kiekiu arba tarnavimo laiku. Rūgštinis švino akumuliatorius (darbe naudojamas energijos kaupiklio tipas), kurio talpa 1 kWh, tampa nebetinkamu naudoti, kai pro jį praeina 1200 kWh (esant minimaliai iškrovimo ribai 40%) jei toks energijos kiekis pro akumuliatorių per tarnavimo laiką (10 metų) nepraeina, galime laikyti, kad kaupiklis neišnaudojamas 100 %. Kuo mažiau išnaudojamas EK, tuo labiau brangsta pro jį praėjusi energija. Jeigu perteklinė energija nepanaudojama naudingai (neverta skaičiuojant AEŠ LCOE), energijos kaupiklio sugrąžintą perteklinę energiją galime laikyti sugeneruota kaupiklio. Taigi, iš kaupiklio išėjusios energijos savikaina yra stabili, nepriklausomai nuo jų kiekio, jei pro kaupiklį praeina energijos kiekis, nemažesnis už 1200 kWh, per tarnavimo laiką. Jeigu energijos kiekis pro EK praeina mažesnis, brangsta sugrąžintos perteklinės energijos savikaina.

26 paveiksle matome, kad bendra mikrotinkle pagamintos energijos savikaina (pilkas grafikas) mažėja iki taško, kol kaupikliai išnaudojami 100 %, toliau didinant EK talpą, kaina didėja, dėl krentančio išnaudojimo efektyvumo. Optimalia kaupiklio talpa galime laikyti tą, su kuria sistemos energijos savikaina mažiausia. Šis optimalus taškas kiekvienam struktūros variantui skirtingas ir priklauso nuo AEŠ generuojamos energijos savikainos (priklausomai nuo perteklinės energijos kiekio), DG generuojamos energijos savikainos, pro baterijas praėjusios energijos savikainos. Jeigu sistemoje nėra DG ir AEŠ, sugeneruota energija yra pigesnė už EK savikainą, papildoma kaupiklio talpa, bet kokiu atveju brangina sistemą ir kaupiklių įrengimas gali būti tikslingas tik siekiant padidinti sistemos patikimumą ir „švarios“ energijos kiekį bendrame mikrotinklo elektros energijos poreikio balanse.

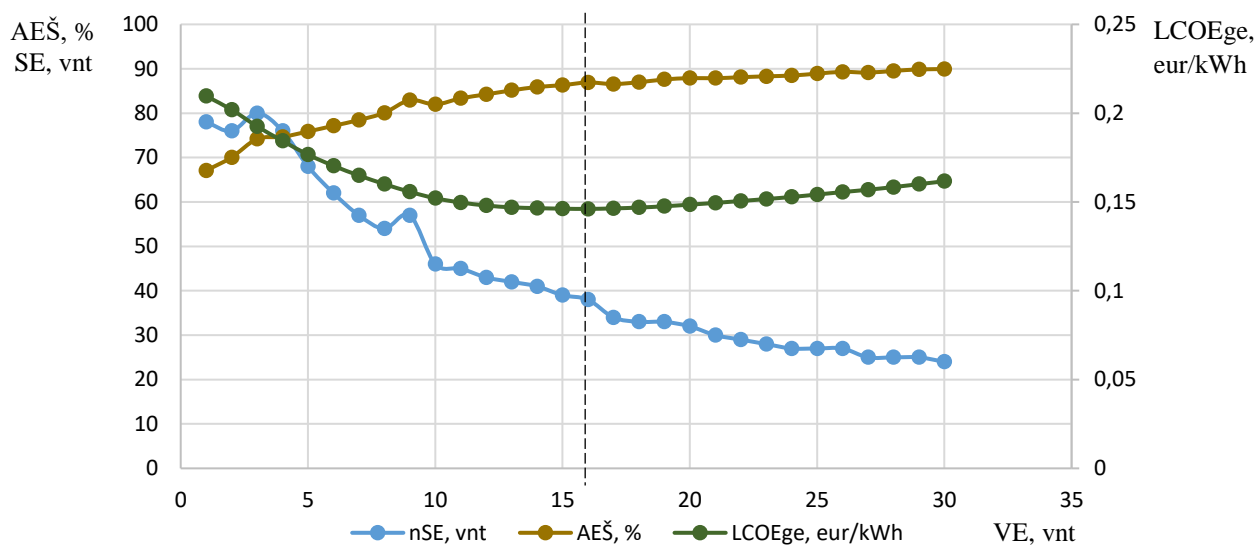


26 pav. LCOE priklausomybė nuo energijos kaupiklio talpos

6.3. Mikrotinklo optimali struktūra

Siekiant mikrotinklo energijos tiekimo prieinamumą padidinti iki 100 % ir subalansuoti nestabilią AEŠ generuojamą galią, būtinas reguliuojamos galios šaltinis. Tyrimui pasirinktas geras dinamines savybes turintis šaltinis – dyzelinis generatorius. Nustatant optimalią MT struktūrą, siekiama surasti struktūros variantą, kuris užtikrintų nepertraukiamą energijos tiekimą visus metus už mažiausią kainą.

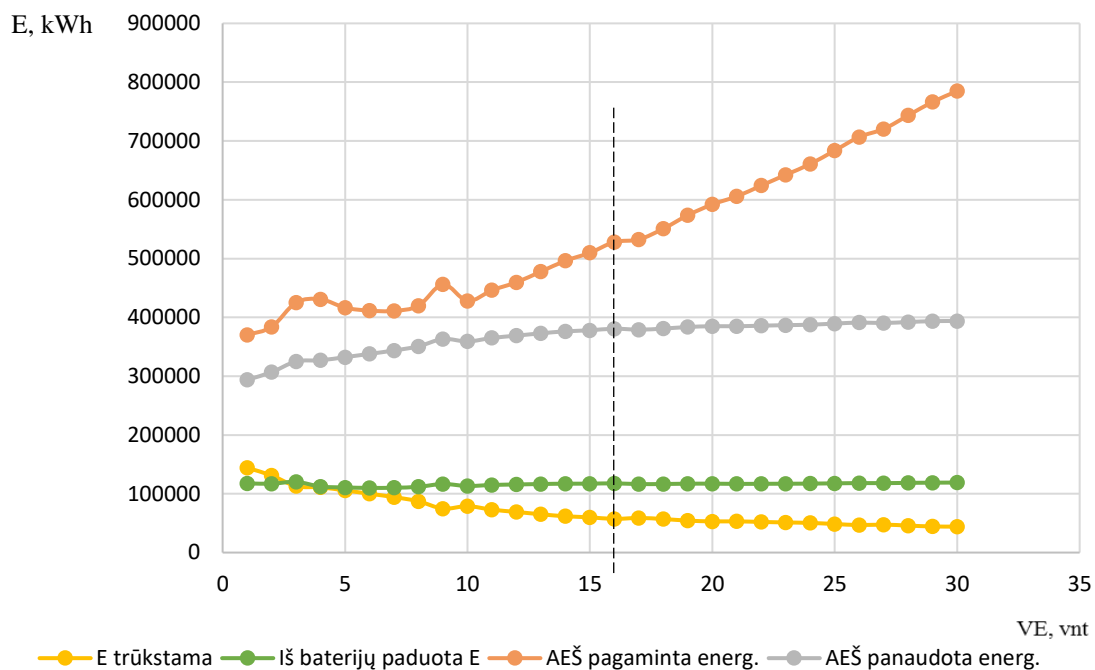
27 paveikslėlyje pavaizduoti pigiausi variantai su skirtingu VE skaičiumi t. y. iš variantų matricos, sugeneruotos algoritmo, išrenkami pigiausi variantai su kiekvienu konkrečiu VE skaičiumi. Tai palengvina duomenų atvaizdavimą. Optimalią struktūrą atitinka taškas, kuriame LCOEge (lyginamoji elektros energijos kaina su dyzeliniu generatoriumi) yra mažiausia. Iš grafiko matome, kad išrinktas variantas yra tas, kurio LCOE yra lygi šiek tiek mažiau už 0,15 eur./kWh., SE – 190 kW., VE – 160 kW., SE ir VE pagaminta energija bendrame MT balanse 87 %. Tokį didelį atsinaujinančių šaltinių kiekį lemia labai aukšta dyzelinio generatoriaus pagaminamos energijos savikaina, lyginat su kitais sistemoje instaliuotais energijos šaltiniais.



27 pav. Optimalios struktūros variantai su RGŠ

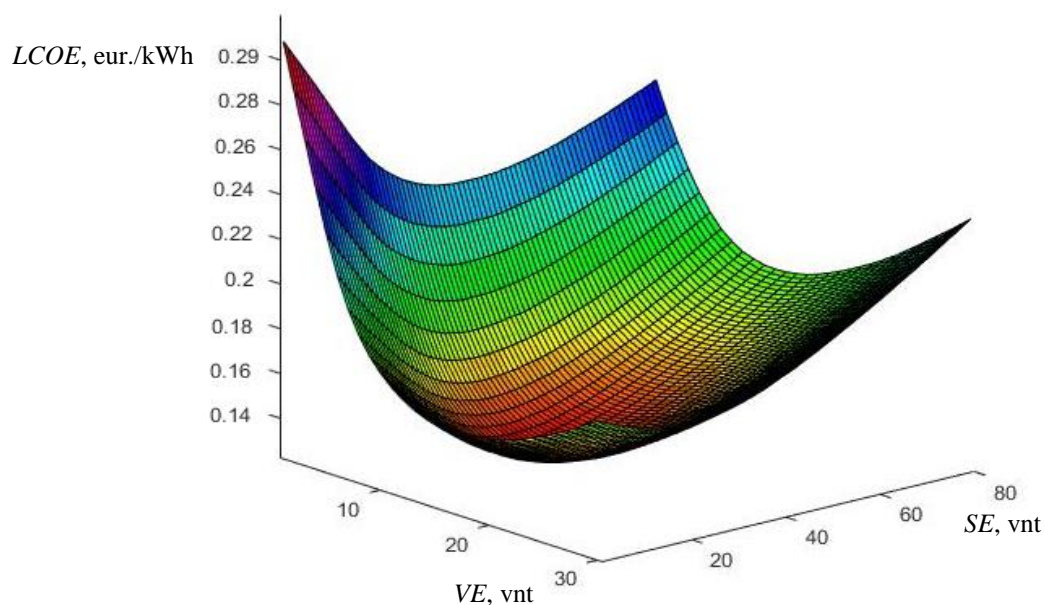
28 paveiksle pavaizduota optimalių variantų, priklausomai nuo VE kiekio, elektros energijos srautų, grafikai. Brūkšnine linija pažymėtas variantas su pigiausiu LCOEge. Iš grafiko matome, kad mažiausia kaina užfiksuojama tada, kai didesnis AEŠ instaliuotos galios kiekis padidina AEŠ panaudotą energiją nežymiai (pilkas grafikas) ir tolimesnis galios didinimas tik didina perteklinę energiją, kuri tiesiogiai įtakoja atsinaujinančių energijos šaltinių pagamintos energijos savikainą. Kai atsinaujinančių šaltinių pagamintos energijos savikaina tampa didesnė už generatoriaus pagamintos energijos savikainą, atsinaujinančių energijos šaltinių instaliuotos galios didinimas pradeda nebemažinti kainos mikrotinkle, tačiau ją didinti. Taigi, pigiausias variantas su skirtingu VE kiekiu yra išrenkamas tas, kuris užtikrina

atsinaujinančių šaltinių panaudojimą iki ribos, kai tolimesnis didinimas tampa netikslingas, dėl AEŠ brangesnės sugeneruotos energijos, lyginat su dyzeliniu generatoriumi.



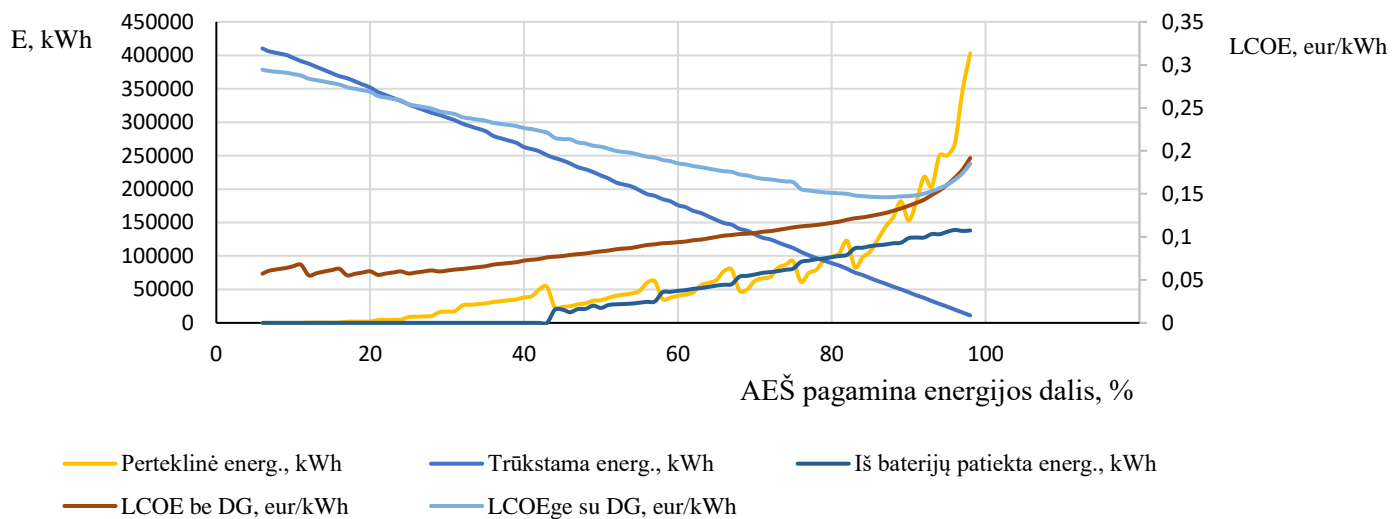
28 pav. Optimalios struktūros variantų su RGŠ energiniai parametrai

29 paveikslėlyje pateiktas trijų dimensijų grafikas, kuris atvaizduoja kaip priklauso LCOE nuo instaliuoto VE (1 vnt. – 10 kW) ir SE (1 vnt. – 5 kW.) skaičiaus, esant optimaliai energijos kaupiklio talpai. Didžiausias LCOE fiksuojamas esant mažiausiam AEŠ kiekiui, didinant SE ir VE pasiekiamas minimumas nuo kurio LCOE pradeda didėti, dėl didelio perteklinės energijos kiekio (28 pav. raudonas grafikas). Tyrimo rezultatai pateikti 2 priede.



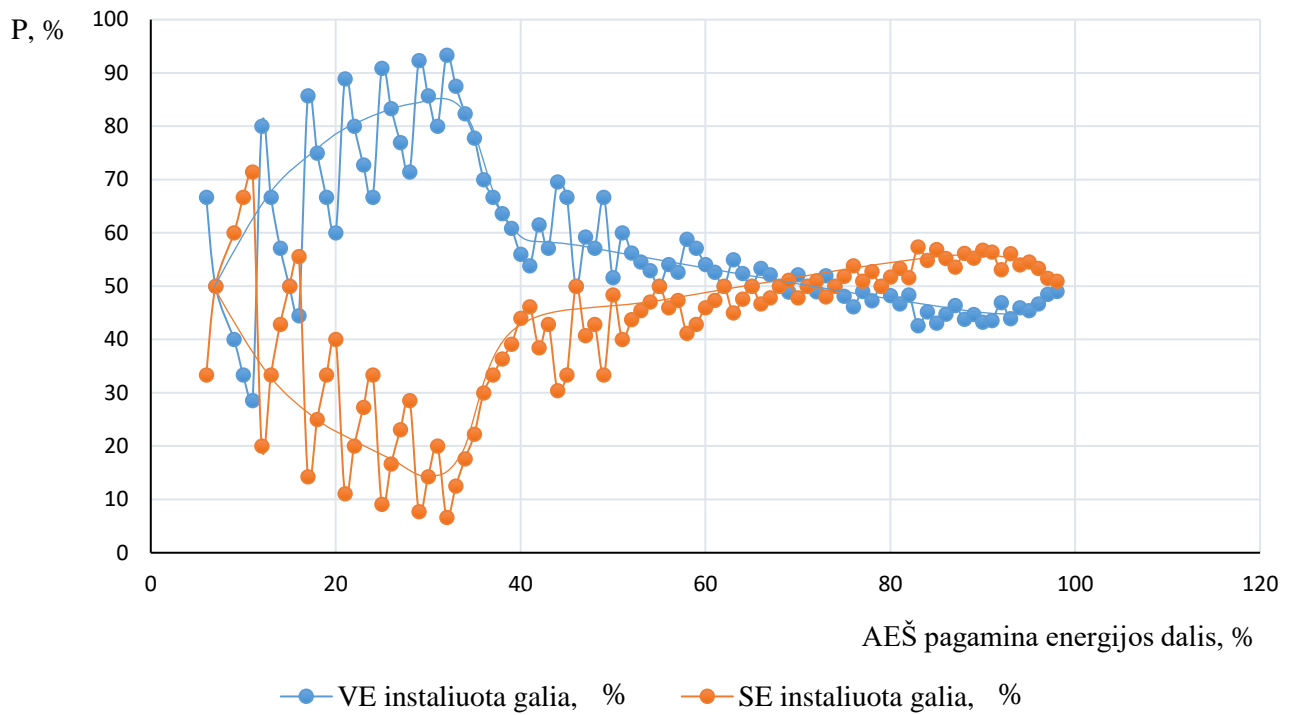
29 pav. LCOE priklausomai nuo instaliuotos VE ir SE galios

30 pav. pavaizduota mikrotinklo energinių parametų priklausomybė nuo sugeneruojamos AEŠ energijos bendrame mikrotinklo poreikio balanse, kai mikrotinklo struktūrą sudaro VE, SE ir EK kombinacija, kuri užtikrina mažiausią galimą energijos savikainą. Sugeneruojamos energijos savikaina, didėjant mikrotinklo energijos aprūpinimą iš AEŠ, didėja, dėl didėjančios nesubalansuotos perteklinės energijos. 100 % apsirūpinimas iš AEŠ galimas, tačiau netikslingas, dėl drastiškai išaugančios perteklinės energijos kiekio, o tuo pačiu ir pagamintos energijos kainos. Iš baterijų išsėjas energijos kiekis, esant parinktam optimalios talpos energijos kaupikliui, didėja proporcingai augančiai perteklinei energijai iki taško, kol pasiekiami riba, kai perteklinės energijos kiekio balansavimas baterijomis tampa neefektyvus.



30 pav. Optimalūs struktūros variantai priklausomai nuo AEŠ pagamintos energijos

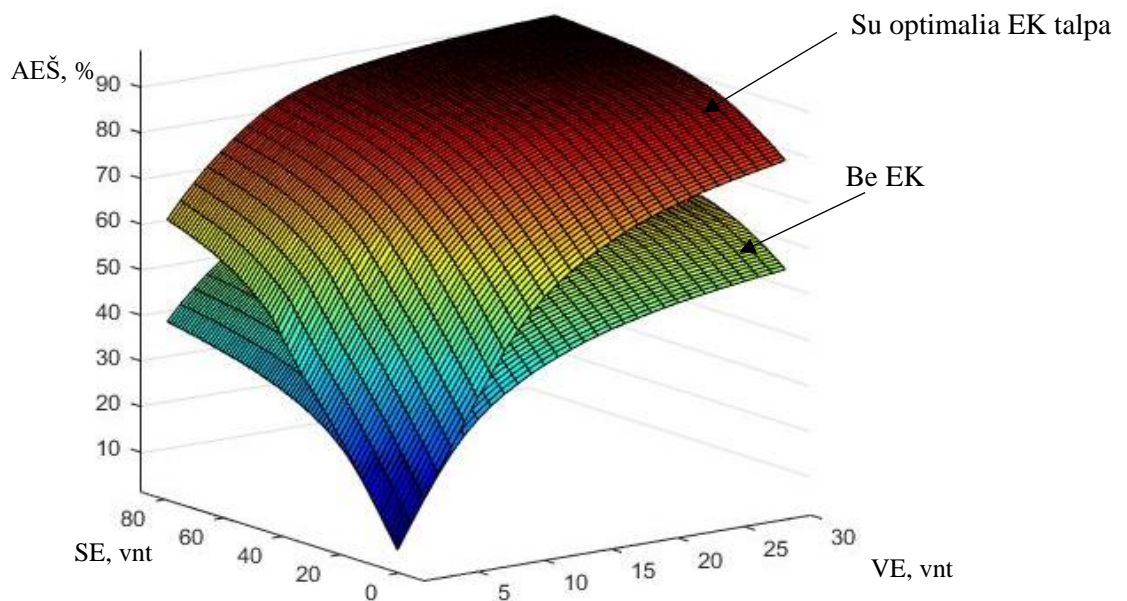
31 pav. pateikta instaliuotos VE ir SE galių santykio priklausomybė nuo sugeneruojamos AEŠ, energijos bendrame mikrotinklo poreikio balanse. Galių santykio svyravimą, didėjant energijai, pagamintai iš AEŠ, įtakoja sąlyginai didelė vėjo elektrinės vieno vieneto galia, lyginant su energijos poreikiu, tačiau kitimo tendencijos, nepaisant svyravimų, išlieka pastebimos.



31 pav. VE ir SE galių santykio priklausomybė nuo AEŠ pagamintos energijos mikrotinkle

32 pav. pateikta AEŠ procentinė dalis mikrotinklo energijos balanse, priklausomai nuo instaliuotos SE ir VE galios. Viršutinis grafikas atvaizduoja AEŠ procentinę dalį, esant parinktai optimaliai energijos kaupiklio talpai, apatinis – kai EK mikrotinklo struktūroje nenumatytas. Iš grafiko matome, kad parinkta optimali kaupiklio talpa padidina AEŠ panaudotos energijos kiekį apie 20 %.

Tyrimo rezultatai pateikti 3 priede.



32 pav. AEŠ pagamintos elektros energijos mikrotinkle priklausomybė nuo VE ir SE skaičiaus

IŠVADOS

1. Nustatyta, kad, kombinuojant vėjo ir saulės elektrines, galima pasiekti didesnę generacijos prisiderinimą prie esančio apkrovos grafiko, negu naudojant vieną iš šių atsinaujinančių šaltinių be papildomų balansavimo priemonių pasiekama, kad 90 % pagamintos energijos būtų panaudojama tiesiogiai. Optimalus vėjo ir saulės elektrinių prisiderinimas prie buitinės apkrovos grafiko pasiekiamas, kai aprūpinima nedaugiau 37 proc. metinio mikrotinklo elektros energijos poreikio, esant tokiam vėjo ir saulės elektrinių galių santykiui: SE – 60 %, VE – 40 %. Jeigu mikrotinklas įrengiamas pramonės objektuose, optimalus suderinamumas pasiekiamas, kai aprūpinime apie 33 % metinio poreikio, o šaltinių galių santykis toks: saulės 53 %, vėjo – 47 % (didesnis energijos poreikis naktį įtakoja mažesnę SE instaliuotą galią). Tokia šaltinių kombinacija užtikrina minimalų galimą perteklinės energijos sugeneravimą su didžiausiu galimu elektros energijos aprūpinimu. Analogiški rezultatai gaunami didinant mikrotinklo elektros energijos poreikį, taigi AEŠ prisiderinimas prie apkrovos grafiko priklauso nuo šaltinių generacijos grafiko ir apkrovos charakteristikos, tačiau nepriklauso nuo apkrovos dydžio.
2. EK panaudojimas ekonomiškai pagrįstas tada, kai mikrotinkle esančių šaltinių pagamintos elektros energijos savikaina didesnė už energijos savikainą patiektą iš EK. Mikrotinkle, kurį sudaro tik AEŠ, optimali EK talpa priklauso nuo AEŠ sugeneruotos energijos savikainos ir tuo pačiu perteklinės energijos kiekio. Kai AEŠ pagamintos elektros energijos kaina didesnė už energiją, patiektą iš EK, optimalia talpa galime laikyti talpą, su kuria elektros energijos kaina išlieka nepakitusi, taip užtikrinant didžiausią galimą energijos poreikio aprūpinimą už mažiausius kaštus. Jeigu AEŠ pagaminta energija pigesnė už energiją patiektą iš kaupiklio, bet kokios talpos EK įrengimas didina mikrotinkle pagamintos energijos savikainą ir kaupiklių įrengimas gali būti tikslingas tik siekiant padidinti sistemos patikimumą ir „švarios“ energijos kiekį bendrame mikrotinklo elektros energijos poreikio balanse. Mikrotinkle, kuriame energija turi būti tiekiamą nepertraukiamai, ir visą laiką naudojamas RGŠ, optimali kaupiklio talpa gali būti nustatoma pagal mažiausios kainos sąlygą.
3. Mikrotinklo struktūra, kuriame nepertraukiamas energijos tiekimas turi būti užtikrintas visus metus, esant darbe numatytoms mikrotinklo charakteristikoms (buitinė apkrova, kurios metinis energijos poreikis - 438 MWh) pasiekiamas su tokia šaltinių instaliuota galia: VE - 160 kW, SE - 190 kW, DG – 129 kW. Tokia struktūra užtikrina energijos prieinamumą ištisus metus už mažiausią pagamintos elektros energijos savikainą (~ 0,15 eur.). AEŠ, esant tokiai struktūrai, pagamina 87 % reikalingos energijos. Tokią didelę AEŠ pagaminamos energijos dalį įtakoja DG pagaminamos energijos savikaina. Pasiekus 87 % iš AEŠ pagamintos energijos, dėl didelio nesubalansuotos energijos kiekio, didesnis AEŠ kiekis sistemoje didina pagamintos elektros energijos kainą.

4. Dyzelinio generatoriaus panaudojimas mikrotinkle, siekiant padidinti elektros energijos prieinamumą, netikslingas dėl didelės pagaminamos energijos savikainos. Tačiau, dėl dyzelinio generatoriaus gerų dinaminių savybių ir nedidelių kapitalinių investicijų, jis gali būti panaudojamas kaip rezervinis šaltinis avariniais atvejais. Pavyzdžiui: mikrotinklui atsijungus nuo išorinio tinklo, įvykus vieno iš pagrindinių šaltinių atsijungimui dėl gedimo, paleidimui po „black out“o“, vienam iš energijos kokybės parametrų pasiekus neleistina ribą. Mikrotinkle, kuriame generavimo šaltiniai yra nestabilios galios, rekomenduotina dyzelinio generatoriaus minimali instaliuota galia yra 80 % pikinės mikrotinklo apkrovos. Tokia generatoriaus galia užtikrins mikrotinklo stabilumo palaikymą dirbant salos režimu ir avariniais atvejais.
5. AEŠ galių santykis mikrotinkle priklauso nuo VE ir SE pagaminamos energijos savikainos. Derinant abu energijos šaltinius su energijos kaupikliu, 100 % apsirūpinimas iš AEŠ galimas, tačiau netikslingas, dėl drastiškai išaugančios perteklinės energijos kiekio, o tuo pačiu ir pagamintos energijos kainos.
6. Optimalios mikrotinklo struktūros parinkimo problematika reikalauja nestabilios galios šaltinių sugeneruotos perteklinės energijos naudingo panaudojimo, energijos mainų su išoriniu elektros tinklu ir apkrovos valdymo tyrimų.

LITERATŪRA

1. ADOMAVIČIUS, V. Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos. Kaunas: Technologija, 2013.
2. HATZIARGYRIOU, N. Microgrids Architectures and Control. Chichester: IEEE Press, 2015.
3. FUSHENG, L. ir kt. Microgrid Technology and Engineering Application. 2015.
4. CHOWDHURY, S. ir kt. Microgrids and Active Distribution Networks. London: Published by The Institution of Engineering and Technology, 2009.
5. Shujun L., Zaijun W., Xiaobo D. Optimal Configuration of Hybrid Solar-Wind Distributed Generation Capacity in a Grid-Connected Microgrid. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. 2013.
6. ZHOU, Y., CARL NGAI-MAN HO. A review on Microgrid architectures and control methods. *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), IEEE 8th International*. 2016.
7. STUKNYS, A. ir ŠIMKEVIČIUS, T. Miesto vėjo energijos išteklių tyrimas. Šiaulių universitetas, 2010.
8. PETRAUSKAS, G. ir ADOMAVIČIUS, V. Vėjo energijos naudojimas elektrai gaminti. Kaunas: Technologija, 2012.
9. PETRAUSKAS, G. ir ADOMAVIČIUS, V. Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti. Kaunas: Technologija, 2012.
10. LAMBERT T., GILMAN P., LILIENTHAL P., Micropower system modeling with HOMER, *Integration of Alternative Sources of Energy, Farret FA*. Simões MG, John Wiley & Sons, 2005, ISBN 0471712329.
11. DUNG PHAN QUOC ir kt. Optimal design combined with power management for stand-alone microgrid. *Region 10 Conference (TENCON), IEEE*. 2016.
12. SAMI HAMED ALALWANI, KIMBALL, W. Optimal Sizing of a Wind/Solar/Battery Hybrid Microgrid System Using the Forever Power Method. *2015 Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference*. 2015.
13. ALALWANI, H. Optimal techno-economic unit sizing of hybrid PV/Wind/battery energy system for an islanded microgrid using the forever power method. *2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*. 2015.
14. LONGE, M. ir kt. Renewable Energy Sources microgrid design for rural area in South Africa. *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*. 2014.

PRIEDAI

1. Priedas. MT optimalios struktūros algoritmo programa

```
%SAULĖS MODULIŲ GENERUOJAMA GALIA IR PAGAMINAMAS ENERGIJOS KIEKIS

nSEMAX=80;%maksimalus saulės elektrinių skaičius
ESE=zeros(8760, nSEMAX);%sukuriama 0 narių matrica

for t=1:8760
    for nSE=1:nSEMAX
        ESE(t,nSE)=ES(t,1)*pSE*kSE*nSE*; %skaičiuojama SE generacija t laiko
        %momentu su nSE saulės modulių
    end
end
ESESUM=round(sum(ESE));% suminio pagaminamo energijos kiekio per metus matrica;

%VĖJO ELEKTRINIŲ GENERUOJAMA GALIA IR PAGAMINAMAS ENERGIJOS KIEKIS

nVEMAX=30;%maksimalus vėjo elektrinių skaičius
EVE=zeros(8760, nVEMAX);%sukuriama 0 narių matrica

for t=1:8760
    if EV(t,1)<Vp%tikrina įsijungimo vėjo greičio sąlyga
        EVE(t,1)=0; %
    else
        V1= round(EV(t,1)); %apvalinamas vėjo greitis (pirmas narys)
        if V1-EV(t,1)>0 %sąlyga
            V2=V1-1;
        else
            V2=V1+1;
        end
        if V1>V2
            EVE(t,1)=(VEgk2(1,V2)+((EV(t,1)-VEgk1(1,V2))*((VEgk2(1,V1)-VEgk2(1,V2))/(VEgk1(1,V1)-VEgk1(1,V2))));
        else
            EVE(t,1)=(VEgk2(1,V1)+((EV(t,1)-VEgk1(1,V1))*((VEgk2(1,V2)-VEgk2(1,V1))/(VEgk1(1,V2)-VEgk1(1,V1))));
        end
    end
    if EV(t,1)>Vs
        EVE(t,1)=0;
    end
    for nVE=1:nVEMAX
        EVE(t,nVE)=EVE(t,1)*nVE; %sukuriama generuojamos energijos
        %matrica su skirtingu elektrinių
    end
    %skaičiumi;
end
EVESUM=round(sum(EVE));% suminio pagaminamo energijos kiekio per metus matrica;

%DISBALANSAS

j=1; %struktūros numeris
Edisb=zeros(8760, nSEMAX*nVEMAX);
Edisbplus=zeros(8760,nSEMAX*nVEMAX);
Edisbminus=zeros(8760,nSEMAX*nVEMAX);
EDISB=zeros(2,nSEMAX*nVEMAX);

for nVE=1:nVEMAX
    for nSE=1:nSEMAX
        for t=1:8760
            Edisb(t,j)=ESE(t,nSE)+EVE(t,nVE)-EA(t,1);
            if Edisb(t,j)>0
```

```

        Edisbplus(t,j)=Edisb(t,j);
    else
        Edisbminus(t,j)=Edisb(t,j);
    end

end

DIDBALANSOGRAFIKAS(nSE,nVE)=round(sum(Edisb(:,j)));
DISBALPLIUS(nSE,nVE)=round(sum(Edisbplus(:,j)));
DISBALMINUS(nSE,nVE)=round(sum(Edisbminus(:,j)));
BALKONK(j,1)=nSE;
BALKONK(j,2)=nVE;
BALKONK(j,3)=DISBALPLIUS(nSE,nVE)+(-1)*DISBALMINUS(nSE,nVE);
BALKONK(j,4)=DISBALMINUS(nSE,nVE);
BALKONK(j,5)=DISBALPLIUS(nSE,nVE);
BALKONK(j,6)=ESESUM(1,nSE)+EVESUM(1,nVE);
BALKONK(j,7)=(BALKONK(j,6)-BALKONK(j,5))/BALKONK(j,6);
BALKONK(j,8)=(BALKONK(j,6)-BALKONK(j,5))/EASUM;
BALKONK(j,9)=BALKONK(j,8)+BALKONK(j,7);
BALKONK(j,10)=(nVE*10*100)/(nSE*5+nVE*10);
BALKONK2(nSE,nVE)=BALKONK(j,8)+BALKONK(j,7);
j=j+1;
end
end
BALANSAS(:, :, 1)=DIDBALANSOGRAFIKAS;
BALANSAS(:, :, 2)=DISBALPLIUS;
BALANSAS(:, :, 3)=DISBALMINUS;
BALANSAS(:, :, 4)=DISBALPLIUS+(-1)*DISBALMINUS;
BALANSAS(:, :, 5)=BALKONK2;
BALKONK1(:, :)=DISBALPLIUS+(-1)*DISBALMINUS;

EdisbSUM=round(sum(Edisb)); %metinis disbalansas ;
EdisbSUM1=round(sum(Edisbplus)); %plusinio disbalanso suma;
EdisbSUM2=round(sum(Edisbminus)); %minusinio disbalanso suma;
for x=1:nSEMAX*nVEMAX
    EDISB(1,x)=EdisbSUM1(1,x); %atspaudzynam plusinio disbalanso suma į matrica
    EDISB(2,x)=(-1)*EdisbSUM2(1,x)/(Kikr*Kiskr); %atspaudzynam minusinio disbalanso
    sumos modulį (įvartinant nuostolius energijos kaupiklį) į matrisa
end
EDISB1=min(EDISB); %nustatome kiek energijos teoriškai galėtų būti subalansuota
naudojant energijos kaupikius;

%ENERGIJOS VALDYMO ALGORITMAS

x=1;
c=1;
Ep=zeros(8760,1);
Etr=zeros(8760,1);
EduomenysVA=zeros(nSEMAX*nVEMAX,8);
MINB=zeros(3,1);
for nVE=1:nVEMAX
    for nSE=1:nSEMAX
        nulis=1;
        Bzingsnis=nBMAX(1,x)/10;
        if Bzingsnis<=1
            Bzingsnis=1;
            nulis=0;
        end
        for nB=0:Bzingsnis:10*Bzingsnis*nulis
            BATapvalinu=round(nB);
            if BATapvalinu-nB>=0
                BATkiekis=BATapvalinu;
            else
                BATkiekis=BATapvalinu+1;
            end
        end
    end
end

```

```

end
EB(1,1)=0.4*BATkiekis*EnB;
htr=0;
EduomenysVA(c,2)=nSE;
EduomenysVA(c,1)=nVE;
EduomenysVA(c,3)=BATkiekis;
MINBtrsuma=0;
MINBPsuma=0;
for t=2:8760
    if Edisb(t,x)>0
        ETikr=SOCmax*EnB*BATkiekis-EB(t-1,1);
        MINB(1,1)=BATkiekis*Emaxikr;
        MINB(2,1)=ETikr/Kikr;
        MINB(3,1)=Edisb(t,x);
        MINBP=min(MINB);
        EB(t,1)=EB(t-1,1)+MINBP*Kikr;
        Ep(t,1)=Edisb(t,x)-MINBP;
        Etr(t,1)=0;
        MINBtr=0;
    else
        ETiskr=EB(t-1,1)-SOCmin*EnB*BATkiekis;
        if ETiskr<0
            ETiskr=0;
        end
        MINB(1,1)=BATkiekis*Emaxiskr;
        MINB(2,1)=ETiskr*Kiskr;
        MINB(3,1)=(-1)*Edisb(t,x);
        MINBtr=min(MINB);
        EB(t,1)=EB(t-1,1)-MINBtr/Kiskr;
        Ep(t,1)=0;
        MINBP=0;
        Etr(t,1)=(-1)*Edisb(t,x)-MINBtr;
    end

    MINBtrsuma=MINBtrsuma+MINBtr;
    MINBPsuma=MINBPsuma+MINBP;
    if Etr(t,1)>0
        htr=htr+1;
    end
end
EduomenysVA(c,4)=sum(Ep);
EduomenysVA(c,5)=sum(Etr);
EduomenysVA(c,6)=htr;
EduomenysVA(c,7)=MINBPsuma;
EduomenysVA(c,8)=MINBtrsuma;
EduomenysVA(c,9)=max(Etr);

c=c+1; %varijantu skaitliukas;
end
EBMAX(1,x)=MINBtrsuma;
nBMAX(1,x)=nB;
x=x+1;
end
end

VARIJANTUMATRICA=zeros(nSEMAX*nVEMAX*11,14);
LCC=zeros(n,nSEMAX*nVEMAX);
Epagaminta=zeros(n,nSEMAX*nVEMAX);
LCCsuG=zeros(n,nSEMAX*nVEMAX);
EpagamintasuG=zeros(n,nSEMAX*nVEMAX);
kdiskonto=0.05;
for nVE=1:nVEMAX
    for nSE=1:nSEMAX

```

```

        nulis=1;
        Bzingsnis=nBMAX(1,x)/10;
        if Bzingsnis<=1
            Bzingsnis=1;
        end
        for nB=0:Bzingsnis:10*Bzingsnis*nulis
            BATapvalinu=round(nB);
            if BATapvalinu-nB>=0
                BATkiekis=BATapvalinu;
            else
                BATkiekis=BATapvalinu+1;
            end
            VARIJANTUMATRICA(i,2)=nSE;
            VARIJANTUMATRICA(i,1)=nVE;
            VARIJANTUMATRICA(i,3)=BATkiekis;
            pataisau=0;
            if VARIJANTUMATRICA(i,3)==0
                pataisau=1;
            end
            BATtarnavimas=1200/(round(EduomenysVA(i,8))/(VARIJANTUMATRICA(i,3)+pataisau));
            if BATtarnavimas>=10
                BATtarnavimas=10;
            end
            for t=1:n
                LCC(t,i)=(Kve*nVE*Pven)/Tve+EPve*nVE*Pven+(Kse*nSE*Psen)/Tse+EPse*nSE*Psen+(Kb*BA
                Tkiekis*Pbn)/BATtarnavimas+EPb*BATkiekis*Pbn);
                Epagaminta(t,i)=(ESESUM(1,nSE)+EVESUM(1,nVE)-EduomenysVA(i,4)-
                2*0.08*EduomenysVA(i,8));
            end
            SUMLCC=sum(LCC);
            SUMEpagaminta=round(sum(Epagaminta));
            VARIJANTUMATRICA(i,8)=SUMLCC(1,i)/SUMEpagaminta(1,i);
            Tge=GEdarbovalandos/EduomenysVA(i,6);
            KGE=Kge*round(EduomenysVA(i,9));
            EPGE=GEeksplotavimokaina*EduomenysVA(i,5);
            KR=EduomenysVA(i,5)*GEkurosanaudos*GEkurokaina;
            for t=1:n
                LCCsuG(t,i)=(Kve*nVE*Pven)/Tve+EPve*nVE*Pven+(Kse*nSE*Psen)/Tse+EPse*nSE*Psen+(Kb
                *BATkiekis*Pbn)/BATtarnavimas+EPb*BATkiekis*Pbn+KGE/Tge+EPGE+KR)/(1+kdiskonto)^t;
                EpagamintasuG(t,i)=(ESESUM(1,nSE)+EVESUM(1,nVE)-
                EduomenysVA(i,4)+EduomenysVA(i,5))/(1+kdiskonto)^t;
            end
            SUMLCCsuG=sum(LCCsuG);
            SUMEpagamintasuG=round(sum(EpagamintasuG));
            VARIJANTUMATRICA(i,13)=SUMLCCsuG(1,i)/SUMEpagamintasuG(1,i);
            VARIJANTUMATRICA(i,14)=round(EduomenysVA(i,5)*GEkurosanaudos);
            VARIJANTUMATRICA(i,9)=(EASUM- EduomenysVA(i,5))/EASUM;
            VARIJANTUMATRICA(i,10)=round((8760- EduomenysVA(i,6))/8760,3);
            VARIJANTUMATRICA(i,11)= VARIJANTUMATRICA(i,9)*100;
            VARIJANTUMATRICA(i,12)=round(EduomenysVA(i,9));
            VARIJANTUMATRICA(i,4)=round(EduomenysVA(i,4));
            VARIJANTUMATRICA(i,5)=round(EduomenysVA(i,5));
            VARIJANTUMATRICA(i,6)=EduomenysVA(i,6);
            VARIJANTUMATRICA(i,7)=round(EduomenysVA(i,8));;
            i=i+1;
        end
        x=x+1;
    end
end

```

2. Priedas. Optimalūs struktūros variantai su RGŠ

nVE, žing.	nSE, vnt.	nB, vnt.	E perteklinė, kWh	E trūkstama, kWh	Laikas kai trūksta E, h	Iš baterijų paduota E, kWh	LCOE, eur.	Pat1	Pat2	AŠ, %	GE, kW	LCOEge, eur.	Kuro sanaudos, l
1	78	1200	76199	144213	3555	117747	0,168	0,671	0,594	67,07	165	0,21	43264
2	76	1200	76912	131149	3313	117177	0,163	0,701	0,622	70,06	165	0,202	39345
3	80	1200	100172	113034	2891	120239	0,162	0,742	0,67	74,19	144	0,193	33910
4	76	1000	103693	110947	2971	112352	0,151	0,747	0,661	74,67	138	0,184	33284
5	68	1000	84160	105673	2826	110745	0,143	0,759	0,677	75,87	138	0,177	31702
6	62	1000	73547	100065	2678	110022	0,137	0,772	0,694	77,15	138	0,17	30020
7	57	1000	67354	94336	2547	110249	0,132	0,785	0,709	78,46	138	0,165	28301
8	54	1000	68993	87271	2370	111879	0,13	0,801	0,729	80,08	138	0,16	26181
9	57	1000	92928	74817	2046	116629	0,132	0,829	0,766	82,92	129	0,156	22445
10	46	1000	68961	78916	2186	113247	0,125	0,82	0,75	81,98	129	0,152	23675
11	45	1000	81077	72949	2022	115022	0,125	0,833	0,769	83,34	129	0,15	21885
12	43	1000	90764	69090	1926	115818	0,125	0,842	0,78	84,23	129	0,148	20727
13	42	1000	105026	65102	1806	116607	0,126	0,851	0,794	85,14	129	0,147	19531
14	41	1000	119989	61772	1730	117142	0,127	0,859	0,803	85,9	129	0,147	18532
15	39	1000	131799	59952	1683	117202	0,127	0,863	0,808	86,31	129	0,146	17986
16	38	1000	147394	57310	1602	117745	0,128	0,869	0,817	86,92	129	0,146	17193
17	34	1000	153392	58864	1638	116472	0,128	0,866	0,813	86,56	129	0,146	17659
18	33	1000	169910	57078	1578	116623	0,129	0,87	0,82	86,97	129	0,147	17123
19	33	1000	190120	54345	1504	117139	0,132	0,876	0,828	87,59	129	0,148	16304
20	32	1000	207147	53030	1478	117192	0,133	0,879	0,831	87,89	129	0,148	15909
21	30	1000	220952	53117	1479	116839	0,134	0,879	0,831	87,87	129	0,149	15935
22	29	1000	238286	52111	1451	116952	0,136	0,881	0,834	88,1	129	0,151	15633

nVE, žing.	nSE, vnt.	nB, vnt.	E perteklinė, kWh	E trūkstama, kWh	Laikas kai trūksta E, h	Iš baterijų paduota E, kWh	LCOE, eur.	Pat1	Pat2	Aš, %	GE, kW	LCOEge, eur.	Kuro sanaudos, l
23	28	1000	255748	51240	1415	117113	0,138	0,883	0,838	88,3	129	0,152	15372
24	27	1000	273295	50460	1389	117301	0,14	0,885	0,841	88,48	129	0,153	15138
25	27	1000	294415	48594	1342	117746	0,142	0,889	0,847	88,91	129	0,154	14578
26	27	1000	315627	46820	1296	118183	0,144	0,893	0,852	89,31	129	0,156	14046
27	25	1000	330035	47555	1319	118102	0,146	0,891	0,849	89,14	127	0,157	14267
28	25	1000	351367	45903	1280	118553	0,148	0,895	0,854	89,52	127	0,158	13771
29	25	1000	372887	44419	1248	118886	0,151	0,899	0,858	89,86	127	0,16	13326
30	24	1000	390962	44163	1253	119069	0,153	0,899	0,857	89,92	127	0,162	13249

3. Priedas. Optimalūs struktūros variantai priklausomai nuo AEŠ dalies MT energijos poreikio balanse

nVE, žing.	nSE, vnt.	nB, vnt.	E perteklinė, kWh	E trūkstama, kWh	Laikas kai trūksta E, h	Iš baterijų paduota E, kWh	LCOE, eur.	Pat1	Pat2	Aš, %	GE, kW	LCOEge, eur.	Kuro sanaudos, l
1	1	0	2	410199	8756	0	0,057	0,063	0	6	165	0,294	123060
1	2	0	2	405497	8756	0	0,061	0,074	0	7	165	0,293	121649
1	3	0	2	400795	8756	0	0,064	0,085	0	9	165	0,291	120238
1	4	0	2	396093	8756	0	0,066	0,096	0	10	165	0,289	118828
1	5	0	2	391391	8756	0	0,068	0,106	0	11	165	0,288	117417
2	1	0	431	387544	8656	0	0,055	0,115	0,012	12	165	0,284	116263
2	2	0	432	382842	8656	0	0,058	0,126	0,012	13	165	0,282	114853
2	3	0	432	378141	8656	0	0,06	0,137	0,012	14	165	0,281	113442
2	4	0	435	373441	8651	0	0,061	0,147	0,012	15	165	0,279	112032
2	5	0	452	368757	8646	0	0,063	0,158	0,013	16	165	0,277	110627
3	1	0	1802	365829	8547	0	0,055	0,165	0,024	17	165	0,274	109749
3	2	0	1827	361153	8542	0	0,057	0,175	0,025	18	165	0,272	108346
3	3	0	1868	356491	8534	0	0,059	0,186	0,026	19	165	0,271	106947
3	4	0	1960	351881	8516	0	0,06	0,197	0,028	20	165	0,269	105564
4	1	0	4209	345151	8347	0	0,056	0,212	0,047	21	165	0,264	103545
4	2	0	4382	340623	8325	0	0,057	0,222	0,05	22	165	0,262	102187
4	3	0	4598	336136	8306	0	0,059	0,233	0,052	23	165	0,260	100841
4	4	0	4874	331710	8275	0	0,06	0,243	0,055	24	165	0,259	99513
5	1	0	8764	326622	8042	0	0,057	0,254	0,082	25	165	0,254	97987
5	2	0	9188	322344	8009	0	0,059	0,264	0,086	26	165	0,252	96703

nVE, žing.	nSE, vnt.	nB, vnt.	E perteklinė, kWh	E trūkstama, kWh	Laikas kai trūksta E, h	Iš baterijų paduota E, kWh	LCOE, eur.	Pat1	Pat2	Aš, %	GE, kW	LCOEge, eur.	Kuro sanaudos, l
5	3	0	9677	318131	7983	0	0,06	0,274	0,089	27	165	0,251	95439
5	4	0	10246	313998	7939	0	0,061	0,283	0,094	28	165	0,249	94199
6	1	0	16099	310872	7725	0	0,06	0,29	0,118	29	165	0,246	93262
6	2	0	16796	306867	7698	0	0,061	0,299	0,121	30	165	0,244	92060
6	3	0	17565	302934	7666	0	0,062	0,308	0,125	31	165	0,243	90880
7	1	0	26148	297837	7411	0	0,063	0,32	0,154	32	165	0,239	89351
7	2	0	27063	294050	7388	0	0,064	0,329	0,157	33	165	0,238	88215
7	3	0	28041	290326	7364	0	0,065	0,337	0,159	34	165	0,236	87098
7	4	0	29064	286646	7338	0	0,066	0,346	0,162	35	165	0,235	85994
7	6	0	31299	279478	7281	0	0,068	0,362	0,169	36	165	0,233	83843
7	7	0	32500	275976	7260	0	0,069	0,37	0,171	37	165	0,231	82793
7	8	0	33763	272538	7230	0	0,07	0,378	0,175	38	165	0,230	81761
7	9	0	35118	269191	7191	0	0,071	0,385	0,179	39	165	0,229	80757
7	11	0	38149	262818	7098	0	0,072	0,4	0,19	40	165	0,226	78845
7	12	0	39851	259817	7044	0	0,073	0,407	0,196	41	165	0,225	77945
8	10	0	50148	256434	6902	0	0,074	0,415	0,212	42	165	0,223	76930
8	12	0	53697	250579	6812	0	0,076	0,428	0,222	43	165	0,221	75174
8	7	160	22777	246465	6373	19530	0,077	0,437	0,272	44	165	0,215	73939
8	8	160	23886	242916	6317	19792	0,078	0,445	0,279	45	165	0,214	72875
7	14	120	24947	238203	6387	15962	0,079	0,456	0,271	46	165	0,213	71461
8	11	160	27741	232809	6161	20646	0,08	0,468	0,297	47	165	0,210	69843
8	12	160	29156	229581	6112	20998	0,081	0,476	0,302	48	165	0,209	68874
9	9	200	33180	225437	5921	25804	0,082	0,485	0,324	49	165	0,206	67631
8	15	160	33759	220306	5910	22346	0,083	0,497	0,325	50	165	0,205	66092
9	12	200	37491	215814	5779	26818	0,084	0,507	0,34	51	165	0,202	64744
9	14	200	40615	209688	5625	27729	0,086	0,521	0,358	52	165	0,200	62906
9	15	200	42277	206736	5552	28253	0,086	0,528	0,366	53	165	0,199	62021
9	16	200	43996	203852	5490	28838	0,087	0,535	0,373	54	165	0,198	61156
9	18	200	47640	198312	5348	30144	0,089	0,547	0,389	55	165	0,195	59494
10	17	200	60014	192519	5211	31423	0,091	0,56	0,405	56	165	0,193	57756
10	18	200	62053	189953	5141	31996	0,091	0,566	0,413	57	165	0,192	56986
10	14	400	35966	184978	5024	45649	0,093	0,578	0,426	58	165	0,189	55493
10	15	400	37485	181915	4955	46362	0,093	0,585	0,434	59	165	0,188	54575
10	17	400	40645	175947	4810	47995	0,094	0,598	0,451	60	165	0,185	52784
10	18	400	42277	173032	4732	48917	0,095	0,605	0,46	61	165	0,184	51910
10	20	400	45759	167444	4604	50896	0,096	0,618	0,474	62	165	0,182	50233
11	18	400	56079	164270	4515	51999	0,097	0,625	0,485	63	165	0,181	49281
11	20	400	59886	158976	4407	53794	0,098	0,637	0,497	64	165	0,179	47693
11	22	400	63902	153911	4294	55709	0,1	0,649	0,51	65	165	0,178	46173
12	21	400	77331	149183	4177	57045	0,101	0,659	0,523	66	165	0,176	44755
12	22	400	79505	146804	4120	57931	0,102	0,665	0,53	67	165	0,176	44041
11	22	600	48319	140577	3963	69042	0,103	0,679	0,548	68	165	0,173	42173
11	23	600	50131	137896	3904	70277	0,104	0,685	0,554	69	165	0,171	41369
12	22	600	62673	132402	3752	72333	0,105	0,698	0,572	70	165	0,169	39721

nVE, žing.	nSE, vnt.	nB, vnt.	E perteklinė, kWh	E trūkstama, kWh	Laikas kai trūksta E, h	Iš baterijų paduota E, kWh	LCOE, eur.	Pat1	Pat2	Aš, %	GE, kW	LCOEge, eur.	Kuro sanaudos, l
12	24	600	66588	127310	3631	74686	0,106	0,709	0,586	71	165	0,168	38193
12	25	600	68628	124847	3572	75865	0,107	0,715	0,592	72	165	0,167	37454
13	24	600	82254	120349	3448	77398	0,108	0,725	0,606	73	165	0,166	36105
13	26	600	86904	115930	3349	79381	0,11	0,735	0,618	74	165	0,164	34779
13	28	600	91966	111896	3248	81205	0,111	0,745	0,629	75	165	0,164	33569
12	28	800	61412	106101	3003	91130	0,112	0,758	0,657	76	129	0,156	31830
13	27	800	74586	101204	2872	92979	0,113	0,769	0,672	77	129	0,154	30361
13	29	800	79365	96941	2772	95124	0,114	0,779	0,684	78	129	0,153	29082
14	28	800	93684	93084	2654	96350	0,115	0,787	0,697	79	129	0,152	27925
14	30	800	98902	89216	2562	98232	0,116	0,796	0,708	80	129	0,151	26765
14	32	800	104386	85599	2463	100026	0,118	0,805	0,719	81	129	0,151	25680
15	32	800	122349	80753	2305	101663	0,12	0,816	0,737	82	129	0,150	24226
13	35	1000	83112	75232	2082	111457	0,122	0,828	0,762	83	129	0,148	22570
14	34	1000	97705	71594	1976	112354	0,123	0,837	0,774	84	129	0,147	21478
14	37	1000	106752	66935	1864	114721	0,124	0,847	0,787	85	129	0,147	20080
15	37	1000	125123	62482	1743	116052	0,126	0,857	0,801	86	129	0,146	18745
16	37	1000	143973	58504	1638	117239	0,128	0,866	0,813	87	129	0,146	17551
16	41	1000	157996	54037	1510	119075	0,13	0,877	0,828	88	129	0,146	16211
17	42	1000	181680	50123	1400	119866	0,133	0,886	0,84	89	129	0,147	15037
16	42	1200	153042	45799	1228	126709	0,136	0,895	0,86	90	129	0,147	13740
17	44	1200	180778	41256	1087	127596	0,14	0,906	0,876	91	129	0,148	12377
19	43	1200	218269	37385	984	127593	0,143	0,915	0,888	92	129	0,150	11216
18	46	1400	203612	32668	854	132805	0,149	0,925	0,903	93	129	0,153	9800
20	47	1400	250234	28445	750	132508	0,154	0,935	0,914	94	129	0,156	8534
20	48	1600	250044	24302	619	136169	0,161	0,945	0,929	95	129	0,161	7291
21	48	1800	267994	19786	490	138927	0,169	0,955	0,944	96	129	0,166	5936
24	51	1800	347281	15536	374	137430	0,178	0,965	0,957	97	129	0,174	4661
26	54	2000	402864	11143	273	138128	0,192	0,975	0,969	98	127	0,185	3343

4. Priedas. Saulės spinduliuotės ir vidutinio vėjo greičio duomenys

Mėnesis	Vėjo greičio vidurkis, m/s	Spinduliuotė, kWh/m ² /d
Sausis	5,420	0,680
Vasaris	4,580	1,390
Kovas	4,530	2,620
Balandis	4,030	3,910
Gegužė	3,830	5,410
Birželis	3,720	5,450
Liepa	3,720	5,240
Rugpjūtis	3,720	4,460
Rugsėjis	4,610	2,890
Spalis	4,580	1,570
Lapkritis	4,580	0,780
Gruodis	4,890	0,540