

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rasa DŽIUGAITĖ-TUMĖNIENĖ

**MAŽAENERGIO VIENBUČIO NAMO
APRŪPINIMO ENERGIJA
INTEGRUOTAS VERTINIMAS**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2015

Disertacija rengta 2009–2015 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T), (2014–2015).

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Vidmantas JANKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, energetika ir termoinžinerija – 06T), (2009–2014).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

doc. dr. Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Juozas AUGUTIS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – 06T),

prof. dr. Marija BURINSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

dr. Vida MALIENĖ (Liverpulio Džono Moreso universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2015 m. birželio 19 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2015 m. gegužės 18 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2322-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-816-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2015

© Rasa Džiugaitė-Tumėnienė, 2015

rasa.dziugaitė-tumeniene@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rasa DŽIUGAITĖ-TUMĖNIENĖ

INTEGRATED ASSESSMENT OF
THE ENERGY SUPPLY
FOR A LOW-ENERGY HOUSE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2015

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2015.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T), (2014–2015).

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Vidmantas JANKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Energetics and Power Engineering – 06T), (2009–2014).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Members:

Assoc Prof Dr Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Juozas AUGUTIS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – 06T),

Prof Dr Marija BURINSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Dr Vida MALIENĖ (Liverpool John Moores University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 19 June 2015**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel. +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 18 May 2015.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Internet website <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziუმė

Disertacijoje nagrinėjamas mažoenerģio vienubučio namo aprūpinimas energija ir jo įtaka pastato energiniam naudingumui. Pagrindinis tyrimo tikslas – sudaryti mažoenerģio vienubučio namo aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelį. Sukurtas modelis gali būti panaudotas išsamiai pastato energijos poreikių ir aprūpinimo energija sistemų analizei atlikti bei nustatyti racionalų sprendimą pagal pasirinktus vertinimo kriterijus – energinį efektyvumą, poveikį aplinkai, ekonominį efektyvumą, komfortą ir funkcionalumą.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros bei autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai ir trys priedai.

Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, pristatomas tyrimų objektas, formuojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė ir pateikiami ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje išvardijamos disertacijos tema paskelbtos autorės publikacijos bei pranešimai konferencijose, paaiškinama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama mokslinės literatūros analizė, joje aptariamos aukšto energinio naudingumo pastatų koncepcijos, šių pastatų vertinimo ir sertifikavimo sistemos, energinio efektyvumo rodikliai, taikomos pasyvosios bei aktyviosios energijos vartojimo efektyvumo priemonės. Taip pat apžvelgti pastatų ir jų aprūpinimo energija vertinimui taikomi modeliavimo ir optimizavimo metodai.

Antrajame skyriuje aprašytas sukurtas mažoenerģio pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelis ir pateikiamas jo taikymo algoritmas.

Trečiajame skyriuje, taikant sukurtą modelį, atliekamas mažoenerģio vienubučio namo skirtingų energijos poreikių variantų ir jiems užtikrinti numatytų penkiolikos aprūpinimo energija sistemų vertinimas. Pristatomas galutinis rezultatas – racionali aprūpinimo energija sistema racionalaus pastato energijos poreikio atveju pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir funkcionalumo vertinimo kriterijus.

Disertacijos tema paskelbti 9 straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtraukta me į „ISI Web of Science“ sąrašą, du – kituose mokslo žurnaluose, penki – recenzuojamose Lietuvos tarptautinės konferencijos medžiagoje, vienas – respublikinės konferencijos medžiagoje.

Abstract

The dissertation is concerned with the energy supply for a low-energy single family house and its influence over the energy performance of the building. The main goal of the study is to compile an integrated assessment model for an energy supply system for a low-energy single family house. The compiled model may be used to comprehensively analyse the energy demand for a building and the energy supply systems as well as to determine a rational solution in terms of selected assessment criteria, i.e. energy efficiency, environmental impact, economy, comfort and functionality.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, a reference list, a list of publications on the topic of the dissertation by the author, and three annexes.

The research topic, the relevance of the study, the subject of the research are discussed as well as the goal and tasks of the work are formed, the research methodology, the scientific novelty of the work, the practical significance of the results and the defended statements are described in the introduction. At the end of the introduction the publications and presentations at conferences by the author are named and the structure of the work is presented.

The first chapter of the work presents an overview of the relevant literature; it is concerned with conceptions of high-efficiency buildings, evaluation and certification systems of these buildings, indicators of energy efficiency and applied passive and active energy efficiency measures. Modelling and optimisation methods applied to the evaluation of buildings and their energy supply systems are also overviewed.

The second chapter provides a compiled model of integrated assessment of low-energy building energy supply system and its application algorithm.

The third chapter presents an assessment of various variants of energy demand for a low-energy single family building and 15 energy supply systems that ensure this demand, while applying the compiled model. The final result – a rational system of energy supply in the case of an efficient building energy demand based on the criteria of energy, environmental impact, economy, comfort and functionality – is presented.

9 scientific articles have been published on the topic of the dissertation: one in a science journal that has been included in the ISI Web of Science, two in other science journals, five in the reviewed materials of international conferences, one in the material of a national conference.

Žymėjimai

Simboliai

A – atvirkštinė jungtinė matrica

A_i – alternatyva i

A_p – pastato grindų plotas, m^2

C_1 – pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklis, apibūdinantis pirminės neatsinaujinančios energijos vartojimo efektyvumą šildymui, vėdinimui, vėsinimui ir apšvietimui

C_2 – pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklis, apibūdinantis pirminės neatsinaujinančios energijos vartojimo efektyvumą karštam buitiniam vandeniui ruošti

Dn – pastato aprūpinimo energija sistemos technologijų derinys

E_{AP} – elektros energijos poreikis buitiniams elektros prietaisams, kWh/m^2

E_{aux} – papildomas elektros energijos poreikis, kWh/m^2

$E_{i,del,m}$ – pastatui patiekta energija, kWh/m^2

E_L – elektros energijos poreikis apšvietimui, kWh/m^2

E_V – elektros energijos poreikis vėdinimui, kWh/m^2

$Q_{H,nd}$ – energijos poreikis šildymui, kWh/m^2

$Q_{W,nd}$ – energijos poreikis karštam vandeniui ruošti, kWh/m^2

U_i – pastato atitvaros i šilumos perdavimo koeficientas, W/m^2K

Vn – pastato variantai

W_{HW} – elektros energijos poreikis, reikalingas pagalbiniam šildymo ir karšto vandens sistemų įrenginiams (cirkuliaciniams siurbliams, elektros pavaroms), kWh/m²

X_{in} – pastatui patiekta energija (į sistemą įeinantys energijos srautai), kWh/m²

X_{out} – pastato energijos poreikis (iš sistemos išeinantys energijos srautai), kWh/m²

Indeksai

AP – būtiniai elektros prietaisai

c – pastato aprūpinimo energija sistemos reguliavimo posistemis (angl. *control*)

cmf – komfortas

CO₂ – CO₂ dujų emisijos

del – patiekta energija

dis – pastato aprūpinimo energija sistemos paskirstymo posistemis (angl. *distribution*)

e – elektra

ec – ekonominis

el – elektra

em – pastato aprūpinimo energija sistemos sklaidos posistemis (angl. *emitter*)

en – energinis

ev – aplinkosauginis

fnc – funkcionalumas

gen – energijos generatorius arba generavimo posistemis (angl. *generator*)

GR – grindys ant grunto

H – šildymas

i – kintantis indeksas

in – įvestis

IS – išorinė siena

cmf – komfortas

L – apšvietimas

LN – langas

ls – pastato aprūpinimo energija sistemos posistemio šilumos nuostoliai (angl. *losses*)

nd – poreikis (angl. *need*)

nren – neatsinaujinantis (angl. *nonrenewable*)

out – išvestis

PE – pirminė energija

rbl – atgaunama energijos dalis (angl. *recoverable*)

ren – atsinaujinantis (angl. *renewable*)

rvd – atgauta energijos dalis (angl. *recovered*)

s – pastato aprūpinimo energija sistemos akumuliacinio posistemis

S – saulės energija

sys – sistema (angl. *system*)

ST – stogas

š – šiluma

V – vėdinimas

W – karštas vanduo

Santrumpos

AC – kintanti elektros srovė (angl. *Alternating Current*)
AEI – atsinaujinantys energijos išteklių (angl. *Renewable Energy Sources*)
AHP – analitinio hierarchinio proceso metodas (angl. *Analytical Hierarchy Process*)
AP – buitiniai elektriniai prietaisai (angl. *Appliances*)
BASIX – pastato tvarumo rodiklis (angl. *Building Sustainability Index*)
BI – bendros išlaidos (angl. *Global Cost, GC*)
BIM – pastato informacinis modelis (angl. *Building Information Model*)
BK – medžio dujų generacijos katilas
BREEAM – tarptautinė tvaryų pastatų vertinimo sistema (angl. *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*)
C – vėsinimas (angl. *Cooling*)
Cmp – sistemos sudėtingumas (angl. *Complexity*)
CŠT – centralizuotas šilumos tiekimas
db – daugiabutis
DC – nuolatinė elektros srovė (angl. *Direct Current*)
DGNB – tvaryų pastatų vertinimo taryba Vokietijoje (angl. *The German Sustainable Building Council*)
DK – kondensacinis dujinis katilas
DSO – dalelių spiečiaus optimizavimas (angl. *Particle Swarm Optimization, PSO*)
EB – Europos Bendrija
EPC – energinio efektyvumo koeficientas (angl. *Energy Performance Coefficient*)
ES – Europos Sąjunga
ET – elektros tinklai
EVEP – energijos vartojimo efektyvumo priemonė
Fnk – sistemos funkcionalumas (angl. *Functionality*)
GA – genetinis algoritmas (angl. *Genetic Algorithm*)
GK – medžio granulių katilas
gv – gyvenamasis pastatas
H – šildymas (angl. *Heating*)
HW – karšto vandens ruošimas (angl. *Hot Water*)
IDA – patalpos oro kokybės kategorija (angl. *Indoor Air*)
IQR – kvartilų skirtumas
IŠ.Ž. – išorinės žaliuzės
IWEC – tarptautinis meteorologijos duomenų tinklas (angl. *International Weather for Energy Calculations*)
Kmf – komfortas
L – apšvietimas (angl. *Lighting*)
LED – šviesą skleidžiantis diodas (angl. *Light-Emitting Diode*)

LEED – žaliųjų pastatų vertinimo sistema (angl. *Leadership in Energy and Environmental Design*)

LR – Lietuvos Respublika

MADM – daugiatakslis diskretusis sprendimo priėmimas (angl. *Multi-Attribute Decision Making*)

Mnt – eksploatavimo patogumas (angl. *Maintainability*)

MODM – daugiatakslis tolydusis sprendimo priėmimas (angl. *Multi-Objective Decision Making*)

MPAES – mažaeenergio pastato aprūpinimo energija sistema

ngv – negyvenamasis pastatas

NSW – Naujasis Pietų Velsas Australijoje (angl. *New South Wales*)

ODA – lauko oro kokybės kategorija (angl. *Outdoor Air*)

P – pietūs

PD – nepatenkintųjų procento rodiklis, taikomas nustatant patalpos oro kokybę (angl. *Percentage of Dissatisfied*)

PE – pirminė energija (angl. *Primary Energy*)

PHPP – pasyvaus namo planavimo paketas (angl. *Passive House Planning Package*)

PMV – numatomasis vidutinis vertinimo rodiklis, nusakantis žmonių šiluminės aplinkos įvertinimo vidutinį dydį (angl. *Predicted Mean Vote*)

PPD – numatomasis nepatenkintųjų procento rodiklis (angl. *Predicted Percentage of Dissatisfied*)

SE – saulės elementai (angl. *Solar Cells*), gaminantys elektrą

SK – saulės kolektoriai (angl. *Solar Collectors*), gaminantys šilumą

SP – sprendimo priėmėjas (angl. *Decision Maker*)

SPF – sezoninis energinio efektyvumo koeficientas (angl. *Seasonal Performance Factor*)

ŠR – šiaurės rytai

ŠS – šilumos siurblys (angl. *Heat Pump*)

ŠVOK – šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas

V – vėdinimas (angl. *Ventilation*)

vb – vienbutis

WASPAS – svorinės agreguotos sumos metodas (angl. *Weighted Aggregated Sum Product Assessment*)

WPM – svorių sumos modelis (angl. *Weighted Sum Model*)

WSM – rezultatų sumos modelis (angl. *Weighted Product Model*)

Terminai ir apibrėžimai

Aktyviosios energijos vartojimo efektyvumo priemonės – energijos vartojimo efektyvumo priemonės, kurias sudaro aukšto šilumos atgavimo efektyvumo vėdinimo sistema, atsinaujinančios energijos technologijos, efektyvūs šilumos generatoriai (transformatoriai) ir techninės pastato sistemos įranga.

Alternatyva – vienos iš konkuruojančių pastato variantų ir aprūpinimo energija sistemų kombinacijų pasirinkimas, padedantis pasiekti pastato energinio naudingumo tikslus (Simanavičienė 2011).

- Atsinaujinančių išteklių energija* – atsinaujinančių neišskastinių išteklių energija: vėjo, saulės energija, aeroterminiai, geoterminiai, hidroterminiai ištekliai ir vandenyne energija, hidroenergija, biomasė, sąvartynų dujos, nuotekų perdirbimo įrenginių dujos ir biologinės dujos.
- Beveik nulinės energijos pastatas* – labai aukšto energinio naudingumo pastatas, kuriame energijos sąnaudos yra beveik lygios nuliui arba labai mažos ir didžiąją dalį sunaudojamos energijos sudaro atsinaujinanti energija, pagaminta vietoje arba netoliese.
- Ekspertinis vertinimas* – kriterijų reikšmės nustatomos, remiantis ekspertų patyrimu ir intuicija (Simanavičienė 2011).
- Imitacinis modeliavimas* – realios sistemos modelio konstravimo ir eksperimentavimo su juo procesas, siekiant suvokti sistemos funkcionavimo principus arba įvertinti skirtingas šios sistemos veikimą užtikrinančias strategijas, esant tam tikriems iš anksto žinomiems apribojimams, aprašytiems kriterijų rinkiniu.
- Integruotas vertinimas* – kompleksinis vertinimas, apimantis imitacinį modeliavimą ir optimizavimo metodus.
- Jautrumo analizė* – sprendimo modelio vykdymas kelis kartus su skirtingomis įvestimis (Simanavičienė 2011).
- Kriterijai* – charakteristikos (savybės) ar reikalavimai, kuriuos privalo turėti kiekviena alternatyva (Simanavičienė 2011).
- Kriterijus* – vertinimo pagrindas, matas.
- Kritiškiausias kriterijus* – kriterijus, kurio mažiausias dabartinio svorio reikšmės pakeitimas gali pakeisti egzistuojančių alternatyvų padėtį rangų skalėje (Simanavičienė 2011).
- Mažaenergis pastatas* – aukšto energinio naudingumo pastatas, kuriame energijos sąnaudos yra mažos ir dalį sunaudojamos energijos sudaro atsinaujinanti energija, pagaminta vietoje arba netoliese.
- Optimizavimas* – tai paieška uždavinio formulavimu apibrėžtoje aibėje tokio elemento, kuriam kriterijaus reikšmė būtų minimali (arba maksimali).
- Pasyviosios energijos vartojimo efektyvumo priemonės* – energijos vartojimo efektyvumo priemonės, kurias sudaro šiluminis izoliavimas, maži skaidrių atitvarų šilumos perdavimo ir visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientai, sandarumas, pasyvios apsaugos nuo saulės priemonės.
- Pastato aprūpinimo energija sistema* – tai sistema, užtikrinanti patalpų mikroklimatą ir apimanti energijos generavimo, transformavimo, akumuliacijos ir paskirstymo technologijas.
- Pastato aprūpinimo energija sistemos technologijų derinys* – tai aprūpinimui energija naudojamų energijos generavimo ir transformavimo technologijų derinys.
- Pastato energinio naudingumo klasė* – pagal kvalifikacinio rodiklio vertę ir STR 2.01.09:2012 nustatyta pastato naudingumo klasė (A++, A+, A, B, C, D, E, F, G).
- Pastato energinis naudingumas* – apskaičiuotas arba išmatuotas energijos kiekis, reikalingas patenkinti pastato energijos poreikį šildymui, vėsinimui, vėdinimui, karšto vandens ruošimui ir apšvietimui.
- Patiekta energija* (angl. *delivered energy*) – pastatui per jo ribą tiekiamą energija, tenkinant šildymo, vėsinimo, vėdinimo, buitinio karšto vandens, apšvietimo ir elektros energijos buitiniams prietaisams poreikius.

Patikimumas (angl. *reliability*) – tikimybė, kad objektas atliks jam skirtą funkciją ar uždavinį reikalavimus tenkinančiu lygiu.

Pirminė energija – atsinaujinančių ir neatsinaujinančių energijos išteklių energija, kuri nebuvo kaip nors konvertuota ar transformuota.

Porinio palyginimo skalė – atitikmuo abstrakčių lingvistinių vertinimo rinkinių ir sveikųjų skaičių aibės, kuri nurodo alternatyvų ar kriterijų svorius (Simanavičienė 2011).

Porinis palyginimas – ekspertinis vertinimas atliekamas poromis, siekiant kiekvienoje lyginamojoje poroje nustatyti reikšmingesnę kriterijų (Simanavičienė 2011).

Racionali pastato aprūpinimo energija sistema – tai sistema, kuri užtikrina minimalias pirminės energijos sąnaudas, beveik neįtakoja aplinkos, palaiko maksimalų komfortą patalpose, sąlygoja mažiausias bendrąsias išlaidas per visą sistemos gyvavimo trukmę ir techniniu požiūriu geriausiai atitinkanti paskirtį.

Racionalus – protingas, pagrįstas, apgalvotas, tikslingas, aiškiai suvokiamas, išreiškiamas.

Rangavimas – kriterijų reikšmingumai nustatomi tiesioginiu būdu, naudojant diskretinių (1, 2, ..., n) skaičių skalę (Simanavičienė 2011).

Rekuperacija – iš pastato patalpų ištraukiamo oro šilumos energijos dalies grąžinimas pakartotiniam panaudojimui.

Rodiklis – kiekybinis ar kokybinis parametras, kuris gali būti išmatuotas, įvertintas, nustatytas (pavyzdžiui, pirminė energija, tarša, išlaidos).

Sąnaudų atžvilgiu efektyvus lygis – energijos vartojimo efektyvumo lygis, užtikrinantis mažiausias sąnaudas per numatomą ekonominio gyvavimo ciklą.

Sezoninis energinio efektyvumo koeficientas – energinio efektyvumo koeficientas, kurio skaitinė reikšmė priklauso nuo posistemio techninio tobulumo ir aplinkos klimato sąlygų kitimo per metus.

Sprendimas – apgalvotas pasirinkimas iš galimų alternatyvų aibės, įvertinus apribojimus.

Sprendimo kintamasis (angl. *decision variable*) – kintantis modelio faktorius, kuris yra nustatytas sprendimo priėmėjo.

Sprendimo patikimumas – tikimybė, kad alternatyva, kuriai nustatytas aukščiausias rango įvertinimas, iš tikrųjų yra racionaliausia.

Sprendinys – matematinio uždavinio sprendimo rezultatas.

Surogatinis – netikras, dirbtinis.

Techninė pastato sistema – pastato techninė šildymo, vėsinimo, vėdinimo, karšto vandens, apšvietimo įranga arba šių funkcijų kombinacijai užtikrinti skirta įranga.

Vertinimo modelis – taikomų vertinimo metodų sistema, apimanti vertinamo objekto savybes, rodiklius ir ryšius tarp jų. Vertinimo modelis nustato, ką vertintojai turi daryti ir paaiškinti, kaip atlikti tam tikros rūšies vertinimą.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	6
Disertacijos struktūra	6
1. MAŽAENERGIJŲ PASTATŲ APRŪPINIMAS ENERGIJA IR JO VERTINIMO METODŲ APŽVALGA	7
1.1. Maženergiai pastatai ir jų aprūpinimas energija	7
1.1.1. Aukšto energinio naudingumo pastatų koncepcijos	8
1.1.2. Pastatų energinio naudingumo vertinimas	10
1.1.3. Energijos vartojimo efektyvumo priemonės sąnaudų atžvilgiu racionaliems pastatų energinio naudingumo lygiams	15
1.1.4. Energijos vartojimo efektyvumo priemonės beveik nulinės energijos pastatams	17
1.2. Pastato ir jo aprūpinimo energija integruoto vertinimo reikšmė bei etapai	22

1.3. Pastato ir jo aprūpinimo energija modeliavimo taikymo analizė.....	24
1.4. Pastato ir jo aprūpinimo energija optimizavimo metodų taikymo analizė.....	28
1.4.1. Optimizavimo metodų klasifikacija	28
1.4.2. Optimizavimo tikslas, tikslo funkcijos ir projektiniai kintamieji.....	30
1.4.3. Tikimybiniai optimizavimo metodai.....	33
1.4.4. Analitiniai optimizavimo metodai	33
1.4.5. Daugiakriterinis optimizavimas evoliuciniais algoritmais	34
1.4.6. Daugiakriterinis optimizavimas genetiniais algoritmais	36
1.4.7. Daugiakriterinis optimizavimas dalelių spiečiaus metodu.....	38
1.4.8. Daugiatiksliai sprendimų priėmimo metodai.....	38
1.4.9. Nuoseklios paieškos optimizavimo metodai.....	40
1.4.10. Hibridiniai daugiakriterinio optimizavimo metodai.....	40
1.5. Pastato integruoto vertinimo galimybės projektavimo procese	40
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	41
2. MAŽAENERGIO PASTATO APRŪPINIMO ENERGIJA SISTEMOS INTEGRUOTO VERTINIMO MODELIO SUDARYMAS.....	45
2.1. Aprūpinimo energija sprendimo įtaka pastato energiniam naudingumui	46
2.2. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelio algoritmas	47
2.3. Mažaenergio pastato pasyvių ir aktyvių energijos vartojimo efektyvumo priemonių nustatymas	49
2.3.1. Mažaenergio pastato atvejo analizei parinkimas.....	49
2.3.2. Mažaenergio pastato pasyviųjų energijos vartojimo efektyvumo priemonių parinkimas	50
2.3.3. Mažaenergio pastato aktyviųjų energijos vartojimo efektyvumo priemonių parinkimas	53
2.4. Mažaenergio pastato energijos balanso sudarymas	54
2.4.1. Vietovė ir klimato duomenys.....	57
2.4.2. Pastato naudojimo režimas	57
2.4.3. Šiluminio komforto ir oro kokybės užtikrinimas	58
2.4.4. Pastato mikroklimato sistemų darbo režimai	58
2.4.5. Pastato karšto vandens poreikis	59
2.4.6. Pastato apšvietimo ir buitinių elektros prietaisų efektyvumas	59
2.5. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos vertinimas	61
2.5.1. Pastato aprūpinimo energija sistemos struktūra ir erdvinės ribos	61
2.5.2. Atsinaujinančių energijos išteklių technologijų integravimas	63
2.5.3. Pastato aprūpinimo energija sistemos technologijų derinių modeliavimas..	65
2.5.4. Technologijų ir jų derinių energinio efektyvumo nustatymas	68
2.6. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos vertinimo modelio matematinė išraiška	69
2.6.1. Lygčių sistema energijos srautams nustatyti.....	69
2.6.2. Ribinių sąlygų nustatymas	71
2.7. Vertinimo kriterijai ir jų rodikliai.....	71
2.7.1. Energinio efektyvumo kriterijus	72

2.7.2. Poveikio aplinkai kriterijus	72
2.7.3. Ekonominio efektyvumo kriterijus	73
2.7.4. Komforto kriterijus	75
2.7.5. Funkcionalumo kriterijus	77
2.8. Daugiatikslio sprendimo priėmimo metodas	78
2.9. Kriterijų subjektyvaus reikšmingumo nustatymas porinio lyginimo metodu	80
2.10. Racionalios pastato aprūpinimo energija sistemos jautrumo analizė	83
2.11. Antrojo skyriaus išvados	85
3. MAŽAENERGIO PASTATO APRŪPINIMO ENERGIJA SISTEMOS INTEGRUOTO VERTINIMO MODELIO TAIKYMAS	87
3.1. Mažaenergio pastato energijos balanso analizė	87
3.1.1. Mažaenergio pastato šilumos ir energijos balansai	88
3.1.2. Šiluminio komforto ir oro kokybės vertinimo rezultatų analizė	90
3.2. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemų modeliavimo rezultatų analizė	93
3.2.1. Atsinaujinančių energijos išteklių technologijų techninių apribojimų analizės rezultatai	93
3.2.2. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos energinio efektyvumo analizės rezultatai	97
3.3. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal skirtingus vertinimo kriterijus	99
3.3.1. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal poveikį aplinkai	99
3.3.2. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal ekonominį efektyvumą	100
3.3.3. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal techninį funkcionalumą	101
3.4. Pastato aprūpinimo energija sistemos daugiatakslio vertinimo rezultatai	102
3.5. Racionalios pastato aprūpinimo energija sistemos jautrumo analizė pagal kriterijų reikšmingumą	105
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	111
BENDROSIOS IŠVADOS	113
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	115
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	127
SUMMARY IN ENGLISH	129

PRIEDAI*	147
A priedas. Mažaenergio pastato energinis naudingumas	148
B priedas. Pastato mikroklimato sistemų užtikrinamo šiluminio komforto parametrai nuo V1 iki V6	150
C priedas. Pastato aprūpinimo energija sistemos D1 energinio efektyvumo vertinimas	151
D priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	152
E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	157

* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of a problem	1
Relevance of the thesis	2
Research object.....	3
The aim of the thesis	3
Objectives of the thesis.....	3
Research methodology	4
Scientific novelty of the thesis	4
The practical value of the research findings	5
Defended statements.....	5
The approval of the research findings	6
The structure of the dissertation	6
1. ENERGY SUPPLY FOR LOW-ENERGY BUILDINGS AND THE OVERVIEW OF ITS ASSESSMENT METHODS	7
1.1. Low-energy buildings and their energy supply	7
1.1.1. Concepts of high efficiency buildings	8
1.1.2. Energy performance assessment of buildings	10
1.1.3. Efficiency measures of energy consumption for the energy levels of buildings rational in terms of expenditure	15
1.1.4. Efficiency measures of energy consumption for nearly-zero energy buildings	17

1.2. The significance and stages of integrated assessment of a building and its energy supply	22
1.3. The analysis of the application of modelling of a building and its energy supply	24
1.4. The analysis of applicability of optimisation methods for a building and its energy supply	28
1.4.1. The classification of optimisation methods	28
1.4.2. The aim, goal functions and design variables of optimisation	30
1.4.3. Probabilistic methods of optimisation	33
1.4.4. Analytical methods of optimisation	33
1.4.5. Multi-criteria optimisation with evolutionary algorithms.....	34
1.4.6. Multi-criteria optimisation with genetic algorithms	36
1.4.7. Multi-criteria optimisation with particle cluster method.....	38
1.4.8. Multi-criteria decision making methods	38
1.4.9. Optimisation methods of consistent search.....	40
1.4.10. Hybrid multi-criteria methods of optimisation	40
1.5. Possibilities of the integrated assessment of a building in the process of planning	40
1.6. Conclusions of the first chapter and the formulation of the objectives of the thesis	41
2. COMPILING AN INTEGRATED ASSESSMENT METHOD OF THE ENERGY SUPPLY OF A LOW-ENERGY BUILDING	45
2.1. Influence of a solution for energy supply on the energy performance of a building.....	46
2.2. The algorithm of the integrated assessment model for the energy supply of a low-energy building	47
2.3. Determining the passive and active efficiency measures of energy consumption for a low-energy building	49
2.3.1. Selecting a low-energy building for the case study	49
2.3.2. Selecting the passive efficiency measures of energy consumption for a low-energy building	50
2.3.3. Selecting the active efficiency measures of energy consumption for a low-energy building.....	53
2.4. Compiling the energy balance for a low-energy building	54
2.4.1. Location and climate data	57
2.4.2. Usage regime of a building.....	57
2.4.3. Ensuring the thermal comfort and air quality	58
2.4.4. Operating regimes of microclimate systems of a building.....	58
2.4.5. Building demand for domestic hot water	59
2.4.6. The efficiency of lighting and domestic electric appliances of a building... ..	59
2.5. Assessing the energy supply system of a low-energy building	61
2.5.1. The structure and spatial limits of the energy supply system of a building	61
2.5.2. The integration of renewable energy resources	63

2.5.3. Modelling technology combinations of energy supply system of a building.....	65
2.5.4. Determining the energy efficiency of technologies and their combinations.....	68
2.6. The mathematical expression of the LEBES assessment model.....	69
2.6.1. Simultaneous equations for determining energy flows.....	69
2.6.2. Determining limit conditions.....	71
2.7. Assessment criteria and their indicators.....	71
2.7.1. Criterion of energy efficiency.....	72
2.7.2. Criterion of environmental impact.....	72
2.7.3. Criterion of economic efficiency.....	73
2.7.4. Criterion of comfort.....	75
2.7.5. Criterion of functionality.....	77
2.8. Multi-criteria decision making method.....	78
2.9. Determining significances of the criteria.....	80
2.10. The sensitivity analysis of a rational building energy supply system.....	83
2.11. Conclusions of the second chapter.....	85
3. THE APPLICATION OF THE INTEGRATED ASSESSMENT MODEL OF THE ENERGY SUPPLY OF A LOW-ENERGY BUILDING.....	87
3.1. The analysis of the energy balance of a low-energy building.....	87
3.1.1. Thermal and energy balances of a low-energy building.....	88
3.1.2. The results of the assessment of thermal comfort and air quality.....	90
3.2. The results of the modelling of energy supply systems of a low-energy building.....	93
3.2.1. The results of the analysis of technical limits to renewable energy resources.....	93
3.2.2. The results of the energy efficiency analysis of the energy supply system of a low-energy building.....	97
3.3. Rational energy supply system of a building in terms of different assessment criteria.....	99
3.3.1. Rational energy supply system of a building in terms of environmental impact.....	99
3.3.2. Rational energy supply system of a building in terms of economic efficiency.....	100
3.3.3. Rational energy supply system of a building in terms of technical functionality.....	101
3.4. Results of the multicriteria assessment of the energy supply system of a building.....	102
3.5. Sensitivity analysis of the rational energy supply system of a building in terms of criteria significance.....	105
3.6. Conclusions of the third chapter.....	111
GENERAL CONCLUSIONS.....	113

REFERENCES 115

THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC
OF THE DISSERTATION..... 127

SUMMARY IN ENGLISH..... 129

ANNEXES* 147

 Annex A. The energy performance of a low-energy building 148

 Annex B. The parameters V1 to V6 of thermal comfort ensured by microclimate
 systems of a building 150

 Annex C. The assessment of energy efficiency of the energy supply system of a
 building D1 151

 Annex D. The co-authors agreement to present publications in the dissertation . 152

 Annex E. Copies of author scientific publications on the topic of dissertation ... 157

* The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Problemos formulavimas

Patalpų mikroklimatui sukurti tenkanti didelė globalių energijos sąnaudų dalis jau keletą dešimtmečių vis labiau domina pasaulinę bendruomenę, vis dažniau ši problema atsiduria ir politikos dėmesio centre. Todėl mažaenergio pastato efektyvaus aprūpinimo energija tyrimai yra svarbūs įgyvendinant pastatų energinio naudingumo tikslus. Siekiant padidinti energijos vartojimo efektyvumą bei atsinaujinančių išteklių energijos dalį bendrajame suvartojamos energijos balanse ir sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, moksliniuose tyrimuose taikomi įvairūs pastatų ir jų aprūpinimo energija vertinimo metodai, kuriami modeliai, pateikiamos rekomendacijos. Tačiau dėl didelio skaičiaus projektinių alternatyvų, apimančių atsinaujinančių energijos išteklių technologijas, pastato technines sistemas, įvairias pasyviąsias energijos vartojimo efektyvumo priemones, ir dėl skirtingų siekiamų tikslų racionalaus sprendinio paieškos procesas tampa sudėtingu optimizavimo uždaviniu.

Pastaraisiais metais ypatingas dėmesys skiriamas integruotam pastato energinių savybių vertinimui, sujungiant modeliavimo priemones ir optimizavimo algoritmus, tačiau universalią metodiką sudėtinga parengti, o naudojamos skirtingos metodologinės priegijos turi privalumų ir trūkumų. Pastato ir jo aprūpinimo energija integruotam vertinimui tyrimuose plačiausiai taikomi sudėtingi dau-

giakriterio optimizavimo metodai, kai tikslo funkcijos ir kintamieji yra tolydieji dydžiai. Šiais metodais gauti optimalūs, t. y. geriausi galimi, sprendiniai dažniausiai tenkina tik energinius, techninius, ekologinius ir ekonominius tikslus, o jų patikimumas nėra vertinamas. Todėl tyrimu siekiama nustatyti aprūpinimo energija sprendimo įtaką pastato energiniam naudingumui, vertinant šio sprendimo patikimumą pagal kiekybinių ir kokybinių kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmių pokyčius.

Darbo aktualumas

Pastarąjį dešimtmetį Europos Sąjunga (toliau – ES) intensyviai sprendžia energijos išteklių problemas, susijusias su priklausomybe nuo energijos importo, pasauline iškastinio kuro pasiūla ir akivaizdžia klimato kaita. Tačiau didžiausia problema yra neefektyvus vartojimas, dėl kurio visoje Europoje veltui išiekvuojama mažiausiai 20 % bendrosios pirminės energijos. Nors pastaraisiais metais energijos vartojimo efektyvumas išaugo, vis dėlto didžiausias ekonominis energijos taupymo potencialas yra gyvenamųjų ir visuomeninės paskirties pastatų sektoriuose, kur atitinkamai galima būtų sutaupyti apie 27 % ir 30 % dabar suvartojamos galutinės energijos. Vienbučiai namai sudaro didžiausią grupę ES gyvenamųjų pastatų sektoriuje – tokių namų CO₂ dujų emisijos apima apie 60 % visų šių dujų emisijų. Todėl daug tyrimų yra susiję su individualių gyvenamųjų pastatų energinių savybių optimizavimo problematika – siekiama kuo efektyviau išnaudoti šių pastatų energijos taupymo galimybes.

Atliktų tyrimų apžvalga parodė, kad daugelis jų susiję su pastatų pasyviųjų energijos vartojimo efektyvumo priemonių optimizavimu ir kad nepakankamai išnaudojamos alternatyvių aprūpinimo energija sistemų kompleksinio taikymo galimybės. Racionalus pastato aprūpinimas energija yra aktuali problema, kurios sprendimo rezultatai turi didelės reikšmės nustatant ne tik sąnaudų atžvilgiu efektyvius pastatų energinio naudingumo lygius, bet ir didinant beveik nulinės energijos pastatų skaičių. Šiame darbe racionali aprūpinimo energija sistema – tai sistema, kuri užtikrina minimalias pirminės energijos sąnaudas, beveik neįtakoja aplinkos, palaiko maksimalų komfortą patalpose, sąlygoja mažiausias bendrąsias išlaidas per visą sistemos gyvavimo trukmę ir techniniu požiūriu geriausiai atitinkanti paskirtį.

Darbe atliekamas integruotas racionali mažaenergio vienbučio namo aprūpinimo energija sistemos vertinimas, sujungiant pastato bei jo aprūpinimo energija sistemos energinį modeliavimą ir daugiatakslį diskretųjį sprendimų priėmimo metodą.

Tyrimų objektas

Šio darbo tyrimų objektas – mažaenergio vienbučio namo aprūpinimo energija sistema.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – sudaryti mažaenergio vienbučio namo aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelį, leidžiantį nustatyti racionalų sprendimą kiekybinių ir kokybinių kriterijų atžvilgiu.

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Apžvelgti moksliniuose tyrimuose taikomus pastato energijos poreikių, aprūpinimo energija sistemų, integruotų atsinaujinančių energijos išteklių technologijų modeliavimo ir optimizavimo metodus.
2. Sudaryti mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos (toliau – MPAES) integruoto vertinimo modelį, leidžiantį nustatyti racionalų sprendimą atsižvelgiant į energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir funkcionalumo (apima sistemos priežiūrą, eksploataciją, reguliavimo galimybes ir sudėtingumą) kriterijus.
3. Atlikti mažaenergio vienbučio namo variantų, kuriuos lemia skirtingos pasyviosios energinio efektyvumo priemonės, energijos poreikių modeliavimą ir nustatyti pagrindinius veiksnius, darančius poveikį pastato energiniam naudingumui.
4. Atlikti pasirinktų pastato aprūpinimo energija sistemų, kurias sudaro skirtingos energijos generavimo (transformavimo) technologijos, modeliavimą ir pateikti kiekvienos pastato aprūpinimo energija sistemos sisteminės analizės rezultatus.
5. Taikant sukurtą modelį, atlikti pastato aprūpinimo energija sistemų daugiataksių vertinimą ir nustatyti racionalią sistemą pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir funkcionalumo kriterijus.
6. Įvertinti racionalaus sprendimo patikimumą pagal kriterijų reikšmingumo reikšmių kitimą ir nustatyti kritiškiausio kriterijaus įtaką priimančiam galutinį sprendimą.

Tyrimų metodika

Darbe pastato variantų energijos poreikiams nustatyti taikoma modeliavimo priemonė „DesignBuilder“, o modeliuojant pasirinktas pastato aprūpinimo energija sistemas – priemonė „Polysun“, su kuria gauti rezultatai apdorojami taikant sisteminę analizę. Ši analizė leidžia nustatyti kiekvienos MPAES posistemio ir jo elementų tarpusavio ryšius. Modeliavimo priemonių išvesties duomenims apdoroti ir rezultatų analizei naudojamos kompiuterinės programos „MATLAB“ ir „Microsoft Excel“.

Pastato aprūpinimo energija sistema vertinama naudojant daugiatakslį sprendimų priėmimo metodą WASPAS, leidžiantį įvertinti nagrinėjamas alternatyvas ir priimti racionalų sprendimą atsižvelgiant į pasirinktus vertinimo kriterijus.

Racionalaus sprendimo patikimumui nustatyti yra taikoma jautrumo analizė, kurios tikslas – nustatyti, ar, pasikeitus kriterijų reikšmingumo reikšmėms, sprendinys išlieka vienodas ir koks kriterijus yra kritiškiausias, keičiantis derinių rangų išsidėstymą. Jautrumo analizei atlikti pasirinktas imitacinis Monte Karlo metodas, kuris pagrįstas statistiniu modeliavimu, ir gautų rezultatų (kriterijų reikšmingumo reikšmių) imčių duomenų statistinė analizė.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Šiame darbe panaudotas autorės sukurtas MPAES integruoto vertinimo modelis, kuriame pirmą kartą apjungiamą energinio modeliavimo priemonės, modifikuota energijos srautų jungtinė matrica, sudaryta „energijos centro“ (angl. *energy hub*) modelio pagrindu, daugiatakslis diskretusis sprendimo priėmimo metodas ir jautrumo analizė racionalaus sprendimo nustatymui.
2. Autorės modifikuota jungtinė matrica, apibrėžianti tiesioginį ryšį tarp pastato energijos poreikio ir pastatui tiekiamos energijos srautų, leidžia lanksčiai apjungti modeliavimo priemones ir daugiatakslio sprendimo priėmimo metodus.
3. Naudojant programinį paketą „Matlab“ ir „Microsoft Excel“, įvestas vertinimo modelio algoritmas įgalina generuoti racionalios MPAES parinkimą, keičiant sprendimo kintamuosius ir atsinaujinančios energijos technologijų integravimo scenarijus.
4. Vertinimo modelis veikia apibrėžtų tikslinių kiekybinių (energinio ir ekonominio efektyvumo, poveikio aplinkai) bei kokybinių (komforto,

funkcionalumo) kriterijų pagrindu ir leidžia gauti racionalų pastato aprūpinimo energija sprendimą konkrečiomis pastato paskirties ir klimato sąlygomis.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Šiame darbe pateiktas integruoto vertinimo modelis leistų mažai energijos vartojančio pastato planavimo ir projektavimo etape parinkti racionalią aprūpinimo energija sistemą, įvertinus galimas pasyviąsias bei aktyviąsias energijos vartojimo efektyvumo priemones ir atsinaujinančių energijos išteklių technologijas.

Modelio algoritmas yra aprašytas kompiuterinės programos „MATLAB“ aplinkoje, turinčioje rezultatų išvestį į programą „Microsoft Excel“. Todėl šį modelį galėtų taikyti vartotojas, norintis atlikti išsamią pastato energijos poreikių ir alternatyvių aprūpinimo energija sistemų analizę bei daugiataksių vertinimą.

Ginamieji teiginiai

1. Siekiant įgyvendinti aukšto energinio naudingumo pastatams keliamus reikalavimus, tikslinga taikyti modeliavimo priemonių ir optimizavimo algoritmų derinius.
2. Sudarytas MPAES integruoto vertinimo modelis yra tinkamas išsamią pastato energijos poreikių ir aprūpinimo energija sistemų analizei atlikti ir nustatyti racionalų sprendimą pagal pasirinktus vertinimo kriterijus – energinį efektyvumą, poveikį aplinkai, ekonominį efektyvumą, komfortą ir funkcionalumą.
3. Pastatų energiniam naudingumui didžiausią įtaką daro racionalios MPAES parinkimas, nes pasyviosios energijos vartojimo efektyvumo priemonės, taikomos atitvaroms, sukelia nežymų pirminės energijos ir CO₂ dujų emisijų mažėjimą bendrajame energijos balanse.
4. Šaltojo klimato zonoje esančiame mažaenergiame vienbučiame name, naudojant biokuro technologijas šilumos poreikiui užtikrinti, galima pasiekti beveik 60 % atsinaujinančių energijos išteklių (toliau – AEI) panaudojimo dalį.
5. Atsižvelgiant į bendrą pastato energijos vartojimo balansą, galima poveikį aplinkai sumažinti iki 3 kgCO₂/m² ir AEI panaudoti iki 97 %, pasirinkus biokuro ir saulės energijos technologijas pastato energijos poreikiui užtikrinti.

6. Taikant daugiatislį sprendimo priėmimo metodą, racionalaus sprendimo patikimumą lemia kritiškiausias kriterijus, kuris keičia galutinį alternatyvų prioritetų eiliškumą.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 9 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtraukta į „ISI Web of Science“ sąrašą (Džiugaitė-Tumėnienė *et al.* 2012), du – mokslo žurnaluose, esančiuose LMT patvirtintose DB (Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013; Džiugaitė-Tumėnienė ir Lapinskienė 2014), penki – recenzuojamoje Lietuvos tarptautinės konferencijos medžiagoje (Džiugaitė-Tumėnienė ir Streckienė 2014; Medineckienė ir Džiugaitė-Tumėnienė 2014; Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2013, 2011, 2010), vienas – respublikinių konferencijų medžiagoje (Džiugaitė-Tumėnienė 2013).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- 9-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ (2014 m. Vilniuje),
- 13-ojoje tarptautinėje doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencijoje „CYSENI 2013“ (2013 m. Kaune),
- 8-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ (2011 m. Vilniuje),
- 10-ojoje tarptautinėje doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencijoje „CYSENI 2010“ (2010 m. Kaune),
- respublikinėje konferencijoje „Šilumos energetika ir technologijos 2013“ (2013 m. Kaune).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, publikacijų sąrašas ir priedai. Bendra apimtis – 146 puslapiai, 34 paveikslai, 26 lentelės ir 5 priedai. Rašant disertaciją buvo panaudota 190 literatūros šaltinių.

Pirmajame disertacijos skyriuje apžvelgiami pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemų integruoto vertinimo metodai.

Antrajame skyriuje pateikiamas sudarytas mažoenergetikos pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelis.

Trečiajame skyriuje, taikant mažoenergetikos pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelį, analizuojami gauti rezultatai.

Mažaenergių pastatų aprūpinimas energija ir jo vertinimo metodų apžvalga

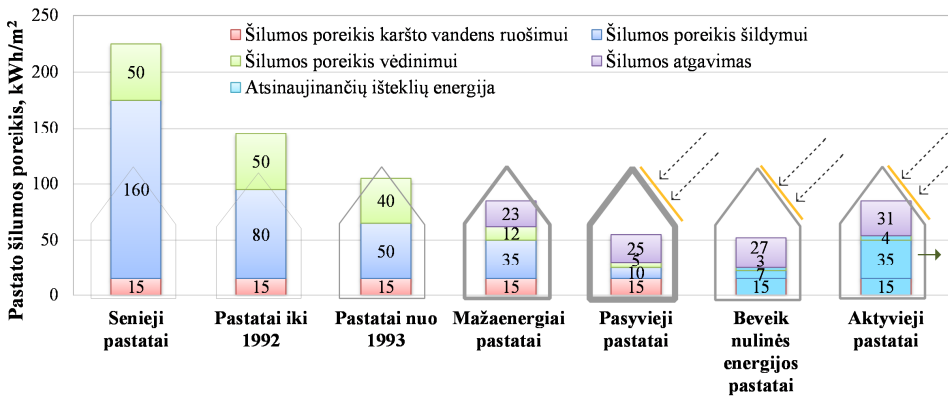
Šiame skyriuje yra analizuojami pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemų integruoto vertinimo metodai bei modeliai, taikomi moksliniuose tyrimuose ir praktikoje. Skyriaus tematika paskelbta 1 publikacija (Džiugaitė-Tumėnienė 2013).

1.1. Mažaenergiai pastatai ir jų aprūpinimas energija

Pasaulyje pamažu įgyvendinant pastatų energiniam naudingumui keliamus reikalavimus, susiformavo įvairios aukšto energinio naudingumo pastatų koncepcijos. Pastarųjų metų moksliniai tyrimai daug dėmesio skiria strategijoms, pasiūlymams ir metodams, kaip racionaliai įgyvendinti aukštą pastatų energinį naudingumą. Nors sukurtos įvairios pastatų vertinimo sistemos, taikomos pasyviosios ir aktyviosios energijos vartojimo efektyvumo priemonės būdingos visoms šiame poskyryje minimoms pastatų koncepcijoms.

1.1.1. Aukšto energinio naudingumo pastatų koncepcijos

Pastatuose suvartojama 40 % visos ES suvartojamos galutinės energijos, todėl šis sektorius turi didžiausią ekonominį energijos taupymo potencialą. Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje 2010/31/ES (toliau – Direktyva) nurodyti pastatų energinio naudingumo gerinimo tikslai skatina mažinti energijos vartojimą bei šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas ir didinti atsinaujinančių išteklių energijos naudojimą. Planuojama, kad 2050 metais Europos pastatų sektorių sudarys daugiau nei 25 % naujų statinių, pastatytų nuo 2012 metų (European Parliament and Council 2010; Commission of the European Communities 2011). Šiais tikslais ES siekia, kad naujų pastatų energijos vartojimas ir su juo susijusi aplinkos tarša būtų beveik nuliniai. Europoje, pamažu įgyvendinant sugriežtintus pastatų energiniam naudingumui keliamus reikalavimus, susiformavo 23 skirtingos aukšto energinio naudingumo pastatų apibrėžtys (Erhorn ir Erhorn-Klutzig 2011). Kiekviena sąvoka apibrėžia skirtingų energinio naudingumo lygių pastatus, tačiau visiems jiems būdingas didesnis energijos vartojimo efektyvumas nei senos statybos ir naujų standartinių pastatų (1.1 paveikslas).



1.1 pav. Pastatų metinių šilumos poreikių kaita (Handel 2011)

Fig. 1.1. The development of an annual heat demand of the buildings (Handel 2011)

Terminai „mažai energijos naudojantis pastatas“, „energiją tausojantis pastatas“, „pasyvusis namas“, „trijų litrų namas“, „beveik nulinės energijos pastatas“, „pliusinės energijos pastatas“, „energijai neimlus namas“, „labai mažai energijos naudojantis pastatas“, „autonominis pastatas“ vartojami apibūdinti energetiškai efektyvius statinius. Daugelis šių terminų yra vartojami tik vienoje valstybėje, tačiau terminai „mažai energijos naudojantis pastatas“, „pasyvusis namas“ ir „beveik nulinės energijos pastatas“ taikomi plačiau. Europos valstybės turi nacionalinius jų apibrėžimus, tačiau tie patys terminai skirtingose šalyse skiriasi ne tik pagal turinį, bet ir pagal siekiamus tikslus.

Norvegijoje, Danijoje, Švedijoje, Šveicarijoje, Austrijoje, Prancūzijoje ir Vokietijoje mažai energijos naudojančiu pastatu (*low-energy, lavenergiklasse 2015, minienergihus, minergie, klima: aktiv, effinergie, effizienzhaus 55, effizienzhaus 70*) laikomas pastatas, kurio metinės energijos sąnaudos yra daugiau nei 50 % mažesnės už įprasto pastato, suprojektuoto ir pastatyto pagal nacionalinius minimalius energijos vartojimo reikalavimus, energijos sąnaudas (Buildings Performance Institute Europe 2011). Lietuvoje mažai energijos naudojantis pastatas turi atitikti reglamento STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ reikalavimus, keliamus B, A, ir A+ energinio naudingumo klasės pastatams. Nustatyta, kad mažaenergio pastato, atitinkančio B energinio naudingumo klasę, neatsinaujinančių išteklių pirminės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui ir apšvietimui yra 1–2 kartus mažesnės už C klasės pastatų, atitinkančių minimalius reikalavimus; A klasės pastatų sąnaudos yra 2–2,67 karto mažesnės; A+ klasės pastatų – 2,67–4 kartus mažesnės (Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija 2014). Akivaizdu, kad neįmanoma lyginti skirtingose šalyse esančių mažaenergių pastatų, nes skiriasi ne tik klimato sąlygos, bet ir energinio naudingumo vertinimo metodai, nustatytosios energinio naudingumo rodiklių vertės, santykiniai dydžiai (1.1 lentelė).

Sąvoką „pasyvusis namas“ taiko Austrija, Vokietija, Čekija, Danija ir Šveicarija. Pasyvusis namas – tai pastatas, kurio šilumos poreikis šildymui neviršija 15 kWh/m², šildymo galia ne didesnė kaip 10 W/m², išorės oro infiltracija mažesnė nei 0,6 h⁻¹, o pirminės energijos poreikis neviršija 120 kWh/m² (Buildings Performance Institute Europe 2011). Daugelis ekspertų pabrėžia, kad pasyviojo namo energinis naudingumas turi būti pasiektas pasyviosiomis energijos taupymo priemonėmis, kurias įgyvendinus nereikėtų įrengti šildymo ir oro vėsinimo sistemų. Vokietijoje šių pastatų šildymui, vėdinimui ir oro vėsinimui būdingas orinis šildymas ir vėsinimas, naudojant šilumos siurblius oras-oras. Suomija ir Norvegija pasyviojo namo apibrėžimą įtraukė į nacionalinius reglamentus, tik energinio naudingumo rodikliai buvo perskaičiuoti ir pritaikyti šalčio klimato šalims (1.1 lentelė).

Per pastaruosius penkerius metus ypatingas dėmesys skiriamas beveik nulinės energijos pastatams. Siekdamas įgyvendinti Direktyvoje nustatytus tikslus, valstybės narės įsipareigojo užtikrinti, kad ne vėliau kaip nuo 2020 m. gruodžio 31 d. visi nauji pastatai būtų beveik nulinės energijos, o po 2018 m. gruodžio 31 d. viešosios valdžios institucijos, užimančios ir valdančios naujus pastatus, užtikrintų, kad jie būtų beveik nulinės energijos pastatai (angl. *nearly zero-energy building*). Literatūroje taip pat galima rasti tą pačią reikšmę turinčias sąvokas „nulinės emisijos pastatas“ arba „nulinio anglies dioksido pastatas“ (angl. *zero-emission, carbon neutral building*). Remiantis Direktyva, beveik nulinės energijos pastatas yra labai aukšto energinio naudingumo ir daugiausia vartoja atsinaujinančių išteklių energiją. Šiems pastatams apibrėžti taikomos kelios planavimo

strategijos, iš kurių viena yra metinis pastato energijos balansas. Beveik nulinės energijos pastatas suvartoja labai mažai energijos, nes, taikant AEI technologijas, pagaminama tiek energijos, koks yra metinis energijos poreikis. Lietuvoje nuo 2021 metų visi nauji pastatai ir jų dalys turės būti energijos beveik nevartojantys pastatai. Jie turės atitikti A++ energinio naudingumo klasę, tai yra energijos sąnaudos turės būti beveik lygios nuliui arba labai mažos, o didžiąją sunaudojamos energijos dalį sudarys vietoje ar netoliese pagaminta atsinaujinančių išteklių energija. Šiuo metu ES valstybėse narėse beveik nulinės energijos pastato apibrėžimas laikomas politiniu reikalavimu, kuris leistų sugriežtinti nacionaliniuose pastatų energinio naudingumo standartuose nustatytus reikalavimus (Hermelink *et al.* 2013).

Tvarių pastatų (angl. *sustainable buildings*) koncepciją apibūdina sąvokos „ekologinis pastatas“ (angl. *ecobuilding*), „žalioji pastatas“ (angl. *green building*), „bioklimato architektūros pastatas“ (angl. *bioclimate house*), „aktyvus pastatas“ (angl. *active building*). Šios sąvokos apima ekonominio, socialinio ir aplinkosaugos tvarumo aspektus. Tokie pastatai vertinami pagal įvairias vertinimo ir sertifikavimo sistemas. Vienas plačiausiai pasaulyje taikomų pastatų poveikio aplinkai vertinimo metodų ir sertifikavimo sistemų yra BREEAM (angl. *the Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), sukurtas 1990 m. Jungtinėje Karalystėje (BREEAM Communities 2012). Norvegija, Švedija, Nyderlandai, Ispanija, Kanada, Australija ir Kinija yra pritaikiusios šią sistemą savo rinkai pagal klimato sąlygas, socialinius ir kultūrinius skirtumus. Vokietijoje 2007 metais įkurta taryba DGNB (angl. *The German Sustainable Building Council*), kurios tikslas – skatinti tvarių ir ekonomiškai efektyvių pastatų statybą (DGNB 2014). JAV taiko nacionalinę žaliųjų pastatų vertinimo sistemą LEED (angl. *Leadership in Energy and Environmental Design*) (Canada Green Building Council 2009). Taigi planuojant, projektuojant ir sertifikuojuant tvarius pastatus yra vertinamas ne tik energijos vartojimo efektyvumas, bet ir komfortas, tarša, ekologija, valdymas, inovacijos, medžiagos, vandentvarka, transportas ir atliekos.

1.1.2. Pastatų energinio naudingumo vertinimas

2002 metais išleista Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2002/91/EB dėl pastatų energinio naudingumo paskatino nacionalinio lygio pastatų energijos vartojimo efektyvumo vertinimo politiką – valstybės narės privalėjo nustatyti minimalius pastatų energinio naudingumo lygius, parengti priemones pastatų energinio naudingumo sertifikavimo sistemai sudaryti ir ją įdiegti. Nauja šios direktyvos redakcija 2010/31/EB (European Parliament and Council 2010) sugriežtino pastatų energiniam naudingumui keliamus reikalavimus – šie skatino dar labiau mažinti energijos vartojimą ir išmetamo anglies dvideginio kiekį. Įgy-

vendinant šiuos tikslus, valstybės narės įpareigos ne tik, atsižvelgiant į sąnaudas, nustatyti efektyvius minimalių energinio naudingumo reikalavimų lygius (European Parliament and Council 2012), bet ir didinti nulinės energijos pastatų skaičių. Todėl pastarųjų metų moksliniai tyrimai daug dėmesio skiria strategijoms, pasiūlymams ir metodams, kaip racionaliai įgyvendinti aukštą pastatų energinį naudingumą, atsižvelgiant į klimato sąlygas, vietovės ypatybes, patalpų mikroklimato reikalavimus ir ekonominį efektyvumą.

Pastato energinis naudingumas yra dydis energijos vartojimo efektyvumui nustatyti. Kuo didesnis pastato energijos vartojimo efektyvumas, tuo mažesnis poveikis aplinkai ir didesnė investicijų grąža. Remiantis Direktyva, pastato energinis naudingumas apibrėžiamas apskaičiuotu arba išmatuotu energijos kiekiu, kuris reikalingas patenkinti pastato energijos poreikį šildymui, vėsinimui, vėdinimui, karštam vandeniui ruošti ir apšvietimui. Norint nustatyti ir palyginti naujų (esamų) pastatų energinį naudingumą, taikomos įvairios pastatų energinio naudingumo vertinimo ir sertifikavimo sistemos. Pasaulio valstybės turi savo nacionalines pastatų energinio naudingumo vertinimo ir sertifikavimo sistemas, kurios remiasi skirtingomis metodikomis (Kordjamshidi 2011; Leipziger 2013). Be egzistuojančių nacionalinių, Europoje sėkmingai taikomi savanoriški energinio naudingumo vertinimo standartai: „Minergie“ (Šveicarijoje), „Effinergie“ (Prancūzijoje), „DE Passive House“ (Vokietijoje). ES valstybės narės energijos sąnaudoms pastate apskaičiuoti ir pastato energiniam naudingumui įvertinti taiko galiojančiais Europos standartais paremtą metodiką (EN 15603; EN 15217). Šioje metodikoje vertinamos šiluminės pastato charakteristikos, šildymo ir oro kondicionavimo įranga, AEI naudojimas, pasyvaus šildymo ir vėsinimo elementai, apsauga nuo saulės, pastato konstrukcijų šiluminė talpa, patalpų oro kokybė, pastatų techninių sistemų efektyvumas, tinkama natūrali šviesa. Atlikus pastato vertinimą ir sertifikavimą, jam priskirta energinio naudingumo klasė informuoja apie energijos vartojimą pastate ir skatina energijos taupymą bei energinį efektyvumą. Pagrindinė problema, su kuria susiduria tarptautinės rinkos dalyviai, yra ta, kad Europoje taikomos nacionalinės pastatų energinio naudingumo vertinimo ir sertifikavimo sistemos skiriasi. ES nacionalinių standartų vertinimo metodika nėra universali. Todėl netikslinga būtų lyginti skirtingose šalyse esančius pastatus remiantis galutinio įvertinimo rezultatu (pastatui priskirta energinio naudingumo klase arba energinį naudingumą nusakančiu rodikliu) (Kurnitski *et al.* 2014). Pagrindiniai skirtumai atsiranda dėl pasirinktų kiekvienai šaliai būdingų specifinių reikalavimų, keliamų šiluminėms pastato atitvarų charakteristikoms, komfortui žiemą ir vasarą, palaikomiems mikroklimato parametrams (patalpos oro temperatūrai, santykiniam drėgnumui, oro greičiui), oro kokybei, AEI naudojimui, pastato orientacijai, langų įstiklinimo plotui, šilumos pritekėjimo dydžiui. 1.1 lentelėje pateikiami pagrindiniai Europos valstybėse taikomų pastatų

energinio naudingumo rodiklių ir jų vertinimo metodų skirtumai (Buildings Performance Institute Europe 2011, Kurnitski *et al.* 2014).

1.1 lentelė. Pastatų energinio naudingumo rodikliai Europoje

Table 1.1. The values of the energy performance of the buildings in Europe

Zona	Šalis	Pastato paskirtis	Rodiklis	Energinio naudingumo rodiklio vertė			Įvertinti energijos srautai	AEI naudojimas, %	Maksimali CO ₂ tarša, kg/m ²
				Mažą-energis	Pasyvusis	Beveik nulinės energijos			
Šaltojo klimato	Danija	gv.	kWh _{PE} /m ²	30+ 1000/ A	-	20	H, C, V, HW	51–56	-
		ngv.		41+ 1000/ A	-	25	H, C, V, HW, L		
	Estija	gv. (vb)	kWh _{PE} /m ²	120	-	50	H, C, V, HW,		
		gv. (db)		120	-	100	L, AP, E _{aux}		
		ngv.		130	-	100			
	Latvija	gv., ngv.	kWh _{PE} /m ²	-	-	95	H, C, V, HW, L		
	Lietuva	gv., ngv.	C ₁ C ₂	0,375– 0,5	0,25– 0,375	<0,25	H, C, V, HW, L	50	
				≤0,85	≤0,80	≤0,70			
	Norvegija	gv. (vb)	kWh/m ²	100	80	-	H, C, V, HW,	15–30	25–35
		gv. (db)		115	80	-	L, AP, E _{aux}		
		ngv.		150	75	-			
	Švedija (3 klimato zonos)	gv.	kWh/m ²	130– 90	60–68		H, C, V, HW, E _{aux}		
ngv.			Nuo 120+ 110(q – 0,35) iki 80 +70(q – 0,35)						

1.1 lentelės tęsinys. Pastatų energinio naudingumo rodikliai Europoje**Sequel of Table 1.1.** The values of the energy performance of the buildings in Europe

Zona	Šalis	Pastato paskirtis	Rodiklis	Energinio naudingumo rodiklio vertė			Įvertinti energijos srautai	AEI naudojimas, %	Maksimali CO ₂ tarša, kg/m ²
				Maža-energis	Pasyvusis	Beveik nulinės energijos			
Vidutinio klimato	Airija	gv.	kWh/m ²			45	H, V, HW, L		
	Austrija	gv.	kWh/m ²	25–45	15	-	H	A _p > 1000 m ²	
		ngv.		<60					
	Belgija (šiaurinė dalis)	gv.	kWh _{PE} /m ²			30	H, C, V,	>10 kWh/m ²	
		ngv.				40	HW, E _{aux}		
	Lenkija	gv. (vb)	kWh _{PE} /m ²	70		30–50	H, C, V, HW, L	2016: >20 2020: >40	2016: <10 2020: <3–6
		gv. (db)		90		30–50			
		ngv.		100		50–60			2016: <15 2020: <8–10
	Olandija	gv., ngv.	EPC			0	H, C, V, HW, L	-	
	Prancūzija	gv. nkn d. ngv. kn d. ngv.	kWh _{PE} /m ²			50 70 110	H, C, V, HW, L, E _{aux}	Naujiems pastatams	
Šveicarija	gv. ngv.	kWh/m ²	38 30	30 25	-	H, C, V, HW, E _{aux}	20		
Vokietija	gv., ngv.	kWh _{PE} /m ²	-	120	-	H, C, V, HW, L, AP, E _{aux}	15–50		

Literatūros apžvalga (Buildings Performance Institute Europe 2011, Kurnitski *et al.* 2014) parodė, kad pagrindiniai parametrai, lemiantys ES valstybių taikomų skaičiavimo metodų neatitikimus, yra šie:

- *Grindų plotas*. Austrijoje, Danijoje, Suomijoje ir Vokietijoje skaičiavimuose naudojami išoriniai matmenys bendrajam plotui nustatyti. Belgijoje, Prancūzijoje, Norvegijoje, Lenkijoje ir Švedijoje skaičiavimuose taikomas naudingasis plotas, nustatytas pagal vidinius matmenis. Aukšto energinio naudingumo pastatams skirtingas ploto nustatymas lemia 10–20 % besiskiriančias apskaičiuotas energijos sąnaudas;
- *Vidinis šilumos pritekėjimas*. Šaltojo klimato šalyse vidinio šilumos pritekėjimo nuo žmonių ir buitinių prietaisų reikšmės skaičiavimuose kinta 2,5–5,0 W/m². Šis skirtumas yra gana žymus vertinant aukšto energinio naudingumo pastatus ir gali lemti mažesnę pastato energijos poreikį šildymui, kai taikoma didžiausia reikšmė;
- *Šiluminis komfortas vasarą*. Vieni skaičiavimo metodai įtraukia energijos poreikį vėsinimui, jei oro vėsinimo sistema yra numatoma. Kiti metodai įvertina elektros energijos poreikį oro vėsinimui, neatsižvelgiant, ar vėsinimo sistemos yra numatomos, ar ne;
- *Pastato energinio naudingumo rodiklis*. Norvegijoje, Švedijoje, Airijoje, Austrijoje ir Šveicarijoje pastato energinio naudingumo rodiklis yra galutinės energijos poreikis. Kitose šalyse jau priimta, kad pagrindinis rodiklis yra pastato pirminės energijos poreikis. Lietuvoje ir Nyderlanduose taikomi pastato energijos vartojimo efektyvumo rodikliai;
- *Energijos srautai* pirminės energijos poreikiui nustatyti. Dažniausiai metodikose neįtraukiamas energijos poreikis apšvietimui ir buitiniams elektros prietaisams. Tačiau galima iš 1.1 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad ne visos metodikos įvertina energijos poreikį karštam vandeniui ruošti, oro vėsinimui ir pagalbinėms mechaninėms sistemoms (ventiliatoriams, cirkuliaciniams siurbliams);
- *Pirminės energijos konversijos koeficientai*. Kiekviena šalis turi savuosius koreguotus pirminės energijos konversijos koeficientus, kurių reikšmės priklauso nuo to, kaip ta energija (elektra, šiluma) pagaminta ir kokie energijos šaltiniai (mediena, dujos, atliekos) naudojami. Skirtingose Europos valstybėse neatsinaujinančių išteklių pirminės energijos faktoriaus elektros energijai reikšmė kinta nuo 2,0 iki 3,0, esant CŠT nuo 0,0 iki 1,3, naudojant gamtines dujas – nuo 1,0 iki 1,1, naudojant biokurą – nuo 0,1 iki 0,2;
- *Išorinės klimato sąlygos*, kurios tiesiogiai veikia aukšto energinio naudingumo pastatams keliamus tikslus. Šaltojo ir šiltojo klimato zonose esančiose ES valstybėse narėse taikomos ne tik skirtingos energinio

naudingumo rodiklių reikšmės bet ir energijos vartojimo efektyvumo priemonės, jų rinkiniai;

- *Pastato aprūpinimo energija sistemos ribos* (mechaninio vėdinimo sistemos su šilumos rekuperacija įtraukiamos kaip energijos taupymo priemonė arba kaip efektyvaus energijos tiekimo priemonė);
- *Atsinaujinančių išteklių energijos dalis*. Tik kelios valstybės nurodo specifinius reikalavimus atsinaujinančių išteklių energijos naudojimui ir maksimaliai CO₂ dujų taršai. Šiuo metu didelis dėmesys skiriamas atsinaujinančių išteklių energijos dalies pastato energijos balanse nustatymui, nes valstybių narių nacionaliniai skaičiavimo metodai skirtingai vertina „vietoje“, „netoliese“ ir „už teritorijos ribų“ pagamintą atsinaujinančių išteklių energiją. Danijoje ir Vokietijoje saulės elementų pagaminta elektros energija atimama iš bendrų metinių elektros energijos sąnaudų, t. y. elektra, kuri pagaminama vasaros laikotarpiu, gali būti panaudojama žiemos laikotarpiu.

Nors aukšto energinio naudingumo pastatams planuoti ir projektuoti sukurtos įvairios vertinimo sistemos, vis dėlto taikomos energijos vartojimo efektyvumo priemonės: racionalus šiluminis izoliavimas, maži skaidrių atitvarų šilumos perdavimo ir visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientai, sandarumas, pasyvosios apsaugos nuo saulės priemonės, aukšto efektyvumo vėdinimo sistema, AEI technologijų integravimas, būdingos visų minėtų pastatų koncepcijoms.

1.1.3. Energijos vartojimo efektyvumo priemonės sąnaudų atžvilgiu racionaliems pastatų energinio naudingumo lygiams

Siekiant sumažinti energijos vartojimą ir padidinti AEI naudojimą pastatų sektoriuje, ES valstybės narės yra įsipareigojusios apibrėžti energijos vartojimo efektyvumo priemones (toliau – EVEP) pastatų etalonams. Remiantis Direktyvos gairėse Nr. 244/2012 pateiktu apibrėžimu, EVEP ar jų rinkinys sudaro galutinį pastato variantą, kuriame užtikrintas efektyvus pastato aprūpinimas energija. Išskiriamos tokios EVEP:

- pasyvosios pastato atitvaroms taikomos priemonės: šiluminis izoliavimas, maži skaidrių atitvarų šilumos perdavimo ir visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientai, sandarumas, pasyvosios apsaugos nuo saulės priemonės,
- aktyviosios pastato aprūpinimo energija sistemoms taikomos priemonės: aukšto energinio efektyvumo energijos generatoriai-transformatoriai, mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija, AEI technologijų integravimas.

Pastatui taikomų EVEL parinkimą lemia ES keliami sugriežtinti reikalavimai. Taigi planuojant, projektuojant ir statant naują pastatą būtina įtraukti tas EVEL, su kuriomis būtų pasiekta sąnaudų atžvilgiu racionali susijusių investicijų ir sutaupyto energijos išlaidų pusiausvyra per visą pastato gyvavimo ciklą. Tuo tikslu valstybės narės įpareigosios nustatyti sąnaudų atžvilgiu efektyvius minimalius energinio naudingumo reikalavimų lygius pastatams, taikant lyginamosios metodikos principus, nurodytus Direktyvos gairėse Nr. 244/2012. Šiuo metu kai kurios šalys jau yra pateikusios racionalių lygių, kurie parodo energijos vartojimo efektyvumo lygį, užtikrinantį mažiausias sąnaudas, patiriamas per apytikrą pastato ekonominio gyvavimo ciklą.

Vokietijoje dabartiniai naujų pastatų energiniam naudingumui keliami reikalavimai (EnEV 2009) neatitinka reikalavimų, keliamų, atsižvelgiant į sąnaudas, racionaliems lygiams. Vienbučio ir daugiabučio gyvenamųjų namų sąnaudų efektyvų lygį galima pasiekti pastato norminius atitvarų šilumos perdavimo koeficientus (EnEV 2009) sumažinus 15 % ir numačius kondensacinį dujinį katilą su integruota saulės kolektorių sistema. Taikant šį priemonių rinkinį, vienbučio namo pirminės energijos poreikis yra apie $54 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$, o daugiabučio namo – $53 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$. Palyginti su dabartiniais reikalavimais (EnEV 2009), sąnaudų atžvilgiu efektyvūs lygiai sumažina bendrąsias išlaidas apie 12 €/m^2 vienbučiam namui ir 8 €/m^2 daugiabučiam namui. Taigi minimalius energiniam naudingumui keliamus reikalavimus vienbučiams namams reikėtų sugriežtinti 23 %, o daugiabučiams namams – 13 %, norint pasiekti sąnaudų atžvilgiu efektyvius lygius (Buildings Performance Institute Europe 2013; Enseling ir Loga 2013). Vokietijoje pasyviojo namo koncepciją galima įgyvendinti taikant 45 % sugriežtintus pastato atitvaroms keliamus reikalavimus ir aprūpinimo energija sistemų derinius, kuriuos sudaro kondensacinis dujinis katilas (arba gruntinis šilumos siurblys, arba granulinis katilas) su saulės kolektorių sistemomis bei mechaninio vėdinimo sistemomis su šilumos rekuperacija (Buildings Performance Institute Europe 2011).

Austrijoje daugiabučiams namams nustatyti priemonių rinkiniai, kurie sąnaudų atžvilgiu yra efektyvūs ir lemia pirminės energijos poreikį $30\text{--}50 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$. Šiuos priemonių rinkinius sudaro deriniai su integruota saulės kolektorių sistema arba pastatas su labai geromis šiluminėmis savybėmis ir papildomai numatyta mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija arba CŠT ir saulės kolektorių sistema (Buildings Performance Institute Europe 2013; Leutgob ir Rammerstorfer 2013).

Lenkijoje sąnaudų atžvilgiu efektyvus pastato energinio naudingumo lygis yra pasiekiamas, kai pirminės energijos poreikis yra $52\text{--}74 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$. EVEL rinkinius sudaro 42 % (naudojant anglį) ir 50 % (naudojant gamtines dujas) pagerintos pastato šiluminės charakteristikos ir iškastinio kuro technologijos. Kondensaciniai dujiniai katilai arba kietojo kuro (anglies) katilai lemia

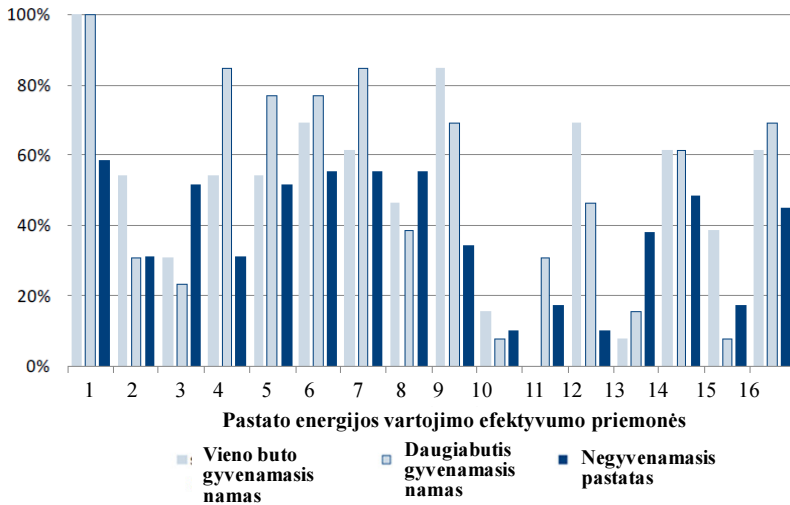
9,2–13,7 kgCO₂/m² emisijas, todėl taikant šias technologijas negalima įvykdyti sugriežtintų aplinkosaugos reikalavimų. Atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad, naudojant anglį, kaip pagrindinį energijos šaltinį, mechaninis vėdinimas su šilumos rekuperacija ir saulės kolektorių sistema yra neveiksmingos priemonės (Buildings Performance Institute Europe 2013).

Lietuvoje nustatyta, kad efektyvus lygis naujiems pastatams atitinka reikalavimus, keliamus A energinio naudingumo klasės pastatams. Ši klasė bus privaloma nuo 2016 metų naujai statomiems namams (Bliūdžius 2014).

Apibendrinant matyti, kad, siekiant įgyvendinti sąnaudų atžvilgiu efektyvius minimalius energinio naudingumo reikalavimų lygius pastatams, nepakanka numatyti norminių pastatų atitvarų šiluminių charakteristikų ir iškastinio kuro technologijų. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad į EPEP rinkinį būtina įtraukti AEI technologijas, siekiant sumažinti poveikį aplinkai.

1.1.4. Energijos vartojimo efektyvumo priemonės beveik nulinės energijos pastatams

„Beveik nulinės energijos pastato“ sąvoka taikoma apibūdinti labai aukšto energinio naudingumo pastatą, kuriame daugiausiai naudojami AEI. Taigi, atsižvelgiant į Direktyvos pateiktą tokio pastato apibrėžtį, AEI grindžiamos priemonės yra ypač svarbios. Tačiau ir pastato energinis efektyvumas, ir AEI technologijos turi apribojimų. Neįmanoma pastato energijos poreikio sumažinti iki nulio taikant tik pasyviausias energijos vartojimo efektyvumo priemones. Atsinaujinančių išteklių energijos ir jų technologijų kaina yra didelė, o norint šią energiją efektyviai panaudoti, atsiranda lokalių (t. y. vietovės klimato sąlygos, reljefas, išvystyta infrastruktūra) ir techninių apribojimų. Per pastaruosius 20 metų pasaulyje jau pastatyta apie 280 pastatų, atitinkančių beveik nulinės energijos pastatų koncepciją (Musall *et al.* 2010). Remiantis jau įgyvendintų pastatų projektais ir atliktų tyrimų rezultatais (Buildings Performance Institute Europe 2011), nustatyta, kad maksimali pirminės energijos poreikio riba turi siekti 30–50 kWh_{PE}/m², taikant sąnaudų atžvilgiu efektyvius energinio naudingumo lygius. Minimali atsinaujinančių išteklių energijos dalis, kuri atitiktų pastato energijos poreikį, turėtų būti 50–90 %. Plačiausiai taikomos EPEP yra didesnė šilumos izoliacija, šilumos pritekėjimo dėl saulės spinduliuotės panaudojimas, pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės, mechaninis vėdinimas su šilumos rekuperacija, saulės kolektoriai karštam vandeniui ruošti, efektyvūs būtiniai prietaisai, efektyvios šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (toliau – ŠVOK) sistemos (1.2 paveikslas).

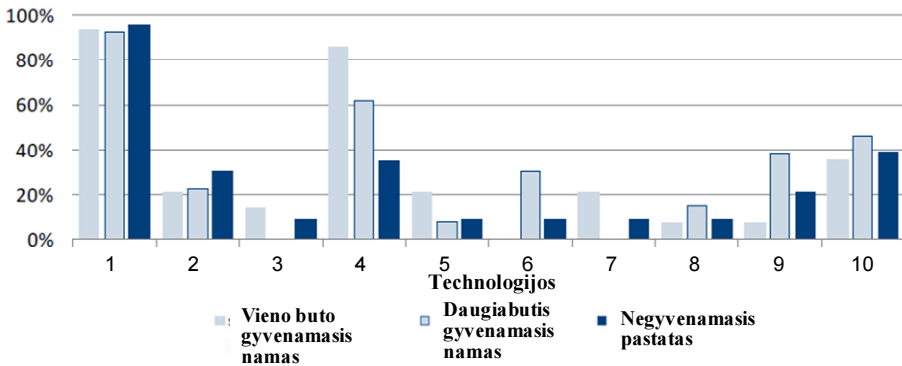


1.2 pav. Taikomos energinio efektyvumo priemonės nulinės energijos pastatuose (Musall *et al.* 2010):

Fig. 1.2. Selected energy saving measures applied in net zero energy buildings (Musall *et al.* 2010):

1 – didesnė šilumos izoliacija, 2 – didesnis šiluminis masyvumas, 3 – natūralaus apšvietimo sprendimai, 4 – šilumos pritekėjimo dėl saulės spinduliuotės panaudojimas, 5 – pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės, 6 – mechaninis vėdinimas, 7 – šilumos rekuperacija, 8 – pasyvūs vėsinimas ir vėdinimas, 9 – saulės kolektoriai karštam vandeniui ruošti, 10 – saulės kolektoriai šildymui ir karštam vandeniui ruošti, 11 – šilumokaitis gruntas-oras, 12 – efektyvūs buitiniai prietaisai, 13 – efektyvi biurų įranga, 14 – efektyvios šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemos, 15 – LED apšvietimas, 16 – kitos efektyvios priemonės.

Taikant tik iškastinį kurą naudojančias technologijas, sunku pasiekti 50 % atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimą pastato energijos balanse. Šios technologijos tampa visai netinkamos, kai į energijos balansą įtraukiamas energijos poreikis buitiniams elektros prietaisams ir reikia įgyvendinti 90 % atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimą. 90 % atsinaujinančių išteklių energijos dalį pastato energijos balanse galima pasiekti regionuose, esančiuose šiltojo klimato zonoje, kur labai intensyvus saulės spinduliavimas. Kitais atvejais – kai papildomai naudojama už teritorijos ribų pagaminta „žalioji“ elektros energija, kuri gaminama iš AEI, arba papildomai įrengiamos AEI technologijos, kurios gamina energiją vietoje. Plačiausiai elektros energijos gamybai vietoje taikomos saulės elementų sistemos, o karštam vandeniui ruošti – saulės kolektorių sistemos (1.3 paveikslas).



1.3 pav. Technologijos, taikomos įvairios paskirties pastatuose (Musall et al. 2010):

Fig. 1.3. Technologies applied in different building typologies (Musall et al. 2010):

1 – stoginiai saulės elementai, 2 – fasadiniai saulės elementai, 3 – saulės elementai šalia pastato, 4 – saulės kolektoriai karštam vandeniui ruošti, 5 – saulės kolektoriai šildymui, 6 – centralizuotos vėjo jėgainės, 7 – vėjo jėgainės ant pastato, 8 – biomasės katilas, 9 – kombinuoto ciklo jėgainė (iškastinis kuras/biomasė), 10 – šilumos siurblys.

Vienbučiuose namuose šilumos siurblių technologijos pasiekia 50 % atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimo dalį. 100 % atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimo dalį galima pasiekti, kai šilumos siurbliai naudoja už teritorijos ribų pagamintą „žaliąją“ elektros energiją arba vietoje pagamintą elektros energiją (kai ant stogo yra saulės elementų sistema). Šaltojo klimato zonoje esančiuose vienbučiuose gyvenamuosiuose namuose, kurių šilumos poreikis šildymui ir karštam vandeniui ruošti yra didesnis, galima pasiekti 90 % atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimo dalį, taikant biokurą naudojančias technologijas (tai biokuro katilai, mikrokogeneracinės jėgainės). Administracinės paskirties pastatuose, taikant biokuro ir šilumos siurblių technologijas, galima pasiekti 50 % atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimo dalį. Tačiau šių pastatų elektros energijos poreikis yra didesnis nei gyvenamųjų pastatų, todėl „žaliosios“ elektros energijos naudojimas yra geriausia alternatyva, siekiant 90 % AEI panaudojimo. Pastaruoju atveju dėl erdvės trūkumo papildomai įrengtos saulės elementų sistemos nėra tokios efektyvios technologijos kaip gyvenamuosiuose pastatuose, todėl dažniausiai įrengiamos tik tuo atveju, kai nėra kitos alternatyvos sumažinti neatsinaujinančių išteklių energijos dalį. CŠT įtraukimas į priemonių rinkinius priklauso nuo AEI naudojimo galimybių. Nesant pakankamo AEI panaudojimo pasirinkus CŠT, reikalingi papildomi sprendimai EVEP numatyti.

Įgyvendinant išmetamo CO₂ dujų kiekio mažinimo tikslus, nulinės energijos pastato energinio naudingumo rodiklis, išreiškiamas suvartojamos pirminės energijos kiekiu, turėtų būti susietas su minimaliu CO₂ emisijų kiekiu, o reikšmė

nepriklausytų nuo vietovės klimato sąlygų. Siūloma, kad nulinės energijos pastato CO₂ emisijų rodiklis būtų mažesnis negu 3 kgCO₂/m² per metus (Buildings Performance Institute Europe 2011.). Vienbučiame gyvenamajame name šią reikšmę galima pasiekti taikant biokurą naudojančias technologijas, t. y. biokuro katilus, mikrokogeneracines jėgaines. Dėl šilumos siurblių ir iškastinio kuro technologijų (tai dujiniai katilai, dujinė mikrokogeneracinė jėgainė, CŠT) CO₂ emisijų kiekis yra kur kas didesnis nei 3 kgCO₂/m² per metus. Tik taikant šilumos siurblius papildomos vietoje energiją gaminančios AEI technologijos (pavyzdžiui, saulės elementų sistemos) įrengimas sumažina CO₂ emisijų kiekį iki ribinės vertės. Nustatyta, kad nulinės energijos gyvenamųjų pastatų CO₂ emisijų rodiklio reikšmė yra pasiekama, kai pastato energijos poreikis vertinamas be elektros energijos poreikio buitiniams elektros prietaisams ir numatomos papildomos vietoje energiją gaminančios saulės elementų sistemos. Administraciniuose pastatuose tik biokurą naudojančios mikrokogeneracinės jėgainės taikymas arba „žaliosios“ elektros energijos naudojimas gali užtikrinti CO₂ emisijų ribines reikšmes. Vidutinio ir šaltojo klimato zonose pastato aprūpinimo energija sprendimai, taikant iškastinio kuro technologijas, negali įvykdyti šio apribojimo, net jei numatomos papildomos vietoje energiją gaminančios saulės elementų sistemos.

Taigi pastaruoju metu atlikti tyrimai parodė, kad kiekvienoje šalyje sprendžiami tie patys uždaviniai, t. y. energijos poreikio ir AEI balanso sudarymas, ribinių sąlygų paieška, pažangių technologijų integracija, o iš gautų rezultatų galima pastebėti bendrą pastato aprūpinimo energija sprendimų tendenciją (1.2 lentelė).

Lenkijoje sąnaudų atžvilgiu efektyvūs variantai beveik nulinės energijos vienbučiam gyvenamajam namui yra mechaninis vėdinimas su rekuperacija, 50 % pagerintos pastato šiluminės savybės, o šilumos gamybai reikėtų pasirinkti granulinį katilą arba gruntinį šilumos siurblių. Šie priemonių deriniai sutaupo apie 0,9–1,4 % metinių išlaidų. Tačiau šilumos gamybai numatytas orinis šilumos siurblys gali metines išlaidas padidinti 0,5 %. Daugiabučiams namams sąnaudų atžvilgiu efektyvūs sprendimai yra granulinis katilas su pagerintomis pastato šiluminėmis savybėmis arba granulinis katilas su mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija, dėl kurių metinės išlaidos padidėja 3,6–5,2 % – tai priklauso nuo pastato geometrijos, šildymo sistemos ir pastato tipo. Administracinės paskirties pastatams efektyvūs variantai yra pagerintos pastato šiluminės savybės, išorinės žaliuzės, efektyvi apšvietimo sistema, granulinis katilas arba gruntinis šilumos siurblys, kurie padidina metines išlaidas nuo 15,8 % iki 17,9 %. Daugiabučiam arba biurų pastatui sąnaudų atžvilgiu efektyviu variantu laikomas priemonių derinys, kurio šiluminės charakteristikos atitinka pasyviojo namo standartą, o šilumos gamybai numatytas granulinis katilas.

1.2 lentelė. Energijos vartojimo efektyvumo priemonės beveik nulinės energijos pastatų reikalavimams įgyvendinti

Table 1.2. Energy saving measures for the implementation of the requirements applied to the net zero energy buildings

Valstybė	Pastato tipas	Technologijos šilumos/vėsos ir elektros energijos gamybai	Priemonės šilumos/vėsos ir elektros energijos vartojimo efektyvumui didinti
Austrija	gv. (db)	CŠT ir saulės kolektorių sistema karštam vandeniui ruošti	–
Lenkija	gv. (vb)	Granulinis katilas	50 % pagerintos pastato šiluminės charakteristikos ir mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija
	gv. (db)	Granulinis katilas arba šilumos siurblys; saulės elementų sistema	50 % pagerintos pastato šiluminės charakteristikos; aukštingumas iki 6 aukštų
	ngv.	Granulinis katilas arba gruntinis šilumos siurblys	50 % pagerintos pastato šiluminės charakteristikos; optimizuotas įstiklintų paviršių plotas fasade; vėsinimas gruntu vandeniu; pasyviojo vėsinimo sistemos; aukštingumas iki 3 aukštų; efektyvus natūralus apšvietimo naudojimas; energijos poreikio valdymo priemonės; žmonių buvimo kontrolė
Vokietija	gv. (vb, db)	Kondensacinis dujinis katilas arba gruntinis šilumos siurblys, arba granulinis katilas su saulės kolektorių sistema	30–45 % pagerintos pastato šiluminės charakteristikos ir mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija
Kitos ES šalys	gv. (vb)	Šilumos siurblys; saulės elementai	Pasyviojo namo koncepcija su saulės kolektoriais; efektyvūs buitiniai prietaisai
	gv. (db)	Kombinuoto ciklo jėgainė; saulės elementai arba kombinuoto ciklo jėgainė	Pasyviojo namo koncepcija su saulės kolektoriais; efektyvi ŠVOK sistema
	ngv.	Šilumos siurblys; saulės elementai arba centralizuotos vėjo jėgainės arba kombinuoto ciklo jėgainė (gamybos paskirties pastatuose)	Žemos temperatūros šildymas; mechaninis vėdinimas su šilumos rekuperacija, pasyvisis vėsinimas arba aukštos temperatūros vėsinimas; mažai energijos vartojantis dirbtinis apšvietimas arba natūralus apšvietimas; reguliavimas

Tada papildomos metinės išlaidos padidėja net 22,9 % (Buildings Performance Institute Europe 2012).

Austrijoje daugiabučiui numatant CŠT ir saulės kolektorių sistemą galima pasiekti 15–20 kWh_{PE}/m² pirminės energijos poreikį. Vokietijoje vienbutis ir daugiabutis gyvenamieji namai atitiks nulinės energijos pastato koncepciją, pastato atitvaroms keliamus reikalavimus sugriežtinus 30–45 % ir atitinkamai sumažinus pirminės energijos poreikį 45–60 % taikant 1.2 lentelėje nurodytus aprūpinimo energija sistemų derinius. Nustatyta, kad vienbučiam namui ekonomiškai efektyviausias priemonių rinkinys yra 30 % sumažintos pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientų vertės, kondensacinis dujinis katilas su saulės kolektoriais ir mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija. Šis priemonių rinkinys padidina bendrąsias išlaidas apie 58 €/m². Taikant tą patį aprūpinimo energija sistemos derinį, tačiau pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientų vertes sumažinus iki 45 %, papildomos bendrosios išlaidos padidėtų apie 101 €/m². Daugiabučiam namui ekonomiškai efektyviausias priemonių rinkinys yra 30 % sumažintos pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientų vertės ir granulinis katilas. Taikant šį priemonių rinkinį, papildomos bendrosios išlaidos būtų apie 23 €/m². Pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientų vertes sumažinus iki 45 % ir numačius granulinį katilą, papildomos bendrosios išlaidos padidėtų apie 41 €/m². Taigi ekonomiškai yra nenaudinga griežtinti reikalavimus nulinės energijos pastatams, nes jie skatina papildomų bendrųjų išlaidų didėjimą nuo 2 % iki 8 % (Buildings Performance Institute Europe 2011).

Lietuvoje atlikta analizė parodė, kad 150–200 m² ploto 1–2 butų gyvenamojo namo, atitinkančio A++ klasės pastatams keliamus reikalavimus, neatsinaujinančios pirminės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, apšvietimui ir karštam vandeniui ruošti, kai naudojamas biokuras, sudaro 12 kWh_{PE}/m² (LR aplinkos ministerija 2014).

Taigi atliktų tyrimų analizė parodė, kad įgyvendinant nulinės energijos pastatų koncepcijas, reikia padidinti pastatų atitvarų šilumos izoliacijos storį (palyginti su norminėmis šiluminėmis charakteristikomis), numatyti trigubo stiklo langus, įrengti mechaninio vėdinimo sistemą su šilumos rekuperacija, šilumos gamybai pasirinkti granulinis katilus arba šilumos siurblius, įrengti saulės kolektorių ir saulės elementų sistemas.

1.2. Pastato ir jo aprūpinimo energija integruoto vertinimo reikšmė bei etapai

Siekiant įgyvendinti griežtesnius pastatų energiniam naudingumui keliamus reikalavimus (pvz., nustatyti sąnaudų atžvilgiu efektyvius pastatų energinio naudingumo lygius, didinti beveik nulinės energijos pastatų skaičių), skirtingos pa-

sviosios ir aktyviosios energijos vartojimo efektyvumą didinančios priemonės turi būti įvertintos dar prieš rengiant pastato projektą. Atliktose apžvalgose (Evins 2013, Attia *et al.* 2013, Stevanovic 2013, Machairas *et al.* 2014, Nguyen *et al.* 2014) teigiama, kad pastaraisiais metais mokslinių tyrimų, susijusių su ES tikslų įgyvendinimu, problematika – tai modeliavimu paremtas (arba automatizuotas) pastato energinių savybių optimizavimas (angl. *simulation-based or automated building performance optimization*). Kitaip tariant, tai pastato ir jo aprūpinimo energija integruotas vertinimas, per kurį, taikant modeliavimo ir optimizavimo priemones, galima įvertinti daugelį skirtingų projektinių architektūrinių ir konstrukcinių bei aprūpinimo energija sprendimų ir nustatyti racionalų jų derinį atsižvelgiant į sąnaudas, komfortą, gyvavimo ciklą užsibrėžtam tikslui, t. y. beveik nulinės energijos pastatas, pasiekti. Šiai problemai spręsti naudojamos įvairios pastato energinio modeliavimo priemonės, kurios daugiausia skirtos nustatyti pastato energinį naudingumą, poveikį aplinkai ir išlaidas. Šiuo metu sukurta apie 406 pastato modeliavimo priemonės, tačiau tik aštuoniolikoje jų yra integruotos optimizavimo priemonės, leidžiančios atlikti parametrinę analizę (Attia *et al.* 2013). Parametrinė analizė atliekama tiesiniams pastato energinių savybių optimizavimo uždaviniams spręsti, ji leidžia įvertinti pasirinktų parametrų įtaką galutiniam rezultatui. Todėl, pastato planavimo etape spręsdami netiesinius optimizavimo uždavinius ir vienu metu vertindami didelį skaičių priklausomų ir nepriklausomų parametrų, daugelis mokslininkų sujungia pastato energinio modeliavimo priemones su jų sudarytais optimizavimo algoritmais (Attia *et al.* 2013).

Per paskutinius penkerius metus tyrėjai pateikė įvairių integruoto vertinimo metodikų, kuriose panaudotos modeliavimo ir optimizavimo priemonės, taikymo pavyzdžių ir rezultatų. Hasan *et al.* (2008), atlikę tipinio vienbučio gyvenamojo namo Suomijoje optimizavimą, energijos poreikį šildymui sumažino 23–49 %. Daugelis gautų racionalių sprendinių yra tinkami siekiant įgyvendinti mažoenergiams pastatams keliamus reikalavimus. Bambrook *et al.* (2011) parodė, kad, taikant efektyvų sprendinį ekonominio efektyvumo atžvilgiu, naujo pasyviojo vienbučio gyvenamojo namo Sidnėjuje energijos poreikis šildymui ir vėsinimui yra 94 % mažesnis nei dabartinės statybos praktikos pastatų. Griego *et al.* (2012) gavo minimalių išlaidų sprendinį, kurį taikant galima sutaupyti apie 52 % metinės energijos naujuose gyvenamuosiuose pastatuose Meksikoje. Pritaikę efektyvius sprendinius ekonominio efektyvumo atžvilgiu, Ihm ir Krarti (2012) sumažino vienbučio gyvenamojo namo Tunise metinės energijos sąnaudas apie 50 %, palyginti su dabartine pastatų statybos praktika. Eisenhower *et al.* (2012), taikydami sudarytą metamodelių panaudojimo pastato optimizavime metodiką, 45 % sumažino pastato metinės energijos sąnaudas ir kartu dvigubai pagerino šiluminį komfortą. Anderson *et al.* (2006), pritaikę pastato energinio modeliavimo ir optimizavimo priemonę, pastatui pateiktos energijos kiekį sumažino iki 60 %. Ad-

ministracinio pastato Korėjoje energijos poreikį šildymui ir vėsinimui Suh *et al.* (2011) sumažino 24 % ir 33 %, taikydami euristinį ir metaeuristinį optimizavimo metodus kartu su modeliavimo priemonėmis. Sudarę administracinio pastato JAV teorinius modelius trijose klimato zonose, Wetter ir Wright (2003) sumažino pirminės energijos poreikį 7–32 %. Kampf *et al.* (2010), nustatę efektyvų nagrinėjamų atvejų derinį dideliame administraciniame pastate, esančiame vidutinio klimato zonoje JAV, sumažino pirminės energijos poreikį 20,2–29,6 %. Tačiau autoriai nustatė, kad šiltojoje klimato zonoje esančio tokio pastato bendras energijos poreikis sumažėtų tik 7,1 %. Taigi iš rezultatų matyti, kad, atlikus pastato energinį modeliavimą ir optimizavimą, pastato energijos poreikį galima būtų sumažinti 20–30 %.

Moksliniuose tyrimuose (Nguyen *et al.* 2014) pastato ir jo aprūpinimo energija integruotas vertinimas atliekamas keliais etapais:

- pirminis duomenų apdorojimo etapas, kuriame sudaromas teorinis pastato modelis, nustatoma optimizavimo problema, tikslo funkcijos, ribinės sąlygos, nepriklausomi projekto kintamieji ir jų apribojimai, pasirenkamas tinkamas optimizavimo algoritmas, kuris sujungiamas su pastato energinio modeliavimo priemone. Šiame etape atliekama jautrumo analizė leidžia nustatyti nereikšmingus kintamuosius, tokiu būdu sumažinama paieška ir padidinamas optimizavimo efektyvumas. Optimizavimo kompiuterines išlaidas mažina surogatinio (angl. *surrogate*) modelio sukūrimas, kuris laikomas supaprastintu modeliu, skirtu pastato energiniam modeliavimui;
- optimizavimo etapas, kurio pagrindinis tikslas yra tikrinti optimizavimo konvergenciją, parodančią, kada pasiekiamas galutinis rezultatas, ir nustatyti klaidas viso proceso metu;
- optimizavimo rezultatų apdorojimo ir sprendimo priėmimo etapas, per kurį rezultatų patikimumui įvertinti jie palyginami su realių arba surogatinių modelių rezultatais, atliekama jautrumo analizė.

Pastato ir jo aprūpinimo energija modeliavimo ir optimizavimo taikymo analizės pateikiamos 1.3 ir 1.4 poskyriuose.

1.3. Pastato ir jo aprūpinimo energija modeliavimo taikymo analizė

Šiuo metu pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemų modeliavimo priemonės geba imituoti beveik visus kompleksinius fizikinius reiškinius, vykstančius pastato atitvarose (pvz., sandarumą, šiluminius ilginčius tiltelius, šilumos izoliaciją, šilumos nuostolius, šešėliavimą), pastato viduje bei techninėse sistemose. Pagrindi-

niai įvesties duomenys, reikalingi pastato savybėms modeliuoti, yra klimato duomenys, pastato geometrija, konstrukcijų charakteristikos, žmonių buvimo grafikai, techninių sistemų parametrai ir veikimo strategijos. Modeliavimo priemonių išvesties duomenys dažniausiai apima pastato energijos poreikį, šilumos ir vizualinio komforto įvertinimą, natūralaus apšvietimo vizualizavimą. Kai kurios iš priemonių vartotojui pateikia CO₂ emisijų kiekį, gyvavimo ciklo sąnaudas ir metines išlaidas. Nguyen *et al.* (2014) pateikė dažniausiai moksliniuose tyrimuose taikytas pastato ir jo aprūpinimo energija sistemų modeliavimo priemones: „EnergyPlus“ (37,2 %), TRNSYS (35,3 %), DOE-2 (10 %), ESP-r (5,6 %), „eQUEST“ (2,7 %), „Ecotect“ (2,7 %) ir kitas (6,7 %). Tiesiniai pastato energinių savybių optimizavimo uždaviniai spęsti taikant parametrinę analizę (Jaber ir Ajib 2011, Ruiz ir Romero 2011, Wang *et al.* 2009).

Pastato savybėms vertinti ir optimizuoti naudojami trijų tipų modeliai: analitiniai, surogatiniai (metamodeliai) ir detalieji. *Analitiniai modeliai* dažniausiai taikomi sprendžiant vieno tikslo problemą, kuri aprašoma matematiškai. Šių modelių privalumas tai, kad, pritaikius atitinkamus optimizavimo algoritmus, galima lengviau rasti tikrąjį efektyvųjį sprendinį, o gautus tarpinius rezultatus panaudoti išsamesnėje analizėje. Keletas mokslininkų, pritaikę analitinius modelius, atliko pastato energinio naudingumo optimizavimą gyvavimo ciklo sąnaudų atžvilgiu (Čiuprinskas 1999, Harvey 2009, Hasan *et al.* 2008, Florides *et al.* 2002, Peippo *et al.* 1999, Wang *et al.* 2005). Čiuprinskas (1999) sudarė matematinį pastato gyvavimo ciklo energijos sąnaudų ir su jomis susijusių aplinkos taršos bei ekonominių išlaidų modelį. Pagrindiniai kriterijai – energijos sąnaudos, tarša ir išlaidos – buvo išreikšti suminių pastato gyvavimo ciklo sąnaudų – energijos, ekonominių ir ekologinių – funkcijomis, kurios leido šiuos kriterijus minimizuoti taikant matematinį optimizavimo algoritmą. Peippo *et al.* (1999), pritaikę holistinį optimizavimo metodą, sudarė analitinį modelį, kuriuo buvo siekiama nustatyti efektyvius gyvenamųjų ir komercinės paskirties pastatų projektinius kintamuosius, kurie lemtų mažiausias gyvavimo ciklo sąnaudas atsižvelgiant į konkrečias projekto specifikacijas ir energijos suvartojimo tikslus. Autoriai vienu metu, taikydami Hooke-Jeeves algoritmą, optimizavo skirtingus kintamuosius, susijusius su pastatų forma (t. y. orientacija, įstiklintų atitvarų plotu), konstrukcijomis (t. y. įstiklinimo tipu), AEI (t. y. saulės kolektorių plotu, saulės elementų plotu) ir techninėmis sistemomis (t. y. mechaninio vėdinimo sistemomis su šilumos rekuperacija, apšvietimo tipu ir valdymu). Čiuprinskas, Peippo ir kiti mokslininkai nustatė, kad svarbu nagrinėti pastatą kaip vieną sistemą, nes projektiniai sprendimai yra glaudžiai susiję, todėl būtina projektinius kintamuosius optimizuoti vienu metu. Šį teiginį patvirtino Diakaki *et al.* (2008) – jie, panaudoję nuoseklios paieškos optimizavimo metodus: tikslo programavimą, kompromiso programavimą ir globalaus kriterijaus metodą, sudarė savarankišką efektyviai energiją vartojančio pastato analitinio vertinimo modelį. Auto-

riai minimizavo pastato statybos išlaidas ir energijos sąnaudas, kai pagrindiniai optimizavimo kintamieji buvo sienų izoliacija ir langų charakteristikos. Rezultatas parodė, kad bet koks vieno kintamojo sumažėjimas lemia padidėjimą kitų kintamųjų. Sudėtingumas siejamas su energijos vartojimo efektyvumo kintamųjų skaičiaus optimizavimu. Pagrindinis šio metodo taikymo trūkumas – tai kriterijaus, apibūdinančio šiluminį komfortą, įvertinimas. Tai yra pagrindinė problema optimizuojant pastato energijos vartojimo modelį, kur didelį skaičių kintamųjų reikia optimizuoti tuo pačiu metu, kai pastato energijos poreikis ir išlaidos turi būti sumažintos iki minimumo. Harvey (2009) išanalizavo gyvenamųjų ir komercinių pastatų Kanadoje energijos efektyvumo priemones ir nustatė, kad didėjant pastato atitvarų izoliacinio sluoksnio storiui, mažėja pastatų atitvarų gyvavimo ciklo sąnaudos. Siekiant nustatyti energijos vartojimo efektyvumo priemones, kurios sumažintų metinį pastato energijos poreikį vėsinimui, Florides *et al.* (2002) atliko pastato, esančio Kipre, parametrinę analizę, taikydami modeliavimo priemonę TRNSYS (Thermal Energy System Specialists 2014). Projektinius kintamuosius sudarė oro apykaita patalpose, pastato konstrukcijų tipai, šiluminės savybės, langų tipai, užtendymo (šešėliavimo) priemonių matmenys, pastato forma ir orientacija, lėmę pastato vėsos poreikį. Taikant gyvavimo ciklo analizę, mokslininkai nustatė, kad padidinus stogo izoliaciją ir atnaujinus langus, t. y. vieno stiklo paketą pakeitus į dvigubo stiklo paketą su mažu saulės praleisties koeficientu, atsipirkimo laikotarpis yra nuo 3 iki 5 metų. Šiuo atveju efektyvios priemonės sąnaudų atžvilgiu yra stogo izoliacija ir efektyvūs langai. Pylsy ir Kalema (2008) atliko mažą energijos pastato gyvavimo ciklo jautrumo analizę – jie išnagrinėjo keturis pastato izoliavimo ir sandarumo lygius, tris vėdinimo sistemų su šilumos rekuperacija tipus ir devynis šildymo sistemų tipus. Analizė parodė, kad pastato atitvarų šilumos izoliacijos storio padidinimas yra efektyviausias būdas sumažinti šilumos poreikius šildymui. Tyrimo rezultatai taip pat parodė, kad, parinkus geoterminį šilumos siurblių šildymui, gyvavimo ciklo sąnaudų atžvilgiu efektyvus sprendimas yra minimalus pastato izoliacijos storis. Optimizuojant pastatą, Schlueter *et al.* (2009) pasiūlė taikyti pastato informacinį modelį, kuris įvertina pastato energijos balansą ir eksergiją. Šis analitinis optimizavimo metodas, įvertinantis energijos šaltinių kokybę, lemia didesnę priemonių lankstumą ieškant efektyvių sprendinių konkrečiam pastatui.

Surogatiniai modeliai, arba metamodeliai, – tai statistiniai modeliai, kurie sudaromi keliais etapais. Pirmiausia, taikant pastato energinio modeliavimo priemonę, sukuriama detalus pastato teorinis modelis, kuris daug kartų išbandomas imituojant skirtingus atvejus. Tokiu būdu sugeneruojama išvesties duomenų bazė, kuri apdorojama statistiniu būdu. Chlela *et al.* (2009) sudarė metamodelį eksperimentų metodo (angl. *Design of Experiments*, DOE) pagrindu. Šis statistinis metodas yra plačiai taikomas parametrinei analizei atlikti ir ieškant tinkamo artimo modelio, kuris būtų arčiau tikrojo, bet paprasčiau ir greičiau pa-

leidžiamas. Tyrimo tikslas buvo įvertinti administracinio pastato Prancūzijoje energijos poreikį ir galutinės energijos sąnaudas trijose šalies klimato zonose. Skaitmeninis modeliavimas buvo atliktas taikant „SIMBAD Toolbox“, išvystytą „CSTB Matlab“ kompiuterinėje programoje, „Simulink“ aplinkoje (Khoury *et al.* 2005). Metamodelis sudarytas šių parametrų įvertinti: sienų, stogo, grindų ir langų šilumos perdavimo koeficientams, langų saulės praleisties koeficientams, horizontalioms užtemdymo priemonėms, langų ir sienų santykiui, pastato šiluminei inercijai, pastato vidiniams šilumos šaltiniams, sandarumui, oro apykaitai. Išvystyti metamodeliai atvejų analizei atlikti parodė gerus metinio pastato šilumos poreikio ir galutinės energijos sąnaudų rezultatus. Mažiau tikslūs rezultatai buvo gauti vertinant metinį pastato vėsos poreikį. Eisenhower *et al.* (2012) sudarė metodiką metamodelių naudojimui optimizuojant pastatą. Autoriai pritaikė metamodelį, kuriame įvertinta per 1 000 parametrų, ir optimizavo pastato energijos sąnaudas ir šiluminį komfortą. Šie pasiūlyti metamodeliai gali būti naudojami vietoje komercinių pastatų energinio modeliavimo priemonių, vertinant mažoenergių pastatų energinį naudingumą, ieškant efektyvių sprendinių pastato konstrukcinei daliai ir techninėms sistemoms. Kur kas sudėtingesnę metamodelį sudarė L. Magnieris ir F. Haghghatas (Magnier ir Haghghat 2010). Autoriai atliko pastato daugiakriterį optimizavimą, naudodami pastato energijos modeliavimo priemonę TRNSYS, genetinį algoritmą ir neuroninį tinklą. Taikant TRNSYS, gyvenamojo namo šiluminio komforto ir energijos sąnaudų optimizavimui buvo sukurtas pastato metamodelis, kuris patikrintas su realiais atliktų matavimų duomenimis. Pastato elgsenai charakterizuoti panaudotas modeliavimu paremtas dirbtinis neuroninis tinklas (angl. *Artificial Neural Network*). Pastato optimizavimui pritaikytas daugiakriteris genetinis algoritmas NSGA-II (angl. *Multi-objective Genetic Algorithm*), kuris įvertino galimus sprendimus. Gautiems atvejams buvo sukurta duomenų bazė, naudojant „Latin Hypercube“ metodą ir „GenOpt“ automatizavimo įrankį. Pasirinktas pastato optimizavimo metodas parodė, kad, integravus dirbtinį neuroninį tinklą į genetinį algoritmą, įmanoma greičiau įvertinti galimus sprendimus. Taigi šie autorių siūlomi metamodeliai yra tinkami metodai, padedantys pasirinkti energijos vartojimo efektyvumą didinančias priemones ir priimti racionalius projektinius sprendinius.

Detalieji pastato imitaciniai modeliai sudaromi naudojant pastato energinio modeliavimo priemones. Hasan *et al.* (2008) pritaikė pastato energinio modeliavimo priemonę „IDA ICE“ (EQUA 2014) kartu su integruota optimizavimo priemone „GenOpt“ (Lawrence Berkeley National Laboratory 2014), siekdami minimizuoti individualaus vienbučio gyvenamojo namo gyvavimo ciklo sąnaudas. Šio tyrimo rezultatai parodė, kad esant didesniam izoliacinio sluoksnio storiiui ir mažesnėms langų šilumos perdavimo koeficientų reikšmėms, palyginti su Suomijos nacionalinėmis statybos normomis, gyvenamųjų pastatų šilumos poreikį šildymui galima sumažinti 23–49 %. Pastato energijos modeliavimo prie-

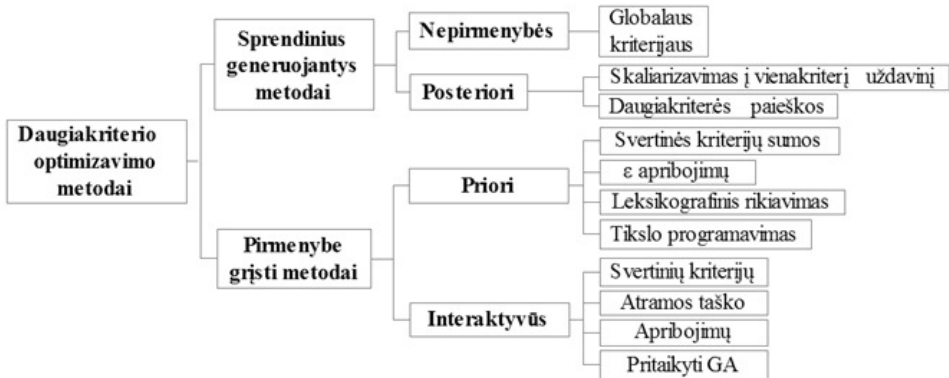
monė „IDA ICE“ ir optimizavimo priemonė „GenOpt 2.0“ panaudotos ir optimizuojant gyvenamojo namo Sidnėjuje modelį (Bambrook *et al.* 2011). Tyrime analizuojamas pastatas, kuris atitinka NSW ir darnumo rodiklio (BASIX) reikalavimus. Pastato energinis naudingumas optimizuotas atsižvelgiant į gyvavimo ciklo sąnaudas. Šio darbo rezultatai, palyginti su norminiais BASIX reikalavimais, parodė, kad taikant pastato energinio modeliavimo ir optimizavimo priemones galima efektyviai sumažinti patalpoms šildyti ir vėsinti reikalingą energijos poreikį iki 94 % ir grynąją dabartinę vertę, atsižvelgus į statybos išlaidas ir energijos sąnaudas šildymui, vėdinimui, vėsinimui ir elektros energijai, per 20 metų laikotarpį. Išsiaiškinta, kad efektyvūs sprendimai gauti nustatius optimalius sienų ir stogo šilumos perdavimo koeficientus, sumažinus langų šilumos perdavimo koeficientus, pagal pastato orientaciją optimizavus įstiklintų paviršių plotus, numačius užtemdymo priemones, sumažinus oro infiltraciją, numačius vėdinimo oro kiekių reguliavimą bei naktinį vėdinimą vasarą.

1.4. Pastato ir jo aprūpinimo energija optimizavimo metodų taikymo analizė

1.4.1. Optimizavimo metodų klasifikacija

Optimizavimo uždavinių sprendimas yra vienas iš pastato ir jo aprūpinimo energija integruoto vertinimo etapų. Šiame etape labai svarbu teisingai pasirinkti tinkamą optimizavimo algoritmą, atitinkantį tyrimo metu sprendžiamą problematiką. Bendruoju atveju optimizavimo algoritmai yra skirstomi į lokaliuosius arba globaliuosius, euristinius arba metaeuristinius, deterministinius arba stochastinius, išvestinius arba neišvestinius, pagrįstus populiacija arba trajektorija, vieno tikslo arba daugiakriterius metodus (Nguyen *et al.* 2014). Pastaraisiais metais atliktų mokslinių tyrimų apžvalgos parodė, kad sprendžiant problemas, susijusias su energijos vartojimo efektyvumo didinimu pastatuose, dažniausiai taikomi daugiakriterio optimizavimo metodai. Šiuo metu sukurta daug tokių metodų, jie gali būti klasifikuojami įvairiai. Viena iš populiariausių klasifikacijų remiasi tuo, ar Pareto optimalūs sprendiniai yra generuojami, ar negeneruojami (Cohon 1985). Išskiriamos dvi grupės (1.4 paveikslas):

- sprendinius generuojantys metodai (angl. *Generating Methods*),
- pirmenybe grįsti metodai (angl. *Preference Based Methods*).



1.4 pav. Daugiakriterio optimizavimo metodų klasifikacija (Filatovas 2012)

Fig. 1.4. The classification of the multicriteria optimization methods (Filatovas 2012)

Sprendinius generuojančiais metodais randama tiksli Pareto aibė arba jos aproksimacija, ir keletas nedominuojančių sprendinių yra pateikiami sprendimų priėmėjui (SP) (angl. *Decision Maker, DM*), kuris iš jų pasirenka vieną tinkamiausią. Optimizuojant šiais metodais nenaudojama jokios informacijos, susijusios su kriterijų svarbumu. Pirmenybe grįstuose metoduose atsižvelgiama į kriterijų svarbą. SP turi formaliai išryškinti kriterijus, kuriems teikia pirmenybę, ir ta informacija naudojama optimizuojant pasirinktu šios grupės metodu.

Daugiakriterio optimizavimo metodai gali būti klasifikuojami pagal tai, kaip SP dalyvauja uždavinio sprendimo procese. Atsižvelgiant į tai, kad SP priima galutinį sprendimą, didelis dėmesys skiriamas daugiakriteriam sprendimų priėmimui, t. y. uždavinių, turinčių daugiau negu vieną kriterijų, sprendimui. Tačiau sprendžiant tokius uždavinius daugiakriterio optimizavimo metodais randami keli Pareto optimalūs sprendiniai. Sprendimų priėmėjas turi pasirinkti vieną iš jam priimtinausių. Kai sprendimas vyksta keliais etapais, SP nukreipia sprendimo eigą, pasinaudodamas savo žiniomis apie sprendžiamą uždavinį ir atsižvelgdamas į siekiamus tikslus. Todėl kuriamos ir tiriamos kompiuterizuotos sprendimų paramos sistemos, kurios padėtų SP interaktyviai spręsti daugiakriterius optimizavimo uždavinius ir dalyvauti sprendimo procese naudojant informacines technologijas, duomenis, modelius ir žinias (Filatovas 2012). Sprendimų paramos sistemos gali būti skirtos (Zavadskas *et al.* 2006):

- priimti daugiakriterius sprendimus remiantis alternatyvomis (angl. *Multiple Attribute Decision Making, MADM*),
- priimti daugiakriterio optimizavimo sprendimus (angl. *Multiple Objective Decision Making, MODM*).

Pagrindinis skirtumas tarp šių dviejų metodų yra alternatyvų nustatymas. Pirmu atveju (MADM) SP tikslas – pasirinkti vieną iš baigtinės aibės alternaty-

vų (sprendinių). Tam yra sukurti įvairūs metodai, kurie surikiuoja arba suklasifikuoja alternatyvas, atsižvelgiant į kelis sprendimo priėmėjo prioritetus bei poreikius. Antru atveju (MODM) sprendiniai iš anksto nėra žinomi ir SP tikslas yra rasti sprendinį arba sprendinius, kurie atitiktų SP reikalavimus. Tam tikslui naudojami daugiakriterio optimizavimo metodai. Čia formuojamas tiesinių arba netiesinių funkcijų rinkinys, atsižvelgiant į uždavinyje siekiamus tikslus. Po to šios funkcijos yra optimizuojamos. Vėliau SP pasirenka jį tenkinantį sprendinį. Pagal pasirinktą optimizavimo metodą sprendiniai ir gautų sprendinių skaičius gali būti skirtingi (Filatovas 2012).

Pastato ir jo aprūpinimo energija optimizavimas atliekamas keliais etapais. Pirmajame etape nustatomi pagrindiniai projektiniai kintamieji ir jiems taikomos ribinės sąlygos. Taikant pastato energinio modeliavimo priemones, sukuriama pastato ir jo aprūpinimo energija sistemų imitacinis modelis. Nustatomos tikslo funkcijos ir pasirenkamas optimizavimo algoritmas, kuris labiausiai tinka optimizavimo problemai spręsti.

1.4.2. Optimizavimo tikslas, tikslo funkcijos ir projektiniai kintamieji

Optimizavimo metodai taikomi sprendžiant įvairias pastato planavimo ir projektavimo problemas, siejamas su pastato šilumine talpa, orientacija, architektūriniais ir konstrukciniais sprendiniais, šiluminiu komfortu, natūraliu apšvietimu, pastato techninėmis sistemomis, gyvavimo ciklo analize, energijos sąnaudomis, statybų išlaidomis ir pastato valdymu. Pagrindinis optimizavimo tikslas – rasti minimalią arba maksimalią tikslo funkcijos vertę, pasirinkus atitinkamą skaičių kintamųjų, priklausomų nuo ribinių sąlygų.

Evinso (2013) atlikta optimizavimo metodų, taikomų tvarių pastatų projektavimui, apžvalga parodė, kad apie 60 % pastato optimizavimo tyrimų buvo pasirinktas vieno tikslo funkcijos optimizavimas. Tačiau, įgyvendinant realių pastatų projektus, susiduriama su tikslais, kurie vienu metu prieštarauja vienas kitam, kai siekiama minimalių pastato energijos sąnaudų ir maksimaliai galimo šiluminio komforto lygio arba minimalių statybos išlaidų. Šioms problemoms spręsti sparčiai plėtojamas daugiakriterio optimizavimo metodų taikymas. Magnier ir Haghghat (2010) gavo Pareto optimalų sprendinį šiluminio komforto ir energijos sąnaudų atžvilgiu. Wang *et al.* (2005, 2006) pasiūlė optimizavimo algoritmą gyvavimo ciklo išlaidų ir poveikio aplinkai suderinamumui optimizuoti. Taip pat keletas mokslininkų sudarė daugiatiskslio optimizavimo algoritmus, siekiant ekonominio efektyvumo ir poveikio aplinkai mažinimo tikslų (Evinso *et al.* 2012, Fesanghary *et al.* 2012, Hamdy *et al.* 2011). Siekdami minimalaus poveikio aplinkai, tačiau tuo pat metu garantuodami reikalingą užtikrinti mikroklimatą patalpose, Rapone ir Saro (2012) optimizavimo pastato fasadą. Taigi apžvelgus

taikomus optimizavimo metodus, 1.3 lentelėje pateikiami apibendrinti pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemų optimizavimui taikomi būdingi kriterijai ir tikslo funkcijos.

1.3 lentelė. Pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemų optimizavimui taikomi kriterijai ir tikslo funkcijos

Table 1.3. Criteria and objective functions applied to the optimization of the buildings and their supply energy systems

Energinio efektyvumo kriterijus	Poveikio aplinkai kriterijus	Ekonominio efektyvumo kriterijus	Komforto kriterijus	Funkcionalumo kriterijus
Pirminės energijos poreikio mažinimas	Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų į aplinką mažinimas	Bendrųjų išlaidų per pastato gyvavimo trukmę mažinimas	Šiluminio komforto didinimas	Sistemos funkcionalumo didinimas
Aprūpinimo energija sistemos energinio / ekserginio efektyvumo didinimas	Atsinaujanančių energijos išteklių naudojimo didinimas	Investicijų atsipirkimo laiko trumpinimas	Oro kokybės didinimas	Sistemos lankstumo didinimas
Aprūpinimo energija sistemos valdymo ir reguliavimo didinimas		Aprūpinimo energija sistemos veikimo ir eksploatacinių metinių išlaidų mažinimas	Natūralaus ir dirbtinio apšvietimo efektyvus derinimas	Patogumo eksploatuoti didinimas
Atsinaujanančių energijos išteklių naudojimo didinimas			Triukšmo lygio mažinimas	

Apibendrinant galima teigti, kad tyrimuose dažniausiai optimizuojamos poveikio aplinkai mažinimo, energinio ir ekonominio efektyvumo didinimo tikslų funkcijos, kurios lemia atitinkamų projektinių kintamųjų pasirinkimą.

Optimizavimo projektiniai kintamieji skirstomi į diskrečiuosius (t. y. pastato elementai) ir tolydžiuosius (t. y. projektiniai parametrai) kintamuosius. Atliktų pastato optimizavimo tyrimų apžvalga parodė, kad šių dviejų kintamųjų tipų naudojimas vienu metu žymiai apsunkina optimizavimo eigą, padidina kompiuterinių išteklių (atminties, darbo sąnaudų) poreikį. Todėl siūloma vengti diskrečiųjų kintamųjų taikymo optimizavimo procese. Wetter (2009) nustatė, kad projektinių kintamųjų skaičius optimizavimo metu turėtų būti sumažintas iki 10, siekiant tikslumo, aiškumo. Todėl prieš optimizavimo procesą siūloma atlikti įvedamų projektinių kintamųjų jautrumo analizę, kuri parodytų, kurie iš kinta-

mųjų turi didžiausią įtaką siekiant optimizavimo tikslo. Būdingais projektiniais kintamaisiais laikomi pastato forma, orientacija, sienų matmenys, sienų ir stogo storis, medžiagos, langų tipas, langų ir sienų santykis, pastato šiluminė talpa, sandarumas, apšvietimo intensyvumas, techninių sistemų charakteristikos, užtemdymo priemonės. Attia *et al.* (2013) pasiūlė juos suskirstyti pagal pasirinktą optimizavimo tikslą:

- pastato išplanavimas ir forma (Adamski 2007, Kampf ir Robinson 2010, Wang *et al.* 2006, Turrin *et al.* 2011),
- pastato geometrija, orientacija, langų ir kitų angų išdėstymo tankumas (Wright ir Mourshed 2009, Rapone ir Saro 2012),
- pastato konstrukcijos, joms naudotos medžiagos (Wetter ir Wright 2004, Attia *et al.* 2012, Suga *et al.* 2010, Caldas ir Norford 2003),
- šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemų dydžio nustatymas (Caldas ir Norford 2003, Fong *et al.* 2006),
- ŠVOK sistemų valdymo parametrai, strategijos (Clarke *et al.* 2002),
- šiluminis komfortas (Asadi *et al.* 2012, Griego *et al.* 2012, Lee *et al.* 2011, Mossolly *et al.* 2009, Nassif *et al.* 2005, Magnier ir Haghight 2010, Stavrakakis *et al.* 2012, Bouchlaghem 2000),
- ŠVOK sistemų deriniai (Wright *et al.* 2008),
- energijos akumuliacijos valdymas (Henze *et al.* 2005) ir automatinis modelio kalibravimas (Liu ir Henze 2006),
- pastato apvaskalo ir ŠVOK sistemų vienalaikis optimizavimas (Charron ir Athienitis 2006, Wetter ir Wright 2004, Wang *et al.* 2005, Hasan *et al.* 2008, Palonen *et al.* 2009, Hamdy *et al.* 2009, Hamdy *et al.* 2010, Bichiou ir Krarti 2011),
- pastato konstrukcijų ir ŠVOK sistemų dydžio ir sistemų stebėsenos valdymo vienalaikis optimizavimas (Brownlee ir Wright 2012),
- pastato konstrukcijų ir ŠVOK sistemų elementų ir aprūpinimo energija sistemos, integruojant AEI, vienalaikis optimizavimas (Verbeeck ir Hens 2007, Christina *et al.* 2010, Diakaki *et al.* 2010, Hamdy *et al.* 2013, Hamdy *et al.* 2012).

Literatūros apžvalga parodė, kad optimizavimo metodais gaunama didelė įvairovė sprendinių, tinkančių pasiekti užsibrėžtus tikslus. Todėl parinkimas tinkamų projektinių kintamųjų ir tikslo funkcijų yra esminiai elementai optimizavimo procese.

1.4.3. Tikimybiniai optimizavimo metodai

Tikimybiniai optimizavimo metodai paremti racionalaus išrinkimo teorija, o projektiniai variantai lyginami pagal vidutinio naudingumo kriterijų. Jiems priskiriamos sistemų parinkimo metodikos, scenarijų analizė, sprendimų medis, statistinis modeliavimas Monte Karlo metodu. Tačiau pagal šias metodikas gauti rezultatai nėra tinkamiausias variantas norint rasti optimalų sprendimą. Dažniausiai šie metodai padeda įvertinti vieną arba du nagrinėjamos sistemos naudingumo rodiklius, kurie yra optimizuojami, neanalizuojant visos sistemos elementų. Taip pat sunkumų kyla, jei sistemos konstruktyvieji parametrai yra daugiamačiai ir jiems įvertinti reikia daug kompiuterinių resursų, o gautos reikšmės gali turėti didelių paklaidų.

Racionalioms hibridinėms aprūpinimo energija sistemoms parinkti buvo pritaikyti tikimybiniai optimizavimo metodai (Protogeropoulos *et al.* 1997, Celik 2003, Tina ir Gagliano 2011). Protogeropoulos *et al.* (1997) pristatė du savarankiškų saulės elementų ir vėjo jėgainės hibridinių sistemų parinkimo metodus. Abu šie metodai įvertino sistemų naudingumą atsižvelgiant į du kriterijus: energijos galios santykį ir akumuliacijos galios santykį. Tačiau vienas metodas buvo sudarytas pagal vidutinį metinį sistemos naudingumą, kitas – pagal blogiausio mėnesio galimą scenarijų. Atsižvelgus į bendras sistemos išlaidas, optimaliu sistemos deriniu pasirinkta tik saulės elementų sistema. Celik (2003) pasiūlė šiems metodams alternatyvią metodiką, kurioje taikomas sistemos veikimo standartinis nuokrypis randant racionalų sistemos derinį. Atsižvelgdamas į tyrimo rezultatus, kai sistemos derinys yra nustatomas pagal blogiausio mėnesio galimą scenarijų, autorius pasiūlė atsarginio energijos šaltinio įdiegimą į sistemą, o ne didinti visos sistemos elementų. Tina ir Gagliano (2011) sudarė tikimybinių metodą taikant tikimybės tankio funkciją (angl. *probability density function*), siekdami įvertinti ilgalaikį hibridinių saulės-vėjo jėgainių sistemų energinį efektyvumą.

1.4.4. Analitiniai optimizavimo metodai

Analitiniuose optimizavimo metoduose vyrauja sprendimo užbaigtumas pagal priimtus kriterijus. Šiems metodams būdinga teorinė sprendimą lemiančių veiksnių analizė. Pastato ir jo aprūpinimo energija sistemų imitacinis modeliavimas taikant modeliavimo priemones („EnergyPlus“, TRNSYS, HOMER, „RETScreen International“, DER-CAM, HYBRIDS, „Hybrid2“, FACES, MESSAGE, IDA ICE) ir jautrumo analizė laikomi analitiniais optimizavimo metodais. Šie metodai plačiai taikomi hibridinių aprūpinimo energija sistemų modeliavimui ir atsinaujinančių energijos išteklių integravimo analizei (Dufo-Lopez *et al.* 2009; Kaldellis *et al.* 2009; Khatod *et al.* 2010; Connolly *et al.* 2010).

1.4.5. Daugiakriterinis optimizavimas evoliuciniais algoritmais

Daugiakriteris evoliucinis algoritmas (angl. *Multi-objective Evolutionary Algorithm*) yra modernus euristinis paieškos metodas su daugiatikslėmis problemomis, jis priskirtas sprendinius generuojančiam Posteriori metodui (Filatovas 2012). Įvairių evoliucinių skaičiavimų istorija prasidėjo XX a. šeštajame dešimtmetyje. Tuo pat metu mokslininkai ir kiti specialistai pradėjo naudoti kompiuterius savo eksperimentams modeliuoti. Iš evoliucinių skaičiavimų išsivystė evoliuciniai algoritmai. Evoliuciniai algoritmai skirstomi į genetinius algoritmus (sprendžiami diskrečiosios optimizacijos uždaviniai), evoliucines strategijas (skirtos uždaviniams su tolydziaisiais kintamaisiais), evoliucinį programavimą ir genetinį programavimą. Evoliucinių algoritmų kombinavimas su kitais kompiuteriniais skaičiavimo metodais, tokiais kaip neuroniniai tinklai, neraiškiosios logikos sistemos, kitomis euristinėmis paieškomis, lokaliąja paieška, tabu paieška, yra intensyviai vystomas tik pastaruju metu. Evoliuciniai algoritmai turi komponentus, procedūras arba operatorius. Pagrindiniai komponentai yra individų atrankos mechanizmas reprodukcijai, funkcija, rekombinacijos mechanizmas – naujų individų gamyba iš tėvų porų, naujų individų rekombinacijos ir/arba mutacijos mechanizmas, naujų individų pozicionavimo populiacijoje mechanizmas.

Pastaruju metu atlikti moksliniai tyrimai parodė platų evoliucinių algoritmų pritaikymą daugiaparametrių funkcijų optimizavimui. Daugelis uždavinių yra suformuluoti kaip optimalaus sprendimo ar kažkokios reikšmės paieška, kur reikšmė gali reikšti sudėtingą funkciją, priklausomą nuo daugelio įvedamų parametų. Dažniausiai ir reikia rasti tas parametų reikšmes, su kuriomis funkcijos reikšmė būtų kuo tikslesnis tenkinantis atsakymas ar skaičius. Kitu atveju gali būti, kad visiškai nebūtinas atsakymo reikšmės tikslumas. Tada svarbiausia pasirinkti optimalų skaičių, kuris geriausiai tinka pagal užduotus parametrus. Tokiais atvejais naudojami evoliuciniai algoritmai. Tai metodas rasti tinkamas reikšmes. Evoliucinis algoritmas išsiskiria tuo, kad gali manipuluoti daugeliu įvestų parametų vienu metu. Todėl dabartiniai moksliniai darbai, kurie skirti pastato ir jo aprūpinimo energija sistemų optimizavimui, parodė didėjantį evoliucinių skaičiavimo metodų, tinkamų daugiakriterėms problemoms spręsti, taikymą. Labiausiai paplitusi optimizavimo strategija yra NSGA-II, pasiūlyta Debo ir Pratapo (2002). Pagrindinė problema, egzistuojanti dabartiniuose algoritmuose, – tai pirmalaikė konvergencija, kurią lemia populiacijos įvairovės žymus sumažinimas. Pelet *et al.* (2005) pateikė holistinį metodą, kuris supaprastina integruotų aprūpinimo energija sistemų projektavimą. Metodą sudaro superstruktūra, t. y. visų ištirtų technologijų modelių rinkinys, ir daugiakriteris optimizavimas taikant evoliucinį algoritmą. Sudarytas optimizavimo algoritmas leido iš superstruktūros išrinkti geriausią integruotą energijos gamybos technologijos variantą, kuris yra patrauklus bendrųjų išlaidų atžvilgiu ir mažiau teršiantis aplinką. Šiame darbe buvo pasirinktos dvi tikslo funkcijos: bendrosios išlaidos ir CO₂ dujų

emisijos. Trims viešbučiams ir miesteliui Tunise buvo numatyta aprūpinimo energija sistema, kurią sudarė saulės elementų sistema, dyzelio generatoriai, saulės kolektoriai, karšto vandens akumuliacinės talpyklos ir adiabatinio aušinimo bokštas.

Dufo-Lopez ir Bernal-Agustin (2005) teigia, kad dėl hibridinės aprūpinimo energija sistemos optimizuojamų tikslo funkcijų netiesiškumo ir sudėtingumo evoliucinių algoritmų, kaip ir genetinių algoritmų, taikymas generuoja geresnius rezultatus negu naudojant klasikinius optimizavimo metodus. Todėl Bernal-Agustin ir Dufo-Lopez (2009) ir Kaundinya *et al.* (2009), taikydami sudarytus evoliucinius algoritmus, pateikė savarankiškų hibridinių aprūpinimo energija sistemų optimizavimą. Šiuose tyrimuose sprendžiamos problemos – tai išlaidų, sistemų patikimumo, projektavimo ir kontrolės, pastatymo ir priimtinos galios optimizavimas.

Ekserginė energijos vartojimo analizė ir evoliucinis algoritmas buvo pritaikyti Pekino miesto šilumos tiekimo sistemai optimizuoti (Li *et al.* 2004). Tyrimo rezultatai parodė, kad specifinis kuro suvartojimas ir atitinkamos emisijos gali būti žymiai sumažinti įgyvendinus atvirkštinio ciklo šildymo sistemą. Daugiakriteris optimizavimas, taikant evoliucinį algoritmą, atliktas nustatant sąveiką tarp išlaidų ir aplinkosaugos rodiklių.

Ahmadi *et al.* (2012) pritaikė evoliucinį algoritmą, optimizuojant poligeneracinės aprūpinimo energija sistemos, užtikrinančios šildymą, vėsinimą, elektros tiekimą ir karšto vandens tiekimą, projektinius parametrus. Šiame tyrime pasirinktos dvi tikslo funkcijos: bendrosios sistemos išlaidos, kurios susijusios su kuro kainomis ir aplinkosaugos poveikiu, ir sistemos ekserginis efektyvumas. Bendrosios sistemos išlaidos minimizuojamos, o sistemos technologijų ekserginis efektyvumas maksimizuojamas.

Abedi *et al.* (2012) panaudojo diferencialinio evoliucinio algoritmo kartu su neapibrėžtumo teorija metodą optimizuojant hibridinę aprūpinimo energija sistemą, sudarytą iš saulės elementų, vėjo jėgainės, dyzelio generatoriaus, vandens baterijų technologijų. Pagrindinis optimizavimo tikslas buvo tuo pat metu minimizuoti bendrąsias sistemos išlaidas, neužtikrintą apkrovą, kuro emisijas, atsižvelgiant į atsinaujinančių energijos išteklių nepastovumą. Tyrimo autoriai teigia, kad pasiūlytas metodas yra tinkamas bet kokiam hibridinių energinių sistemų deriniui.

Apžvelgti daugiakriterio optimizavimo atvejai, kai taikomi evoliuciniai algoritmai, parodė, kad dažniau šie sudėtingi metodai taikomi sudėtingų hibridinių aprūpinimo energija sistemų optimizavimui.

1.4.6. Daugiakriterinis optimizavimas genetiniais algoritmais

Genetiniai algoritmai priklauso daugiakriterio optimizavimo metodams ir priskiriami sprendinius generuojančiam Posteriori metodui. Genetinių algoritmų formulavimas buvo pasiūlytas XX amžiaus antrojoje pusėje ir kilęs iš metaeuristinių metodų šeimos. Pirmasis jį sugalvojo J. H. Hollandas 1960 metais (Filatovas 2012). Genetiniai algoritmai energetinių sistemų optimizavimo uždaviniuose sėkmingai pradėti taikyti XX amžiaus paskutiniame dešimtmetyje. Jų veikimas yra pagrįstas gyvosios gamtos evoliucija. Taigi jie imituoja natūraliosios atrankos procesą. Pagrindinės sąvokos, kurios vartojamos modeliuojant biologinės evoliucijos procesus, yra „individai“ ir „populiacija“. Individas yra atskiras sprendinys, o populiacija – sprendinių aibė (grupė, rinkinys). Turėti individus nepakanka. Reikia įvertinti jų tinkamumą. Individo tinkamumas siejamas su tikslo funkcijos reikšme duotajam sprendiniui. Šių algoritmų darbo rezultatai yra interpretuojami kaip ir gyvosios gamtos evoliucijoje išliekantys tik vertingiausi individai. Taigi sprendžiant pastato ir jo aprūpinimo energija sistemų optimizavimo uždavinį siekiama suformuoti, kuo geresnį sprendinį, t. y. sprendinį su kuo mažesne tikslo funkcijos reikšme. Vienas didžiausių genetinių algoritmų trūkumų yra tas, kad jie labai lėti. Konak *et al.* (2006) atliko apžvalgą ir aprašė genetinį algoritmą (toliau – GA), sukurtą specialiai daugiataklėms netiesinėms problemoms spręsti.

Znouda *et al.* (2007) pritaikė genetinį algoritmą optimizuojant stačiakampio formos pastatą, atsižvelgiant į energijos sąnaudas ir išlaidas. Autoriai pasiūlė du nepriklausomus optimalius sprendinius esant Viduržemio jūros klimato sąlygoms. Wright ir Farmani (2001) panaudojo GA pastato konstrukcijų, techninių sistemų dydžių ir kontrolės strategijos vienalaikiam optimizavimui. Yi ir Malkawi (2009) optimizavo pastato formą. Charron ir Athienitis (2006) pateikė GA pagrindu sudarytą optimizavimo priemonę, skirtą nulinės energijos saulės architektūros namo projektui optimizuoti. Tuhus-Dubrow ir Krarti (2009) sukūrė panašią optimizavimo metodiką – jie, naudodami GA, parinko geriausius keleto pastatų apvaskalų savybių derinius, norėdami optimizuoti energijos poreikį ir gyvavimo ciklo sąnaudas. Coley ir Schukat (2002) sudarė pastato šiluminį modelį, sujungtą su genetinio optimizavimo algoritmu, užtikrinantį pastato optimalius statybos sprendinius. Šis tyrimas nagrinėjo tik šiaurinėje Europos dalyje esančio pastato šilumos poreikį šildymui, o išlaidų analizė nebuvo įtraukta.

Wang *et al.* (2005) panaudojo gyvavimo ciklo analizės metodiką ir daugiakriterio optimizavimo GA, optimizuodami pastato projektines galimybes aplinkos apsaugos ir ekonominio efektyvumo atžvilgiu. Tyrimo autoriai pateikė išsamią analizę jau atliktų tyrimų, kurie nagrinėjo, kaip vienu metu optimizuoti pastato energinį naudingumą ir išlaidas, įtraukiant įkūnytąją energiją, ir kaip panaudoti optimizavimo modelį su rezultatais pastato projektavimo etape. Šiame

tyrime daugiausia dėmesio skiriama energijos poreikiui patalpų šildymui ir vėsinimui, o į pastato medžiagų įkūnytąją energiją neatsižvelgiama.

Ooka ir Komamura (2009) naudojo genetinius algoritmus ieškodami optimalaus projekcinio metodo pastato aprūpinimo energija sistemoms. Kayo ir Ooka (2010) pasiūlė naują optimalų pastato aprūpinimo energija sistemų projektavimo metodą, kurį taikant randama efektyviausia sistema optimizuojant galimų sistemų veikimą ir nustatant sistemų technologijų optimalias galias. Optimizavimui taikomas genetinis algoritmas, sprendžiantis netiesines optimizavimo problemas. Tyrimo rezultatai parodė, kad siūlomas metodas yra tinkamas optimizavimui ir gali būti taikomas sudėtingoms aprūpinimo energija sistemoms optimizuoti.

GA yra pirmas populiarus metodas, taikomas hibridinių AEI technologijų sistemų daugiakriteriam optimizavimui, sprendžiant didelės apimties ir kombinuotas optimizavimo problemas (Alonso *et al.* 2011). Dufo-Lopez ir Bernal-Agustin (2006) panaudojo GA hibridinės aprūpinimo energija sistemos, sudarytos iš saulės elementų, dyzelio generatoriaus, vandenilio baterijų technologijų, valdymo strategijai optimizuoti. Masoum *et al.* (2010) patobulino GA optimalios hibridinės sistemos, sudarytos iš saulės elementų ir vėjo jėgainės, pastatymo vietai parinkti tarp duotų vietovių. Taip pat patobulintas GA buvo sukurtas siekiant optimizuoti hibridinę AEI technologijų sistemą atsižvelgiant į jos veikimą per visą gyvavimo trukmę (Zeng *et al.* 2010).

Moksliniuose darbuose genetiniai algoritmai plačiai taikomi sprendžiant optimalaus hibridinės aprūpinimo energija sistemos dydžio nustatymo problemas. Kalantar ir Mousavi (2010) nustatė hibridinės sistemos, sudarytos iš vėjo mikroturbinos ir saulės elementų, optimalų dydį ir minimalias sistemos metines išlaidas. Ould Bilal *et al.* (2010) optimizavo hibridinės sistemos, sudarytos iš vėjo jėgainės ir saulės elementų, dydį minimizuodami metines sistemos išlaidas ir galios tiekimo nuostolių tikimybes. Koutroulis *et al.* (2006) pasiūlė optimalų dydį savarankiškos aprūpinimo energija sistemos, sudarytos iš saulės elementų ir vėjo jėgainės. Yang *et al.* (2008) rekomendavo optimalaus dydžio nustatymo metodą, optimizuojant hibridinės saulės elementų ir vėjo jėgainės technologijų sistemos su akumuliacija derinį. Optimalaus sistemos dydžio nustatymo metodas buvo sukurtas parenkant optimalų sistemos derinį, kuris tenkintų reikalingos elektros energijos tiekimo nuostolių tikimybę su minimaliomis sistemos metinėmis išlaidomis.

Genetiniai algoritmai taip pat apima pastato aprūpinimo energija bei techninių sistemų veikimo valdymo optimizavimo problemas (Huang ir Lam 1997; Obara ir Kudo 2003) ir yra taikomi kogeneracinėms jėgainėms optimizuoti (Abdollahi ir Meratizaman 2011).

1.4.7. Daugiakriterinis optimizavimas dalelių spiečiaus metodu

Dalelių spiečiaus optimizavimas (toliau – DSO) – tai vienas iš stochastinio optimizavimo algoritmų, pagrįstų populiacija. Tai algoritmas, sukurtas pagal dalelių srauto judėjimo teoriją ir skirtas netiesinėms optimizacijos problemoms spręsti (Freitas Vaz ir Fernandes 2006). Dalelių spiečiaus optimizavimo metodas, kaip ir evoliuciniai skaičiavimo metodai (evoliuciniai algoritmai, genetiniai algoritmai), pagrįstas sprendinių populiacijų manipuliavimu ir kooperavimosi principu. Sistema yra nustatoma su atsitiktinių sprendimų populiacija ir ieško optimumo atnaujinant generacijas. Tačiau, skirtingai nuo GA, šis metodas neturi evoliucijos operatorių, pavyzdžiui, kryžminimo ir mutacijos. Dalelių spiečiaus optimizavime galimi sprendimai, vadinami dalelėmis, skrenda per problemos erdvę, sekdami paplitusias optimalias daleles. Kiekviena dalelė stebi savo koordinates, susijusias su pasiektu geriausiu sprendimu problemos erdvėje. Kita geriausia vertė, kuri yra stebima dalelių spiečiaus optimizavimo, yra gaunama bet kokios dalelės kaimynystėje. Kai dalelė apima visą populiaciją, yra gaunama globali geriausia vertė. Palyginti su kitais optimizavimo metodais, DSO metodu gaunami geresni rezultatai greičiau ir su mažesnėmis darbo sąnaudomis.

Rapone ir Saro (2012), panaudoję DSO algoritmą, optimizavo administracinių pastatų fasadų formą. Literatūroje daugiau DSO algoritmų taikymo pavyzdžių yra susiję su hibridinių aprūpinimo energija sistemų optimizavimu. Kaviani *et al.* (2009) pristatė patobulintą DSO algoritmą optimaliam hibridinės savarankiškos aprūpinimo energija sistemos, sudarytos iš saulės elementų, vėjo jėgainės ir vandenilio baterijų, parinkimui ir projektavimui minimizuojant metines hibridinės sistemos išlaidas. Hakimi ir Tafreshi (2009) pritaikė DSO optimalaus dydžio hibridinei savarankiškai aprūpinimo energija sistemai nustatyti minimizuojant sistemos bendrąsias išlaidas. Boonbumroong *et al.* (2011) optimizavo elektros energijos tinklą, sujungtą su savarankiška hibridine sistema, derinį, minimizuojant bendrąsias išlaidas per sistemos gyvavimo laiką. Šiam tikslui buvo panaudota optimizavimo priemonė „HOMERpro“. Moghaddam *et al.* (2011) pristatė pritaikytą modifikuotą DSO hibridinės atsinaujinančių energijos išteklių technologijų sistemos, sujungtos su rezervine hibridine sistema (vėjo mikroturbina, kuro elementai), optimaliam veikimui nustatyti. Pagrindinis šio tyrimo tikslas – palyginti galios neatitikimą arba išsaugoti perteklinę energiją, kai jos reikia.

1.4.8. Daugiatiksliai sprendimų priėmimo metodai

Literatūros analizė parodė, kad daugiakriterio optimizavimo sprendimų priėmimo (MODM) metodai plačiai taikomi parenkant AEI technologijų racionalius derinius įvairiuose sektoriuose (Cormico *et al.* 2003) ir planuojant AEI plėtrą,

kai siekiama aprūpinimo energija sistemų ekonominio efektyvumo (Borges ir Antunes 2003).

Daugiatiksliai sprendimų priėmimo remiantis alternatyvomis (MADM) metodai naudojami AEI technologijų integravimo ir planavimo projektuose (Pohekar ir Ramachandran 2004). MADM metodų grupei priskiriami AHP (angl. *Analytical Hierarchy Process*), PROMETHEE (angl. *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*), ELECTRE, MAUT (angl. *Multi-attribute Utility Theory*), VIKOR, TOPSIS metodai, kurie dažniausiai taikomi energetikos sektoriuje. AHP metodas taikomas planuojant AEI (Wang ir Feng 2002) bei vėjo jėgainių integravimo projektuose (Lee *et al.* 2009). PROMETHEE metodas taiko porinį alternatyvų palyginimą, kuris surikiuoja alternatyvas pagal kriterijų reikšmingumą. Metodas pritaikytas geoterminėms technologijoms (Haralambopoulos ir Polatidis 2003). Cavallaro (2009) naudojo šį metodą vertindamas saulės šiluminės energijos technologijas. ELECTRE metodas gali valdyti kokybinius ir kiekybinius kriterijus, užtikrindamas baigtą alternatyvų surikiavimą. Metodas parenka alternatyvas, kurios labiausiai atitinka kriterijus. Iteracinis procesas yra taikomas klasifikuojant alternatyvas. Šio metodo taikymas AEI planavimo projektuose yra pateikiamas Beccali *et al.* (2003) ir Georgopoulou *et al.* (1997) darbuose. Papadopoulos *et al.* (2008) pritaikė ELECTRE III metodą decentralizuotoms aprūpinimo energija sistemoms optimizuoti atsižvelgiant į energinį efektyvumą, poveikį aplinkai ir ekonominį racionalumą. Autoriai, taikydami šį metodą, panaudojo pseudokriterijus su ribomis – jie leido nustatyti duomenų netikslumą ir neapibrėžtumą. VIKOR ir TOPSIS metodai, išplėtoti kaip alternatyvos ELECTRE metodui, pateikia daugiakriterio klasifikavimo rodiklį, sudarytą remiantis bendros funkcijos „kuo arčiau idealaus“ sprendimu. San Cristobal (2011) pateikia VIKOR metodo taikymą AEI parinkimo projektuose. VIKOR metodas sujungtas su AHP tam, kad pagal svarbumą surikiuoti skirtingi kriterijai leidžia sprendimo priėmėjui (toliau – SP) sistemiškai nustatyti santykinės svarbos vertes atributams pagal pagedavimus. Tyrimo rezultatai parodė, kad biomasės jėgainės atvejis yra geriausias pasirinkimas, palyginti su vėjo ir saulės elementų jėgainių alternatyvomis. Alanne *et al.* (2007) pateikė gyvenamojo namo Suomijoje aprūpinimo energija sistemos, kurią sudarė mikrokogeneracinė jėgainė, daugiatislį vertinimą pagal gyvavimo ciklo sąnaudas ir poveikį aplinkai. Analizei pasirinkta PAIRS (angl. *Preference Assessment by Imprecise Ratio Statements*) metodika, kuri sudaryta pagal daugiatislį sprendimų priėmimo remiantis alternatyvomis teoriją. Ši metodika priklauso priori optimizavimo metodų grupei, išryškinant kriterijus, kuriems teikiama pirmenybė. SP pats parenka pasirinkto kriterijaus tikslo funkciją, kuri bus minimizuojama, ir nustato kitų kriterijų reikšmių viršutines ribas.

1.4.9. Nuoseklios paieškos optimizavimo metodai

Nuoseklios paieškos optimizavimo metodas yra pritaikytas beveik nulinės energijos pastatams optimizuoti (Christensen *et al.* 2005) ir padeda parinkti optimalias pastato formas, atitvarų konstrukcijas, technines sistemas (Tuhus-Durow ir Krarti 2010; Bichiou ir Krarti 2011). Ihm ir Krarti (2012) pritaikė nuoseklios paieškos metodiką energetiškai efektyvių vienbučių gyvenamųjų pastatų Tunise optimizavimui minimizuojant pastatų gyvavimo ciklo energijos sąnaudas ir didinant jų energinį naudingumą. Autoriai nagrinėjo EVEP pirminiam pastato projektui su konkrečiomis gyvavimo ciklo sąnaudomis. Atvejo analizė parodė, kad pagal gyvavimo ciklo sąnaudas ekonomiškai efektyviausią šių priemonių paketą sudarė didesnė stogo šilumos izoliacija, sumažinta oro infiltracija, efektyvių šildymo, vėsinimo, apšvietimo ir buitinių elektros prietaisų įrengimas. Autoriai teigia, kad nuoseklios paieškos optimizavimo metodas gali užtikrinti optimalų sprendinių variantų rinkinį, kuris leistų sutaupyti energijos tiek, kiek norima, ir sumažintų gyvavimo ciklo sąnaudas, kol bus pasiektas optimalus sprendimas. Taigi optimalus būdas pasiekti įvairių lygių energijos vartojimo taupymus mažiausiomis gyvavimo ciklo sąnaudomis galimas taikant nuoseklios paieškos optimizavimo metodą (Anderson *et al.* 2006; Christensen *et al.* 2004).

1.4.10. Hibridiniai daugiakriterinio optimizavimo metodai

Hibridiniais optimizavimo metodais laikomi optimizavimo metodų deriniai. Vienas iš daugelio taikymo pavyzdžių yra modifikuoti genetiniai algoritmai, kai vienu metu naudojama modeliavimo programa, GA ir dirbtinis neuroninis tinklas (Magnier ir Haghihat 2010). Hasan *et al.* (2008), pritaikė hibridinį DSO metodą ir Hooke-Jeeves algoritmą, minimizavo gyvenamojo namo gyvavimo ciklo sąnaudas. Kampf ir Robinson (2010) pateikė hibridinio pritaikymo evoliucinę strategiją su diferencialiniu vertinimu siekdami optimizuoti saulės energijos naudojimą pastate. Hamdy *et al.* (2012) pritaikė GA bei deterministinių algoritmų derinį ir nustatė, kad gaunami sprendiniai yra patikimesni, arčiau Pareto optimumo, be to, pasiekama geresnė konvergencija.

1.5. Pastato integruoto vertinimo galimybės projektavimo procese

Akivaizdu, kad planuojant ir projektuojant aukšto energinio naudingumo pastatus reikalingas efektyvus jų vertinimo procesas, kuris apimtų pastato savybių modeliavimo ir optimizavimo metodus. Šiuo metu pastato kūrimo, projektavimo, statybos etapuose taikant pastato informacinį modelį (angl. *Building Infor-*

mation Modeline, BIM) nesunku visą informaciją apie pastatą iš architektūrinių modelių perkelti į pastato modeliavimo priemones. Tačiau daugelis modeliavimui skirtų priemonių negali pasiūlyti daugiakriterio optimizavimo, kuris automatiškai vertintų alternatyvius sprendinius, spręstų netiesines optimizavimo problemas ir ieškotų racionalaus sprendinio pagal pasirinktas tikslo funkcijas. Šiuo metu moksliniuose tyrimuose taikomi integruoto vertinimo atvejai, kuriuose sujungiamos modeliavimo priemonės ir daugiatis optimizavimo algoritmai, yra gana sudėtingi ir būtų sunkiai pritaikomi projektavimo etape. Nguyen *et al.* (2014) atliktame tyrime nurodo pagrindines problemas, susijusias su optimizavimo priemonių integravimu į įprastinį pastato vertinimo procesą. Autoriai pateikė dažniausiai taikomas pastato savybių optimizavimo priemones: „Altair HyperStudy“, „BEopt“, „BOSS quattro“, DAKOTA, GENE_ARCH, „GenOpt“, „GoSUM“, „iSIGHT“, „jEplus+EA“, „LionSolver“, „MatLab toolbox“, MOBO, „modeFRONTIER“, „ModelCenter“, „MultiOpt 2“, „Opt-E-Plus“, „ParadisEO“, TRNOPT, ir jų galimybes. Jie nustatė, kad viena iš daugelio optimizavimo priemonių integravimo techninių kliūčių yra ta, jog daugelis skirtingiems tikslams taikomų priemonių neturi bendrų sąsajų ir nėra pritaikytos jungtiniam taikymui. Taip pat sunku suderinti skirtingų optimizavimo metodų atliekamo vertinimo proceso galimybes – tikslumą ir paprastumą, pajėgumą ir praktiškumą, lankstumą ir vizualizavimą, efektyvumą ir laiko sąnaudas. Pagrindiniai veiksniai, kurie turės įtakos optimizavimo priemonių taikymui praktikoje, yra dabartinių kompiuterių skaičiavimo greitis bei nacionalinė politinė strategija, kuri paskatintų aukšto energinio naudingumo pastatų optimizavimą projektavimo etape.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Literatūros analizė parodė, kad netikslinga lyginti skirtingose šalyse esančius mažaeenergius pastatus, nes skiriasi ne tik klimato sąlygos, bet ir energinio naudingumo vertinimo metodai, kuriais nustatyti energinio efektyvumo rodikliai. Pastarųjų rodiklių reikšmių skirtumus lemia kiekvienai šaliai būdingi specifiniai reikalavimai, keliami šiluminėms pastato atitvarų charakteristikoms, komfortui žiemą ir vasarą, palaikomiems mikroklimato parametrams, oro kokybei, AEI naudojimui, pastato orientacijai, langų įstiklinimo plotui, šilumos pritekėjimo dydžiui.
2. Mokslinių tyrimų apžvalga parodė sparčiai didėjančią dėmesį strategijoms, pasiūlymams ir metodams, kaip efektyviai pasiekti aukštą pastatų energinį naudingumą atsižvelgiant į išorės klimato sąlygas, vietovės ypatybes, patalpų mikroklimato reikalavimus ir ekonominį efektyvumą. Šiam tikslui įgyvendinti tyrimuose taikomos pastato energinio mode-

liavimo priemonės ir optimizavimo metodai. Sukurtos ir nuolat tobulinamos modeliavimo priemonės taikomos plačiai, tačiau jų jungtinis naudojimas kartu su optimizavimo metodais yra aktuali, dar besivystanti ne tik mokslinių tyrimų kryptis, bet ir integruoto statybos projekto rengimo bei vystymo etapų dalis.

3. Modeliavimu pagrįstas pastato energinių savybių optimizavimas apima sudėtingus pastato energinio modeliavimo išvesties duomenis, daugiatakslias problemas, projektinių kintamųjų, modelio ir apribojimų neapibrėžtumus bei sąlygoja aukštą skaičiavimo kainą. Pagrindinės priežastys, lemiančios ribotą pritaikymą praktikoje, yra sudėtingumas, neapibrėžtumas, pateiktose metodikose trūksta sisteminio požiūrio, sujungiant skirtingas modeliavimo priemones ir optimizavimo metodus, nėra pastato ir jo aprūpinimo energija kompleksinio vertinimo.
4. Tyrimais nustatyta, kad evoliuciniai algoritmai labiau tinkami efektyvių sprendimų globaliai paieškai. Šių metodų pagrindinis trūkumas yra tas, kad gauto globalaus optimumo patikimumą sumažina žymus pastato modeliavimo rezultatų neapibrėžtumas. Genetiniai algoritmai santykinai lengvai sprendžia pastato ir jo aprūpinimo energija projektines, veikimo bei valdymo problemas, kai paieškos erdvė yra didelė, netolygi, tačiau nereikia rasti globalaus optimumo. Todėl sudėtingų hibridinių aprūpinimo energija sistemų ir jų derinių optimizavimui taikomi evoliuciniai, genetiniai ir dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmai, generuojantys geresnius rezultatus, palyginti su kitais metodais. Šių sistemų optimizavimo kintamieji: optimalus galingumas, minimalios išlaidos, elektros energijos tiekimo nuostolių tikimybė, sistemų patikimumas, pastatymas, valdymas.
5. Nuoseklios paieškos metodai efektyvūs, jei tikslo funkcijos netolydumas yra nežymus, nes priešingu atveju paieška gali būti sustabdyta ties lokaliu minimumu. Todėl šiuos metodus tikslinga taikyti, sprendžiant konkrečias optimizavimo problemas, siekiant sąnaudų atžvilgiu racionalaus lygio ir nulinės energijos pastatų savybių optimizavimo.
6. Tyrimuose daugiataksliai sprendimų priėmimo metodai taikomi AEI technologijų planavimo ir integravimo projektuose, sprendžiant centralizuoto ir decentralizuoto aprūpinimo energija problemas.
7. Kaip rodo naujausių tyrimų rezultatai, esami sudėtingi optimizavimo algoritmai, kuriais sprendžiami pastato energijos sąnaudų optimizavimo uždaviniai kintamuosius laikant tolydžiais dydžiais, ne visada užtikrina tikrąjį racionalų sprendinį. Atsižvelgiant į tai, kad pastato ir jo inžinerinių sistemų sprendimai yra diskretūs duomenys, o energijos poreikių analizės bei aprūpinimo energija sistemų veikimo modeliai yra

atskiri, nėra išsamios metodikos, galinčios integruotai vertinti pastato bei jo aprūpinimo energija sistemos.

8. Įvertinus minėtų optimizavimo metodų taikymo sritis, kitaip negu daugumoje kitų tyrimų, šiame darbe pastato ir jo aprūpinimo energija sistemos integruotam vertinimui siūloma taikyti sukurtą modelį, kuriame pirmą kartą apjungiami energinio modeliavimo priemonės, modifikuota energijos srautų jungtinė matrica, daugiatakslis diskretusis sprendimo priėmimo metodas ir jautrumo analizė. Pasirinkto svorinės agreguotos sumos metodo (WASPAS) ir jautrumo analizės taikymas integruoto vertinimo metu leidžia sumažinti alternatyvių sprendimų paieškos erdvę, susieti kiekybinių bei kokybinių rodiklių vertinimą, suderinti skirtingus tikslus, padidinti alternatyvų rangavimo tikslumą, užtikrinant gauto racionalaus sprendimo patikimumą.

Atkreipiant dėmesį į atliktų tyrimų apžvalgą, disertacijoje sprendžiami šie uždaviniai:

1. Sudaryti MPAES integruoto vertinimo modelį, leidžiantį nustatyti racionalų sprendimą pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir funkcionalumo (apima sistemos priežiūrą, eksploataciją, reguliavimo galimybes ir sudėtingumą) kriterijus.
2. Atlikti mažoenergetinio vienbučio namo variantų, kuriuos lemia skirtingos pasyvosios energinio efektyvumo priemonės, energijos poreikių modeliavimą ir nustatyti pagrindinius veiksnius, darančius įtaką mažoenergetinio pastato energiniam naudingumui.
3. Atlikti pasirinktų pastato aprūpinimo energija sistemų, kurias sudaro skirtingos energijos generavimo (transformavimo) technologijos, modeliavimą ir pateikti kiekvienos MPAES sisteminės analizės rezultatus.
4. Taikant sukurtą modelį, atlikti PAE sistemų daugiatakslių vertinimą ir nustatyti racionalią sistemą pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir funkcionalumo kriterijus.
5. Įvertinti racionalaus sprendimo patikimumą pagal kriterijų reikšmingumo reikšmių kitimą ir nustatyti kritiškiausio kriterijaus įtaką priimant galutinį sprendimą.

2

Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelio sudarymas

Šiame skyriuje pateikiamas sukurtas MPAES integruoto vertinimo modelis, skirtas nustatyti racionalią MPAES pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir funkcionalumo kriterijus. Aprašoma tyrimo metu taikoma pastato ir jo aprūpinimo energija integruoto vertinimo metodika, kuri apima modeliavimo priemones „DesignBuilder“ ir „Polysun“, MPAES technologijų ir jų derinių sisteminę analizę, daugiataikslį sprendimų priėmimo metodą WASPAS, jautrumo analizę, atliekamą taikant imitacinį Monte Karlo metodą, ir kriterijų reikšmingumo reikšmių imčių duomenų statistinę analizę. Skyriaus tematika paskelbti 5 autorės straipsniai (Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2010, 2011; Džiugaitė-Tumėnienė *et al.* 2012; Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013; Medineckienė ir Džiugaitė-Tumėnienė 2014).

2.1. Aprūpinimo energija sprendimo įtaka pastato energiniam naudingumui

Disertacijoje nagrinėjama racionalaus mažoenergi pastato aprūpinimo energija sprendimo problematika. Siekiant nustatyti, kokią įtaką pastato energiniam naudingumui turi aprūpinimo energija sistemos parinkimas, tyrimo metu buvo pasirinktas realus mažoenergis vienbutis gyvenamasis namas Vilniuje. Šio namo energijos vartojimo efektyvumui nustatyti atlikta gyvavimo ciklo analizė, eksperimentinis tyrimas, energinis modeliavimas, parametrinė analizė, vieno tikslo optimizavimo uždavinio sprendimas, taikant evoliucinį algoritmą. Atlikta pastato gyvavimo ciklo analizė parodė, kad didžiausias pirminės energijos taupymo potencialas (96 %) ir poveikio aplinkai mažinimas (87 %) galimas pastato energijos vartojimo lygiu (Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2011).

Siekiant nustatyti pastatyto mažoenergi gyvenamojo namo energijos vartojimo efektyvumą ir pagrįsti racionalaus aprūpinimo energija sprendimo svarbą, atliktas eksperimentinis tyrimas (Džiugaitė-Tumėnienė *et al.* 2012). Per šį tyrimą buvo išmatuoti pagrindiniai parametrai, darantys įtaką pastato patalpų šiluminiam komfortui ir oro kokybei. Matavimo laikotarpiu (nuo 2010-10-02 iki 2011-04-30) nustatyta, kad esamos pastato aprūpinimo energija sistemos, sudarytos iš šilumos siurblio oras-vanduo, 200 l vandens šildytuvo su integruotu elektriniu tenu, grindų/radiatorių šildymo sistemos, mechaninio vėdinimo sistemos su šilumos rekuperacija, energinis efektyvumas siekė tik 1,56. Nors esamo pastato šiluminės charakteristikos atitinka A klasės energinio naudingumo pastatui keliamus reikalavimus (STR 2.01.09:2012), dėl neefektyvios aprūpinimo energija sistemos pastato metinis pirminės energijos poreikis šildymui, karštam vandeniui ruošti, vėdinimui, apšvietimui ir buitiniams elektros prietaisams siekia $192,1 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$, o išmetamų CO_2 dujų kiekis yra $35,14 \text{ kgCO}_2/\text{metus}$ (Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013). Taikant pastato energinio modeliavimo priemonę „DesignBuilder“ atliktos pastato energinį naudingumą lemiančių veiksnių parametrinės analizės rezultatai taip pat parodė, kad MPAES turi didžiausią įtaką pastato energijos vartojimo efektyvumui (Džiugaitė-Tumėnienė *et al.* 2012). Apibendrinus literatūros apžvalgos ir šiuos gautus tarpinius rezultatus, patvirtinama, kad pastato kūrimo ir projektavimo etape būtina atlikti pastato ir jo aprūpinimo energija integruotą vertinimą, įgyvendinant aukšto energinio naudingumo pastatams keliamus reikalavimus.

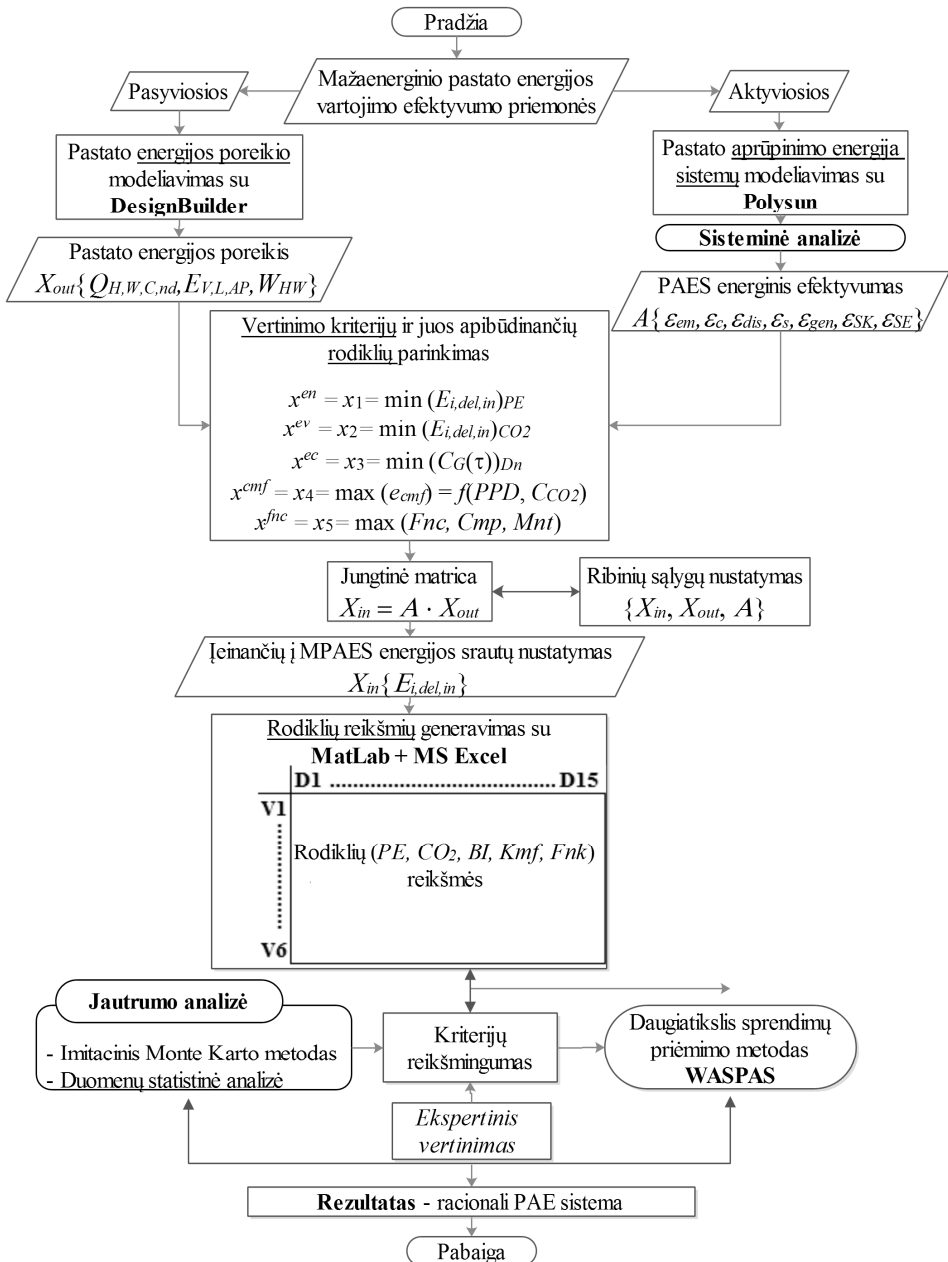
Siekiant padidinti pastato energinį naudingumą, parenkant racionalią aprūpinimo energija sistemą pagal energinį, ekologinį ir ekonominį vertinimą, buvo pritaikytas MPAES vertinimo ir optimizavimo algoritmas (Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2013; Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013). Šis MPAES vertinimo ir optimizavimo algoritmas yra paremtas vieno tikslo optimizavimo metodu, kai iš galimų technologijų (energijos generatorių ir transformatorių) su-

generuojamas racionalus derinys pavienio tikslo atžvilgiu. Racionaliam deriniui, kuris atitiktų minimalią tikslo funkciją, sugeneruoti taikomas evoliucinis algoritmas, integruotas į programą „Microsoft Excel Solver“. Gauti rezultatai parodė, kad racionaliai MPAES suformuoti generuojami skirtingi technologijų deriniai, esant skirtingoms tikslo funkcijoms. Energinio efektyvumo ir poveikio aplinkai racionalus tiriamojo namo aprūpinimo energija technologijų derinys, kurį sudaro biokuro katilas, saulės energijos technologijos ir elektros energijos tinklai, lemia pirminės energijos poreikio sumažėjimą 43,8 %, o išmetamų teršalų kiekis sumažėja apie 39 %. Tačiau ekonominio efektyvumo atžvilgiu racionalus derinys yra šilumos siurblys gruntas-vanduo, saulės kolektoriai, saulės elementai ir elektros energijos tinklai. Apibendrinant matyti, kad vieno tikslo optimizavimas neleidžia kompleksiskai išspręsti tiriamos problemos, o gautas sprendimas nebūtinai yra racionalus kitų veiksmų atžvilgiu. Todėl šio tyrimo metu siūloma taikyti sukurtą MPAES integruoto vertinimo modelio algoritmą, leidžiantį atlikti daugiatakslį vertinimą pagal pasirinktus kriterijus.

2.2. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelio algoritmas

Siekiant nustatyti racionalią MPAES pagal energinį efektyvumą, poveikį aplinkai, ekonominį efektyvumą, komfortą ir funkcionalumą, pateikiamas šiame tyrime taikomas MPAES integruoto vertinimo modelio algoritmas (2.1 pav.). Sukurtas modelis leidžia atlikti išsamią pastato energijos poreikių bei aprūpinimo energija sistemos technologijų analizę ir priimti racionalų sprendimą pagal pasirinktus vertinimo kriterijus – energinį efektyvumą, poveikį aplinkai, ekonominį efektyvumą, komfortą ir funkcionalumą. MPAES integruoto vertinimo modelį sudaro šie etapai:

1. Mažaenergio pastato pasyviųjų ir aktyviųjų energijos vartojimo efektyvumo priemonių ir jų derinių nustatymas.
2. Mažaenergio pastato variantų energijos balansų sudarymas taikant modeliavimo priemonę „DesignBuilder“.
3. Mažaenergio pastato variantų aprūpinimo energija sistemų technologijų derinių modeliavimas taikant modeliavimo priemonę „Polysun“.
4. Mažaenergio pastato variantų aprūpinimo energija sistemų energinio efektyvumo nustatymas taikant sisteminę analizę.
5. Daugiatakslio vertinimo kriterijų ir juos apibūdinančių rodiklių apibrėžimas.



2.1 pav. MPAES integruoto vertinimo modelio algoritmas

Fig. 2.1. An algorithm of the integrated assessment model of the energy system of the low-energy building

6. Daugiatikslio vertinimo kriterijų reikšmingumo nustatymas remiantis subjektyvaus ekspertinio vertinimo rezultatais ir taikant porinio palyginimo metodą AHP.
7. Daugiatikslio sprendimo priėmimo metodo parinkimas ir taikymas.
8. Sprendimų priėmimo matricos sudarymas pagal pasirinktą daugiatikslio sprendimo priėmimo metodą.
9. Rezultato, t. y. racionalios MPAES pagal energinį efektyvumą, poveikį aplinkai, ekonominį efektyvumą, komfortą ir funkcionalumą, nustatymas.
10. Daugiatikslio sprendimo jautrumo kriterijų reikšmingumui nustatymas taikant Monte Karlo modeliavimo metodu sugeneruotas kriterijų reikšmingumo reikšmes ir statistinę analizę.
11. Daugiatikslio sprendimo patikimumo vertinimas remiantis statistinės analizės rezultatais (dažniausiai pasitaikiusi rango reikšmė ir dažniausiai pasitaikiusios rango reikšmės pasikartojimų dažnis).

MPAES integruoto vertinimo modelis išsiskiria tuo, kad kompleksiniam vertinimui taikomos modeliavimo priemonės ir daugiatikslio sprendimų priėmimo metodas. Gauto racionalaus sprendimo patikimumas įvertinamas taikant jautrumo analizę, Monte Karlo modeliavimo metodą ir statistinę analizę.

2.3. Mažaenergio pastato pasyvių ir aktyvių energijos vartojimo efektyvumo priemonių nustatymas

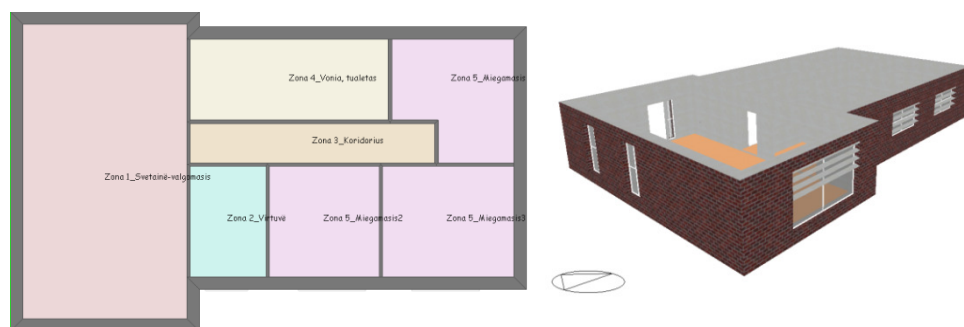
Šiame darbe pasirenkamas vienbutis gyvenamasis namas, atitinkantis mažai energijos vartojančiam pastatui keliamus reikalavimus (STR 2.01.09:2012). Pasirinktam pastatui numatomos galimos pasyviosios (šilumos izoliavimas, maži skaidrių atitvarų šilumos perdavimo ir visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientai, sandarumas, pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės) ir aktyviosios (aukšto efektyvumo vėdinimo sistema, AEI technologijų integravimas) energijos vartojimo efektyvumo priemonės.

2.3.1. Mažaenergio pastato atvejo analizei parinkimas

Didžiausias ekonominis energijos taupymo potencialas yra gyvenamųjų ir visuomeninės paskirties pastatų sektoriuose, kur atitinkamai galima būtų sutaupyti apie 27 % ir 30 % dabar suvartojamos galutinės energijos. ES gyvenamieji pastatai, kurių CO₂ dujų emisijos sudaro 77 % (725 Mt/metus), daro didžiausią poveikį aplinkai, o negyvenamieji pastatai į aplinką išmeta tik 23 % visų teršalų. Tačiau gyvenamasis pastatų sektorius lemia didžiausią energijos vartojimo intensyvumą. Vienbučiai namai sudaro didžiausią ES gyvenamųjų pastatų grupę,

jų CO₂ dujų emisijos sudaro net apie 60 % visų šių dujų emisijų (435 Mt/metus) (Carsten *et al.* 2006).

Didžiausio energijos taupymo galimybės slypi individualiuose gyvenamuosiuose namuose, todėl tyrimo metu atvejo analizei atlikti pasirenkamas vienbutis gyvenamasis namas, kurio išoriniai geometriniai matmenys (plotis – 9 m, ilgis – 18 m, vyraujančių patalpų aukštis – 2,7 m) atitinka tipinio pastato etalono atrankos kriterijus (Bliūdžius 2014). Nuspręsta priimti realaus vienbučio gyvenamojo namo architektūrinius ir konstrukcinius sprendimus, kuriuos įgyvendinus buvo pasiekta A energinio naudingumo klasė (2.2 pav.).



2.2 pav. Vienbučio gyvenamojo namo geometrinis modelis, sukurtas su „DesignBuilder“

Fig. 2.2. Geometrical model of the low energy house made by using "DesignBuilder"

Pastatas yra vieno aukšto, bendras šildomas plotas – 160,24 m², tūris – 480,72 m³. Pagrindinis namo fasadas orientuotas į šiaurės rytus. Pastate išskiriamos 3 pagrindinės zonos: svetainė-valgomasis, virtuvė ir miegamieji su pagalbinėmis patalpomis. Namų langų ir išorinių sienų plotų santykis yra 16 %. Didžiausias namo sienos įstiklintos dalies plotas (17,5 m²) yra pietiniame fasade. Pastato konstrukcija yra monolitinė iš polistireninio putplasčio blokelių, užpildytų betono mišiniu.

2.3.2. Mažaenergio pastato pasyviųjų energijos vartojimo efektyvumo priemonių parinkimas

Mažaenergio pastato pasyviosios EVEP yra atitvarų šilumos izoliavimas, mažai skaidrių atitvarų šilumos perdavimo ir visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientai, sandarumas, pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės (išorinės užsklandos), pasyvusis šildymas naudojant saulės energiją, pasyvusis vėsinimas, natūralus vėdinimas ir kitos. Šių priemonių taikymas daro tiesioginę įtaką pasta-

to architektūriniais ir konstrukciniais sprendimams. Pavyzdžiui, taikant pasyvųjį vėsinimą numatomas sienų ir langų plotų santykio, langų išdėstymo atsižvelgiant į pastato orientaciją, šiluminės talpos optimizavimas, išorinės užsklandos dienos metu bei natūralus vėdinimas naktį. Todėl, parenkant tiriamajam pastatui būdingas pasyviausias priemones, bandyta atsižvelgti į visas šias galimas priemonių ir sprendimų tarpusavio sąsajas, remiantis kitų tyrėjų gautais rezultatais.

Bichiou ir Krarti (2011) atliktos vienbučio gyvenamojo namo JAV (penkiose klimato zonose) atvejo analizės rezultatai parodė, kad gyvavimo ciklo sąnaudų atžvilgiu racionalus sprendimas yra stačiakampio forma, mažesnė šiluminė talpa, efektyvūs langai, minimalus langų ir sienų plotų santykis į rytus, šiaurę, vakarus, kai pietuose šis santykis kinta. Šis racionalus sprendimas gali sumažinti gyvavimo ciklo sąnaudas apie 10–25 %, atsižvelgiant į klimato zoną. Tą patį patvirtino Tuhus-Dubrow ir Krarti (2010). Jie optimizavimui pasirinko pastato formos kintamuosius (stačiakampio, trapecijos, L, T, kryžiaus, U, H formas, orientaciją, geometrinį santykį), skirtingus atitvarų šilumos izoliacijos lygius, langų plotus, jų tipus, infiltracijos ir šiluminės talpos dydžius. Optimizavimo metu, keičiantis šioms kintamiesiems, nustatyta, kad stačiakampis yra optimali forma bet kioje klimato zonoje esančiam pastatui, tačiau pastato formos kintamieji turi mažesnę įtaką pastato energijos sąnaudoms nei kiti projektiniai kintamieji. Inanici ir Demirbilek (2000), Jaber ir Ajib (2011), Persson *et al.* (2006), Leskovar ir Premrov (2011) nustatė, kad pastato langų plotas, jų šilumos perdavimo koeficientai, saulės spinduliuotės praleisties koeficientai, šešėliavimo (užtemdymo) elementai yra projektiniai kintamieji, kurie labiausiai veikia pastato energijos poreikį šildymui ir vėsinimui. Tačiau tinkamai parinkus skaidrių atitvarų plotus, apsaugos nuo saulės priemones ir jų reguliavimą, visiškai įstiklinto administracinio pastato energijos poreikis padidėtų tik 15 %, palyginti su pastatu, kurio langų ir sienų santykis yra 30 % (Poirazis *et al.* 2008). Leskovar ir Premrov (2011) nustatė, kad optimalus langų ir sienų santykis yra mažesnis, kai sienų šilumos perdavimo koeficientai yra itin maži. Todėl, remiantis šių tyrimų rezultatais, disertacijoje nenagrinėjama skirtingos formos įtaka pastato energijos poreikiui, o langų ir išorinių sienų plotų santykis priimamas kaip 16 % – toks jis yra nagrinėjamo realaus mažoenergi pastato.

Šiame tyrime atvejo analizei pasirenkamos plačiausiai taikomos ir turinčios didžiausią įtaką pastato energiniam naudingumui pasyvosios EVEL: atitvarų šilumos izoliacija, šilumos pritekėjimo dėl saulės spinduliuotės naudojimas, pasyvosios apsaugos nuo saulės priemonės (Evins 2013; Musall *et al.* 2010; Stevanovic 2013). Tiriamo mažoenergi pastato variantų (nuo V1 iki V6) atitvarų šilumos perdavimo koeficientų vertės ir kiti pagrindiniai parametrai yra pateikiami 2.1 lentelėje.

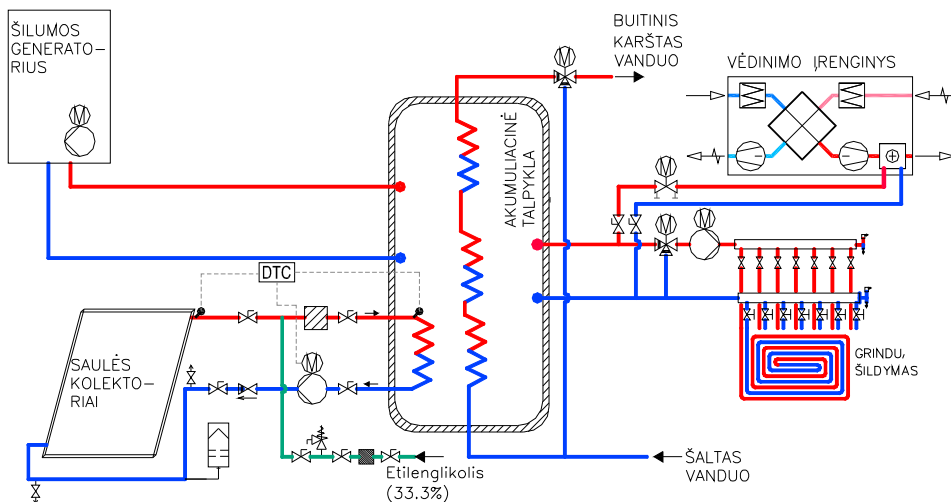
2.1 lentelė. Pastato atitvarų pagrindinės charakteristikos**Table 2.1.** The main characteristics of the elements of the building envelope

Pastato konstrukcinių sprendimų variantai			V1	V2	V3	V4	V5	V6
Pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientai atitinka energinio naudingumo klasę (STR 2.01.09:2012)			B	B	A	A+	A++	A++
Geometrija	Plotas	m ²	160,24					
	Tūris	m ³	480,72					
	Orientacija		ŠR					
Pastato elementai	U_{IS}	W/m ² K	0,18	0,15	0,12	0,11	0,10	0,06
	U_{ST}	W/m ² K	0,13	0,13	0,10	0,09	0,08	0,06
	U_{GR}	W/m ² K	0,15	0,15	0,14	0,12	0,10	0,06
	U_L	W/m ² K	1,0	0,8	0,8	0,8	0,7	0,51
	Šilumos tilteliai	W/mK	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0
	Infiltracija	h ⁻¹	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės		Iš.ž./P	Iš.ž./P	Iš.ž./P	Iš.ž./P	Iš.ž./P	Iš.ž./P
	Visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientas g		0,67	0,6	0,55	0,55	0,5	0,5

Tyrimo metu pasirinkta, kad skirtingi atitvarų šilumos perdavimo koeficientai ir visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientai yra pagrindiniai parametrai, veikiantys skirtumą tarp pasirinktų šešių pastato variantų energijos poreikių. V1 ir V2 variantų šiluminės charakteristikos parinktos remiantis literatūros apžvalga, kurioje išnagrinėti šaltojo klimato šalių mažaeenergių pastatų atitvaroms taikomi rodikliai (Buildings Performance Institute Europe 2011). V3, V4, V5 variantų atitvarų šilumos perdavimo koeficientai atitinka energinio naudingumo klases A, A+, A++, remiantis STR 2.01.09:2012. V6 varianto šiluminės charakteristikos yra praktiškai pasiektos šilumos perdavimo koeficientų reikšmės (Feist *et al.* 2005). Kiekvienam pastato variantui yra numatomos reguliuojamos išorinės žaliuzės apsaugai nuo saulės spinduliuotės.

2.3.3. Mažaenergio pastato aktyviųjų energijos vartojimo efektyvumo priemonių parinkimas

Remiantis 1.1.3 ir 1.1.4 poskyriuose pateikta literatūros apžvalga, nustatyta, kad mažaaenergiuose ir beveik nulinės energijos individualiuose gyvenamuosiuose pastatuose plačiausiai taikomos aktyviosios EPEP yra mechaninis vėdinimas su šilumos rekuperacija, saulės kolektoriai karštam vandeniui ruošti, saulės elementai ant stogo, šilumos siurblių ir biokuro technologijos, efektyvūs buitiniai prietaisai bei apšvietimas. Didelis dėmesys energiškai efektyviuose pastatuose skiriamas AEI technologijų integracijai. Tyrimo rezultatai parodė, kad, siekiant minimizuoti pirminės energijos poreikį ir poveikį aplinkai, pastato aprūpinimas energija sugeneruojamas iš AEI technologijų – biokuro katilo, saulės kolektorių sistemos, saulės elementų (Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013). Todėl siekiant atlikti įvairių galimų derinių kompleksinį vertinimą, apsiribojama tik dažniausiai praktikoje taikomomis aprūpinimo energija technologijomis. Tiriamajam mažaaenergiam pastatui numatoma 15 skirtingų aprūpinimo energija technologijų derinių, kuriuos sudaro skirtingi energijos generatoriai (transformatoriai), skirtingo dydžio akumuliacinės talpyklos ir vienoda grindų šildymo sistema bei mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija. Principinė MPAES schema vaizduojama 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Pastato aprūpinimo šiluma sistemos schema
Fig. 2.3. The scheme of the building energy system

2.2 lentelėje pateikiamos tik skirtingos generavimo ir transformavimo posistemių technologijos, kurios formuoja skirtingas mažaenergio vienbučio namo aprūpinimo energija sistemas.

2.2 lentelė. Mažaenergio vienbučio namo aprūpinimo energija technologijos

Table 2.2. Technologies of energy system of low-energy single family building

Kuras	Žymuo	MPAES technologijos
Malkos	D1	Biokuro (malkų) katilas
	D2	Biokuro (malkų) katilas ir saulės kolektoriai
	D3	Biokuro (malkų) katilas, saulės kolektoriai ir saulės elementai
Granulės	D4	Granulinis katilas
	D5	Granulinis katilas ir saulės kolektoriai
	D6	Granulinis katilas, saulės kolektoriai ir saulės elementai
Gamtinės dujos	D7	Kondensacinis dujinis katilas
	D8	Kondensacinis dujinis katilas, saulės kolektoriai
	D9	Kondensacinis dujinis katilas, saulės kolektoriai ir saulės elementai
Elektra	D10	Šilumos siurblys oras-vanduo
	D11	Šilumos siurblys oras-vanduo, saulės kolektoriai
	D12	Šilumos siurblys oras-vanduo, saulės kolektoriai ir saulės elementai
	D13	Šilumos siurblys gruntas-vanduo
	D14	Šilumos siurblys gruntas-vanduo, saulės kolektoriai
	D15	Šilumos siurblys gruntas-vanduo, saulės kolektoriai ir saulės elementai

Naudojant modeliavimo priemonę „Polysun“ (Polysun 2000), sudaromi šių suformuotų PAE sistemų modeliai kiekvienam pastato variantui.

2.4. Mažaenergio pastato energijos balanso sudarymas

Remiantis pasirinkto namo projekciniais duomenimis ir architektūriniais planais, naudojant modeliavimo priemonę „DesignBuilder“ (DesignBuilder 2014), sukurtas teorinis geometrinis pastato modelis, kuris pritaikytas šešiams skirtingų šiluminių charakteristikų pastato variantams. Pastato energijos balansas sudarytas atlikus dinaminį energinį modeliavimą, sujungiant skirtingas modeliavimo priemones. Nustatant pastato energijos poreikį šildymui, vėdinimui, vėsinimui, apšvietimui ir buitiniams elektros prietaisams taikoma programa „EnergyPlus“ (EnergyPlus 2013), integruota į modeliavimo priemonę „DesignBuilder“. Pastato aprūpinimo energija sistemai patiekto energijos nustatymui naudojama modeliavimo priemonė „Polysun“ ir sisteminė analizė.

Mažaenergio pastato energijos balansas sudarytas remiantis balanso lygtimis (EN 15603:2008):

– patiektai šilumos energijai:

$$E_{H,W,C,i,nren,del} = Q_{H,W,C,nd} + (Q_{H,C,ls,em} + Q_{H,C,ls,c} + Q_{H,W,C,ls,dis} + Q_{H,W,C,ls,s} + Q_{H,W,C,ls,gen}) - (Q_{H,W,C,ren,in} + Q_{H,W,C,sys,ls,rbl} + Q_{V,sys,ls,rvd}), \quad (2.1)$$

– patiektai elektros energijai:

$$E_{el,nren,del} = W_{H,C,in,em} + W_{H,C,in,c} + W_{H,W,C,in,dis} + W_{H,W,C,in,s} + W_{H,W,C,in,gen} - W_{el,ren,in} + E_V + E_L + E_A, \quad (2.2)$$

čia $E_{H,W,C,i,nren,del}$ – pastatui patiekta neatsinaujinančių išteklių šilumos energija, kWh/m²; $Q_{H,W,C,nd}$ – pastato energijos poreikis šildymui, karštam vandeniui ruošti, vėsinimui, kWh/m²; $Q_{H,C,ls,em}$ – pastato šildymo ir vėsinimo sistemų energijos nuostoliai sklaidos posistemyje, kWh/m²; $Q_{H,C,ls,c}$ – pastato šildymo ir vėsinimo sistemų energijos nuostoliai reguliavimo posistemyje, kWh/m²; $Q_{H,W,C,ls,dis}$ – pastato šildymo, karšto vandens ruošimo ir vėsinimo sistemų energijos nuostoliai paskirstymo posistemyje, kWh/m²; $Q_{H,W,C,ls,s}$ – pastato šildymo, karšto vandens ruošimo ir vėsinimo sistemų energijos nuostoliai akumuliacinio posistemyje, kWh/m²; $Q_{H,W,C,ls,gen}$ – pastato šildymo, karšto vandens ruošimo ir vėsinimo sistemų energijos nuostoliai generavimo posistemyje, kWh/m²; $Q_{H,W,C,ren,in}$ – pastato šildymo, karšto vandens ruošimo ir vėsinimo sistemoms patiekta atsinaujinančių išteklių energija, kWh/m²; $Q_{H,W,C,sys,ls,rbl}$ – pastato šildymo, karšto vandens ruošimo ir vėsinimo sistemų atgaunami energijos nuostoliai, kWh/m²; $Q_{V,sys,ls,rvd}$ – pastato vėdinimo sistemos atgauti energijos nuostoliai, kWh/m²; $E_{el,nren,del}$ – pastatui patiekta neatsinaujinančių išteklių elektros energija, kWh/m²; $W_{H,C,in,em}$ – elektros energija, reikalinga pastato šildymo ir vėsinimo sistemų sklaidos posistemiui, kWh/m²; $W_{H,C,in,c}$ – elektros energija, reikalinga pastato šildymo ir vėsinimo sistemų reguliavimo posistemiui, kWh/m²; $W_{H,W,C,in,dis}$ – elektros energija, reikalinga pastato šildymo, karšto vandens ruošimo ir vėsinimo sistemų paskirstymo posistemiui, kWh/m²; $W_{H,W,C,in,s}$ – elektros energija, reikalinga pastato šildymo ir vėsinimo sistemų akumuliacinio posistemiui, kWh/m²; $W_{H,W,C,in,gen}$ – elektros energija, reikalinga pastato šildymo ir vėsinimo sistemų generavimo posistemiui, kWh/m²; $W_{el,ren,in}$ – pastatui patiekta atsinaujinančių išteklių elektros energija, kWh/m²;

E_V – elektros energijos poreikis vėdinimui, kWh/m²; E_L – elektros energijos poreikis apšvietimui, kWh/m²; E_A – elektros energijos poreikis buitiniams elektros prietaisams, kWh/m².

Pastato šilumos ir vėsos balansai sudaryti remiantis lygtimis (EN ISO 13790):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \times Q_{H,gn}, \quad (2.3)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} \times Q_{C,ht}, \quad (2.4)$$

$$X_{out}(Q_{H,C,nd}) = f \left(\begin{array}{l} U_i, \psi_k, \chi_j, \theta_{int,set,H,C}, \theta_{sup,k}, q_{ve,k}, \eta_{hru}, \\ \Phi_{int,Oc}, \Phi_{int,A}, \Phi_{int,L}, F_{sh,ob,k}, F_{sh,gl}, g_{gl}, F_F, A_{w,p} / A_i \end{array} \right), \quad (2.5)$$

čia $Q_{H,ht}$ – mėnesio šilumos poreikis šilumos nuostoliams per atitvaras ir dėl vėdinimo padengti per šildymo sezoną, kWh/m²; $\eta_{H,gn}$ – koeficientas, įvertinantis į patalpą patenkančios šilumos suvartojimo dalį; $Q_{H,gn}$ – mėnesio šilumos pritekėjimas į patalpą, kWh/m²; $Q_{C,gn}$ – mėnesio šilumos pritekėjimas į patalpą vėsinimo laikotarpiu, kWh/m²; $\eta_{C,ls}$ – koeficientas, įvertinantis šilumos nuostolių, naudojamų vėsos poreikiui mažinti, dalį; $Q_{C,ht}$ – mėnesio šilumos poreikis šilumos nuostoliams per atitvaras ir dėl vėdinimo padengti vėsinimo laikotarpiu, kWh/m²; U_i – pastato atitvaros šilumos perdavimo koeficientas, W/m²K; ψ_k – ilginių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientas, W/mK; χ_j – taškinių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientai, W/K; $\theta_{int,set,H,C}$ – nustatytoji patalpos oro temperatūra šildymo ir vėsinimo laikotarpiais, °C; $\theta_{sup,k}$ – mechaninės vėdinimo sistemos tiekiamojo oro temperatūra, °C; $q_{ve,k}$ – tiekiamo į patalpą oro kiekis, m³/h; η_{hru} – mechaninio vėdinimo su rekuperacija sistemos šilumos atgavimo temperatūros efektyvumo koeficientas, %; $\Phi_{int,Oc}$ – per mėnesį į patalpą patenkantis šilumos srautas dėl žmonių, W; $\Phi_{int,A}$ – per mėnesį į patalpą patenkantis šilumos srautas dėl buitinių elektros prietaisų, W; $\Phi_{int,L}$ – per mėnesį į patalpą patenkantis šilumos srautas dėl apšvietimo, W; $F_{sh,ob,k}$ – koeficientas, įvertinantis skaidrių atitvarų užtemdymą dėl šalia esančių pastatų ir medžių; $F_{sh,gl}$ – koeficientas, įvertinantis apsaugos nuo saulės priemonių poveikį; g_{gl} – visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientas; F_F – lango rėmo ploto dalis; $A_{w,p} / A_i$ – skaidrių atitvarų ir išorinių sienų plotų santykis.

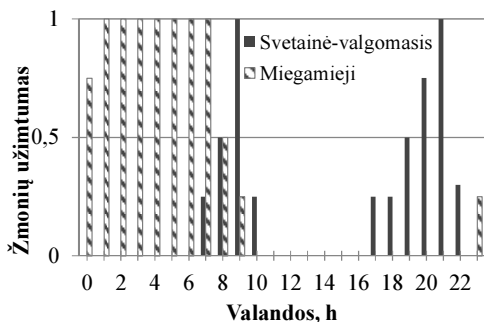
Nustatyta, kad pastato energijos poreikiui įtaką darantys veiksniai yra vietovė, klimato duomenys, pastato naudojimo režimas, palaikomo šiluminio komforto ir oro kokybės parametrai, pastato mikroklimato sistemų darbo režimai, pastato karšto vandens poreikis, apšvietimo sistemos ir buitinių elektros prietaisų efektyvumas.

2.4.1. Vietovė ir klimato duomenys

Pastato energiniam modeliavimui buvo panaudoti Kauno miesto tipinių meteorologinių metų klimato duomenys, kurie įvesti į tarptautinio meteorologijos duomenų tinklo IWEC (angl. *International Weather for Energy Calculations*) duomenų bazę (IWEC 2009). Projektinė lauko oro temperatūra šildymui ir vėdinimui projektuoti yra priimta $-19,3$ °C.

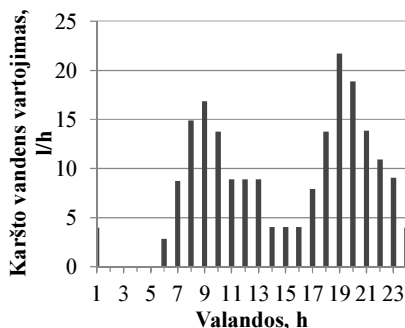
2.4.2. Pastato naudojimo režimas

Nagrinėjamame name gyvena du suaugusieji ir trys vaikai. Sudarytame namo modelyje panaudotas priemonėje „DesignBuilder“ įvestas būdingas žmonių buvimo grafikas darbo dienomis, savaitgaliais ir atostogų laikotarpiu gyvenamuosiuose namuose. Atliekant pastato energinį modeliavimą yra priimta prielaida, kad darbo dienomis, nuo 11 val. iki 16 val., gyventojų namie nėra, o poilsio dienomis gyventojai namie būna visą parą. Būdingas žmonių buvimo skirtingose namo zonose grafikas darbo dienomis pateikiamas 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Būdingas žmonių buvimo grafikas individualiame gyvenamajame name darbo dienomis

Fig. 2.4. Typical occupancy activity schedule in the single family house



2.5 pav. Būdingas maksimalaus karšto vandens vartojimo grafikas per parą

Fig. 2.5. Daily hot water consumption pattern

Remiantis žmonių buvimo grafiku, buvo nustatytas šilumos pritekėjimas nuo žmonių ir buitinių elektros prietaisų. Skaičiavimams naudotas žmonių ir buitinių elektros prietaisų skleidžiamos šilumos srauto tankis valgomajame yra $3,06 \text{ W/m}^2$, virtuvėje – $30,28 \text{ W/m}^2$ ir miegamųjų zonoje – $3,58 \text{ W/m}^2$.

2.4.3. Šiluminio komforto ir oro kokybės užtikrinimas

Atliekant namo energinį modeliavimą priimta, kad pastato atskirose zonose palaikomos skirtingos temperatūros. Per šildymo sezoną svetainėje-valgomajame palaikoma oro temperatūra yra $22 \text{ }^\circ\text{C}$, virtuvėje ir miegamuosiuose – $21 \text{ }^\circ\text{C}$, vonios ir dušo patalpose – $22 \text{ }^\circ\text{C}$, koridoriuje – $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Šiltuoju laikotarpiu patalpose palaikoma $26 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūra. Priimta, kad leistinas temperatūros patalpose didėjimas, nesukeliantis diskomforto, yra $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kiekvienam gyvenamojo namo variantui yra numatoma vienoda mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperatoriumi, kurio temperatūros šilumos atgavimo efektyvumas siekia 85% . Tiekiamo į patalpas ir šalinamo iš patalpų oro kiekis sudaro $190 \text{ m}^3/\text{h}$, užtikrinant ne mažesnę kaip $0,4 \text{ h}^{-1}$ oro kaitą patalpose. Tiekiamo į patalpas oro temperatūra yra $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Remiantis pastato energinio modeliavimo duomenimis, nustatyta, kad vėdinimo sistemos sezoninis energinis šilumos atgavimo efektyvumas siekia tik 57% .

2.4.4. Pastato mikroklimato sistemų darbo režimai

Gyvenamajame name yra numatoma grindų šildymo sistema, kai tiekiamojo ir grįžtamojo šilumnešio parametrai yra $40/35 \text{ }^\circ\text{C}$. Pastato grindų šildymo sistemoje įrengtas valdymas su nustatytosios vidaus temperatūros keitimu. Šildymo sezono metu (nuo spalio mėn. iki balandžio mėn.), darbo dienomis, nuo 11 val. iki 16 val., yra numatytas patalpų oro temperatūros sumažinimas $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Šio tyrimo metu priimta, kad mechaninio vėdinimo sistema įjungžiama valandą prieš žmonėms atvykstant ir veikia per visą jų buvimą namie. Šaltuoju laikotarpiu tiekiamo oro temperatūra yra $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Kai gyventojų namie nėra (nuo 11 val. iki 15 val.), vėdinimo sistema yra išjungžiama.

Atlikus pirminį pastato variantų energinį modeliavimą šiltuoju laikotarpiu, nuspręsta numatyti pasyviąsias apsaugas nuo saulės priemonės (išorines žaluzijas) kiekvieno varianto pietiniame fasade. Modeliavimo rezultatai parodė, kad patalpų oro temperatūra padidėja iki $27 \text{ }^\circ\text{C}$, todėl papildoma oro vėsinimo sistema pastate nenumatoma.

2.4.5. Pastato karšto vandens poreikis

Tyrimo metu priimta, kad karšto vandens poreikis yra 50 l/žmogui per parą. Numatyta, kad MPAES užtikrina 200 l karšto vandens per parą, o jo temperatūra ne žemesnė kaip 55 °C. Karšto vandens vartojimo grafikas pateikiamas 2.5 paveiksle. Atlikus MPAES modeliavimą, nustatyta, kad energijos poreikis karštam vandeniui ruošti yra 4 110 kWh/metus, kai šalto vandens temperatūra yra kintanti pagal metų laikotarpį.

Skaičiavimais nustatyta, kad šilumos galia, reikalinga karštam vandeniui ruošti, intensyviausio vandens vartojimo valandą, kai vanduo pašildomas nuo 5 °C iki 55 °C, yra 22,70 kW. Tačiau šiuo atveju pastato aprūpinimo sistemos šilumos generavimo technologijos pagamintą šilumą tiekia į akumuliacinę talpyklą. Tyrimo metu priimta, kad akumuliacinėje talpykloje nuolatos bus palaikoma 40 °C vandens temperatūra. Karštas vanduo ruošiamas 5 valandas prieš intensyviausią vartojimą ryte ir vakare. Remiantis EN 15450:2008 pateikta metodika, nustatyta, kad, esant 300 litrų akumuliacinei talpyklai, intensyviausio vandens vartojimo metu (vakare) reikalinga šilumos galia karštam vandeniui ruošti yra 3,22 kW. Esant 500 litrų akumuliacinei talpyklai, intensyviausio vandens vartojimo metu (vakare) reikalinga šilumos galia siekia 2,40 kW. Šiuose skaičiavimuose įvertinti akumuliacinės talpyklos (500 litrų) šilumos nuostoliai, kurie sudaro 100,8 kWh/mėn.

2.4.6. Pastato apšvietimo ir buitinių elektros prietaisų efektyvumas

Darbe įvertintas energijos poreikis apšvietimui (E_L) ir buitiniams elektros prietaisams (E_A). Energijos poreikis apšvietimui nustatytas atlikus pastato energinį modeliavimą su „DesignBuilder“. Pagrindiniai apšvietimo sistemos parametrai pateikiami 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Pagrindiniai pastato apšvietimo sistemos parametrai

Table 2.3. Main parameters of the lighting system of the house

Pastato zona	Apšvietimas, lx	Elektros galingumas, W/m ²
Svetainė-valgomasis	150	1,95
Virtuvė	200	2,6
Koridorius	50	0,65
Vonia, WC	75	0,975
Miegamasis (3 kambariai)	100	1,3

Tyrimo metu pasirinkta, kad kiekvienoje zonoje skleidžiamos šilumos srauto tankis sudaro $1,3 \text{ W/m}^2$, pataisa šilumos pritekėjimui dėl apšvietimo yra $0,42$, o pataisa šilumos srautui dėl matomo spinduliavimo – $0,18$. Sudarant mažaenergio pastato energijos balansą ir numatant AEI technologijų integravimą, būtina įvertinti energijos poreikį buitiniams elektros prietaisams (2.4 lentelė). Elektros energijos poreikio buitiniams prietaisams vertinimas atliktas naudojant Pasyviojo namo planavimo paketo (angl. *Passive House Planning Package*, PHPP) programą (PHPP 2007).

2.4 lentelė. Pastato energijos poreikis buitiniams elektros prietaisams

Table 2.4. The building energy demand for electrical appliances

Buitiniai elektros prietaisai	Nominalus energijos poreikis	Panaudojimo koeficientas	Naudojimosi dažnumas	Žmonių skaičius	Elektros energijos poreikis, kWh/metus
Indaplovė	1,20 kWh/plovimui	1,00	65 ciklai žmogui per metus	4	312
Skalbyklė	1,10 kWh/skalbimui	1,00	57 ciklai žmogui per metus	4	251
Drabužių džiovyklė	3,10 kWh/džiovinimui	0,88	57 ciklai žmogui per metus	4	622
Šaldytuvas	0,78 kWh/dieną	1,00	365 d. per metus	–	285
Šaldiklis	0,88 kWh/dieną	1,00	365 d. per metus	–	321
Elektrinė voryklė	0,20 kWh/virimui	1,00	500 kartų žmogui per metus	4	400
Maži el. prietaisai	50 kWh/vartotojui	1,00	–	4	200
Elektro-niniai prietaisai	44 kWh/vartotojui	1,00	–	4	176
Elektros energijos poreikis buitiniams elektros prietaisams, kWh/m ²					16,0

2.4 lentelėje pateiktas elektros energijos poreikis apšvietimui ir buitiniams elektros prietaisams atitinka šaltojo klimato šalyse atliktų mažaenergių pastatų monitoringų duomenis (Kurnitski *et al.* 2011).

2.5. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos vertinimas

Tyrimo metu kiekvienam gyvenamojo namo variantui numatyta 15 galimų PAE sistemų (2.2 lentelė). MPAES modeliavimas pasirinktu laiko žingsniu per vienerius metus atliktas su modeliavimo priemone „Polysun“ (Sorensen *et al.* 2009). Atlikus PAE sistemų modeliavimą, įvertinti šilumos (elektros) generavimo (transformavimo), akumuliavimo, paskirstymo ir sklaidos posistemių sezoniniai energiniai efektyvumai – šie požymiai yra MPAES integruoto vertinimo modelio kintamieji. MPAES vertinimas apima aprūpinimo energija sistemos struktūros, energijos srautų ir erdvinę ribų nustatymą, pasirinkto atsinaujinančių išteklių energijos technologijų integravimo metodą, pasirinktų PAE sistemų modeliavimą ir jų energinio efektyvumo įvertinimą.

2.5.1. Pastato aprūpinimo energija sistemos struktūra ir erdvinės ribos

Šio tyrimo metu priimta, kad MPAES ribos apima:

- pastato energijos poreikį šildymui, vėdinimui, vėsinimui, karštam vandeniui ruošti, apšvietimui, pagalbinėms sistemoms ir buitiniams elektros prietaisams,
- pastato energijos poreikiui užtikrinti reikalingos energijos (šilumos, vėsos, elektros) kiekį,
- pastato įgautą ir transformuotą atsinaujinančių išteklių energiją (saulės, oro, grunto), pagamintą vietoje (angl. *on site*),
- pastato techninių sistemų energijos nuostolius, atsižvelgiant į generavimo, akumuliavimo, paskirstymo, reguliavimo ir sklaidos posistemių charakteristikas.

MPAES struktūra ir energijos srautai pateikiami 2.6 paveiksle. Iš 2.6 paveikslo matyti, kad pastatui pateiktos energijos, reikalingos užtikrinti energijos poreikį, kiekį tiesiogiai veikia pastatui reikalingos bei įgautos energijos kiekiai ir pastato techninių sistemų energijos nuostoliai.

Iš pateiktos energijos balanso lygčių 2.1 ir 2.2 matyti, kad, siekiant efektyvaus aprūpinimo energija sprendinio, reikia sumažinti sistemos technologijų energijos nuostolius, patiriamus transportuojant ir transformuojant energijos srautus, bei padidinti pastato įgaunamos energijos dalį, kurią sudaro vietoje pagaminta ir panaudota atsinaujinančių išteklių energija bei sistemų efektyvumo didinimo technologijos (šilumogrąža).

2.5.2. Atsinaujinančių energijos išteklių technologijų integravimas

Šio tyrimo metu nagrinėtos AEI technologijų integravimo į pasirinktas PAE sistemas galimybės. Remiantis atlikta literatūros apžvalga, galima teigti, kad AEI yra riboti ne dėl išteklių trūkumo, o dėl naudojimo metu vykdomos energijos konversijos termodinamikos apribojimų. Vėjo ir vandens energijos retai naudojamos aprūpinti energija individualius gyvenamuosius namus. Mažos galios vėjo jėgainių pritaikymas ant vienbučių namų stogų siekia tik apie 21 %, o mikroko-generacinių jėgainių – vos 7 % iš visų taikomų AEI technologijų (Musall *et al.* 2010). Todėl šio tyrimo metu pasirenkamos plačiausiai taikomos saulės energiją transformuojančios technologijos – saulės elementų (gaminančių elektrą) ir saulės kolektorių (gaminančių šilumą) sistemos. Priimta, kad vietoje pagaminta atsinaujinančių išteklių energija nėra eksportuojama į kitus energijos tinklus. Pagrindinė AEI integravimo į pastato aprūpinimo energija sistemą užduotis yra nustatyti apribojimus, atsiradusius dėl technologijų vykdomos energijos konversijos. Dėl šios priežasties, prieš atliekant MPAES vertinimą, į modelį yra įvedami pagrindiniai apribojimai saulės energiją transformuojančioms technologijoms. Šiems apribojimams nustatyti atliktas saulės energijos technologijų modeliavimas (Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2013) su jautrumo analize.

Saulės kolektorių (SK) sistemos parametų jautrumo analizės tikslas – parinkti tokio dydžio saulės kolektorių sistemą su atitinkamo dydžio akumuliacine talpykla, kad šiltuoju laikotarpiu (birželio, liepos ir rugpjūčio mėn.) 100 % būtų užtikrintas energijos poreikis karštam vandeniui ruošti. Naudojant modeliavimo priemonę „Polysun“, sumodeliuoti saulės kolektorių sistemos variantai. Modeliavimo metu pasirinkti pastovūs parametrai: Vilniaus miesto klimato sąlygos, efektyvūs plokštieji saulės kolektoriai, 80 mm storio akumuliacinės talpyklos šilumos izoliacija, 40 mm storio pagrindinių vamzdinių šilumos izoliacija. Pagrindiniai kintamieji – saulės kolektorių orientacija, posvyrio kampas, absorberio plotas ir akumuliacinės talpyklos tūris.

Saulės kolektorių orientacija. Remiantis Perednio ir Kavaliausko (2005) tyrimo rezultatais, racionali saulės kolektorių orientacija yra į pietus. 15° nuokrypis nuo pietų krypties į rytus arba vakarus sumažina saulės spinduliuotę į saulės kolektorius paviršių apie 2–4 %. Kai nuokrypis didesnis nei 30°, saulės spinduliuotė sumažėja 15 %. Nustatyta, kad saulės kolektorių orientacija nėra kritinis parametras, todėl visais analizės atvejais saulės kolektoriai yra orientuoti į pietus.

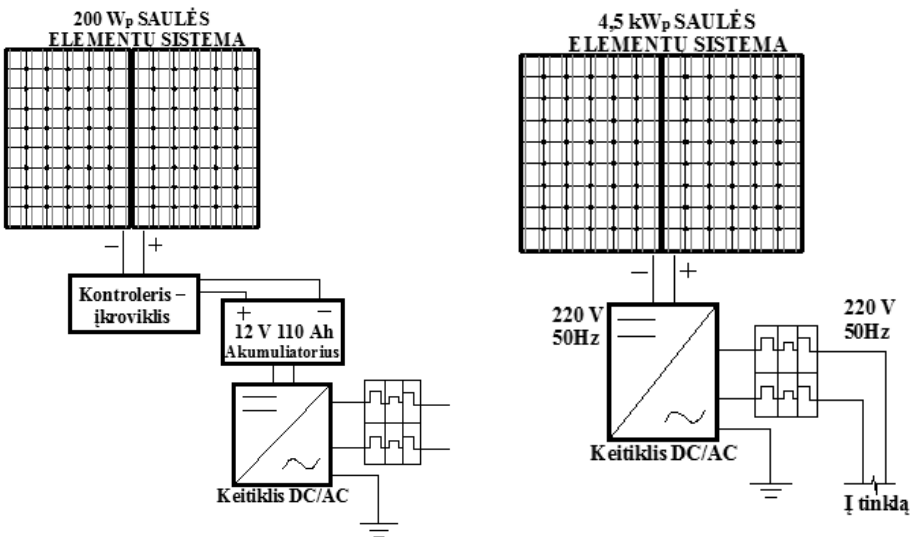
Saulės kolektorių posvyrio kampas. Remiantis Perednio ir Kavaliausko (2005) tyrimo rezultatais, kai posvyrio kampas į horizontą yra 30–45°, saulės kolektoriai per metus pagamina 15 % energijos daugiau negu kolektoriai, įrengti horizontaliai. Taigi posvyrio kampas nėra kritinis parametras, todėl visais anali-

zės atvejais saulės kolektorių posvyrio kampas pasirenkamas 45° , siekiant padidinti pagamintos energijos kiekį per metus.

Saulės kolektorių plotas parinktas atsižvelgiant į energijos poreikį karštam vandeniui ruošti nuo birželio iki rugpjūčio mėnesio. Šiuo laikotarpiu vidutinis karšto vandens poreikis yra 324,8 kWh per mėnesį (nevertinant šilumos nuostolių akumuliacinėje talpykloje). Jautrumo analizei pasirinkti saulės kolektorių plotai nuo $5,4 \text{ m}^2$ iki $14,4 \text{ m}^2$.

Akumuliacinės talpyklos dydžio nustatymas yra svarbus veiksnys optimizuojant saulės kolektorių sistemą. Per jautrumo analizę nagrinėjama akumuliacinės talpyklos dydžio įtaka generatoriaus ir saulės kolektorių, kurių plotai – $5,4 \text{ m}^2$ ir $7,2 \text{ m}^2$, pagamintos energijos kiekiui.

Saulės elementų (SE) sistemos parametų jautrumo analizė. Su modeliavimo priemone „Polysun“ atliktas saulės elementų sistemų variantų modeliavimas (2.7 paveikslas).



2.7 pav. Saulės elementų sistemų variantų principinės schemos

Fig. 2.7. The principal schemes of the variants of the solar cells systems

Modeliuojant pasirinkti pastovūs parametrai: Vilniaus miesto klimato sąlygos, efektyvūs polikristaliniai saulės elementai, 45° posvyrio kampas, orientacija į pietus.

Tyrimo metu pasirinkti du pastato aprūpinimo energija scenarijai, naudojant skirtingos galios saulės elementų sistemas:

- 200 W_p saulės elementų sistema, reikalinga saulės kolektorių sistemos cirkuliacinio siurblio, kurio elektros galia siekia 45 W, veikimui užtikrinti. Šią autonominę (angl. *stand-alone*) sistemą sudaro saulės elementų moduliai, baterijų įkroviklis, akumuliatorius, inverteris ir įvadinis skydelis. Protogeropoulos *et al.* (1997) pabrėžė, kad šioms autonominėms AEI technologijoms yra svarbus savarankiškumo lygis, t. y. kai tuo pačiu metu energijos poreikis sutampa su technologijų pagamintos energijos kiekiu. Dėl saulės spinduliuotės nepastovumo šaltuoju laikotarpiu saulės kolektorių sistema yra geriausias variantas užtikrinant saulės kolektorių sistemos savarankišką veikimą. Šiuo atveju saulės kolektorių sistemos cirkuliacinio siurblio veikimui reikalingas energijos kiekis sutampa su saulės elementų sistemos pagamintu elektros energijos kiekiu.
- 4,5 kW_p saulės elementų sistema, kuri gamina elektros energiją vietoje (angl. *on site*) ir perteklių atiduoda elektros tinklams. Šis scenarijus nagrinėjamas, kai, savo poreikiams pasistatęs saulės elektrinę, vartotojas metų pabaigoje atsiskaito už elektros energiją, suvartotą iš nacionalinių elektros tinklų. Priimta tokia prielaida: jei vartotojas per metus suvartojo iš tinklo tiek elektros, kiek pats į jį patiekė, už elektrą nieko nemokama, jei suvartojo daugiau – susimoka, o jei patiekė daugiau – perteklius yra nuperkamas už rinkos kainą.

Saulės kolektorių ir saulės elementų sistemų parametų jautrumo analizės rezultatai pateikiami 3.2.1 poskyryje.

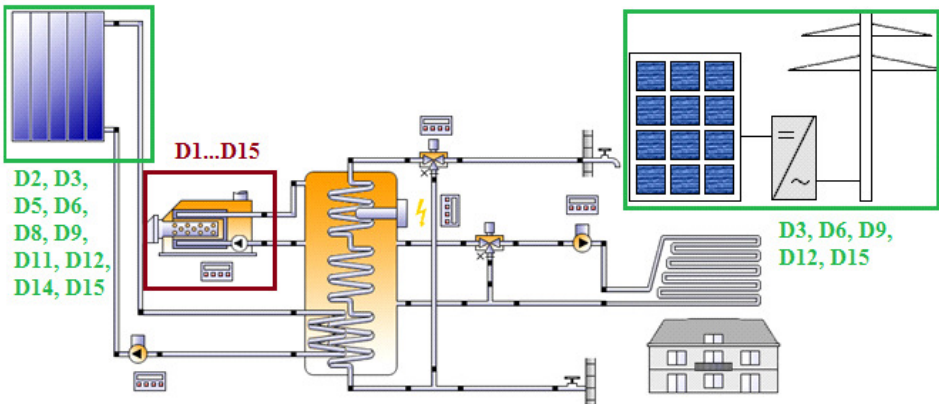
2.5.3. Pastato aprūpinimo energija sistemos technologijų derinių modeliavimas

Modeliavimo priemonių, skirtų pastato energiniam efektyvumui nustatyti ir AEI technologijoms integruoti į įvairias aprūpinimo energija sistemas, pasiūla yra didelė. Džiugaitė-Tumėnienė ir Streckienė (2014) palygino modeliavimo priemones TRNSYS (Klein *et al.* 2012), „Polysun“ ir „energyPRO“ (energyPRO 2013) ir išsiaiškino, kad su TRNSYS ir „Polysun“ gauti vienbučio gyvenamojo namo saulės energijos sistemos karštam vandeniui ruošti modeliavimo rezultatai yra patikimesni. „Polysun“ atveju metinis saulės kolektorių sistemos ir papildomo šilumos šaltinio pagamintos energijos kiekis buvo didesnis atitinkamai 5,2 % ir 24,4 %, palyginti su rezultatais, gautais taikant TRNSYS. Nors viena plačiausiai taikomų modeliavimo priemonių yra TRNSYS, šiame tyrime, pasirinkus tik saulės energijos technologijų integravimą, dinaminiam PAE sistemų modeliavimui naudojama „Polysun“.

MPAE sistemų modeliavimas atliktas vieneriems metams, naudojant Vilniaus miesto klimato duomenis. Klimato duomenų generatorius „Meteonorm“ (Remund *et al.* 2013) yra integruotas į „Polysun“ modeliavimo priemonę. „Me-

teonorm“ sugeneruoja tipinių klimato sąlygų profilių pasirinktai vietai, interpoliuojant vietovės duomenis iš meteorologinių stočių ir palydovų. Vidutinė metinė lauko oro temperatūra yra 6,8 °C, maksimali oro temperatūra siekia 31 °C liepos mėnesį, o žemiausia oro temperatūra yra –21,9 °C sausio mėnesį. Didžiausia vidutinė mėnesio bendroji saulės spinduliuotė liepos mėnesį yra 988,3 W/m², mažiausia vidutinė mėnesio vertė – 178,9 W/m² gruodžio mėnesį. Vilniuje metinė bendroji saulės spinduliuotė yra 1 000,6 kWh/m², o išsklaidyta saulės spinduliuotė – 528,4 kWh/m². MPAE sistemų modeliavimas atliktas naudojant valandines klimato duomenų reikšmes.

Tyrimo metu sukurta po 15 MPAE sistemų imitacinių modelių kiekvienam pastato variantui nuo V1 iki V6 (2.8 paveikslas).



2.8 pav. MPAE sistemų modeliai, sukurti su „Polysun“

Fig. 2.8. Models of the building energy supply systems made by using "Polysun"

Iš 2.8 paveikslas matyti, kad skirtingi generatoriai numatyti MPAES (nuo D1 iki D15). MPAE sistemose D2, D3, D5, D6, D8, D9, D11, D12, D14, D15 taikomos saulės kolektorių sistemos, o D3, D6, D9, D12 ir D15 yra su saulės elementų sistemomis.

Modeliuojant MPAE sistemas, įvedami įvesties duomenys (2.5 lentelė): pastato geometriniai duomenys, palaikoma patalpų oro temperatūra, žmonių skaičius, karšto vandens poreikis ir temperatūra, šilumos poreikis šildymui, vėdinimui, karštam vandeniui ruošti.

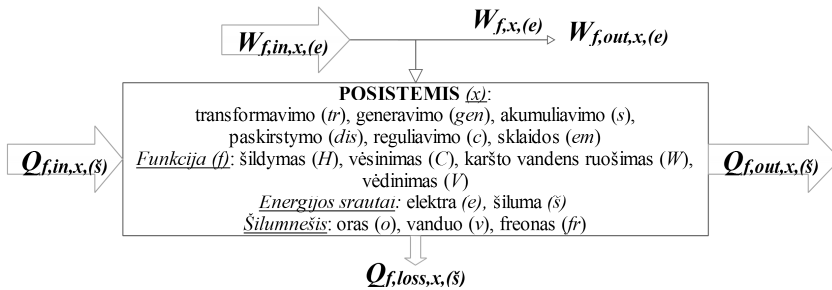
2.5 lentelė. MPAES charakteristikos, naudojamos modeliavimui**Table 2.5.** Input characteristics of energy system of low-energy house used for the simulation

Saulės kolektorių įvesties parametrai		Akumuliacinės talpyklos įvesties parametrai			Saulės elementų įvesties parametrai		
					Sistema	200 W _p	4,5 W _p
Tipas – plokštieji		Tipas – su šilumokaičiais			Tipas – polikristaliniai		
Bendras plotas, m ²	8,0	Tūris, l	300	500	Bendras plotas, m ²	1,47	32,56
Efektyvus plotas, m ²	7,2	Aukštis, m	1,3	1,7	Nominali elektros galia, W	200	225
Posvyrio kampas / orientacija	45°/P	Išsikišimų aukštis, mm	100		1 modulio plotas, m ²	1,47	1,628
Vėjo įtaka, %	50	Medžiaga	Nerūdijantis plienas		Modulių skaičius, vnt.	1	20
η_0 (laminarinis, turbulentinis)	0,848	Sienelės storis, mm	2,5		Bendra instaliuota elektros galia, kW _p	0,200	4,50
a_1 , W/m ² /K	4,02	Izoliacija	Kietasis putplastis		Posvyrio kampas / orientacija	45°/P	45°/P
a_2 , W/(m ² /K) ²	0,0108	Šilumos izoliacijos storis, mm	80		Vėjo įtaka, %	50	50
Šilumnešis – vandens ir 33,3 % etilenglikolio mišinys		Storis talpyklos viršuje	80		Nominalus efektyvumas STS, %	0,136	0,135
Koeficientas, įvertinantis pasvirusių paviršių	K _θ = 0,95 esant 50°	Storis talpyklos apačioje	50		Nuostoliai kabeliuose / nesutapimas	4 % / 4 %	4 % / 4 %

Modeliavimo išvesties duomenys: pastatui patiekta energija (šilumos, elektros, oro, grunto šilumos), šilumos generatorių pagaminta šiluma, elektros transformatorių pagaminta elektros energija, akumuliacinės talpyklos ir sistemos vamzdynų šilumos nuostoliai, papildomai reikalinga elektros energija cirkuliacinių siurblių darbui užtikrinti.

2.5.4. Technologijų ir jų derinių energinio efektyvumo nustatymas

Po 2010 m. gegužės 19 d., kai priimta Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo ir išleistos reikalaujamos šios direktyvos gairės 2012/C 115/01, pasirodė daugiau mokslinių darbų, kuriuose pateikiama platesnė energijos efektyvumo priemonių analizė atsižvelgiant į atskirų sistemų technologijų energinį efektyvumą ir jų tarpusavio sąveiką (Perez-Lombard *et al.* 2012). Remiantis šio tyrimo pagrindiniais uždaviniais, atliekama pasirinkta MPAES kiekvieno posistemio sisteminė analizė, kurią taikant nustatoma kiekvieno posistemio įtaka MPAES energiniam efektyvumui. Posistemio analizės metu įvertinamas MPAES transformavimo, gamybos, akumuliavimo, paskirstymo, reguliavimo ir sklaidos posistemio energinis efektyvumas, kuris parodo numatytų technologijų patiriamus nuostolius generuojant, transformuojant ir transportuojant energijos srautus. Taip pat per sisteminę analizę įvertinami papildomi energijos srautai, reikalingi MPAES cirkuliacinių siurblių elektros poreikiams ir nuostolių dėl šilumnešio transportavimo kompensavimui dengti. Kiekvieno MPAES posistemio energijos srautų diagrama vaizduojama 2.9 paveiksle.



2.9 pav. Pastato aprūpinimo energija sistemos posistemio energijos srautai
Fig. 2.9. Energy flows of subsystem of building energy system

Kiekvieno MPAES posistemio energinis efektyvumas nustatomas (EN 15316-1) pagal lygtį:

$$\varepsilon_x = \frac{Q_{out,x}}{Q_{in,x}}. \quad (2.6)$$

PAE sistemos energinis efektyvumas nustatomas (EN 15316-1) pagal lygtį:

$$SPF = \frac{f_{P,i,del} \cdot Q_{out,x} + f_{P,i,del} \cdot W_x}{Q_x}. \quad (2.7)$$

MPAES sezoninio energinio efektyvumo skaitinė reikšmė priklauso nuo posistemių techninio tobulumo ir aplinkos klimato sąlygų kitimo per metus. Šio tyrimo metu MPAES sezoninis energinis efektyvumas nustatomas pagal lygtį:

$$\varepsilon_{i,sys} = \varepsilon_{i,gen} \cdot \varepsilon_{i,s} \cdot \varepsilon_{i,e,d}, \quad (2.8)$$

čia Q_x – pastato šilumos poreikis šildymui, karšto vandens ruošimui ir tiekiamo oro pašildymui, kWh/m²; $Q_{out,x}$ – x posistemio pagaminta šiluma, kWh/m²; $Q_{in,x}$ – posistemiu reikalinga šiluma, kWh/m²; $f_{P,i,del}$ – neatsinaujinančių išteklių pirminės energijos faktorius; W_x – posistemiu reikalinga papildoma elektros energija, kWh/m²; $\varepsilon_{i,sys}$ – pastato aprūpinimo energija sistemos sezoninis energinis efektyvumas; $\varepsilon_{i,gen}$ – generavimo posistemio energinis efektyvumas; $\varepsilon_{i,s}$ – akumuliacinio posistemio energinis efektyvumas; $\varepsilon_{i,e,d}$ – paskirstymo ir sklaidos posistemių energinis efektyvumas.

MPAES energinio efektyvumo vertinimo matrica, į kurią suvedami modeliavimo su „Polysun“ rezultatai, pateikiama C priede.

2.6. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos vertinimo modelio matematinė išraiška

2.6.1. Lygčių sistema energijos srautams nustatyti

Siekiant nustatyti pastato energijos poreikio ir pastatui patiektos energijos srautų tarpusavio ryšį, tyrimo metu pritaikyta supaprastinta energijos srautų teorija, vadinama „Įvestis – juodoji dėžė – išvestis“ (angl. *input – black box – output*) arba „Energinis centras“ (angl. *energy hub*), kurią išplėtojo Andersson, Frölich, Geidl, Koepfel (Fabrizio 2008). Autoriai pateikė bendrųjų teorinių žinių, reikalingų suprasti viso komplekso ir su juo susijusių įvairių energijos tiekimo sistemų derinių veikimą. Kaip teigia autoriai, ši teorija užpildo trūkumą informacijos apie bendrą skirtingų modeliavimo metodų integraciją į vieną teoriją, taikomą hibridinėms energijos sistemoms, kurios per pastaruosius 20 metų buvo priskiriamos pavienėms sistemoms. Šis metodas plačiai taikomas elektros energijos tinklų optimizavimo problemoms spręsti. Tačiau vartodamas tą pačią „energinio centro“ sąvoką, Fabrizio (2008) išplėtojo kompleksinių energijos sistemų veikimo modelį. Fabrizio savo darbuose (2009, 2010) nagrinėjo skirtingas pastato energijos sistemas, siekdamas parinkti racionalų energijos šaltinį ir užtikrinti efektyvaus veikimo strategijas.

Šioje disertacijoje aprašomame tyrime šis metodas pritaikomas mažaener-
gijo pastato energijos poreikio ir pastatui pateiktos energijos srautų sąveikai nu-
statyti ir atlikti kompleksinį MPAES vertinimą, sujungiant skirtingų modeliavi-
mo priemonių rezultatus. Remiantis energijos centro metodo teorija (Fabrizio
2008), tyrimo metu pasirinktoms MPAE sistemoms sudaryta bendra lygčių sis-
tema, kuri pateikiama jungtinės matricos išraiška:

$$X_{in} = A \cdot X_{out}, \quad (2.9)$$

$$X_{out} = [Q_{H,nd}, Q_{C,nd}, Q_{W,nd}, E_L, E_V, W_{HW}, E_A], \quad (2.10)$$

$$X_{in} = [E_{i,del,in}], \quad (2.11)$$

$$A = f(v_{Dn}^{(e)}, \mathcal{E}_{Dn}^{sys}), \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} E_{del,in}^{malkos} \\ E_{del,in}^{gramules} \\ E_{del,in}^{dujos} \\ E_{del,in}^{elektra} \\ E_{del,in}^{saulė(SK)} \\ E_{del,in}^{saulė(SE)} \end{bmatrix}_{Vn \times Dn} = \begin{bmatrix} \frac{v_{D1 \div D3}^f}{\mathcal{E}_{D1 \div D3}^{sys}} & \frac{v_{D1 \div D3}^f}{\mathcal{E}_{D1 \div D3}^{sys}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{D4 \div D6}^f}{\mathcal{E}_{D4 \div D6}^{sys}} & \frac{v_{D4 \div D6}^f}{\mathcal{E}_{D4 \div D6}^{sys}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{D7 \div D9}^f}{\mathcal{E}_{D7 \div D9}^{sys}} & \frac{v_{D7 \div D9}^f}{\mathcal{E}_{D7 \div D9}^{sys}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{D10 \div D15}^f}{\mathcal{E}_{D10 \div D15}^{sys}} & \frac{v_{D10 \div D15}^f}{\mathcal{E}_{D10 \div D15}^{sys}} & v^e & v^e & v^e & v^e \\ \frac{v_{SK}^f}{\mathcal{E}_{SK}^{sys}} & \frac{v_{SK}^f}{\mathcal{E}_{SK}^{sys}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_{SE}^e}{\mathcal{E}_{SE}^{sys}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{Dn} \times \begin{bmatrix} Q_{H,nd} \\ Q_{W,nd} \\ W_{HW} \\ E_V \\ E_L \\ E_A \end{bmatrix}_{Vn}, \quad (2.13)$$

čia A – atvirkštinė jungtinė ($Vn \times Dn$) matrica; X_{in} – pastatui pateikta energija, kWh/m²; X_{out} – pastato energijos poreikis, kWh/m²; Vn – pastato variantai; Dn – technologijų deriniai.

Žinomi duomenys ir kintamieji yra įvedami į modelio bendrąją matematinę išraišką 2.12, susidedančią iš pastato energijos poreikio, pastatui pateiktos energijos srautų ir šių srautų pasiskirstymo kiekviename sistemos energijos generavimo (transformavimo) posistemyje ($v_{gen}^{(e)}$), atsižvelgiant į tai, kokią energiją (šilumą, vėšą ar elektrą) generatorius gamina. Gautas rezultatas – tai pastatui pateikta energija (X_{in}), reikalinga užtikrinti pastato energijos poreikį (X_{out}). Šiame tyrime taikomas ne energijos generatorių nominalus energinis efektyvumas, bet MPAES kiekvieno posistemo sezoninis energinis efektyvumas. Taip pat pasirinkto atvejo analizei vėšos poreikis nevertinamas, nes nustatyta, kad pastato vėšos poreikis šiltuoju laikotarpiu bus užtikrintas taikant pasyviausias apsaugas

nuo saulės priemonės (reguliuojamas išorinės užsklandas) ir mechaninį vėdinimą tiekiant orą iš šiaurinės namo dalies.

2.6.2. Ribinių sąlygų nustatymas

Tyrimo metu, atliekant MPAES integruotą vertinimą, nustatomos taikomos ribinės sąlygos:

- energijos srautų pasiskirstymo MPAES energijos generavimo (transformavimo) posistemiuose ($v_{Dn}^{t(e)}$) sprendimo kintamųjų reikšmių suma (atskirai šilumai, vėsei ir elektros energijai) neturi viršyti 1:

$$\sum_{\bar{G}=G1}^{Gn} v_{Dn}^{t(e)} = 1, \quad (2.14)$$

- energijos srautų pasiskirstymo sprendimo kintamųjų reikšmės gali kisti intervalu nuo 0 iki 1:

$$0 \leq v_{Dn}^{t(e)} \leq 1, \quad (2.15)$$

- pastatui patiekta energija yra teigiamas dydis:

$$E_{i,del,in} \geq 0, \quad (2.16)$$

- techniniai apribojimai saulės energiją vartojančioms technologijoms:

$$\frac{E_{del,in}^{saulė(SK)} \cdot v_{SK}^t}{\mathcal{E}_{SK}^{sys}} \leq (E_{t,SK})_{\max}, \quad (2.17)$$

$$\frac{E_{del,in}^{saulė(SE)} \cdot v_{SE}^e}{\mathcal{E}_{SE}^{sys}} \leq (E_{e,SE})_{\max}, \quad (2.18)$$

čia $t \in \{\text{šiluma}\}$, $e \in \{\text{elektra}\}$, $Dn \in \{D1, \dots, Dn\}$, $i \in \{\text{malkos, granulės, gamtinės dujos, saulė, elektra}\}$.

2.7. Vertinimo kriterijai ir jų rodikliai

Šiame tyrime MPAES įvertinti pasirinkti penki vertinimo kriterijai – energinis efektyvumas, poveikis aplinkai, ekonominis efektyvumas, komfortas ir funkcionalumas.

2.7.1. Energinio efektyvumo kriterijus

Atliekant MPAE sistemų daugiatislį vertinimą, pasirinktas energinio efektyvumo kriterijus, kurį nusako pirminės energijos poreikio rodiklis. Sistemos vertinamos pagal minimalią pirminės energijos poreikio rodiklio reikšmę:

$$x^{en} = x_1 = \min (E_{i,del,in})_{PE} = E_{i,del,in} \cdot f_{P,i,del} \cdot \quad (2.19)$$

Atsinaujinančių išteklių energijos panaudojimo pastate dalis apskaičiuojama taip:

$$RER_p = \frac{\sum E_{ren,i} + \sum ((f_{P,i,del,tot} - f_{P,i,del,nren}) \cdot E_{i,del,in})}{\sum E_{ren,i} + \sum (f_{P,i,del,tot} \cdot E_{i,del,in}) - \sum (f_{P,i,del,exp} \cdot E_{i,exp})}, \quad (2.20)$$

čia $f_{P,i,del}$ – neatsinaujinančių išteklių pirminės energijos faktorius, kurio reikšmės atskiriems energijos srautams pateiktos 2.6 lentelėje (STR 2.01.09:2012).

2.6 lentelė. Pastatui pateiktos energijos srautų konversijos koeficientų reikšmės

Table 2.6. The values of conversion coefficients for delivered energy flows

Energija	Pastatui pateiktos energijos srautai	$f_{P,i,del}$	$f_{CO_2,i,del}$
Šiluma	Malkos	0,1	0
	Granulės	0,1	0
	Gamtinės dujos	1,1	0,2
Elektra	Elektra	2,8	0,6
Saulė	Saulės energija (karštam vandeniui)	0	0
	Saulės energija (elektrai)	0	0

Tyrimo metu priimta, kad saulės energijos technologijos gamina energiją vietoje, todėl pirminės energijos ir CO₂ dujų emisijų faktoriai yra lygūs 0 (Kurnitski *et al.* 2011).

2.7.2. Poveikio aplinkai kriterijus

Atliekant MPAE sistemų daugiatislį vertinimą, pasirinktas poveikio aplinkai kriterijus, kurį nusako šiltnamio efektą sukeliančių CO₂ dujų emisijų rodiklis. Sistemos vertinamos pagal minimalią CO₂ dujų emisijų rodiklio reikšmę:

$$x^{ev} = x_2 = \min (E_{i,del,in})_{CO_2} = E_{i,del,in} \cdot f_{CO_2,i,del}, \quad (2.21)$$

čia $f_{CO_2,i,del}$ – CO₂ dujų emisijų faktorius, kurio reikšmės atskiriems energijos srautams pateiktos 2.6 lentelėje (STR 2.01.09:2012).

2.7.3. Ekonominio efektyvumo kriterijus

Atliekant MPAE sistemų daugiataklį vertinimą, pasirinktas ekonominio efektyvumo kriterijus, kurį nusako MPAES bendrųjų išlaidų (angl. *global cost*) rodiklis (LST EN 15459:2008). Šio tyrimo metu nevertinama su pastato atitvaromis susijusi bendrųjų išlaidų dalis. Pastato energinį naudingumą labiausiai veikia aprūpinimas energija, todėl per ekonominį vertinimą nustatomos bendrosios išlaidos technologijoms ir vėdinimo įrenginiui. Pastato aprūpinimo energija sistemos vertinamos pagal minimalią bendrųjų išlaidų rodiklio reikšmę:

$$x^{ec} = x_3 = \min(C_G(\tau))_{Dn} = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right], \quad (2.22)$$

čia $C_G(\tau)$ – bendrosios išlaidos, nurodytos nuo pradinio laikotarpio τ_0 , per skaičiavimo laikotarpį, €/m²; C_I – pradinių investicijų išlaidos, €/m²; $C_{a,i}(j)$ – metinės išlaidos i -aisiais metais priemonei ar priemonių rinkiniui j , įvertinus einamąsias ir periodines (arba pakeitimo) išlaidas, €/m²; $R_d(i)$ – diskonto normos koeficientas i -aisiais metais, atitinkantis diskonto normą R_R , %; $V_{f,\tau}(j)$ – priemonės ar priemonių rinkinio j galutinė vertė skaičiuojamojo laikotarpio pabaigoje, nurodant pradinį laikotarpį τ_0 , €/m².

Ekonominių skaičiavimų prielaidos, naudotos vertinant MPAE sistemas, pateikiamos 2.7, 2.8 ir 2.9 lentelėse.

2.7 lentelė. MPAES bendrųjų išlaidų vertinimo kintamieji

Table 2.7. Input values for the evaluation of the global cost of the building energy supply system

Skaičiavimo laikotarpis, metai	30
Vidutinė metinė infliacijos norma R_i , %	2
Bankų paskolos (rinkos) palūkanų norma R , %	7
Tikroji diskonto norma R_R , %	4,90
Diskonto normos koeficientas 30-aisiais metais $R_d(\tau)$	0,238
Grynosios dabartinės vertės koeficientas 30-aisiais metais f_{GDP}	15,55
Ekspluatacinių išlaidų padidėjimas per metus, %	2
Biokuro kainos padidėjimas per metus, %	2
Dujų kainos padidėjimas per metus, %	1,8
Elektros kainos padidėjimas per metus, %	1

Kuro ir energijos kasmetis brangimo lygis nustatytas remiantis pastarųjų metų kainų tendencijomis ir prognozėmis (European Commission 2009). Vidutinis metinis infliacijos dydis ir bankų paskolų palūkanų norma nustatyta remian-

tis Lietuvos statistikos departamento ir „Eurostato“ (ES statistikos) duomenimis (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija 2014).

2.8 lentelė. MPAES technologijų kaina

Table 2.8. The initial cost of the technologies of the building energy supply system

MPAES technologijos	Kaina, €/mato vnt.	Gyvavimo trukmė τ_n , metai (LST EN 15459: 2008)	Pakeitimų skaičius	Likutinė vertė	$R_d(\tau_n)$
Biokuro (malkų) katilas, kW	232,04	20	1	0,50	0,616
Granulinis katilas, kW	696,13	20	1	0,50	0,616
Kondensacinis dujinis katilas, kW	278,45	20	1	0,50	0,616
Šilumos siurblys oras-vanduo, kW	779,76	20	1	0,50	0,616
Šilumos siurblys gruntas-vanduo, kW	928,17	20	1	0,50	0,616
Vėdinimo įrenginys, m ³ /h	11,58	20	1	0,50	0,616
Saulės kolektoriai, m ²	371,48	20	1	0,50	0,616
200 W _p saulės elementų sistema, sist.	378,64	25	1	0,80	0,546
4,5 kW _p saulės elementų sistema, sist.	7 323,2	25	1	0,80	0,546

Investicijos į technologijas nustatytos atsižvelgiant į esamas rinkos kainas ir remiantis įvairių tiekėjų pateiktais komerciniais pasiūlymais. Šilumos generavimo technologijų kainą sudaro šilumos generatoriaus, grindų šildymo sistemos medžiagų ir montavimo darbų kainos. Saulės kolektorių sistemos kaina nustatyta įvertinus visos sistemos elementų ir montavimo darbų kainas. Saulės elementų sistemos kainą sudaro visiškai sukomplektuotos sistemos kaina, tačiau dėl duomenų trūkumo neįvertinti montavimo ir prijungimo prie elektros tinklų darbai.

2.9 lentelė. Kuro ir elektros energijos kainos Lietuvoje

Table 2.9. Energy prices in Lithuania

Energija	Pastatui patiektos energijos srutai	Kuro kalingumas, kWh/mato vnt.	Kuro kaina, €/mato vnt.	Energijos kaina, €/kWh
Šiluma	Malkos, m ³	2 910	34,75	0,012
	Granulės, t	5 024	159,3	0,032
	Gamtinės dujos, m ³	9,35	0,58	0,062
Elektra	Elektra, kWh	–	–	0,137
Saulė	Saulės energija (karštam vandeniui)	–	–	0
	Saulės energija (elektrai)	–	–	0

Kuro ir elektros energijos kainos pirmaisiais metais nustatytos pagal 2014 metų kainas, pateiktas atitinkamų gamintojų ir tiekėjų. 2.6 lentelėje energijos kaina nurodyta nevertinant šilumos šaltinių energinio efektyvumo.

2.7.4. Komforto kriterijus

Pastato techninių sistemų sukuriamas patalpų mikroklimatas tiesiogiai veikia energijos sąnaudas. Moksliniai tyrimai patvirtina, kad energijos tausojimas daro neigiamą įtaką žmogaus sveikatai, komfortui ir darbingumui. Kita vertus, pagerinus patalpų mikroklimato ir oro kokybės parametrus, beveik visada gaunamos didesnės energijos sąnaudos (Hamdy *et al.* 2011). Šiuo tyrimu siekiama nustatyti, kaip pastato energiniam naudingumui keliami reikalavimai, skatinantys tausoti energiją, veikia žmogaus poreikių įgyvendinimą. Taigi per MPAE sistemų daugiataklį vertinimą pasirinktas komforto kriterijus, apibūdinamas palaikomo komforto lygio rodikliu (Bjorn *et al.* 2004):

$$\begin{aligned} x^{cmf} &= x_4 = \max(e_{cmf}) = f(PPD, C_{CO_2}) = \\ &= 0,5 \times (100 - 1,0625 \times (PPD - 5)) + 0,5 \times (100 - 2,905 \times (PD - 5)), \end{aligned} \quad (2.23)$$

čia e_{cmf} – bendrojo komforto lygio vertinimo rodiklis; PPD – numatomasis nepatenkintųjų procento rodiklis, %; C_{CO_2} – CO_2 koncentracijos skirtumas tarp patalpos ir lauko oro, ppm; PD – nepatenkintųjų procento rodiklis, taikomas nustatant patalpos oro kokybę, %.

Iš 2.22 lygybės matyti, kad bendrasis komforto lygis vertinamas nustatant patalpose palaikomo šiluminio komforto ir oro kokybės lygius. Pagrindiniu šiluminio komforto vertinimo veiksmu pasirinktas numatomasis nepatenkintųjų procento rodiklis (PPD), o CO_2 koncentracijos skirtumas tarp patalpos ir lauko oro apibrėžia patalpų oro užterštumą.

Šiluminis komfortas. Šiluminio komforto pojūtis – tai būseną, kai žmogus yra patenkintas šilumine aplinka. Nepasitenkinimo pojūtį sukelia žmogų veikianti vėsa arba šiluma. Numatomasis nepatenkintųjų procento rodiklis (PPD) nustato nepatenkintų šilumine aplinka žmonių skaičiaus kiekybinę prognozę, kuri apskaičiuojama pagal 2.23 lygtį (LST EN ISO 7730:2006):

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp \left[- \left(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2 \right) \right]. \quad (2.24)$$

Iš 2.23 lygties matyti, kad patalpos šiluminiam komfortui įvertinti naudojamas numatomasis vidutinio vertinimo rodiklis (PMV), kuris nustatomas pagal O. Fangerio skaičiavimo metodiką (LST EN ISO 7730:2006). Šis rodiklis taikomas, kai norima patikrinti, ar nustatoma šiluminė aplinka atitinka šiluminio komforto parametrų vertes. PMV rodiklis yra apibūdinamas pagrindiniais šešiais

šiluminiais kintamaisiais: žmogaus fiziniu aktyvumu (medžiagų apykaita), aprangos šilumine varža, šiluminio spinduliavimo vidutine temperatūra, oro santykiniu drėgnumu, patalpos oro temperatūra, oro judėjimo greičiu. Nustačius šių kintamųjų reikšmes, apskaičiuojamas PMV rodiklis, pagal kurį įvertinamas žmogaus organizmo šilumos pojūtis (LST EN ISO 7730:2006):

$$\begin{aligned}
 PMV = & \left(0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028\right) \cdot \left\{ (M - W) \right. \\
 & - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - \\
 & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - \\
 & \quad \left. - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_r) - \right. \\
 & \left. - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot \alpha_c \cdot (t_{cl} - t_r) \right\}
 \end{aligned} \quad (2.25)$$

čia t_{cl} – drabužių paviršiaus temperatūra, °C; α_c – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas, W/(m²·K); f_{cl} – koeficientas, kuris parodo santykį tarp žmogaus kūno ploto su apranga ir kūno ploto be aprangos; I_{cl} – aprangos šiluminė varža, m²·K/W; M – medžiagų apykaita kūno paviršiaus kvadratiniam metrui, W/m²; W – išorinis darbas kūno paviršiaus kvadratiniam metrui, W/m²; t_r – patalpos oro temperatūra, °C; t_{mrt} – šiluminio spinduliavimo vidutinė temperatūra, °C; v_{ar} – oro judėjimo greitis, m/s; p_a – dalinis vandens garų slėgis, esant lauko sąlygoms, Pa.

Šiame darbe PMV rodiklio reikšmės nustatytos taikant modeliavimo priemonę „DesignBuilder“. Pastato modelyje įvesti nekintami dydžiai, t. y. gyventojų aprangos šiluminė varža (žiema – $I_{cl} = 1,5$ clo, vasara – $I_{cl} = 1,0$ clo) ir žmogaus medžiagų apykaita (110 W/žmogui valgomajame-svetainėje, 90 W/žmogui miegamajame, 160 W/žmogui virtuvėje su pataisais koeficientu 0,90). Šiluminio komforto vertinimo rezultatai pateikiami 3-iajame skyriuje.

Oro kokybė. Patalpų oro kokybė lemia žmogaus komfortą, produktyvumą ir sveikatą. Norvegijoje ir Vokietijoje mažaeenergių pastatų patalpoms vėdinti tiekiamo oro kiekis nustatytas ne mažesnis kaip 1,2 m³/(h·m²), Danijoje – 1,08 m³/(h·m²), Lietuvoje – 0,7 m³/(h·m²) (NS 3700, STR 2.01.09:2012). Šiame darbe patalpų oro kokybė nustatoma taikant nepatenkintųjų procento rodiklį (PD), įvertinantį oro užterštumą gyvenamosiose patalpose.

$$PD = 395 \cdot \exp\left(-15,15 \cdot C_{CO_2}^{-0,25}\right), \quad (2.26)$$

Šiame darbe CO₂ dujų koncentracija yra naudojama kaip rodiklis oro kokybei apibūdinti. Gyvenamosiose patalpose oro kokybės lygis nustatomas remiantis 2.10 lentelėje pateiktomis CO₂ koncentracijos norminėmis vertėmis (STR 2.09.02:2005).

2.10 lentelė. Oro kokybės kategorijos ir jas atitinkantys lygiai

Table 2.10. The air quality categories and corresponding levels

Oro kokybės kategorija	Oro kokybės lygis	Patalpų ir lauko ore CO ₂ koncentracijos skirtumas, ppm
IDA 1	Aukštas	iki 400
IDA 2	Vidutinis	iki 600
IDA 3	Pakankamas	iki 800
IDA 4	Žemas	iki 1 000

Patalpose CO₂ koncentracija apskaičiuota pagal 2.26 lygtį (ANSI/ASHRAE Standard 62-2004):

$$C_{CO_2} = C_{IDA} - C_{ODA} = \frac{N \cdot 10^6}{L_o}, \quad (2.27)$$

čia C_{CO_2} – patalpų ir lauko ore CO₂ koncentracijos skirtumas, ppm; C_{IDA} – CO₂ koncentracija patalpose, ppm; C_{ODA} – CO₂ koncentracija lauko ore, ppm; N – vieno žmogaus išskiriamas CO₂ kiekis, m³/h; L_o – tiekiamo oro kiekis vienam žmogui, m³/h. Vertinant oro kokybę, priimta, kad CO₂ koncentracija lauko ore yra 400 ppm, tiekiamo oro kiekis vienam žmogui yra 47,5 m³/h, vieno žmogaus išskiriamas CO₂ kiekis – 0,011 cfm arba 0,0187 m³/h, kai žmogaus fizinis aktyvumas siekia 1,2 met (ANSI/ASHRAE Standard 62-2004).

2.7.5. Funkcionalumo kriterijus

Atliekant MPAE sistemų daugiataklį vertinimą, pasirinktas funkcionalumo kriterijus, apibrėžiamas MPAES funkcionalumo rodikliu:

$$x^{fnc} = x_5 = \max(Fnc, Cmp, Mnt) = |Fnc, Cmp, Mnt|_{avg}, \quad (2.28)$$

$$Fnc = 1 - \frac{Q_{def}}{Q_{HW,nd}}, \quad (2.29)$$

čia Fnc – techninis funkcionalumas, %; Cmp – sistemos sudėtingumas, %; Mnt – priežiūra ir eksploatacija, %; Q_{def} – trūkstama energija, reikalinga sistemai užtikrinti 100 % šilumos poreikį šildymui ir karštam vandeniui ruošti, kWh/m². Trūkstamos energijos kiekis Q_{def} nustatomas iš MPAES modeliavimo rezultatų, taikant „Polysun“.

MPAES funkcionalumas įvertinamas apibūdinant sistemų sudėtingumą ir aptarnavimą ekspertinio vertinimo būdu. Ekspertams pateiktos 28 anketos kiek-

vienos MPAES funkcionalumui nustatyti pagal sudarytą vertinimo skalę (2.11 lentelė).

2.11 lentelė. Bendroji MPAES funkcionalumo vertinimo skalė

Table 2.11. The common measurement scale for the functionality of the building energy supply system

Balas	Ekspertinis vertinimas	
	Priežiūra ir eksploatacija (<i>Mnt</i>)	Sudėtingumas (<i>Cmp</i>)
10	Puikus	Minimalių darbo sąnaudų reikalaujanti sistema.
9	Labai geras	Įprastinė, rankinis reguliavimas.
8	Geras	Nesudėtinga, automatikos minimaliai (reguliavimas pagal šilumnešio temperatūros jutiklius).
7	Vidutinis	Mažiau sudėtinga, automatinis reguliavimas su pastovios temperatūros karšto vandens talpyklose palaikymu.
6	Patenkinamas	Vidutinio sudėtingumo, automatinis reguliavimas su karšto vandens temperatūros kontrole pagal nustatytą režimą.
5	Beveik patenkinamas	Sudėtinga, automatinis reguliavimas, įvertinantis vartotojo elgseną.
4	Blogas	Labai sudėtinga, visiškai automatizuota.

MPAE sistemų priežiūra ir eksploatacija vertinamos pagal įrangos elementų pasiekiamumą juos keičiant ir prižiūrint bei lengvumą vertinant sistemos techninę būklę ir šalinant gedimus eksploataavimo metu. Sudėtingumas apibrėžiamas pagal sistemos hidraulinių vandens kontūrų ir įrangos reguliavimo sudėtingumą.

2.8. Daugiatikslio sprendimo priėmimo metodas

Remiantis atliktais tyrimais (Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013; Medineckienė ir Džiugaitė-Tumėnienė 2014), nustatyta, kad pastato aprūpinimo energija sistemos daugiatislio vertinimo metu, taikant SAW, MEW, COPRAS, TOPSIS ir WASPAS metodus, alternatyvų vertinimo eiga skiriasi, tačiau galutinis rezultatas sutapo visais nagrinėtais atvejais. Todėl šiame tyrime sprendimui priimti naudojamas daugiatislio vertinimo metodas WASPAS (angl. *Weighted Aggregated Sum Product Assessment*), kuris sujungia svorių sumos (angl. *Weighted Sum Model*, WSM) ir rezultatų sumos (angl. *Weighted Product Model*, WPM) modelius (Zavadskas *et al.* 2012). Dviejų modelių derinys padidina rezultato patikimumą, nes išnaudojami modelių privalumai ir sumažinami esami apribojimai.

Šiame darbe daugiatis sprendimas priimamas šešioms pastato variantams, kiekvienam iš jų numatant 15 skirtingų aprūpinimo energija sistemų, kurios vertinamos pagal 5 kriterijus. Taikant svorinės agreguotos sumos metodą, atlikti skaičiavimai pagal šias lygtis:

–bendroji lygtis:

$$WAPAS_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) Q_i^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \bar{q}_j + (1 - \lambda) \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{\bar{q}_j}, \quad (2.30)$$

–koeficientas, sujungiantis du modelius $Q_i^{(1)}$ ir $Q_i^{(2)}$ ir nusakantis šių modelių tiesinę kombinaciją, esant reikšmėms $\lambda \in [0,1]$:

$$\lambda = \frac{\sigma^2(Q_i^{(2)})}{\sigma^2(Q_i^{(1)}) + \sigma^2(Q_i^{(2)})}, \quad (2.31)$$

–modelių $Q_i^{(1)}$ ir $Q_i^{(2)}$ santykinės svarbos (įtakos) neatitikimas:

$$\sigma^2(Q_i^{(1)}) = \sum_{j=1}^n \bar{q}_j^2 \sigma^2(\bar{x}_{ij}), \quad (2.32)$$

$$\sigma^2(Q_i^{(2)}) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{\bar{q}_j} \bar{q}_j}{(\bar{x}_{ij})^{\bar{q}_j} (\bar{x}_{ij})^{(1-\bar{q}_j)}} \right)^2 \sigma^2(\bar{x}_{ij}), \quad (2.33)$$

–normalizuotų pradinių rodiklių reikšmių dispersija, priimant, kad rodiklių reikšmių neapibrėžtumas siekia 10 %; koeficientas $t = 2,0$, kai klaidų pasiskirstymas pagal normalųjį dėsnį; patikimumo lygis $q = 0,05$:

$$\sigma^2(\bar{x}_{ij}) = (0,05 \bar{x}_{ij})^2, \quad (2.34)$$

–normalizuotos rodiklių reikšmės, kai racionali reikšmė yra minimali:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}, \quad (2.35)$$

–normalizuotos rodiklių reikšmės, kai racionali reikšmė yra maksimali:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}, \quad (2.36)$$

čia $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$; m – alternatyvos; n – vertinimo kriterijai; $Q_i^{(1)}$ – galutinė alternatyvos i racionalumo reikšmė pagal svorių sumos modelį; $Q_i^{(2)}$ – galutinė alternatyvos i racionalumo reikšmė pagal rezultatų sumos modelį; λ – koeficientas, tiesiškai sujungiantis modelius $Q_i^{(1)}$ ir $Q_i^{(2)}$; x_{ij} – alternatyvos i rodiklio reikšmė, kada alternatyva vertinama j kriterijaus atžvilgiu; \bar{q}_j – vertinimo kriterijaus reikšmingumas; $\sigma^2(\bar{x}_{ij})$ – normalizuotų pradinių rodiklių reikšmių dispersija.

Nustačius pasirinktų vertinimo kriterijų reikšmingumą, kompiuterinės programos „MATLAB“ aplinkoje sudaroma pradinė sprendimų priėmimo matrica kiekvienam pastato variantui (nuo V1 iki V6). Pradinę sprendimų priėmimo matricą sudaro 15 MPAE sistemų (alternatyvų) pirminės energijos poreikio, išmetamų CO₂ dujų emisijų kiekio, bendrųjų išlaidų, užtikrinamo komforto lygio, technologinio funkcionalumo rodiklių reikšmės ir vertinimo kriterijų reikšmingumo reikšmės. Atliekamas alternatyvų rodiklių reikšmių normalizavimas, atsižvelgiant į kriterijų racionalias (minimalias arba maksimalias) reikšmes. Kitame etape, taikant WASPAS metodą, sudaroma normalizuota svertinė sprendimo priėmimo matrica. Paskutiniame sprendimo etape atliekamas alternatyvų rangavimas. Daugiatikslio vertinimo rezultatas – racionali MPAES kiekvienam pastato variantui.

2.9. Kriterijų subjektyvaus reikšmingumo nustatymas porinio lyginimo metodu

Taikant daugiatikslius sprendimo priėmimo metodus, pirmiausiai nustatomi vertinimo kriterijų reikšmingumai, kurie rodo pasirinkto kriterijaus svarbą nagrinėjamai problemai. Šiame darbe alternatyvų vertinimui pasirinktas kriterijų subjektyvus reikšmingumas, kuris atspindi eksperto subjektyvų požiūrį į kriterijų svarbą. Todėl racionalaus sprendimo, gauto įvertinus kriterijų subjektyvų reikšmingumą, patikimumas nustatomas, atliekant jautrumo analizę (2.10 poskyris).

Šiame darbe pasirinktų kriterijų (x^{en} – energinio efektyvumo, x^{ev} – poveikio aplinkai, x^{ec} – ekonominio efektyvumo, x^{cmf} – komforto, x^{fnc} – funkcionalumo) reikšmingumui (\bar{q}_j) apskaičiuoti naudojamas AHP (angl. *Analytic Hierarchy Process*) porinio palyginimo metodas (Saaty ir Erdener 1979; Podvezko 2009). Kriterijų reikšmingumų reikšmėms gauti reikia informacijos, gaunamos poromis lyginant rodiklius ir nustatant jų „tarpusavio svarbos intensyvumą“. Ekspertams pateiktos 28 anketos kiekvieno kriterijaus reikšmingumui įvertinti pagal Saaty (1977) sudarytą vertinimo skalę (2.12 lentelė).

2.12 lentelė. Kiekybinių ir kokybinių kriterijų reikšmingumo vertinimo skalė

Table 2.12. The weighting scale for the qualitative criteria and the quantitative criteria

Reikšmingumo intensyvumas	Atitinkamas reikšmingumas
1	Vienodai svarbus
3	Vienas kriterijus šiek tiek svarbesnis už kitą
5	Vienas kriterijus svarbesnis už kitą
7	Vienas kriterijus ženkliai svarbesnis už kitą
9	Vienas kriterijus ypatingai svarbesnis už kitą
2, 4, 6, 8	Tarpinės reikšmės

Remiantis 28 ekspertams išdalytų anketų duomenimis, užpildytos porinio palyginimo lentelės. Skaitinės rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmės \bar{q}_j nustatomos mažiausių kvadratų metodu (Ustinovičius ir Zavadskas 2004). Metodo privalumas tas, kad vienu metu apima visą tiesinių lygčių sistemos sprendinių aibę. Rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmės gaunamos sprendžiant optimizavimo uždavinį:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (b_{ij} \bar{q}_j - \bar{q}_i)^2, \quad (2.37)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{q}_i = 1, \quad (\bar{q}_i > 0, i = \overline{1, n}). \quad (2.38)$$

Uždavinys sprendžiamas sudarant Lagranžo funkciją:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (b_{ij} \bar{q}_j - \bar{q}_i)^2 + 2\lambda \left(\sum_{i=1}^n \bar{q}_i - 1 \right), \quad (2.39)$$

čia λ – Lagranžo daugiklis.

Diferencijuojant (2.39) funkciją atžvilgiu $\bar{q}_l, (l = 1, 2, \dots, n)$, gaunamos lygtys:

$$\sum_{i=1}^n (b_{il} \bar{q}_l - \bar{q}_i) \cdot b_{il} - \sum_{j=1}^n (b_{lj} \bar{q}_j - \bar{q}_l) + \lambda = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, n). \quad (2.40)$$

Naudojant lygtis (2.38) ir (2.40), sudaroma tiesinių nehomogeninių lygčių sistema, turinti $(n+1)$ lygtį ir $(n+1)$ nežinomąjį. Bendrai ši lygčių sistema užrašoma matricine forma:

$$C \cdot Q = m, \quad (2.41)$$

čia $Q = (\overline{q_1}, \overline{q_2}, \dots, \overline{q_n}, \lambda)^T$ – kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmių su λ – Lagranžo daugikliu vektorių stulpelis; $m = (0, \dots, 1)^T$ – atitinkamas laisvųjų narių stulpelis.

Matricą $C_{[(n+1) \times (n+1)]}$ sudaro elementai l_{ij} , apskaičiuojami pagal formules:

$$l_{ii} = (n-2) + \sum_{j=1}^n b_{ji}^2, \quad (i, j = \overline{1, n}), \quad (2.42)$$

$$l_{ij} = -(b_{ij} + b_{ji}), \quad (i, j = \overline{1, n}, i \neq j), \quad (2.43)$$

$$l_{k, n+1} = l_{n+1, k} = 1, \quad (k = \overline{1, n}), \quad (2.44)$$

$$l_{n+1, n+1} = 0, \quad (2.45)$$

čia n – kriterijų skaičius, b_{ij} – i -tojo ir j -tojo kriterijų rangų santykis.

Ekspertizės patikimumas išreiškiamas ekspertų nuomonių konkordancijos koeficientu, apibūdinančiu individualių nuomonių sutapimo laipsnį kiekvieno kriterijaus įvertinimo rezultatų nuokrypių kvadratų suma S . S apskaičiuojama pagal formulę:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^r c_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r c_{ij} \right]^2, \quad (2.46)$$

čia r – ekspertų skaičius, n – kriterijų skaičius, c_{ij} – i -tojo kriterijaus rango reikšmė, kurią suteikė j -tasis ekspertas.

Kriterijų rangų sumų nuokrypių nuo bendro vidurkio kvadratų suma lygi 4611.

Ekspertų nuomonių konkordancijos koeficientas apskaičiuojamas:

$$W = \frac{12S}{r^2(n^3 - n)}. \quad (2.47)$$

Nustatyta konkordancijos koeficiento reikšmė $0,588 > 0$, todėl galima teigti, kad rangavimo metodu gautų kriterijų reikšmingumų dydis pakankamas. Nustatomas konkordancijos reikšmingumas:

$$\chi^2 = \frac{12S}{r \cdot n(n+1)}. \quad (2.48)$$

Nustatytas ekspertų nuomonių suderinamumas:

$$\chi^2 = 65,87 > \chi_{krit}^2 = 9,49 - \text{sąlyga tenkinama}, \quad (2.49)$$

čia χ_{krit}^2 – parinktas iš lentelės, atsižvelgiant į laisvės laipsnių skaičių ($\nu = n - 1 = 4$) ir tikimybę $p = 0,95$, kai pasirinktas reikšmingumo lygmuo $\alpha = 0,05$.

Gauta lygybė yra teisinga, todėl ekspertų nuomonių suderinamumas yra pakankamas. Kadangi ekspertų nuomonių dėl kriterijų reikšmingumų suderinamumas yra pakankamas, rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmės skaičiuojamos pagal formulę:

$$\bar{q}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \bar{q}_{ij}, \quad j = \bar{1}, n. \quad (2.50)$$

Gauti rezultatai pateikiami 2.13 lentelėje.

2.13 lentelė. Kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmės ($\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \bar{q}_4, \bar{q}_5$)

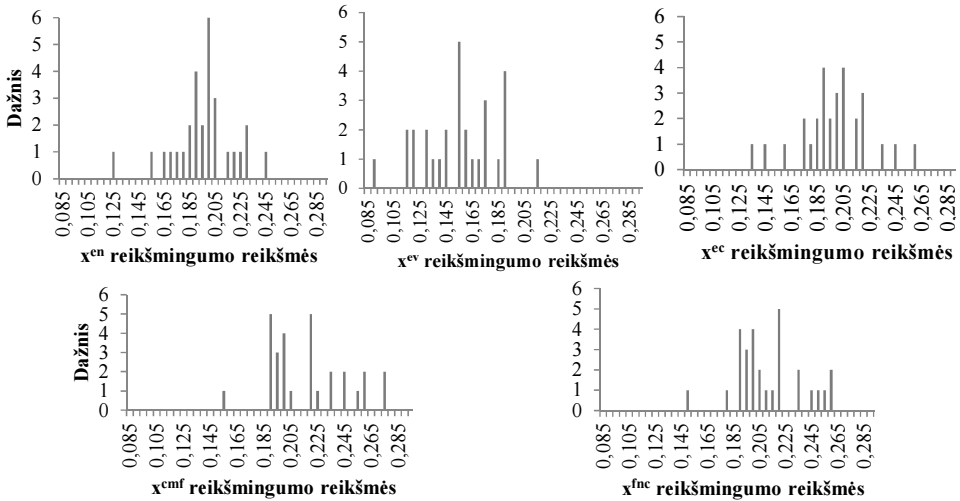
Table 2.13. Criteria weights ($\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \bar{q}_4, \bar{q}_5$)

Vertinimo kriterijai	Subjektyvaus reikšmingumo reikšmės \bar{q}_j
x^{en}	0,204
x^{ev}	0,160
x^{ec}	0,202
x^{cmf}	0,220
x^{fnc}	0,215
	1,000

Šiame darbe energinio efektyvumo, poveikio aplinkai ir ekonominio efektyvumo vertinimo kriterijus nusakančių rodiklių reikšmės yra minimizuojamos, o komforto ir funkcionalumo rodiklių reikšmės – maksimizuojamos.

2.10. Racionalios pastato aprūpinimo energija sistemos jautrumo analizė

Tyrimo metu racionalaus derinio patikimumui nustatyti atliekama jautrumo analizė pagal kriterijų reikšmingumą. Tikslas – nustatyti, ar, pasikeitus kriterijų reikšmingumo reikšmėms, sprendinys išlieka racionalus ir koks kriterijus yra kritiškiausias, keičiantis derinių rangų išsidėstymą. Jautrumo analizei taikomas Monte Karlo statistinio modeliavimo metodas (Simanavičienė 2011). Kriterijų reikšmingumo reikšmių imitavimo procesas atliktas dviem etapais. Remiantis 28 ekspertų nuomonėmis, nustatyta, kad kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmės pasiskirsto pagal normalųjį dėsnį (2.10 paveikslas).



2.10 pav. Kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmių pasiskirstymas
Fig. 2.10. The distribution of the values of criteria subjective significances

Todėl pirmajame etape sugeneruotos kriterijų reikšmingumo atsitiktinės reikšmės pagal normalųjį pasiskirstymo dėsnį. Kiekvienam kriterijui sugeneruojama atsitiktinė imtis iš 662 eksperimentinių bandymų, esant pasirinktam tolerancijos intervalui (0,99; 0,99) (Kopustinskas *et al.* 2007). Pirminiam priartėjimui yra priimtas kriterijų reikšmingumo reikšmių kitimas intervalu [0,05; 0,5]. Antrajame etape kiekvienam kriterijui sugeneruota reikšmių imtis yra patikslinama taip, kad visų kriterijų suma būtų lygi 1.

Sugeneruotos penkių kriterijų reikšmingumo reikšmės įvedamos į modelį. Sprendimas priimamas naudojant pasirinktą daugiakriterį vertinimo metodą WASPAS. Gautai rezultatų (kiekvieno pastato varianto aprūpinimo energija sistemų racionalumo reikšmių) imčiai atliekama statistinė analizė, nustatomos skaitinės charakteristikos: vidurkis, standartinis nuokrypis, mediana, minimumas, maksimumas, kvantiliai, variacijos koeficientas (Čekanavičius ir Murauskas 2006). Nustatoma, ar galutiniam sprendimui priimti naudojamų atsitiktinių kriterijų reikšmingumo reikšmių kitimas yra pakankamas PAE sistemų racionalumui patikrinti. Sprendimo patikimumui įvertinti yra taikomi statistinės analizės metu nustatyti rodikliai: dažniausiai pasitaikiusi rango reikšmė kiekvienai alternatyvai ir dažniausiai pasitaikiusios rango reikšmės pasikartojimų dažnis (Simanavičienė 2011):

$$p(A_i) = \frac{n(l)}{K} \cdot 100\% , \quad (2.51)$$

čia $p(A_i)$ – alternatyvai A_i priskirto rango l patikimumo įvertis; K – iteracijų skaičius; $n(l)$ – dažniausiai pasitaikiosios alternatyvos A_i rango reikšmės l , dažnis.

Gautas racionalus sprendimas yra laikomas patikimu, kai dažniausiai pasitaikiosios rango reikšmės pasikartojimų dažnio reikšmė didesnė nei 90 %.

2.11. Antrojo skyriaus išvados

1. Siekiant nustatyti mažą energijos pastato su skirtingomis pasyviosiomis EPEP energinį naudingumą, parinkta ir pritaikyta modeliavimo priemonė „DesignBuilder“. Modeliavimo priemonės taikymas leidžia sudaryti pastato energijos balansą kiekvieno nagrinėjamo varianto atveju, remiantis vietovės klimato duomenimis, pastato naudojimo režimu, šiluminio komforto ir oro kokybės sąlygomis, mikroklimato sistemų darbo režimais, pastato karšto vandens poreikiu, apšvietimo ir buitinių elektros prietaisų efektyvumu.
2. Mažą energijos pastato aprūpinimo energija sistemos kompleksiniam vertinimui pasiūlyta nagrinėti tik dažniausiai praktikoje taikomas aprūpinimo energija technologijas, įvertinant kiekvienos sistemos struktūrą, energijos srautus, erdvines ribas, AEI technologijų integravimo galimybes. Energijos srautų ir saulės energiją transformuojančių technologijų techninių apribojimų nustatymui pasirinkta modeliavimo priemonė „Polysun“. MPAES technologijų modeliavimo rezultatams apdoroti tikslinga taikyti sisteminę analizę, kuri leidžia nustatyti kiekvieno posistemo (transformavimo, gamybos, akumuliacinio, paskirstymo, reguliavimo ir sklaidos) sezoninį energinį efektyvumą ir jo didinimo galimybes.
3. Sukurtas MPAES integruoto vertinimo modelis apima pastato energijos poreikio ir aprūpinimo energija sistemų modeliavimo rezultatų apdorojimą, pritaikant modifikuotą energijos srautų jungtinę matricą, daugiataksių sprendimo priėmimo metodą ir jautrumo analizę. Autorės modifikuota jungtinė matrica, apibrėžianti tiesioginį ryšį tarp pastato energijos poreikio ir pastatui tiekiamos energijos srautų, leidžia lanksčiai apjungti modeliavimo priemones ir daugiataksio sprendimo priėmimo metodus.
4. Racionalų mažą energijos pastato aprūpinimą energija tikslinga nustatyti vertinant kiekybinių ir kokybinių rodiklių visumą, kuri apima energinį efektyvumą, poveikį aplinkai, ekonominį efektyvumą, užtikrinamą komfortą ir sistemos techninį funkcionalumą.

5. Integruoto vertinimo metu daugiatakslio sprendimo priėmimo metodo parinkimas ir galutinio rezultato patikimumas yra svarbūs aspektai, siekiant gauti efektyvų ir pagrįstą sprendimą. Pasirinktas svorinės agreguotos sumos metodas (WASPAS) leidžia padidinti sprendimo patikimumą, nes išnaudojami sujungtų WSM ir WPM modelių privalumai ir sumažinami esami jų apribojimai. Atliekant racionalaus sprendimo jautrumo analizę pagal kriterijų reikšmingumą, tikslinga pasirinkti imitacinį Monte Karlo metodą, pagrįstą statistiniu modeliavimu, ir kriterijų reikšmingumo reikšmių imčių duomenų statistinę analizę.

3

Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos integruoto vertinimo modelio taikymas

Siekiant patikrinti sudaryto MPAES integruoto vertinimo modelio pritaikymą, šiame skyriuje vertinami mažąenergio vienbučio namo šešių konstrukcinių sprendimų variantai ir jiems numatytos 15 PAE sistemos.

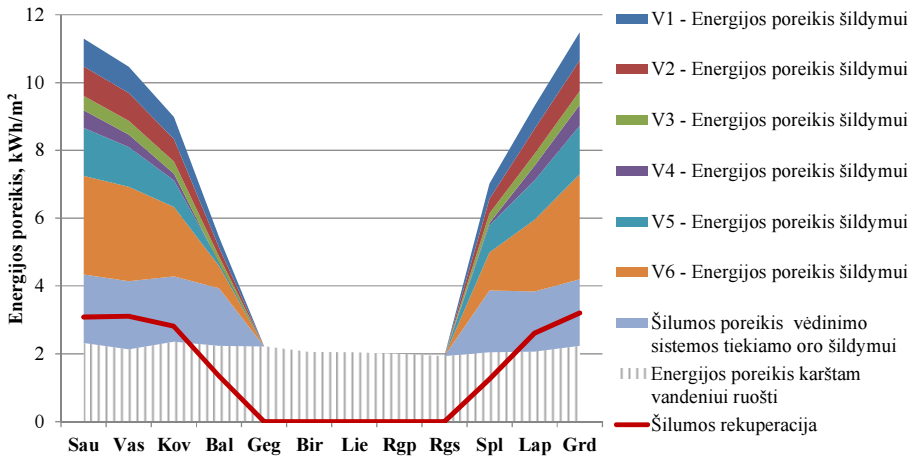
Skyriaus tematika paskelbti 3 autorės straipsniai (Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2013; Džiugaitė-Tumėnienė ir Streckienė 2014; Džiugaitė-Tumėnienė ir Lapinskienė 2014).

3.1. Mažaenergio pastato energijos balanso analizė

Šiame poskyryje pateikiami mažąenergio vienbučio namo šilumos ir energijos balansai, palaikomo šiluminio komforto ir oro kokybės vertinimo rezultatai.

3.1.1. Mažaenergio pastato šilumos ir energijos balansai

Sudarant mažą energijos vienbučio namo energijos balansą, įvertintas energijos poreikis šildymui, vėdinimui, karštam vandeniui ruošti, apšvietimui ir buitiniams elektros prietaisams. Pastato energinio modeliavimo rezultatai pateikiami 3.1 paveiksle ir A priede.



3.1 pav. Mažaenergio pastato energijos poreikis šildymui, karštam vandeniui ruošti ir vėdinimui

Fig. 3.1. The energy demand of the low energy house for space heating, ventilation and domestic hot water

Pastato energijos poreikis karštam vandeniui ruošti ($25,6 \text{ kWh/m}^2$) ir vėdinimui ($13,2 \text{ kWh/m}^2$) yra vienodas visiems pasirinktiems pastato variantams. V1 varianto atveju gaunamas didžiausias energijos poreikis patalpų šildymui ($35,5 \text{ kWh/m}^2$), jį galima sumažinti iki $14,7 \text{ kWh/m}^2$, jei pastato atitvarų šiluminės charakteristikos atitiktų V6 variantą. 3.1 lentelėje pateikiama pastato šilumos galia šildymui, karštam vandeniui ruošti ir tiekiamam orui šildyti.

3.1 lentelė. Pastato šilumos galia šildymui, karštam vandeniui ruošti ir tiekiamam orui šildyti

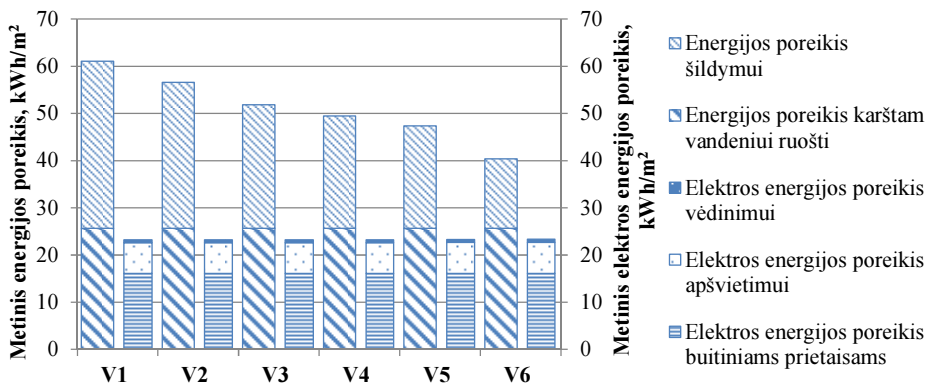
Table 3.1. The heat load of heating, hot water preparation and supplied air heating of the house

Variantai	V1	V2	V3	V4	V5	V6
P_{Hs} , kW	3,65	3,29	2,92	2,77	2,57	2,05
P_{Ws} , kW	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22
P_{Vs} , kW	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457
Σ , kW	7,33	6,97	6,60	6,45	6,25	5,73

3.2 lentelė. Metinis pastato energijos poreikis**Table 3.2.** Annual building energy demand

Variantai	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Q_H , kWh/m ²	35,50	30,90	26,21	23,80	21,70	14,70
Q_W , kWh/m ²	25,65	25,65	25,65	25,65	25,65	25,65
Q_V , kWh/m ²	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20
W_{HW} , kWh/m ²	žiūrėti į 3.3 lentelėje pateiktus duomenis					
E_V , kWh/m ²	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
E_L , kWh/m ²	6,55	6,57	6,56	6,55	6,60	6,63
E_A , kWh/m ²	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00

Tyrimo metu įvertintas pastato elektros energijos poreikis vėdinimui, apšvietimui ir buitiniams elektros energijos prietaisams (3.2 paveikslas). MPAES cirkuliaciniams siurbliams reikalingas elektros energijos poreikis vertinamas atskirai, nes kiekvieno MPAES technologijų derinio atveju gaunamos skirtingos elektros energijos sąnaudos (3.3 lentelė).



3.2 pav. Mažaenergio pastato energijos balansas
Fig. 3.2. The energy balance of the low energy house

3.3 lentelė. Pastato elektros poreikis (W_{HW} , kWh/m²) MPAES cirkuliaciniams siurbliams**Table 3.3.** Building electricity demand (W_{HW} , kWh/m²) for circulation pumps of BESS

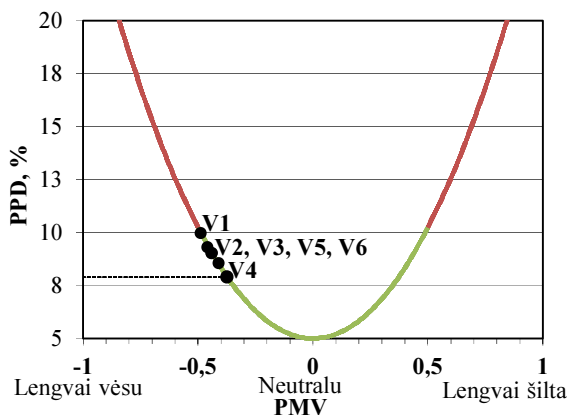
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
V1	2,0	1,7	1,7	2,0	1,7	1,7	2,0	1,7	1,7	2,0	1,7	1,7	2,8	2,4	2,4
V2	1,7	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,8	1,6	1,6	2,8	2,3	2,3
V3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,6	2,2	2,2
V4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	2,5	2,1	2,1
V5	1,4	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	2,4	2,0	2,0
V6	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	2,2	1,8	1,8

Taigi per šį tyrimą, kai elektros energijos poreikis vėdinimui, apšvietimui ir elektros prietaisams yra vienodas, energijos poreikis šildymui turi didžiausią įtaką pastato variantų energijos poreikių rezultatams.

3.1.2. Šiluminio komforto ir oro kokybės vertinimo rezultatų analizė

Tyrimo metu nustatytas bendras metinis pastato patalpose palaikomas komforto lygis. Jis išaiškintas įvertinus numatomąjį vidutinio vertinimo rodiklį (PMV) – patalpos šiluminiam komfortui nustatyti, ir CO₂ koncentraciją – oro kokybei gyvenamojoje aplinkoje nusakyti. Naudojant pastato energinio modeliavimo programą „DesignBuilder“, PMV rodiklio vertės nustatytos atsižvelgiant į nustatytą oro temperatūrą, palaikomą santykinį oro drėgnumą, oro judrumą patalpose, žmonių apsirengimą ir buvimo patalpose laiką. Atlikus PMV rodiklio rezultatų analizę, išaiškinta, kad didžiausią įtaką šiluminio komforto vertinimui turi pastato konstrukcijų šilumos talpa ir palaikomi patalpų mikroklimato parametrai. Nustatyta, kad šaltuoju laikotarpiu V1 pastato varianto atveju (konstrukcijų šilumos talpa yra mažiausia) dažniausiai pasikartojančių mikroklimato parametrų reikšmės neuztikrina šiluminio komforto sąlygų (B priedas), t. y. vidutinė oro temperatūra siekia apie 21 °C, tačiau vidutinis santykinis drėgnumas yra 25,3 %. Šie parametrai lemia PMV rodiklio reikšmę, kuri lygi -0,370 (nežymiai vėsu), t. y. šaltuoju laikotarpiu dažniausiai nepatenkintųjų gyventojų procento rodiklis (PPD) siekia 7,85 %. Šaltuoju laikotarpiu diskomfortas sudaro 1 226 valandas. Pereinamuoju laikotarpiu palaikoma vidutinė oro temperatūra yra apie 20,3 °C, o vidutinis santykinis drėgnumas siekia 41,3 %. Šiluminio komforto PMV rodiklio reikšmė yra -0,982 (lengvai vėsu) – ji nurodo, kad pereinamuoju laikotarpiu PPD yra 25,4 % (378 diskomforto valandos). Šiltuoju laikotarpiu vidutinė PMV rodiklio reikšmė yra -0,231 (nežymiai vėsu), nepatenkintųjų šilumine aplinka – 6,11 %, kai vidutinė patalpose palaikoma oro temperatūra yra 22,8 °C, o vidutinis santykinis drėgnumas – apie 52,4 %. Kiekvieno nagrinėjamo pastato varianto (nuo V1 iki V6) patalpose palaikomo šiluminio komforto rodikliai vaizduojami 3.3 paveiksle.

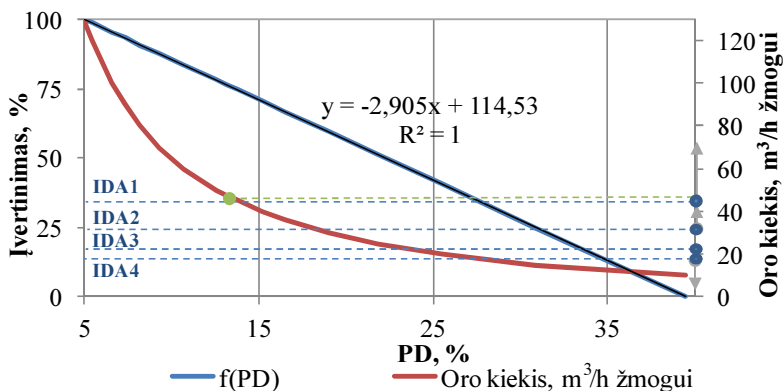
Iš 3.3 paveikslo matyti, kad kiekvieno pastato varianto atveju numatomasis nepatenkintųjų procento rodiklis (PPD) kito 8–10 %, vadinasi, per visus metus palaikomos šiluminio komforto sąlygos tenkina namo gyventojus. V1 varianto atveju diskomforto valandų skaičius siekia 1 721 valandą per metus.



3.3 pav. Numatomas šilumine aplinka nepatenkintųjų procentas (PPD), kaip PMV rodiklio funkcija

Fig. 3.3. Predictable percentage of dissatisfied with the thermal environment (PPD) as a function of the PMV index

Nustatant bendrąjį komforto lygį yra vertinama patalpose palaikoma oro kokybė. Tyrimo metu priimtas sprendimas, kad kiekvieno pastato variantui yra numatoma vienoda mechaninio vėdinimo sistema su šilumos rekuperacija. Tiekiamo į patalpas ir šalinamo iš patalpų oro kiekis yra $190 \text{ m}^3/\text{h}$ – tai užtikrina aukštą oro kokybės lygį (IDA1). Skaičiavimo metu nustatyta, kad patalpose CO_2 koncentracija neviršys 393 ppm daugiau negu CO_2 koncentracija lauko ore (400 ppm). Pastato patalpose oro kokybės lygio įvertinimo rezultatai pateikiami 3.4 paveiksle.

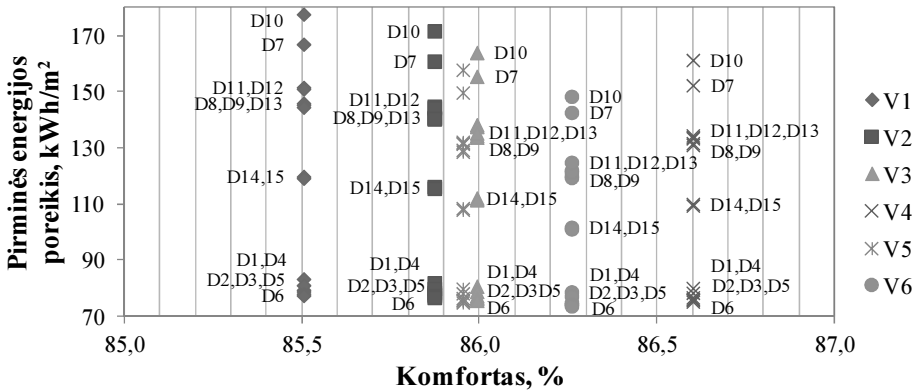


3.4 pav. Oro kokybė nepatenkintųjų procento (PD) įvertinimo skalė

Fig. 3.4. Evaluation scale of the percentage dissatisfied (PD) with the air quality

Iš 3.4 paveikslo matyti, kad pastato patalpose užtikrinamas oro kokybės lygis yra aukštas, kai tiekiamo oro kiekis yra $47,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,4 \text{ h}^{-1}$), nes oro kokybė nepatenkintųjų procentas siekia tik 13,2 %.

Įvertinus kiekvienam pastato variantui bendrąjį palaikomo komforto lygį patalpose, pastebėta, kad didžiausią įtaką bendrojo komforto vertinimui turi šiluminio komforto vertinimo rodiklio (PPD) vertė, kai patalpose palaikomas oro kokybės lygis yra vienodas (3.5 paveikslas).



3.5 pav. Bendrasis palaikomo komforto lygis pastato patalpose
Fig. 3.5. Common comfort level in the rooms of the house

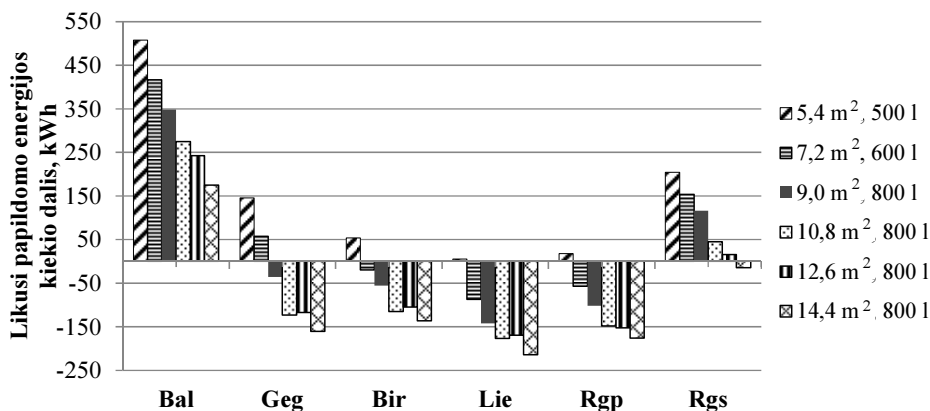
Iš 3.5 paveikslo matyti, kad MPAES technologijų derinių (nuo D1 iki D15) palaikomas komforto lygis kiekvienam pastato variantui (nuo V1 iki V6) yra vienodas, nes kiekvienos sistemos sklaidos posistemį sudaro grindų šildymo kontūrai, užtikrinantys nustatytąsias patalpų oro temperatūras šaltuoju laikotarpiu. Šiltuoju laikotarpiu patalpų komfortą lemia pasyvosios priemonės nuo saulės spinduliuotės (išorinės žaliuzės pietiniame fasade) ir vėdinimo sistemos užtikrinama oro kokybė. Geriausias komforto lygis (86,6 %) yra pasiektas V4 pastato variantui, o žemiausias lygis (apie 85,5 %) užtikrinamas V1 variantui. V4 varianto konstrukcijų šilumos talpa yra mažesnė nei V5 ir V6 variantų, tačiau 9 % didesnė langų visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficiento g reikšmė lėmė didesnę šilumos pritekėjimą į patalpas – tai sumažino nepatenkintųjų šilumine aplinka gyventojų procentą.

3.2. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemų modeliavimo rezultatų analizė

Šiame poskyryje pateikiami atsinaujinančios energijos technologijų techniniai apribojimai, pasirinktų aprūpinimo energija sistemų energinis efektyvumas.

3.2.1. Atsinaujinančių energijos išteklių technologijų techninių apribojimų analizės rezultatai

Saulės kolektorių (SK) sistemos parametų jautrumo analizės rezultatai. Saulės kolektorių sistemos parametų jautrumo analizė atlikta remiantis realaus gyvenamojo namo energijos poreikiu karštam vandeniui ruošti – jis yra 372 kWh/m^2 . SK sistema parenkama užtikrinant 100 % karšto vandens ruošimą vasaros laikotarpiu (nuo birželio mėn. iki rugpjūčio mėn.). Atlikus pasirinktų saulės kolektorių sistemų variantų modeliavimą, gauta papildomo energijos kiekio, reikalingo saulės kolektorių sistemoms, priklausomybė nuo pastarųjų ploto, kuris kinta nuo $5,4 \text{ m}^2$ iki $14,4 \text{ m}^2$ (3.6 paveikslas). Kitą papildomo energijos kiekio dalį užtikrintų MPAES šilumos generatorius.



3.6 pav. Papildomo energijos kiekio priklausomybė nuo saulės kolektorių ploto šiltuoju periodu

Fig. 3.6. The dependence of remaining auxiliary energy demand on the collector area during warm period

Iš 3.6 paveikslas matyti, kad saulės kolektorių, kurių plotas $5,4 \text{ m}^2$, sistema yra per maža siekiant 100 % užtikrinti energijos poreikį karštam vandeniui ruošti nuo birželio mėn. iki rugpjūčio mėn. Padidinus saulės kolektorių plotą nuo 9 m^2 iki $14,4 \text{ m}^2$, papildomas energijos kiekis pagaminamas nuo gegužės mėn. iki

rugpjūčio mėn. Tačiau jautrumo analizės rezultatai rodo, kad didesnio ploto saulės kolektorių sistemos perkaista vasaros laikotarpiu. Neteisingai parinktos per didelės saulės kolektorių sistemos veikimas stabdomas dėl perkaitimo pavojaus, kad būtų išvengta papildomo slėgio susidarymo. Taip pat didesni saulės kolektoriai pagamina perteklinį šilumos kiekį, kurio vartotojas negali kaupti, nes riboja akumuliacinės talpyklos charakteristikos (tūris, maksimali vandens temperatūra ir pan.). Dėl šių priežasčių pasirenkama 7,2 m² saulės kolektorių sistema, kuri tenkina energijos poreikį karštam vandeniui ruošti vasaros laikotarpiu.

Akumuliacinės talpyklos dydis yra svarbus užtikrinant efektyvų MPAES veikimą. Tokios talpyklos dydžio įtaka šilumos generatoriaus ir saulės kolektorių sistemų (5,4 m² ir 7,2 m²) pagaminamam energijos kiekiui pateikiama 3.4 lentelėje.

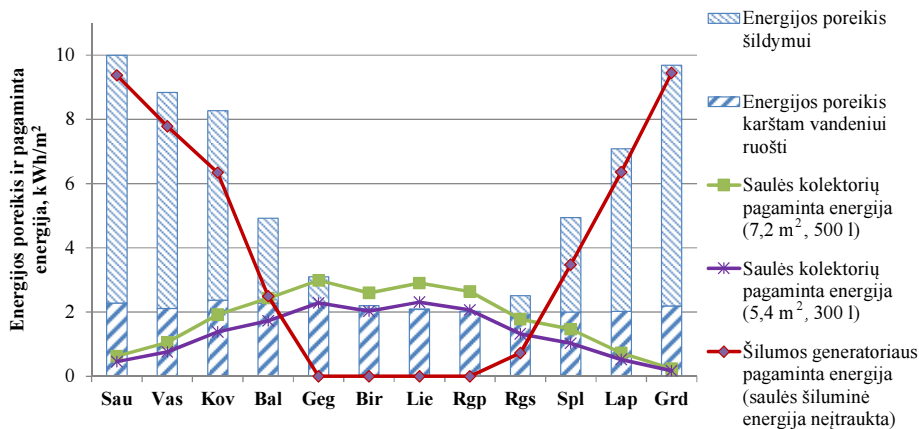
3.4 lentelė. Akumuliacinės talpyklos dydžių įtaka šilumos generatoriaus energijai ir saulės energijai, tiekiamai į sistemą

Table 3.4. The influence of storage tank sizes on the heat generator energy and solar energy to the system

Akumuliacinės talpyklos dydis, m ³	Saulės kolektorių plotas, m ²			
	5,4		7,2	
	Šilumos generatoriaus pagaminta energija (saulės šiluminė energija neįtraukta) kWh/m ²	Saulės kolektorių pagaminta energija, kWh/m ²	Šilumos generatoriaus pagaminta energija (saulės šiluminė energija neįtraukta) kWh/m ²	Saulės kolektorių pagaminta energija, kWh/m ²
0,3	53,1	16,1	49,8	19,3
0,4	52,8	16,3	49,1	20,0
0,5	52,5	17,1	47,7	21,4
0,6	51,8	17,3	47,4	21,7
0,7	51,6	17,5	47,2	21,9
1,0	51,1	18,0	46,6	22,5

Iš 3.4 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad, didėjant akumuliacinės talpyklos tūriui nuo 0,3 m³ iki 1,0 m³, apie 11 % ir 14 % daugiau saulės šilumos energijos galima sukaupti naudojant 5,4 m² ir 7,2 m² SK. Didinant akumuliacinę talpyklą, didėja talpyklos šilumos nuostoliai, todėl manoma, kad neracionalu didinti talpyklos tūrį. Šiuo atveju pasirinkta saulės karšto vandens ruošimo sistema, kurią sudaro 7,2 m² plokštieji kolektoriai ir 0,5 m³ akumuliacinė talpykla, nes saulės kolektorių pagamintos energijos kiekis išlieka beveik vienodas kintant talpyklos tūriui nuo 0,5 m³ iki 1,0 m³.

Bendras pastato energijos poreikis šildymui bei karštam vandeniui ruošti ir generatorių bei saulės kolektorių sistemos pagamintas energijos kiekis vaizduojami 3.7 paveiksle.

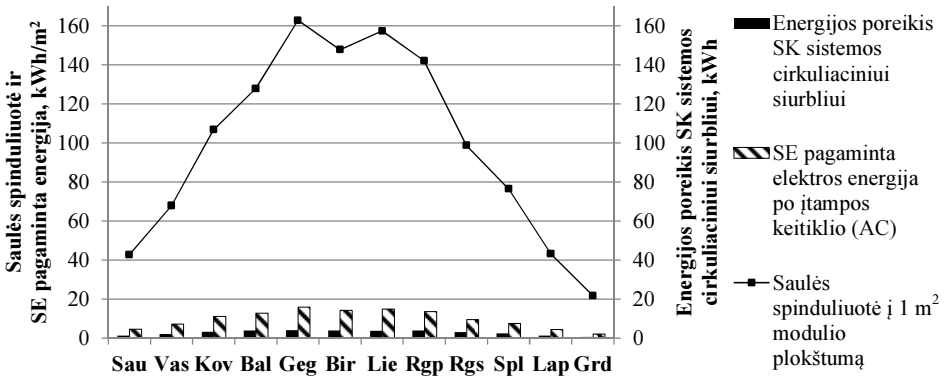


3.7 pav. Pastato energijos poreikis ir saulės kolektorių pagaminta energija

Fig. 3.7. Specific energy demand of the house

Analizės rezultatai parodė, kad vienbučiam gyvenamajam namui, kurio karšto vandens poreikis yra ne mažesnis kaip 372 kWh/mėn., reikėtų numatyti 7,2 m² saulės kolektorių, kurių posvyrio kampas – 45°, ir sistemą su 0,5 m³ akumuliacine talpykla. SK sistemos tiekiamą šilumą sudaro 21,4 kWh/m² per metus, t. y. 68,5 % šilumos, reikalingos karštam vandeniui ruošti. Saulės kolektorių sezoninis energinis efektyvumas siekia 31 %. Kitą reikalingos šilumos dalį (48,3 kWh/m²) pagamina šilumos generatorius. Remiantis būdingu karšto vandens vartojimo grafiku (2.5 paveikslas), šiame darbe nustatyta, kad pastato vidutinis energijos poreikis karštam vandeniui ruošti yra 342 kWh/m². Todėl MPAES technologijų deriniuose (D2, D3, D5, D6, D8, D9, D11, D12, D14, D15) yra numatytos 7,2 m² saulės kolektorių sistemos su 500 litrų akumuliacinėmis talpyklomis. Jautrumo analizė parodė, kad tuo atveju, jei energijos poreikis karštam vandeniui ruošti būtų apie 310 kWh/mėn. ir mažesnis, reikėtų svarstyti 5,4 m² SK sistemos variantą.

Saulės elementų (SE) sistemos integravimo techninių galimybių nustatymas. Tyrimo metu pasirinkti du pastato aprūpinimo energija scenarijai. Pagal pirmąjį scenarijų MPAES technologijų deriniams D3, D6, D9, D12, D15 yra numatoma 200 W_p instaliuotos elektros galios saulės elementų sistema. Elektros energijos gamybai iš AEI yra pasirinkti 1 m² polikristaliniai saulės elementai, kurie patenkintų metinį elektros energijos poreikį (34,4 kWh/metus), reikalingą saulės kolektorių sistemos cirkuliaciniam siurbliui (3.8 paveikslas).



3.8 pav. Mėnesio saulės spinduliuotė ir saulės elementų sistemos pagaminta elektros energija

Fig. 3.8. Monthly solar radiation and performance of photovoltaic system

Taigi pirmajame scenarijuje pagrindiniai AEI technologijų techniniai apribojimai yra šie: saulės kolektoriai pagamins $114 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{SK}} \cdot 1 \text{ asmeniui})$ per metus šilumos, o saulės elementai – $34,4 \text{ kWh}/\text{m}^2_{\text{SE}}$ per metus elektros energijos.

3.5 lentelė. Saulės energijos technologijų efektyvumo parametrai

Table 3.5. Efficiency parameters of solar energy technologies

Parametrai	Vienetai	Saulės kolektorių sistema	200 W _p saulės elementų sistema	4,5 kW _p saulės elementų sistema
Saulės spinduliuotė į 1 m ² plokštumą	kWh/m ²	1 195	1 195	1 195
Energijos gamyba 1 m ² plokštumos	kWh/m ²	476	139,0 (DC) / 130,7 (AC)	141,9 (DC) / 130,6 (AC)
Sistemos energinis efektyvumas	%	31	13	11
Saulės energijos dalis per metus	%	68,5	0,880	100
			esant minimaliam elektros poreikiui 24,41 kWh/m ² per metus	

Pagal antrąjį pastato aprūpinimo energija scenarijų, MPAES technologijų deriniams D3, D6, D9, D12, D15 yra numatoma 4,5 kW_p instaliuotos elektros galios saulės elementų sistema. Ši sistema pagamintą elektros energijos perteklių tiesiogiai atiduoda elektros tinklams. Priimta prielaida, kad jei vartotojas per metus suvartojo iš tinklo tiek elektros, kiek pats į jį patiekė, už elektrą nieko nemoka, jei suvartojo daugiau – susimoka, jei patiekė daugiau – perteklius nuperka-

mas už rinkos kainą. Pagal šį scenarijų, tyrimo metu elektros energijos gamybai iš AEI yra pasirinkti 32,56 m² polikristaliniai saulės elementai, kurie patenkintų vidutinį metinį elektros energijos poreikį (3 911 kWh/metus), reikalingą pastato vėdinimui, apšvietimui, buitiniams elektros prietaisams ir pagalbiniais MPAES įrenginiams: cirkuliaciniams siurbliams, elektros pavaroms. Taigi pagrindiniai AEI technologijų techniniai apribojimai yra šie: saulės kolektoriai pagamins 114 kWh/(m²_{SK}·1 asmeniui) per metus šilumos, o saulės elementai – 120,1 kWh/m²_{SE} per metus elektros energijos.

3.2.2. Mažaenergio pastato aprūpinimo energija sistemos energinio efektyvumo analizės rezultatai

Ištyrus gyvenamojo namo konstrukcijų variantų energijos poreikius, nustatomi galimi MPAES technologijų deriniai. Šio tyrimo metu yra pasirinkta 15 MPAES technologijų derinių, kuriuos sudaro skirtingų tipų energijos generatoriai (transformatoriai) ir integruotos AEI technologijos. Kiekvienam pastato variantui yra modeliuojami technologijų deriniai atskirai, naudojant modeliavimo programą „Polysun“.

MPAES technologijų derinių modeliavimo ir atliktos sisteminės analizės rezultatai – MPAES energijos generavimo (transformavimo), akumuliacinio, paskirstymo ir sklaidos posistemių sezoninis energinis efektyvumas, kurio skaitinės reikšmės priklauso nuo posistemių techninio tobulumo ir aplinkos klimato sąlygų kitimo per metus (3.6 lentelė).

3.6 lentelė. V1 pastato varianto MPAES generavimo, akumuliacinio, paskirstymo ir sklaidos posistemių sezoninis energinis efektyvumas

Table 3.6. The seasonal energy efficiency coefficient of generation, storage, distribution and emission subsystems of BESS of V1

Sis-tema	Technologijų dydis	$\varepsilon_{e,d}$	ε_s	ε_{gen}	ε_{SK}	ε_{SE}	E_{HW} , kWh	SPF
D1	BK (11,2 kW, 500 l)	0,963	0,920	0,655	–	–	323	0,247
D2	BK (11,7 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²)	0,964	0,930	0,624	0,372	–	275	0,193
D3	BK (11,7 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²) + SE (200 W _p)	0,964	0,930	0,624	0,372	0,130	275	0,190
D4	GK (9,3 kW, 500 l)	0,962	0,920	0,791	–	–	318	0,218
D5	GK (10,1 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²)	0,963	0,930	0,727	0,368	–	273	0,175

3.6 lentelės tęsinys. V1 pastato varianto MPAES generavimo, akumuliacinio, paskirstymo ir sklaidos posistemų sezoninis energinis efektyvumas

Sequel of Table 3.6. The seasonal energy efficiency coefficient of generation, storage, distribution and emission subsystems of BESS of V1

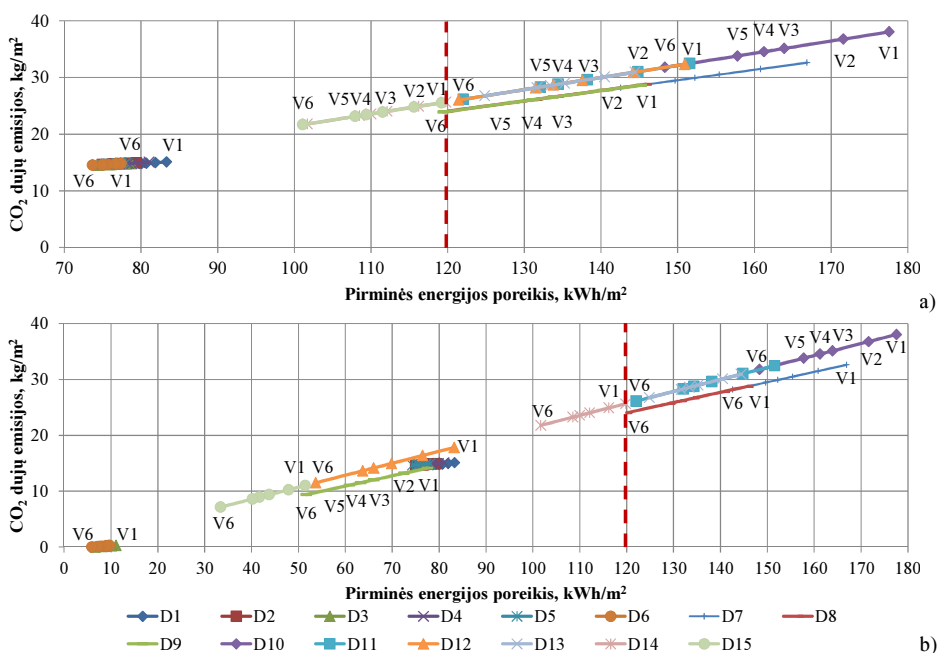
Sis-tema	Technologijų dydis	$\epsilon_{e,d}$	ϵ_s	ϵ_{gen}	ϵ_{SK}	ϵ_{SE}	EH W, kWh	SPF
D6	GK (10,1 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²) + SE (200 W _p)	0,963	0,930	0,727	0,368	0,130	273	0,172
D7	DK (7,7 kW, 300 l)	0,962	0,930	0,948	–	–	319	1,377
D8	DK (8,2 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²)	0,962	0,920	0,896	0,361	–	272	1,164
D9	DK (8,2 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²) + SE (200 W _p)	0,962	0,920	0,896	0,361	0,130	272	1,161
D10	\check{S}_{o-v} (7,3 kW, 300 l)	0,963	0,940	2,15	–	–	328	1,532
D11	\check{S}_{o-v} (7,3 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²)	0,964	0,940	2,05	0,373	–	274	1,255
D12	\check{S}_{o-v} (7,3 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²) + SE (200 W _p)	0,964	0,940	2,05	0,373	0,130	274	1,252
D13	\check{S}_{g-v} (7,3 kW, 300 l)	0,962	0,940	3,21	–	–	455	1,088
D14	\check{S}_{g-v} (7,3 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²)	0,970	0,940	3,42	0,386	–	389	0,799
D15	\check{S}_{g-v} (7,3 kW, 500 l) + SK (7,2 m ²) + SE (200 W _p)	0,970	0,940	3,42	0,386	0,130	389	0,796

Tyrimo metu nustatyta, kad racionalaus MPAES technologijų derinio formavimą veikia derinio energinis efektyvumas (SPF), išreikštas santykiu pirminės energijos poreikio ir pastato energijos poreikio šildymui, vėdinimo orui ir karštam vandeniui pašildyti. Pagal energijos vartojimo efektyvumą geriausi deriniai yra su integruotomis AEI technologijomis (nuo D1 iki D6).

3.3. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal skirtingus vertinimo kriterijus

3.3.1. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal poveikį aplinkai

Skirtingos MPAES technologijos lemia skirtingus pastato pirminės energijos poreikio ir CO₂ dujų emisijų kiekio į aplinką rezultatus (3.9 paveikslas). Pastato variantams numatant derinius (nuo D1 iki D6), kurių pagrindiniai šilumos generatoriai yra biokuro (malkų, medžio granulių) katilai, ir derinius, kuriuos sudaro dujiniai katilai (D8, D9) bei šilumos siurbliai gruntas-vanduo (D14, D15) su integruotomis saulės energijos technologijomis, pirminės energijos poreikis neviršija 120 kWh_{PE}/m² (3.9.a paveikslas), t. y. atitinka pasyviesiems namams keliamus reikalavimus.



3.9 pav. Racionali MPAES pagal CO₂ dujų emisijas (a) I scenarijus, b) II scenarijus)
 Fig. 3.9. Rational BES with regard to CO₂ emissions (a) 1st scenario, b) 2nd scenario)

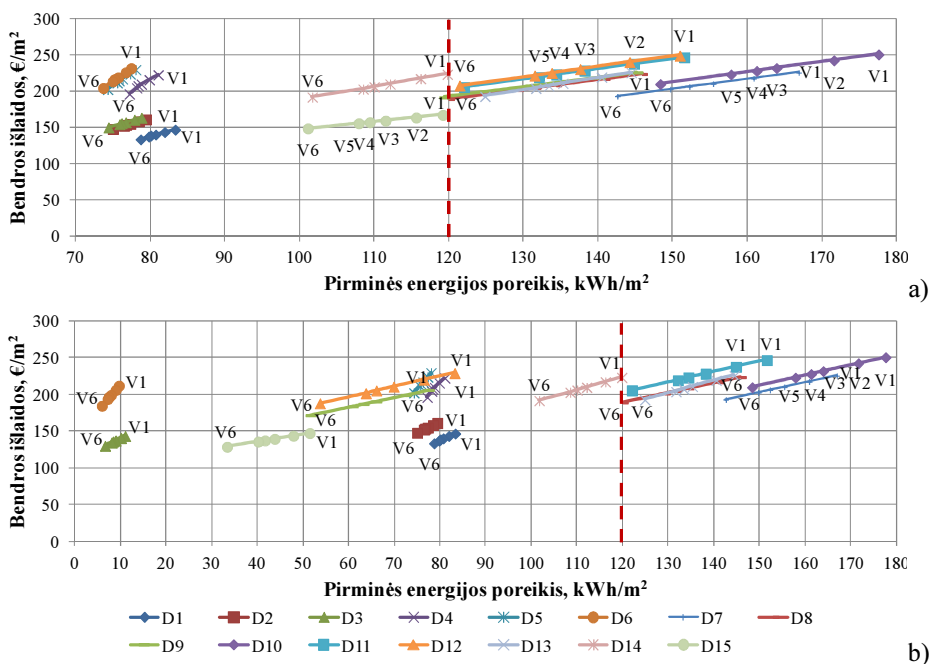
Iš 3.9.a paveikslo matyti, kad naudojant biokuro katilų technologijas (nuo D1 iki D6) pastato variantų pirminės energijos poreikis yra nuo 74 iki 83 kWh_{PE}/m², o CO₂ dujų emisijos į aplinką siekia 15 kg CO₂/m². Palyginti su kitais deriniais, šios technologijos yra racionaliausios pagal pirminės energijos poreikį ir poveikį aplinkai. Tačiau siekiant įgyvendinti beveik nulinės energijos pastatams keliamus reikalavimus, CO₂ dujų emisijos į aplinką turėtų neviršyti 3 kg CO₂/m². Pagal pirmąjį scenarijų pateikti derinių rezultatai rodo, kad nė vienas derinys neatitinka šio reikalavimo. CO₂ dujų emisijų mažinimą galima būtų įgyvendinti tik didinant atsinaujinančių išteklių energijos dalį bendrame pastato energijos vartojimo balanse. Todėl tyrimo metu yra numatytas antrasis scenarijus, pagal kurį didinama saulės elementų sistemos pagaminama elektros energijos dalis. Remiantis rezultatais pagal antrąjį scenarijų (3.9.b paveikslas), naudojant biokuro (malkų, medžio granulių) katilus su saulės energijos technologijomis (D3 ir D6), pastato variantų pirminės energijos poreikis yra nuo 6 iki 11 kWh_{PE}/m², o poveikis aplinkai yra nulinis. Taigi taikant šias technologijas galima pasiekti reikalavimus, keliamus beveik nulinės energijos pastatams. D1, D2, D3, D4, D5, D6, D9, D12, D14, D15 technologijų deriniai gali būti numatomi pasyviųjų namų aprūpinimui energija.

3.3.2. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal ekonominį efektyvumą

Ieškant racionalaus sprendimo ekonominiu atžvilgiu, tyrime įvertintos bendrosios išlaidos, kurias sudaro pradinės investicijos technologijai įsigyti, išlaidos energijai ir išlaidos technologijų elementų keitimui per pasirinktą 30 metų vertinimo laikotarpį. Nagrinėjamų MPAES technologijų derinių bendrosios išlaidos pateiktos 3.10 paveiksle.

Iš 3.10.a paveikslo matyti, kad, pagal pirmąjį scenarijų, racionalus sprendimas ekonominiu atžvilgiu yra biokuro (malkų) katilas (D1), kurio bendrosios išlaidos yra nuo 133,2 €/m² (V6 atveju) iki 146,3 €/m² (V1 atveju) per 30 metų laikotarpį. D1 derinio (V6 atveju) bendrosios išlaidos yra apie 10 % mažesnės, palyginti su D2, D3 ir D15 derinių bendrosiomis išlaidomis, ir 59,3 % mažesnės, palyginti su nepalankiausio D7 derinio bendrosiomis išlaidomis. Tačiau D1 derinys negali būti laikomas racionaliu sprendimu vertinant pagal pirminę energiją, nes pirminės energijos poreikis yra 5,5 % didesnis negu D3 derinio atveju.

Pagal antrąjį scenarijų (3.10.b paveikslas), D1, D3, D15 derinių bendrosios išlaidos yra mažiausios, t. y. vidutiniškai apie 56 % mažesnės, palyginti su nepalankiausio D7 derinio bendrosiomis išlaidomis. Tačiau šie deriniai lemia skirtingą pastato pirminės energijos poreikį.



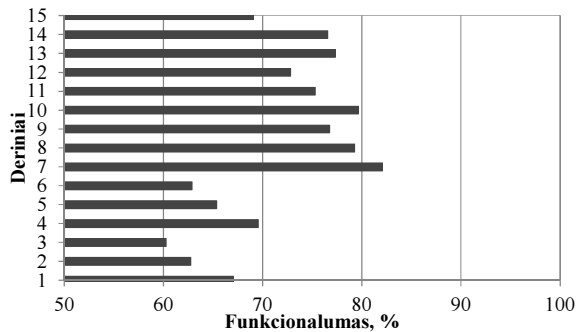
3.10 pav. Racionalus MPAES technologijų derinys pagal bendrąsias išlaidas (a) I scenarijus, b) II scenarijus)

Fig. 3.10. Rational BESS with regard to the global cost (a) 1st scenario, b) 2nd scenario)

Siekiant įgyvendinti beveik nulinės energijos pastatams keliamus reikalavimus, galimi deriniai yra D3 ir D6, tačiau D6 derinio bendrosios išlaidos yra vidutiniškai apie 32 % didesnės už D3 derinio bendrąsias išlaidas. Pasyviajam gyvenamajam namui racionalus sprendimas dėl bendrųjų išlaidų yra D15 derinys.

3.3.3. Racionali pastato aprūpinimo energija sistema pagal techninį funkcionalumą

Remiantis MPAES technologijų derinių modeliavimo ir ekspertinio vertinimo rezultatais, yra nustatytas kiekvieno pasirinkto derinio funkcionalumas. Kiekvieno derinio patikimumas pastato energijos poreikiui užtikrinti nustatytas atlikus derinių modeliavimą su „Polysun“ programa, o derinių sudėtingumas, lankstumas ir eksploataavimo patogumas buvo vertintas ekspertiniu būdu pagal 28 ekspertų užpildytas anketas (vertinimo skalė pateikta 2.11 lentelėje). Derinių nuo D1 iki D15 funkcionalumo vertinimo rezultatai pateikiami 3.11 paveiksle.



3.11 pav. MPAE sistemų nuo D1 iki D15 funkcionalumas
Fig. 3.11. The functionality of the BESS from D1 to D15

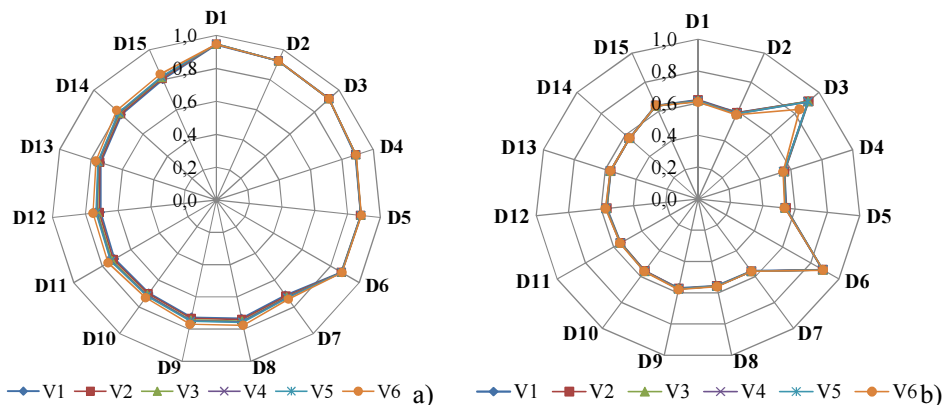
Iš 3.11 paveikslo matyti, kad dujinio katilo (D7) ir šilumos siurblio gruntasvanduo (D10) sistemų bendras funkcionalumo įvertinimas atitinkamai siekia 82,1 % ir 79,7 %. Šios PAE sistemos turi po vieną pagrindinį šilumos generatorių, kurio veikimas yra visiškai automatizuotas, lankstus sistemų reguliavimas (80 %), jos patogios eksploatuoti (80 %), o energijos poreikio užtikrinimas siekia 98,3 % (D7 atveju) ir 98,6 % (D10 atveju). Žemiausia sistemos funkcionalumo įvertinimo reikšmė gauta naudojant biokuro (malkų) katilą su integruotomis saulės kolektorių ir elementų sistemomis D3 atveju – reikšmė yra 60,3 %. Nors šio derinio patikimumas pastato energijos poreikiui užtikrinti yra 91 %, sistema yra pusiau automatizuota, sistemos lankstumas įvertintas tik 60 %, o patogumas eksploatuoti sistemą – 40 %, nes vartotojas turi rūpintis kietojo kuro tiesioginiu pakrovimu į katilą. Apibendrinant funkcionalumo vertinimo rezultatus, galima teigti, kad kuo MPAES yra technologiškai paprastesnė, tačiau visiškai automatizuota, tuo aukštesnis yra technologijų derinio funkcionalumas. Šio tyrimo metu, kai nagrinėjami du skirtingi pastato aprūpinimo energija scenarijai, priimta, kad MPAES technologijų derinių funkcionalumo įvertinimas išlieka vienodas pagal abu scenarijus.

3.4. Pastato aprūpinimo energija sistemos daugiatakslio vertinimo rezultatai

Apibendrinant racionalaus MPAES technologijų derinio paieškos rezultatus, matyti, kad, pagal pirmąjį scenarijų, D6 derinys yra racionalus sprendimas pagal energinio efektyvumo ir poveikio aplinkai kriterijus. Tačiau siekiant ekonominio racionalumo, reikėtų pasirinkti D1 derinį arba D7 derinį, jei ieškoma funkcionaliausios sistemos. Pagal antrąjį scenarijų, D6 derinys taip pat yra racionalus

sprendimas vertinant pagal energinį efektyvumą ir poveikį aplinkai. Pagal bendrąsias išlaidas D3 derinys yra racionalus pastato variantams nuo V1 iki V5. Tačiau vertinimo rezultatai parodė, kad D3 derinio bendrųjų išlaidų rodiklio reikšmės yra vidutiniškai tik 2 % didesnės už D15 derinio reikšmes. D15 derinys racionalus tampa V6 pastato variantui, kai pastato energijos poreikis yra mažiausias. Padidinus saulės elementų sistemos pagamintos elektros energijos dalį, D15 derinys būtų racionalus sprendimas pagal bendrąsias išlaidas pasirinktiems pastato variantams.

Gauti derinių vertinimo rezultatai rodo, kad racionalumo rodiklių (PE, CO₂, BI, komforto, funkcionalumo) reikšmių nesutapimas kiekvieno derinio atveju sunkina galutinio sprendimo priėmimą. Todėl atliekamas daugiatakslis MPAES technologijų derinių vertinimas taikant daugiatakslį sprendimo priėmimo metodą WASPAS. Gauti rezultatai pateikiami 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Racionali MPAES: a) pagal I scenarijų – D1, b) pagal II scenarijų – D3

Fig. 3.12. Rational BES system: a) in case of the 1st scenario is D1, b) in case of the 2nd scenario is D3

Iš 3.12.a paveikslo matyti, kad, pagal pirmąjį scenarijų, racionalus derinys visiems pastato variantams yra D1 derinys, kai pagrindinis šilumos generatorius yra biokuro (malkų) katilas, o elektros energija tiekama iš nacionalinių elektros tinklų. Lyginant pastato variantus tarpusavyje, nustatyta, kad derinio racionalumo didžiausia reikšmė gaunama V4 pastato variantui (3.7 lentelė).

3.7 lentelė. D1 sistemos racionalumo rodiklių reikšmės

Table 3.7. The efficiency values of the attributes of the system D1

	PE, kWh _{PE} /m ²	CO ₂ , kg _{CO2} /m ²	BI, €/m ²	Kmf, %	Fnk, %	Racio- nalus derinys	Racionalumo reikšmės
V1	83,3	15,1	147,2	85,5	67,1	D1	0,94386
V2	81,9	15,0	143,9	85,9	67,1	D1	0,94635
V3	80,7	14,8	140,6	86,0	67,1	D1	0,94704
V4	80,1	14,8	139,1	86,6	67,1	D1	0,94733
V5	79,8	14,8	137,7	86,0	67,1	D1	0,94727
V6	78,7	14,7	133,9	86,3	67,1	D1	0,94614

Iš 3.7 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad papildomas pastato konstrukcijų šiltinimas, kai V6 varianto atveju U_{IS} padidinamas 67 %, U_{ST} – 54 %, U_{GR} – 60 %, o langų U_{LN} sumažinamas 49 %, lemia tik 5,5 % pirminės energijos, 2,4 % CO₂ dujų emisiją į aplinką ir 9 % bendrųjų išlaidų sumažėjimą, palyginti su V1 varianto rezultatais. Šie tyrimo rezultatai rodo, kad didžiausią įtaką pastato energiniam efektyvumui turi racionalus MPAES technologijų derinio parinkimas.

Pagal antrąjį scenarijų (3.12.b paveikslas), racionalus derinys pastato variantams nuo V1 iki V5 yra D3 derinys, kai pagrindinis šilumos generatorius yra biokuro (malkų) katilas su integruotomis saulės energijos technologijomis. Tačiau V6 pastato variantui racionalus derinys yra D6, kurio pagrindinis šilumos generatorius yra granulinis katilas su integruotomis saulės energijos technologijomis. Lyginant pastato variantus tarpusavyje, nustatyta, kad D3 derinio racionalumo didžiausia reikšmė gaunama V2 pastato variantui (3.8 lentelė).

3.8 lentelė. D3 ir D6 sistemų racionalumo rodiklių reikšmės

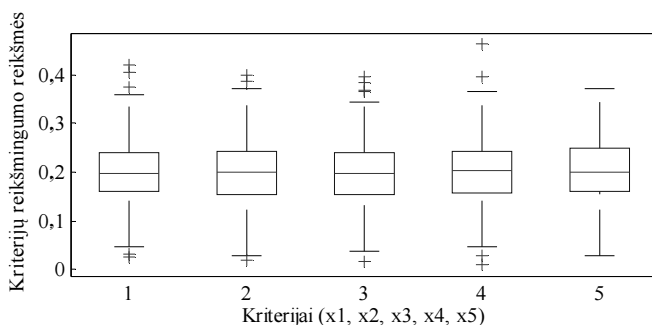
Table 3.8. The efficiency values of the attributes of the systems D3 and D6

	PE, kWh _{PE} /m ²	CO ₂ , kg _{CO2} /m ²	BI, €/m ²	Kmf, %	Fnk, %	Racio- nalus derinys	Racionalumo reikšmės
V1	11,1	0,29	143,9	85,5	60,3	D3	0,9130
V2	10,1	0,24	141,1	85,9	60,3	D3	0,9140
V3	9,0	0,15	137,6	86,0	60,3	D3	0,9130
V4	8,4	0,10	136,4	86,6	60,3	D3	0,9095
V5	8,1	0,10	135,1	86,0	60,3	D3	0,9098
V6	5,9	0,01	185,1	86,3	62,9	D6	0,8897

Iš 3.7 ir 3.8 lentelėse pateiktų rezultatų matyti, kad, pagal pirmąjį scenarijų, esant racionaliam deriniui D1 ir pastato V4 variantui, galima pasiekti mažaenergiams ir pasyviems pastatams keliamus reikalavimus. Pagal antrąjį scenarijų, esant racionaliam deriniui D3 ir pastato V2 variantui, gali būti įgyvendinti reikalavimai, keliami beveik nulinės energijos pastatams.

3.5. Racionalios pastato aprūpinimo energija sistemos jautrumo analizė pagal kriterijų reikšmingumą

Tyrimo metu racionaliam sprendimui priimti taikomas daugiatakslis sprendimo priėmimo metodas WASPAS. Priimant daugiatakslį sprendimą, naudojamos kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmės. Siekiant nustatyti gauto racionalaus sprendimo patikimumą, atliekama jautrumo analizė pagal kriterijų reikšmingumą. Ši analizė yra atlikta remiantis pirmuoju scenarijumi. Išanalizavus 28 ekspertų pateiktų penkių kriterijų reikšmingumo reikšmių porinio palyginimo rezultatus, nustatyta, kad kiekvieno kriterijaus reikšmingumo reikšmės pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį. Tyrimo metu, taikant Monte Karlo modeliavimą, „Microsoft Excel“ programos aplinkoje yra sugeneruotos 662 kriterijų reikšmingumo reikšmės, pasiskirsčiusios pagal normalųjį pasiskirstymo dėsnį intervalu $[0,05; 0,5]$. Šių reikšmių statistinės analizės duomenys pateikiami 3.13 paveiksle ir 3.9 lentelėje.



3.13 pav. Kriterijų reikšmingumo reikšmės
Fig. 3.13. Significance values of the criteria

Pateiktų kriterijų reikšmingumo reikšmių statistinės analizės rezultatai rodo, kad vidutinė reikšmių sklaida apie vidurkį yra maža (standartinis nuokrypis yra nuo 0,060 iki 0,063). Iš 3.13 paveikslo galima matyti, kad x1 kriterijaus imtyje

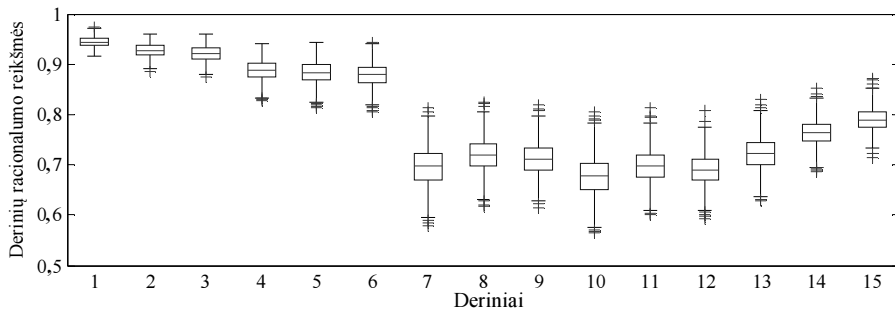
yra 25 % reikšmių, mažesnių nei 0,159, 25 % reikšmių, didesnių nei 0,240, ir išskirtys, kurios sudaro 0,63 % (atitinkamai vertinamos kitų kriterijų reikšmingumo reikšmės). Vadinasi, priimant galutinį sprendimą naudojamų atsitiktinių kriterijų reikšmingumo reikšmių kitimas yra pakankamas MPAES technologijų derinių racionalumui patikrinti.

3.9 lentelė. Kriterijų reikšmingumo reikšmių statistinės analizės rezultatai

Table 3.9. The results of statistical analysis of the criteria significance values

Kriterijai	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Vidurkis	0,199	0,198	0,197	0,202	0,204
Mediana	0,197	0,199	0,196	0,203	0,201
Min	0,026	0,020	0,016	0,010	0,028
Max	0,421	0,400	0,396	0,463	0,372
25 % kvantilis (Q_1)	0,159	0,155	0,156	0,158	0,161
75 % kvantilis (Q_3)	0,240	0,243	0,239	0,242	0,249
Kvantilių skirtumas (IQR)	0,081	0,088	0,083	0,084	0,088
Standartinis nuokrypis	0,061	0,063	0,060	0,060	0,060

V1, V2, V3, V4, V5, V6 pastato variantų PAE sistemų technologijų derinių racionalumo statistinės analizės rezultatai pateikiami 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 paveiksluose. Kiekvieno varianto deriniams yra nurodytos derinių dažniausiai pasitaikančių rangų reikšmės ir jų dažniai, kurie nusako galutinį sprendimą ir jo patikimumą.



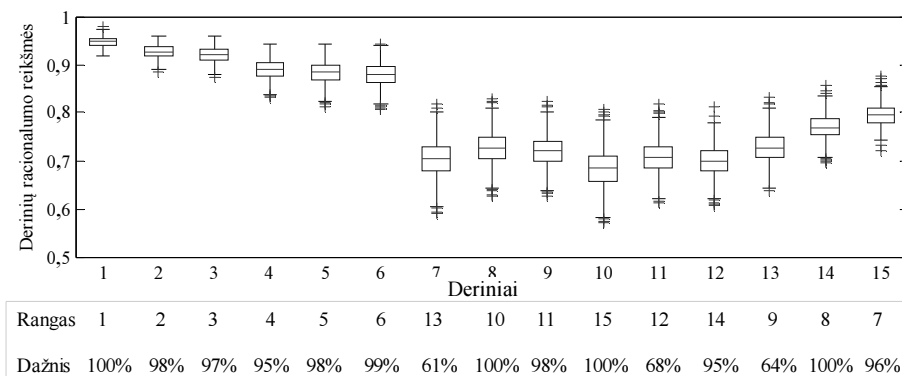
Rangas	1	2	3	4	5	6	13	10	11	15	12	14	9	8	7
Dažnis	99%	98%	97%	84%	99%	99%	72%	100%	98%	100%	57%	92%	73%	100%	96%

3.14 pav. V1 varianto technologijų derinių racionalumo rezultatai

Fig. 3.14. The results of efficiency values of the combinations of technologies of V1

V1 variantui racionalus MPAES technologijų derinys yra D1 su 99,2 % patikimumu. Analizuojant V1 varianto rezultatus, pastebėta, kad 662 atsitiktinių reikšmių imtyje yra galimi kiti racionalūs deriniai, kai kriterijų reikšmingumo reikšmės išsidėsto šia prioritetine tvarka:

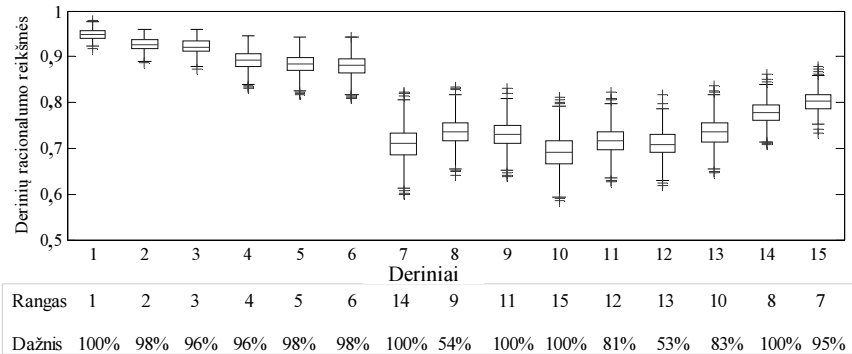
- $x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3$, $x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$, t. y. ekonominis kriterijus praranda svarbumą [0,016; 0,038], o derinio funkcionalumas [0,225; 0,293], energinis efektyvumas [0,187; 0,328] ir užtikrinamas komfortas [0,151; 0,289] įgauna svarbumą, racionalių sprendimų tampa D4 derinys;
- $x_2 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_2 \succ x_5 \succ x_3$, t. y. ekonominis kriterijus praranda svarbumą [0,039; 0,076], o derinio poveikis aplinkai [0,199; 0,331] ir užtikrinamas komfortas [0,198; 0,326] įgauna svarbumą, racionalių sprendimų tampa D2 derinys.



3.15 pav. V2 variantu technologijų derinių racionalumo rezultatai

Fig. 3.15. The results of efficiency values of the combinations of technologies of V2

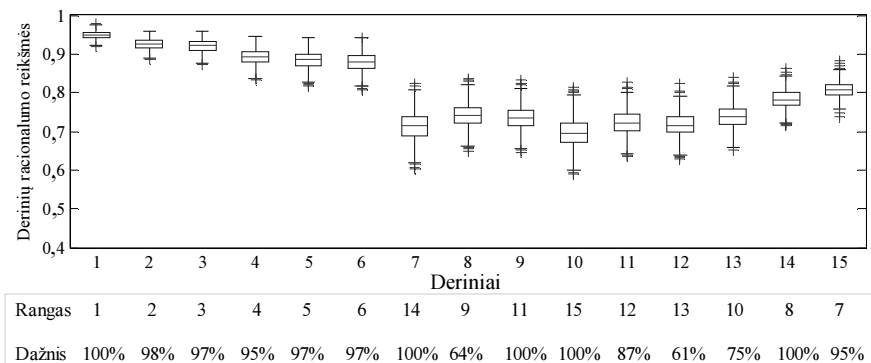
V2 variantui racionalus MPAES technologijų derinys yra D1 su 99,5 % patikimumu. Analizuojant V2 varianto rezultatus, pastebėta, kad D4 tampa racionalių deriniu, kai kriterijų reikšmingumo reikšmės išsidėsto šia prioritetine tvarka: $x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3$, $x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$.



3.16 pav. V3 variantu technologijų derinių racionalumo rezultatai

Fig. 3.16. The results of efficiency values of the combinations of technologies of V3

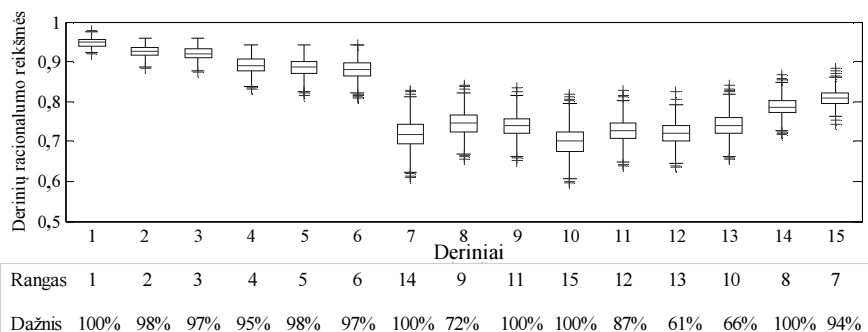
V3 variantui racionalus MPAES technologijų derinys yra D1 su 99,5 % patikimumu. Analizuojant V3 variantu rezultatus, pastebėta, kad D4 tampa racionaliu deriniu, kai kriterijų reikšmingumo reikšmės išsidėsto šia prioritetine tvarka: $x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3$, $x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$.



3.17 pav. V4 variantu technologijų derinių racionalumo rezultatai

Fig. 3.17. The results of efficiency values of the combinations of technologies of V4

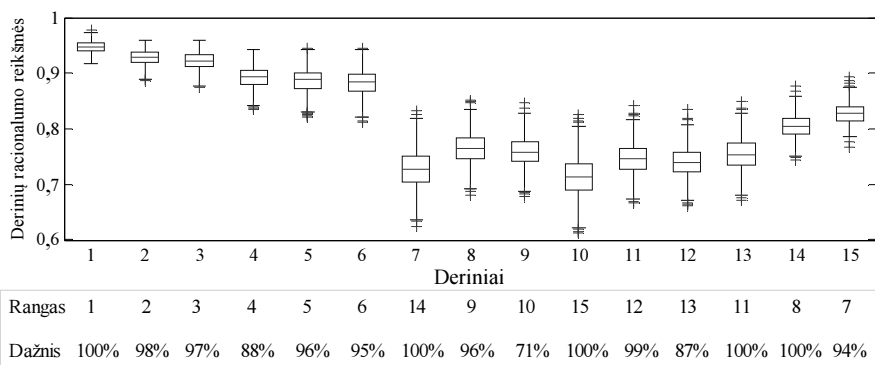
V4 variantui racionalus MPAES technologijų derinys yra D1 su 99,7 % patikimumu. Analizuojant V4 variantu rezultatus, pastebėta, kad D4 tampa racionaliu deriniu, kai kriterijų reikšmingumo reikšmės išsidėsto šia prioritetine tvarka: $x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$.



3.18 pav. V5 variantu technologijų derinių racionalumo rezultatai

Fig. 3.18. The results of efficiency values of the combinations of technologies of V5

V5 variantui racionalus MPAES technologijų derinys yra D1 su 99,7 % patikimumu. Analizuojant V5 variantu rezultatus, pastebėta, kad D4 tampa racionali deriniu, kai kriterijų reikšmingumo reikšmės išsidėsto šia prioritetine tvarka: $x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$.



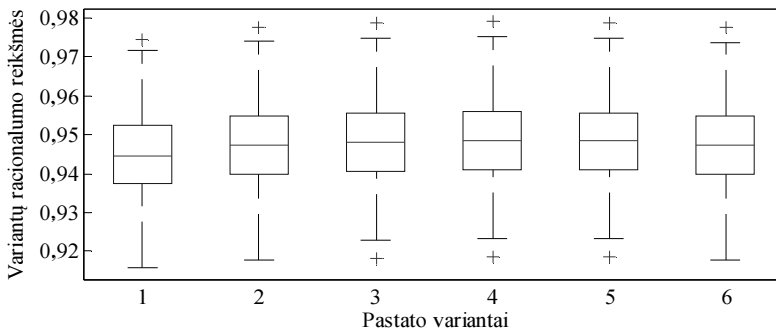
3.19 pav. V6 variantu technologijų derinių racionalumo rezultatai

Fig. 3.19. The results of efficiency values of the combinations of technologies of V6

V6 variantui racionalus MPAES technologijų derinys yra D1 su 99,5 % patikimumu. Analizuojant V6 variantu rezultatus, pastebėta, kad D4 tampa racionali deriniu, kai kriterijų reikšmingumo reikšmės išsidėsto šia prioritetine tvarka: $x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3$, $x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$. Pateikti rezultatai rodo, kad racionalus derinys pasirinktiems pastato variantams yra D1. Šis galutinis rezultatas yra stabilus, kiekvienu variantu dominuoja prieš kitus pasirinktus derinius, kai kriterijų reikšmingumo reikšmių standartinis nuokrypis yra apie 0,060. Re-

zultatų statistinė analizė parodė, kad kritiškiausias kriterijus, kuris labiausiai veikia derinių racionalumo reikšmių pasiskirstymą, yra ekonominis racionalumas (x_3). Derinių rangavimas keičiasi, kai ekonominio kriterijaus reikšmingumo reikšmių pokytis didesnis nei 61 %.

Tyrimo metu pastato variantai su D1 deriniu palyginti tarpusavyje (3.20 paveikslas, 3.10 lentelė).



3.20 pav. Pastato energijos poreikių variantų lyginamoji analizė

Fig. 3.20. Comparative analysis of the variants of the building energy demands

3.10 lentelė. Pastato energijos poreikių variantų statistinės analizės rezultatai

Table 3.10. The results of statistical analysis of the variants of building energy demands

Pastato variantai	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Vidurkis	0,945	0,947	0,948	0,948	0,948	0,947
Mediana	0,945	0,947	0,948	0,949	0,948	0,947
Standartinis nuokrypis	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Variacijos koeficientas	1,089	1,096	1,101	1,100	1,098	1,094
Rango reikšmė pagal vidurkį	6	4	3	1	2	5
Dažniausiai pasitaikiusi rango reikšmė	6	4	3	1	2	5
Dažniausiai pasitaikiusios rango reikšmės dažnis, %	100	100	100	73	88	100

Analizuojant pastato variantų statistinės analizės rezultatus, matyti, kad V4 pastato variantas nežymiai dominuoja tarp kitų pasirinktų pastato variantų ($V4 > V5 > V3 > V2 > V6 > V1$) su 73 % patikimumu. Šie rezultatai rodo, kad nebūtina pasiekti itin aukštų pastato atitvaroms keliamų reikalavimų, tačiau būtina numatyti racionalų MPAES technologijų derinį, siekiant racionalaus energijos vartojimo pastate.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Tyrimu nustatyta, kad integruotas modeliavimo priemonių ir daugiataktinio sprendimo priėmimo metodo taikymas leidžia spręsti racionalaus mažaenergetinio pastato aprūpinimo energija parinkimo uždavinį, kuris apima skirtingus vertinimo kriterijus.
2. Sukurto mažaenergetinio pastato apūpinimo energija integruoto vertinimo modelio veiksnas patikrintas atlikus pasirinktų šešių pastato energijos poreikių variantų ir juos užtikrinančių penkiolika technologijų derinių vertinimą. Modelis yra lankstus, nes gali nustatyti aprūpinimo energija sistemą, tenkinančią racionalų pastato energijos poreikį, vertinant pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir techninio funkcionalumo kriterijus.
3. Pasirinkus biokuro (malkų) katilo, elektros tiekimo iš nacionalinių elektros tinklų ir A+ energinio naudingumo klasę atitinkančių pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientų derinį, galima įgyvendinti mažaenergetiniams ir pasyviems pastatams keliamus reikalavimus. Nustatyta, kad taikant šį racionalų derinį galima pasiekti šias energinio naudingumo rodiklių reikšmes: pirminės energijos poreikį – $80,1 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2$, CO_2 dujų emisijų kiekį – $14,8 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo dalį – 58 %. Sprendimo patikimumo reikšmė siekia 99,7 %. Pateiktos jautrumo analizės išvados parodo, kad šis galutinis rezultatas yra stabilus, dominuojantis, kai kriterijų reikšmingumo reikšmių standartinis nuokrypis yra apie 0,060.
4. Biokuro (malkų) katilo ir integruotų saulės energijos technologijų ($7,2 \text{ m}^2$ saulės kolektorių sistema ir $4,5 \text{ kW}_p$ instaliuotos elektros galios saulės elementų sistema) derinio (D3) racionalumo didžiausia reikšmė gaunama B energinio naudingumo klasę atitinkančiam pastato variantui (V2). Šio sprendimo atveju, esant pirminės energijos poreikiui – $10,1 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2$, CO_2 dujų emisijų kiekiui – $0,24 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo daliai – 97,4 %, galima įgyvendinti reikalavimus, keliamus beveik nulinės energijos pastatams.
5. Siekiant įgyvendinti nulinės anglies dioksido emisijos pastato koncepciją, racionalus sprendimas yra granulinio katilo su integruotomis saulės energijos technologijomis ($7,2 \text{ m}^2$ saulės kolektorių sistema ir $4,5 \text{ kW}_p$ instaliuotos elektros galios saulės elementų sistema) ir A++ energinio naudingumo klasę atitinkančio pastato varianto (V6) derinys. Nustatyta, kad taikant šį racionalų derinį galima pasiekti šias energinio naudingumo rodiklių reikšmes: pirminės energijos poreikį – $5,9 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2$, CO_2 dujų emisijų kiekį – $0,01 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo dalį – 97,4 %.

6. Tyrimo rezultatai rodo, kad didžiausią įtaką pastato energiniam efektyvumui turi racionalus mažoenergetinio pastato aprūpinimo energija sistemos technologijų derinio parinkimas, nes papildomas pastato konstrukcijų šiltinimas, kai A++ energinio naudingumo klasę atitinkančio varianto (V6) atveju U_{IS} padidinamas 67 %, U_{ST} – 54 %, U_{GR} – 60 %, o langų U_{LN} sumažinamas 49 %, lemia tik 5,5 % pirminės energijos, 2,4 % CO₂ dujų, išmetamų į aplinką, ir 9 % bendrųjų išlaidų sumažėjimą, palyginti su B energinio naudingumo klasę atitinkančio varianto (V1) rezultatais.
7. Racionalaus MPAES technologijų derinio jautrumo analizė pagal kriterijų reikšmingumą parodė, kad didžiausią įtaką derinių racionalumo reikšmių pasiskirstymui turi ekonominio racionalumo kriterijus. Derinių rangavimas keičiasi, kai ekonominio kriterijaus reikšmingumo reikšmės pokytis didesnis nei 61 %, todėl pasikeitus energijos ir aprūpinimo energija technologijų rinkos kainai, kiekvienu atveju gauto racionalaus sprendimo patikimumą būtina tikslinti.

Bendrosios išvados

1. Atlikta mokslinių tyrimų analizė parodė, kad šiuolaikinių integruotų atsinaujanančių energijos išteklių technologijų spartus techninis tobulėjimas bei pastatų energijos vartojimo efektyvumo didinimas lemia viena laikį modeliavimo priemonių ir optimizavimo metodų taikymą, papildomai sumažinant pastato energijos poreikį apie 20–30 %.
2. Šiame darbe sukurtas ir panaudotas mažaenergetinio pastato aprūpinimo energija integruoto vertinimo modelis, kuris iš pasirinktų šešių pastato energijos poreikių variantų ir juos užtikrinančių penkiolikos aprūpinimo energija sistemų leido nustatyti aprūpinimo energija sistemą, tenkinančią racionalų pastato energijos poreikį, vertinant pagal energinio efektyvumo, poveikio aplinkai, ekonominio efektyvumo, komforto ir techninio funkcionalumo kriterijus.
3. Tyrimo rezultatai rodo, kad didžiausią įtaką pastato energiniam naudingumui daro racionalus pastato aprūpinimo energija sistemos parinkimas, nes papildomas pastato konstrukcijų šiltinimas, kai sienų šilumos perdavimo koeficientas padidinamas 67 %, stogo – 54 %, grindų – 60 %, o langų – sumažinamas 49 %, lemia tik 5,5 % pirminės energijos ir 2,4 % CO₂ dujų, išmetamų į aplinką, sumažėjimą.
4. Taikant sukurtą modelį, nustatyta, kad Lietuvoje ir panašaus klimato šalyse racionalus sprendimas įgyvendinant keliamus reikalavimus:

4.1. Mažaenergiams, pasyviesiems vienbučiams namams:

- pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientai: sienų – $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$, stogo – $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$, grindų – $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$, langų – $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- pastato aprūpinimo energija sistema – biokuro (malkų) katilas ir elektros energijos tiekimas iš nacionalinių elektros tinklų. Šio varianto racionalumo didžiausia reikšmė gaunama, kai pirminės energijos poreikis – $80 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$, CO_2 dujų emisijų kiekis – $14,8 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, atsinaujinančių energijos išteklių dalis – 58 %;

4.2. Beveik nulinės energijos vienbučiams namams:

- pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientai: sienų – $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, stogo – $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$, grindų – $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, langų – $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- pastato aprūpinimo energija sistema – biokuro (malkų) katilas, $7,2 \text{ m}^2$ saulės kolektorių sistema, elektros energijos tiekimas iš nacionalinių elektros tinklų ir $4,5 \text{ kW}_p$ saulės elementų sistema. Šio derinio racionalumo didžiausia reikšmė gaunama, kai pirminės energijos poreikis – $10,1 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^2$, CO_2 dujų emisijų kiekis – $0,24 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, atsinaujinančių energijos išteklių dalis – 97,4 %.

5. Taikant daugiatikslį sprendimo priėmimo metodą, racionalaus sprendimo patikimumas siekia 99,5 %, kai kriterijų subjektyvaus reikšmingumo reikšmės pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį.
6. Racionalaus pastato aprūpinimo energija technologijų derinio jautrumo analizė pagal kriterijų reikšmingumą parodė, kad didžiausią įtaką derinių racionalumo reikšmių pasiskirstymui daro ekonominio efektyvumo kriterijus. Derinių rangavimas keičiasi, kai ekonominio kriterijaus reikšmingumo reikšmės pokytis didesnis nei 61 %.

Literatūra ir šaltiniai

- Abdollahi, G.; Meratizaman, M. 2011. Multi-objective approach in thermoenviromonic optimization of a small-scale distributed CCHP system with risk analysis, *Energy and Buildings* 43(11): 3144–3153.
- Abedi, S.; Alimardani, A.; Gharehpetian, G. B.; Riahy, G. H.; Hosseinian, S. H. 2012. A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid RES-based autonomous energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3): 1577–1587.
- Adamski, M. 2007. Optimization of the form of a building on an oval base, *Building and Environment* 42(4): 1632–1643.
- Ahmadi, P.; Rosen, M. A.; Dincer, I. 2012. Multi-objective exergy-based optimization of a polygeneration energy system using an evolutionary algorithm, *Energy* 46(1): 21–31.
- Alanne, K.; Salo, A.; Saari, A.; Gustafsson, S. 2007. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems, *Energy and Buildings* 39(12): 1218–1226.
- Alonso, M.; Amaris, H.; Alvarez-Ortega, C. 2011. Integration of renewable energy sources in smart grids by means of evolutionary optimization algorithms, *Expert Systems with Applications* 39(5): 5513–5522.
- Anderson, R.; Christensen, C.; Horowitz, S. 2006. Program design analysis using BEopt building energy optimization software: defining a technology pathway leading to new homes with zero peak cooling demand, *2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Conference Paper*, NREL/CP-550-39821, Pacific Grove, California, August 2006.
- ANSI/ASHRAE Standard 62-2004 Ventilation for acceptable indoor air quality.*
- Asadi, E.; Silva, M. G. D.; Antunes, C. H.; Dias, L. 2012. A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB, *Building and Environment* 56: 370–378.

- Attia, S.; Gratia, E.; De Herde, A.; Hensen, J. 2012. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design, *Energy and Buildings* 49: 2–15.
- Attia, S.; Hamdyc, M.; O'Briend, W.; Carluccio, S. 2013. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, *Energy and Buildings* 60: 110–124.
- Bambrook, S.; Sproul, A.; Jacob, D. 2011. Design optimisation for a low energy home in Sydney, *Energy and Buildings* 43(7): 1702–1711.
- Beccali, M.; Cellura, M.; Mistretta, M. 2003. Decision-making in energy planning. Application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology, *Renewable Energy* 28(13): 2063–2087.
- Bernal-Agustín, J. L.; Dufo-López, R. 2009. Efficient design of hybrid renewable energy systems using evolutionary algorithms, *Energy Conversion and Management* 50(3): 479–489.
- Bichiou, Y.; Krarti, M. 2011. Optimisation of envelope and HVAC systems selection for residential buildings, *Energy and Buildings* 43(12): 3373–3382.
- Bjorn, E.; Wahlstrom A.; Brohus, H. [interaktyvus] 2004. Eco-factor method. [žiūrėta 2014m. kovo 30 d.]. Prieiga prie interneto: <http://www.opticontrol.ethz.ch/Lit/Bjor_04_Rep-IDEEB_2.pdf>.
- Blūdžius, R. 2014. Kodėl didinamas pastatų energinis efektyvumas? [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <<http://lntpa.lt/wp-content/uploads/2014/04/Lietuvos-pasirinkta-metodika-siekiant-u%C5%BEsibr%C4%97%C5%BEto-tikslo-2020-m.pdf>>.
- Boonbumroong, U.; Pratinthong, N.; Thepa, S.; Jivacate, C.; Pridasawas, W. 2011. Particle swarm optimization for AC-coupling stand alone hybrid power systems, *Solar Energy* 85(3): 560–569.
- Borges, A. R.; Antunes, C. H. 2003. A fuzzy multiple objective decision support model for energy-economy planning, *European Journal of Operational Research* 145(2): 304–316.
- Bouchlaghem, N. 2000. Optimising the design of building envelopes for thermal performance, *Automation in Construction* 10(1): 101–112.
- BREEAM Communities [interaktyvus]. 2012. Technical Manual [žiūrėta 2014 m. rugpjūčio 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.breeam.org/communitiesmanual/#_frontmatter/breeam_communities.htm%3FTocPath%3D_____1>.
- Brownlee, A.; Wright, J. 2012. Solution analysis in multi-objective optimisation, in *Proc. of the 1st Building Simulation and Optimization Conference (BSO12)*, Loughborough, United Kingdom, 2012. Loughborough University: IBPSA–England, 317–324.
- Buildings Performance Institute Europe [interaktyvus] 2011. Principles for nearly zero-energy buildings. [žiūrėta 2013 m. lapkričio 16 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.institutebe.com/InstituteBE/media/Library/Resources/Existing%20Building%20Retrofits/BPIE-Report-Principles-for-Nearly-Zero-Energy-Buildings.pdf>>. ISBN 9789491143021.
- Buildings Performance Institute Europe [interaktyvus] 2012. Implementing nearly zero-energy buildings (nZEB) in Poland – towards a definition and roadmap. [žiūrėta 2013 m. spalio 14 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.bpie.eu/documents/BPIE/publications/Poland_nZEB/Executive_Summary_nZEB_Poland.pdf>. ISBN 9789491143052.
- Buildings Performance Institute Europe [interaktyvus] 2013. Implementing the cost-optimal methodology in EU countries. Lessons learned from three case studies. [žiūrėta 2014 m. vasario 4 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.bpie.eu/documents/BPIE/publications/>>

- cost_optimal_methodology/BPIE_Implementing_Cost_Optimality.pdf>. ISBN 9789491143083.
- Caldas, L. G.; Norford, L. K. 2003. Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems, *Journal of Solar Energy Engineering* 125(3): 343–351.
- Carsten, P.; Boermans, T.; Harnisch, J. [interaktyvus] 2006. Mitigation of CO2 emissions from the EU-15 building stock: beyond the EU directive on the energy performance of buildings. [žiūrėta 2013 m. vasario 4 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.pubfacts.com/detail/17067030/Mitigation-of-CO2-emissions-from-the-EU-15-building-stock:-beyond-the-EU-Directive-on-the-Energy-Per>>.
- Cavallaro, F. 2009. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies, *Renewable Energy* 34(7): 1678–1685.
- Čekanaavičius, V.; Murauskas, G. 2006. Statistika ir jos taikymai I. Vilnius:TEV. 240p.
- Celik, A. N. 2003. Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods, *Energy Conversion and Management* 44(12): 1951–1968.
- Charron, R.; Athienitis, A. 2006. The use of genetic algorithms for a net-zero energy solar home design optimisation tool, in *Proc. of the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6–8 September 2006*.
- Chlela, F.; Husaunndee, A.; Inard, C.; Riederer, P. 2009. A new methodology for the design of low energy buildings, *Energy and Buildings* 41(9): 982–990.
- Christensen, C.; Barker, G.; Horowitz, S. 2004. A sequential search technique for identifying optimal building designs on the path to zero net energy [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://beopt.nrel.gov/sites/beopt.nrel.gov/files/docs/2004_A%20Sequential%20Search%20Technique%20for%20Identifying%20Optimal%20Building%20Designs%20on%20the%20Path%20to%20Zero%20Net%20Energy.pdf>.
- Christensen, C.; Horowitz, S.; Barker, G. 2005. BEopt: software for identifying optimal building designs on the path to zero net energy, in *Proc. of the ISES 2005 Solar World Congress, Orlando, Florida, 6–12 August 2005*.
- Čiuprinskas, K. 1999. *Vienbučio namo energijos sąnaudų modeliavimas ir šilumos izoliacijos paskirstymo optimizavimas*: daktaro disertacijos santrauka. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 36 p.
- Clarke, J. A.; Cockroft, J.; Conner, S.; Hand, J. W.; Kelly, N. J.; Moore, R.; O'Brien, T.; Strachan, P. 2002. Simulation-assisted control in building energy management systems, *Energy and Buildings* 34(9): 933–940.
- Cohon, J. L. 1985. Multicriteria programming: Brief review and application. Design optimization, 163–191.
- Coley, D. A.; Schukat, S. 2002. Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement, *Building and Environment* 37(12): 1241–1247.
- Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 2011. Energy efficiency plan 2011 [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. kovo 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/docs/efficiency_plan_en.pdf>.
- Connolly, D.; Lund, H.; Mathiesen, B. V.; Leahy, M. 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems, *Applied Energy* 87(4): 1059–1082.

Cormico, C.; Dicorato, M.; Minoia, A.; Trovato, M. 2003. A regional energy planning methodology including renewable energy sources environmental constraints, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7(2): 99–130.

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(2): 182–197.

DesignBuilder [interaktyvus] 2009. DesignBuilder user manual. [žiūrėta 2014 m. kovo 6 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder_2.1_Users-Manual_Ltr.pdf>.

DGNB [interaktyvus]. 2014. Excellence defined. Sustainable building with a systems approach. [žiūrėta 2014 m. rugpjūčio 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://issuu.com/manufaktur/docs/dgnb_system_en_06-2012?mode=embed&layout=http%3A%2F%2Fskin.issuu.com%2Fv%2Fflight%2Flayout.xml&showFlipBtn=true>.

Diakaki, C.; Grigoroudis E.; Kolokotsa, D. 2008. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings, *Energy and Buildings* 40(9): 1747–1754.

Diakaki, C.; Grigoroudis, E.; Kabelis, N.; Kolokotsa, D.; Kalaitzakis, K.; Stavrakakis, G. 2010. A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency, *Energy* 35(12): 5483–5496.

Dufo-López, R.; Bernal-Agustín, J. L. 2005. Design and control strategies of PV–Diesel systems using genetic algorithms, *Solar Energy* 79(1): 33–46.

Dufo-López, R.; Bernal-Agustín, J. L., Contreras, J. 2007. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage, *Renewable Energy* 32(7): 1102–1126.

Dufo-López, R.; Bernal-Agustín, J. L.; Mendoza, F. 2009. Design and economical analysis of hybrid PV-wind systems connected to the grid for the intermittent production of hydrogen, *Energy Policy* 37(8): 3082–3095.

Eisenhower, B.; O'Neill, Z.; Narayanan, S.; Fonoberov, V. A.; Mezic, I. 2012. A methodology for meta-model based optimization in building energy models, *Energy and Buildings* 47: 292–301.

EN 15316-1 Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1: General. EU, 2007.

EnergyPlus Energy Simulation [interaktyvus] 2013. *Software EnergyPlus Engineering Reference.* [žiūrėta 2013 09 11]. Prieiga prie interneto: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>.

energyPRO 2013. *User's Guide.* EMD International A/S, Denmark.

Erhorn, H.; Erhorn-Kluttig, H. 2011. *Terms and definitions for high performance buildings* [interaktyvus]. European Union [žiūrėta 2014 m. sausio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.epbd-ca.org/Medias/Pdf/High_Performance_Buildings.pdf>.

European Commission [interaktyvus] 2009. EU energy trends to 2030. [žiūrėta 2014m. kovo 20 d.]. Prieiga prie interneto: <http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030/doc/trends_to_2030_update_2009.pdf>.

European Parliament and Council. 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 may 2010 due on the energy performance of buildings, *Official Journal of the European Union* 153: 13–35.

European Parliament and Council. 2012. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of

- the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements, *Official Journal of the European Union C 115/01*: 1–38.
- Evins, R. 2013. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22: 230–245.
- Evins, R.; Pointer, P.; Vaidyanathan, R.; Burgess, S. 2012. A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation, *Building and Environment* 54: 126–136.
- Fabrizio, E. 2008. *Modelling of multi-energy systems in buildings*. Doctoral thesis. Politecnico di Torino & Institut National des Sciences Appliquees de Lyons, Torino: 170 p.
- Fabrizio, E.; Corrado, V.; Filippi, M. 2010. A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy* 35(3): 644–55.
- Fabrizio, E.; Filippi, M.; Virgone, J. 2009. An hourly modelling framework for the assessment of energy sources exploitation and energy converters selection and sizing in buildings. *Energy and Buildings* 41(10): 1037–50.
- Feist, W.; Schnieders, J.; Dorer, V.; Haas, A. 2005. Re-inventing air heating: convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept, *Energy and Buildings* 37(11): 1186–1203.
- Fesanghary, M.; Asadi, S.; Geem, Z. W. 2012. Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm, *Building and Environment* 49: 245–250.
- Filatovas, E. 2012. *Daugiakriterinių optimizavimo uždavinių sprendimas interaktyviuoju būdu*: daktaro disertacija. Vilniaus universitetas. Vilnius: 125 p.
- Florides, G. A.; Tassou, S. A.; Kalogirou, S. A.; Wrobel, L. C. 2002. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness, *Applied Energy* 73(3–4): 299–328.
- Fong, K. F.; Hanby, V. I.; Chow, T. T. 2006. HVAC system optimisation for energy management by evolutionary programming, *Energy and Buildings* 38(3): 220–231.
- Freitas Vaz, A., I.; Fernandes, E., M., G., P. 2006. Optimization of nonlinear constrained particle swarm, *Technological and Economic Development of Economy* 12(1): 30–36
- Generic Optimization Program [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2014 m. vasario 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://gundog.lbl.gov/GO/>>.
- Georgopoulou, E.; Lalas, D.; Papagiannakis, L. 1997. A multi-criteria decision aid approach for energy planning problems: the case of renewable energy option, *European Journal of Operational Research* 103(1): 38–54.
- Griego, D.; Krarti, M.; Hernández-Guerrero, A. 2012. Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico, *Energy and Buildings* 54: 540–549.
- Hakimi, S. M.; Moghaddas-Tafreshi, S. M. 2009. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran, *Renewable Energy* 34(7): 1855–1862.
- Hamdy, M.; Hasan, A.; Siren, K. 2009. Combination of optimisation algorithms for a multi-objective building design problem, in *Proc. of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow, United Kingdom, 2009*. Glasgow: IBPSA, 173–179.

- Hamdy, M.; Hasan, A.; Siren, K. 2011. Applying a multi-objective optimization approach for design of low-emission cost-effective dwellings, *Building and Environment* 46(1): 109–123.
- Hamdy, M.; Hasan, A.; Siren, K. 2013. A multi-stage optimisation method for cost-optimal nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, *Energy and Buildings* 56(1): 189–203.
- Hamdy, M.; Palonen, M.; Hasan, A. 2012. Implementation of pareto-archive NSGA-II algorithms to a nearly-zero-energy building optimisation problem, in *Proc. of the 2012 Building Simulation and Optimization Conference, Loughborough, United Kingdom, 2012*. Leicester-shire: Loughborough University, 181–188.
- Hamdy, M.; Hasan, A.; Siren, K. 2010. Optimum design of a house and its HVAC systems using simulation-based optimisation, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 5(3): 120–124.
- Händel, C. 2011. Ventilation with heat recovery is a necessity in “nearly zero” energy buildings, *REHVA Journal* 5: 18–22.
- Haralambopoulos, D. A.; Polatidis, H. 2003. Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework, *Renewable Energy* 28(6): 961–973.
- Harvey, L. D. D. 2009. Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples, *Energy Efficiency* 2: 139–163.
- Hasan, A.; Vuolle, M.; Siren, K. 2008. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation, *Building and Environment* 43(12): 2022–2034.
- Henze, G. P.; Kalz, D. P.; Liu, S.; Felsmann, C. 2011. Experimental analysis of model-based predictive optimal control for active and passive building thermal storage inventory, *HVAC&R Research* 11(2): 189–214.
- Hermelink, A.; Schimschar, S.; Boermans, T.; Pagliano, L.; Zangheri, P.; Armani, R.; Voss, K.; Musall, E. 2013. *Towards nearly zero-energy buildings. Definition of common principles under the EPBD* [interaktyvus]. Köln [žiūrėta 2014 m. kovo 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/doc/nzeb_full_report.pdf>.
- Huang, W.; Lam, H. N. 1997. Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems, *Energy and Buildings* 26(3): 277–282.
- IDA indoor climate and energy [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2014 m. vasario 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.equa-solutions.co.uk/en/software/idaice>>.
- Ihm, P.; Krarti, M. 2012. Design optimization of energy efficient residential buildings in Tunisia, *Building and Environment* 58: 81–90.
- Inanici, M. N.; Demirbilek, F. N. 2000. Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey, *Building and Environment* 35(1): 41–52.
- IWEC 2009. Weather Files (International Weather for Energy Calculations), ASHRAE, Atlanta, USA.
- Jaber, S.; Ajib, S. 2011. Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region, *Energy and Buildings* 43(8): 1829–1834.
- Jaber, S.; Ajib, S. 2011. Thermal and economic windows design for different climate zones, *Energy and Buildings* 43(11): 3208–3215.
- Kalantar, M.; Mousavi, S. M. G. 2010. Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine microturbine, solar array and battery storage, *Applied Energy* 87(10): 3051–3064.

- Kaldellis, J. K.; Zafirakis, D.; Kondili, E. 2009. Optimum autonomous stand-alone photovoltaic system design on the basis of energy pay-back analysis, *Energy* 34(9): 1187–1198.
- Kämpf, J. H.; Robinson, D. 2010. Optimisation of building form for solar energy utilization using constrained evolutionary algorithms, *Energy and Buildings* 42(6): 807–814.
- Kämpf, J. H.; Wetter, M.; Robinson, D. 2010. A comparison of global optimisation algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus, *Journal of Building Performance Simulation* 3(2): 103–120.
- Kaundinya, D. P.; Balachandra, P.; Ravindranath, N. H. 2009. Gridconnected versus stand-alone energy systems for decentralized power – a review of literature, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(8): 2041–2050.
- Kaviani, A., K.; Riahy, G. H.; Kouhsari S. M. 2009. Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages, *Renewable Energy* 34(11): 2380–2390.
- Kayo, G.; Ooka, R. 2010. Building energy system optimizations with utilization of waste heat from cogenerations by means of genetic algorithm, *Energy and Buildings* 42(7): 985–991.
- Khatod, D. K.; Pant, V.; Sharma, J. 2010. Analytical approach for well-being assessment of small autonomous power system with solar and wind energy sources, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25(2): 535–545.
- Khoury, Z. E.; Riederer, P.; Couillaud, N.; Simon, J.; Raguin M. 2005. A multizone building model for MATLAB/ Simulink environment, in *Proc. of the IBPSA Conference Building Simulation, Montréal, Canada, 2005*. Montreal: IBPSA, 525–532.
- Klein, S., A.; Beckmann, B.; Duffie, J. 2012. *TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Program Manual*. Solar Laboratory, Madison, Wisconsin.
- Knudstrup, M.; Hansen, H. T. P.; Brunsgaard, C. 2009. Approaches to the design of sustainable housing with low CO₂ emission in Denmark, *Renewable Energy* 34(9): 2007–2015.
- Konak, A.; Coit, D. W.; Smith, A. E. 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial, *Reliability Engineering and System Safety* 91(9): 992–1007.
- Kopustinskas, V.; Alzbutas, R.; Augutis, J. 2007. Matematinų modelių parametų jautrumo ir rezultatų neapibrėžtumo statistiniai tyrimo metodai, *Energetika* 53(3): 10–15.
- Kordjamshidi, M. 2011. *House Rating Schemes, Green Energy and Technology*. Berlin: Springer. 146 p. ISBN 978-3642157899.
- Koutroulis, E.; Kolokotsa, D.; Potirakis, A.; Kalaitzakis, K. 2006. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms, *Solar Energy* 80(9): 1072–1088.
- Kurnitski, J.; Buso, T.; Corgnati, S. P.; Derjanecz, A.; Litiu, A. 2014. nZEB definitions in Europe, *REHVA Journal* 3: 6–9.
- Kurnitski, J.; Alard, F.; Braham, D.; Goeders, G.; Heiselberg, P.; Jagemar, L.; Kosonen, R.; Lebrun, J.; Mazarela, L.; Railo, J.; Sepänen, O.; Schmidt, M.; Virta, M. 2011. *How to define nearly net zero energy buildings nZEB – REHVA proposal for uniformed national implementation of EPBD recast* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <file:///D:/Downloads/nzeb-rehva-proposal_final.pdf>.
- Lee, A. H. I.; Chen, H. H.; Kang, H. Y. 2009. Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms, *Renewable Energy* 34(1): 120–126.
- Lee, W.; Chen, Y.; Kao, Y. 2011. Optimal chiller loading by differential evolution algorithm for reducing energy consumption, *Energy and Buildings* 43(2–3): 599–604.

- LEED Canada for homes [interaktyvus]. 2009. [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cagbc.org/AM/PDF/LEED_Canada_for_Homes_2009_RS.pdf>. ISBN 978-0-9736610-3-3.
- Leipzigiger, D. 2013. *Comparing Building Energy Performance Measurement. A framework for international energy efficiency assessment systems* [interaktyvus]. Washington: Institute for Market Transformation [žiūrėta 2014 m. kovo 17 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.imt.org/>>.
- Leskovar, V. Ž.; Premrov, M. 2011. An approach in architectural design of energy-efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south-oriented façade, *Energy and Buildings* 43(12): 3410–3418.
- Li, H.; Burer, M.; Song, Z. P.; Favrat, D.; Marechal, F. 2004. Green heating system: characteristics and illustration with multi-criteria optimization of an integrated energy system, *Energy* 29(2): 225–244.
- Liu S.; Henze, G. P. 2006. Experimental analysis of simulated reinforcement learning control for active and passive building thermal storage inventory. Part 1: theoretical foundation, *Energy and Buildings* 38(2): 142–147.
- LR Aplinkos ministerija [interaktyvus]. 2014. Energijos beveik nevartojančių pastatų kiekio didinimo planas [žiūrėta 2014 m. gegužės 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.am.lt/VI/files/0.399491001352106171.pdf>>.
- LST EN 15217:2007 *Energetinės pastatų charakteristikos. Pastatų energetinių charakteristikų išreiškimo ir energetinio sertifikavimo metodai*. Vilnius, 2007. 31 p.
- LST EN 15603:2008 *Energetinės pastatų charakteristikos. Visuminis energijos suvartojimas ir energetinių parametų apibrėžtis*. Vilnius, 2008. 62 p.
- LST EN ISO 7730:2006. *Šiluminės aplinkos ergonomika. Šiluminio komforto analitinis nustatymas ir aiškinimas, naudojant numatomojo vidutinio vertinimo ir numatomojo nepatenkintųjų procento rodiklių bei vietinio šiluminio komforto kriterijų skaičiavimą (ISO 7730:2005)*. Vilnius, 2006. 54 p.
- Machairas, V.; Tsangrassoulis, A.; Axarli, K. 2014. Algorithms for optimization of building design: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 101–112.
- Magnier, L.; Haghghat, F. 2010. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and artificial neural network, *Building and Environment* 45(3): 739–746.
- Masoum, M. A. S.; Mousavi Badejani, S. M.; Kalantar, M. 2010. Optimal placement of hybrid PV-wind systems using genetic algorithm, in *Proc. of the Innovative Smart Grid Technologies Conference, Gaithersburg, Maryland, 2010*. USA: IEEE, 1–5.
- Moghaddam, A. A.; Seifi, A.; Niknam, T.; Pahlavani, M. R. A. 2011. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source, *Energy* 36(11): 6490–6507.
- Mossolly, M.; Ghali, K.; Ghaddar, N. 2009. Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm, *Energy* 34(1): 58–66.
- Musall, E.; Weiss, T.; Voss, K.; Lenoir, A.; Donn, M.; Cory, S.; Garde, F. 2010. Net zero energy solar buildings: an overview and analysis on worldwide building projects [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. gruodžio 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.enob.info/fileadmin/media/Projektbilder/EnOB/Thema_Nullenergie/EuroSun_Conference_Graz_2010_Net_Zero_Energy_Solar_Buildingsx.pdf>.

- Nassif, N.; Stainslwa, K.; Sabourin, R. 2005. Optimisation of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm, *HVAC&R Research* 11(3): 459–486.
- Nguyen, A.; Reiter, S.; Rigo, P. 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy* 113: 1043–1058.
- NS 3700:2013. *Criteria for passive houses and low energy buildings – Residential buildings.*
- Obara, S.; Kudo, K. 2003. Multiple-purpose operational planning of fuel cell and heat pump compound system using genetic algorithm, *Transactions of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan* 91: 65–76.
- Ooka, R.; Komamura, K. 2009. Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms, *Building and Environment* 44(7): 1538–1544.
- Ould Bilal, B.; Sambou, V.; Ndiaye, P. A.; Kébé, C. M. F.; Ndongo, M. 2010. Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP), *Renewable Energy* 35(10): 2388–2390.
- Palonen, M.; Hasan, A.; Siren, K. 2009. A genetic algorithm for optimisation of building envelope and HVAC system parameters, in *Proc. of the 11th International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 2009*. Glasgow: IBPSA, 159–166.
- Papadopoulos, A.; Karagiannidis, A. 2008. Application of the multi-criteria analysis method ELECTRE III for the optimization of decentralized energy systems, *Omega* 36(5): 766–776.
- Peippo, K.; Lund, P. D.; Vartiainen, E. 1999. Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings, *Energy and Buildings* 29(2): 189–205.
- Pelet, X.; Favrat, D.; Leyland, G. 2005. Multiobjective optimisation of integrated energy systems for remote communities considering economics and CO2 emissions, *International Journal of Thermal Sciences* 44(12): 1180–1189.
- Perednis, E.; Kavaliauskas, A. 2005. Investigation of solar energy usage for heat production in Lithuania. *Energetics*, 4: 49–53.
- Perez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Maestre, i., R.; Coronel, J., F. 2012. Constructing HVAC energy efficiency indicators, *Energy and Buildings* 47: 619–629.
- Persson, M. L.; Roos, A.; Wall, M. 2006. Influence of window size on the energy balance of low energy houses, *Energy and Buildings* 38(3): 181–188.
- PHPP [interaktyvus] 2007. The Passive House Planning (Design) Package (PHPP). [žiūrėta 2014 m. kovo 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/PHPP.html.
- Podvezko, V. 2009. Application of AHP technique, *Journal of Business Economics and Management* 10(2): 181–189. doi:10.3846/1611-1699.2009.10.181-189.
- Pohekar, S. D.; Ramachandran, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8(4): 365–381.
- Poirazis, H.; Blomsterberg, Å.; Wall, M. 2008. Energy simulations for glazed office buildings in Sweden, *Energy and Buildings* 40(7): 1161–1170.
- Polysun 2000. *User's manual for Polysun 3.3*. SPF, Switzerland.
- Protogeropoulos, C.; Brinkworth, B. J.; Marshall, R. H. 1997. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage, *International Journal of Energy Research* 21(6): 465–479.

- Pylsy, P.; Kalema, T. 2008. *Concepts for low-energy single-family houses*. Finland: Tampere University of Technology. 64 p.
- Rapone, G.; Saro, O. 2012. Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm, *Energy and Buildings* 45: 189–196.
- Remund, J.; Muller, S.; Kunz, S.; Huguenin-Landl, B.; Schmid, C.; Schilter, C. 2013. *Meteorology, Global Meteorological Database, Handbook part I: Software*. Bern, Switzerland.
- Ruiz, M. C.; Romero, E. 2011. Energy saving in the conventional design of a Spanish house using thermal simulation, *Energy and Buildings* 43(11): 3226–3235.
- Saaty, T. L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology* 15(3): 234–281.
- Saaty, T. L.; Erdener, E. 1979. A new approach to performance measurement the analytic hierarchy process, *Design Methods and Theories* 13(2): 62–68.
- San Cristóbal, J. R. 2011. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: the Vikor method, *Renewable Energy*, 36(2): 498–502.
- Schlueter, A.; Thesseling, F. 2009. Building information model based energy / exergy performance assessment in early design stages, *Automation in Construction* 18(2): 153–163.
- Simanavičienė, R. 2011. *Kiekybinių daugiataikslių sprendimo priėmimo metodų jauštumo analizė: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: 148 p.
- Sorensen, B.; Breeze, P.; Suppes, G. J.; Bassam, N. E. L.; Silveira, S.; Yang, Shang-Tian, R.; Aldo, V.; Gupta, H. K.; Sukanta, R.; Doble, M.; Broussely, M.; Maegaard, P.; Pistoia, G.; Kalogirou, S. 2009. *Renewable Energy Focus Handbook, 1st Edition*. Oxford: Elsevier. 528 p. ISBN 978-0-12-374705-1.
- Stavarakakis, G. M.; Zervas, P. L.; Sarimveis, H.; Markatos, N. C. 2012. Optimization of window openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings, *Applied Mathematical Modelling* 36(1): 193–211.
- Stevanovic, S. 2013. Optimization of passive solar design strategies: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 177–196.
- STR 2.01.09:2012 *Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas*. Vilnius, 2012.
- STR 2.09.02:2005 *Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas*. Vilnius, 2005.
- Suga, K.; Kato, S.; Hiyama, K. 2010. Structural analysis of Pareto-optimal solution sets for multi-objective optimisation: an application to outer window design problems using multiple objective genetic algorithms, *Building and Environment* 45(5): 1144–1152.
- Suh, W. J.; Park, C. S.; Kim, D. W. 2011. Heuristic vs. meta-heuristic optimization for energy performance of a post office building, in *Proc. of the 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 2011*. Sydney: IBPSA, 704–711.
- Thermal Energy System Specialists. Transient System Simulation Tool [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2014 m. vasario 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.trnsys.com/>>.
- Tina, G. Ā.; Gagliano, S. 2011. Probabilistic analysis of weather data for a hybrid solar / wind energy system, *International Journal of Energy Research* 35(3): 221–232.
- Tuhus-Dubrow, D.; Krarti, M. 2009. Comparative analysis of optimization approaches to design building envelope for residential buildings, *ASHRAE Transactions* 115(2): 554–562.
- Tuhus-Dubrow, D.; Krarti, M. 2010. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings, *Building and Environment* 45(7): 1574–1584.

- Turrin, M.; von Buelow, P.; Stouffs, R. 2011. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms, *Advanced Engineering Informatics* 25(4): 656–675.
- Ustinovičius, L.; Zavadskas, E. K. 2004. *Statybos investicijų efektyvumo sistemos techninis įvertinimas* [Assessment of investment profitability in construction from technological perspectives]. Vilnius: Technika. 220 p. ISBN 9986-05-806-6.
- Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija [interaktyvus] 2014. Šilumos kainų Lietuvoje statistika. [žiūrėta 2014m. kovo 20 d.]. Prieiga prie interneto: <<http://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2014-metai/2014-04-08/komisija-pateikia-balanzio-menesio-silumos-kainu-lietuvoje-statistika.aspx>>.
- Verbeeck, G.; Hens, H. 2007. Life cycle optimisation of extremely low energy dwellings, *Journal of Building Physics* 31(2): 143–177.
- Wang, L.; Gwilliam, J.; Jones, P. 2009. Case study of zero energy house design in UK, *Energy and Buildings* 41(11): 1215–1222.
- Wang, W.; Rivard, H.; Zmeureanu, R. 2006. Floor shape optimization for green building design, *Advanced Engineering Informatics* 20(4): 363–378.
- Wang, W.; Zmeureanu, R.; Rivard, H. 2006. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, *Building and Environment* 40(11): 1512–1525.
- Wang, X.; Feng, Z. 2002. Sustainable development of rural energy and its appraisal system in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6: 395–404.
- Wetter, M. 2009. GenOpt, generic optimization program – user manual, version 3.0.0 [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. spalio 1 d.]. Prieiga per internetą: <<http://simulationresearch.lbl.gov/GO/download/manual-3-0-3.pdf>>.
- Wetter, M.; Wright, J. A. 2003. Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method, in *Proc. of the 8th IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 2003*. Eindhoven: IBPSA, 1401–1408.
- Wetter, M.; Wright, J. A. 2004. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization, *Building and Environment* 39(8): 989–999.
- Wright J. A.; Farmani, R. 2001. The simultaneous optimisation of building fabric construction, HVAC system size, and the plant control strategy, in *Proc. of the 7th IBPSA Conference: Building Simulation, Rio de Janeiro, Brazil, 2001*. Rio de Janeiro: IBPSA, 865–872.
- Wright, J. A.; Mourshed, M. 2009. Geometric optimization of fenestration, in *Proc. of the 11th International IBPSA Conference Building Simulation, Glasgow, Scotland, 2009*. Glasgow: IBPSA, 920–927.
- Wright, J. A.; Zhang, Y.; Angelov, P.; Hanby, V. I.; Buswell, R. A. 2008. Evolutionary synthesis of HVAC system configurations: algorithm development (RP-1049), *HVAC&R Research* 14(1): 33–55.
- Yang, H.; Zhou, W.; Lu, L.; Fang, Z. 2008. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm, *Solar Energy* 82(4): 354–367.
- Yi, Y. K.; Malkawi, A. M. 2009. Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation, *Automation in Construction* 18(6): 825–833.
- Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Antucheviciene; Zakarevicius, A. 2012. Optimization of weighted aggregated sum product assessment, *Electronics and Electrical Engineering* 6(122): 3–6.

- Zavadskas, E. K.; Zakarevicius, A.; Antucheviciene, J. 2006. Evaluation of Ranking Accuracy in Multi-Criteria Decisions, *Informatica* 17(4), 601–618.
- Zeng, J.; Li, M.; Liu, J. F.; Wu, J.; Ngan, H. W. 2010. Operational optimization of a stand-alone hybrid renewable energy generation system based on an improved genetic algorithm, in *Proc. of the Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, Minneapolis, Minnesota, 2010*. Minneapolis: IEEE, 1–6.
- Zitzler, E.; Deb, K.; Thiele, L. 2000. Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: empirical results, *Evolutionary Computation* 8(2): 173–195.
- Znouda, E.; Ghrab-Morcos, N.; Hadj-Alouane, A. 2007. Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms, *Energy and Buildings* 39(2): 148–153.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Jankauskas, V.; Motuzienė, V. 2012. Energy Balance of a Low Energy House, *Journal of Civil Engineering and Management* 18(3): 369–377. ISSN 1392-3730.

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Lapinskienė, V. 2014. The Multicriteria Assessment Model of an Energy Supply System of a Low Energy House, *Engineering Structures and Technologies* 6(1): 33–41.

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Medineckienė, M. 2013. Daugiakriterių metodų taikymas racionaliam pastato aprūpinimo energija sistemos technologijų deriniui nustatyti, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 5(4): 410–422. ISSN 2029-2341.

Straipsniai kituose leidiniuose

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Streckienė, G. 2014. Solar Hot Water Heating System Analysis Using Different Software in Single Family House in *9th International Conference "Environmental Engineering"*, held in Vilnius on May 22–23, 2014.

Vilnius, Lithuania: selected papers CD. Vilnius: Technika, 2014. ISSN 2029-7092. ISBN 9786094576409.

Medineckienė, M.; Džiugaitė-Tumėnienė, R. 2014. Energy Simulation in Buildings with the Help of Multi-criteria Decision Making in *9th International Conference "Environmental Engineering"*, held in Vilnius on May 22–23, 2014. Vilnius, Lithuania: selected papers CD. Vilnius: Technika, 2014. ISSN 2029-7092. ISBN 9786094576409.

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Jankauskas, V. 2013. Integration and Optimization of Renewable Energy Sources in a Low Energy House, in *Proceedings of the 13th Conference of Young Scientists on Energy Issues "CYSENI 2013"*, held in Kaunas on May 29, 2013. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2013. ISSN 1822-7554 (CD).

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Jankauskas, V. 2011. Energy Use in the Life Cycle of a Low-energy Building, in *Proceedings of the 8th International Conference "Environmental Engineering"*, held in Vilnius on May 19–20, 2011. Vilnius: Technika, 740–746. ISSN 2029-7106.

Džiugaitė, R.; Jankauskas, V. 2010. Case Study of a Low Energy Building in Lithuania, in *Proceedings of the 10th Conference of Young Scientists on Energy Issues "CYSENI 2010"*, held in Kaunas on May 27, 2010. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2010. ISSN 1822-7554 (CD).

Džiugaitė-Tumėnienė, R. 2013. Integruotų pastato energetinių sistemų optimizavimo metodai, *respublikinės mokslinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“*, įvykusios Kaune 2013 m. sausio 31 – vasario 1 d., mokslinių pranešimų rinkinyje. Kaunas: Technologija, 173–180. ISSN 2335-2477.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

For the last few decades, a large portion of global energy resources assigned to creating an indoor climate has been given increasingly growing attention by the global community and politics. For this reason, research in the field of efficient energy supply for low-energy buildings is significant to the implementation of targets pertinent to energy performance of buildings. In order to increase the efficiency of energy consumption as well as the portion of renewable energy in the total share of consumed energy and to reduce the greenhouse effect, various assessment methods for buildings and their energy supply are applied in scientific studies, models are created and recommendations are provided. However, due to a large number of design alternatives that encompass the renewable energy technologies, technical systems of a building, and various passive efficiency measures of energy consumption as well as different goals, the process of finding an optimal solution becomes a difficult optimisation task.

Despite great attention paid to integrated assessment of energy properties of a building combining modelling measures and optimisation algorithms in the recent years, preparing universal methodology seems to be complicated, whereas different methodological measures currently in use each have their own benefits and disadvantages. For research involving integrated assessment of a building and its energy supply, when functions and variables of a goal are continuous values, complicated multicriteria optimisation methods are most often applied. The optimal (the best possible) solutions derived

using these methods usually satisfy energy, technical, ecological and economic goals only, while their reliability is not assessed. Thus, this study aims at determining the influence of a solution for energy supply over the energy performance of a building while assessing the reliability of such solution in terms of the subjective importance of quantitative and qualitative criteria to the variation in values.

Relevance of the thesis

In the last decade the European Union (hereinafter – the EU) has been actively solving the problems of energy resources related to dependence on energy import, the global supply of fossil fuel and obvious climate change. The biggest problem, however, is inefficient consumption which leads to wasting at least 20 % of total primary energy in the entire Europe. Although in the recent years the energy consumption efficiency has increased, the highest energy saving potential is in residential and public buildings sectors where 27 % and 30 % of currently consumed final energy could be saved, respectively. Single family detached houses constitute the largest group of residential buildings in the EU and generate about 60 % of CO₂ emissions. Thus, a lot of research is related to the issues pertaining to the optimisation of energy properties of individual residential buildings, aiming at the most efficient use of the energy saving potential of these buildings.

The overview of performed studies has shown that many of them are concerned with the optimisation of passive efficiency measures of energy consumption while not maximising the complex application possibilities of alternative energy supply systems. Efficient building energy supply is a relevant issue; the solutions pertaining to it are of great importance when determining not only the optimal levels of building energy performance in terms of resources but also increasing the number of nearly-zero energy buildings. In this work, rational energy supply system means a system that ensures minimal expenditure of primary energy, has almost no influence on the environment, maintains maximum comfort in rooms, leads to minimum total costs during the lifetime of the system, and best suits its purpose in the technical sense.

This study presents an assessment of a rational energy supply system of a low-energy single family house, applying a combination of energy modelling of a building and its energy supply system and multi-criteria discrete decision making method.

The object of research

The object of this study is an energy supply of a low-energy house.

The aim of the thesis

This study aims at establishing an integrated assessment model for an energy supply system of a low-energy single family house which would allow determining a rational solution in terms of quantitative and qualitative criteria.

Objectives of the thesis

In order to reach the aim of this study, the following tasks have been set out:

1. To overview the modelling and optimisation methods of building energy demand, energy supply systems and integrated renewable energy technologies, applied in scientific studies.
2. To compile an integrated assessment model of a low-energy building energy supply system (hereinafter – BESS) which would allow determining a rational solution in terms of energy, ecological, economic, comfort and technical functionality (which encompasses system maintenance, exploitation, adjustment possibilities and complexity) criteria.
3. To perform energy demand modelling for low-energy single family house variants, conditioned by different passive measures of energy efficiency, and to determine the main factors that influence the energy performance of a building.
4. To perform the modelling of selected building energy supply systems, comprised of different energy generation (transformation) technologies and to provide systemic analysis results for each BESS.
5. To use the compiled model to perform the multi-criteria assessment of building energy supply systems and to determine a rational system in terms of energy, ecological, economic, comfort and functionality criteria.
6. To assess the reliability of a rational solution in terms of variation in significance values of criteria and to determine the influence of the most critical criterion over the final solution.

Research methodology

In order to model the energy demand of building variants, DesignBuilder modelling tool is used in this study. PolySun modelling tool is used for modelling energy supply systems of selected buildings; derived results are processed using systemic analysis. This analysis allows determining the interrelations between every BESS subsystem and its elements. MATLAB and MS Excel are used to process the output data of modelling tools and to analyse the results.

Multi-criteria decision making method WASPAS that allows assessing the examined alternatives and making a rational decision in terms of selected assessment criteria is used in order to assess the energy supply system of a building.

In order to determine the reliability of a rational solution, a sensitivity analysis is performed; its goal is to determine whether the solution remains the same if the significance values of criteria are changed and which criterion is the most critical, i.e. alters the arrangement of combination ranks. To perform the sensitivity analysis, the imitation Monte Carlo method, based on statistical modelling as well as statistical analysis of samples of derived results (the significance values of criteria).

Scientific novelty of the thesis

While preparing the dissertation, the following results, new to constructional engineering discipline, were achieved:

1. The model of integrated BESS assessment created by the author and used in this work, combining energy modelling tools, modified joint matrix of energy flows created on the basis of the energy hub model, multipurpose discrete decision making method, and sensitivity analysis to determine a rational solution.
2. A joint matrix, modified by the author, that determines the direct relation between the energy demand of the building and the energy flows supplied to be the building, allows combining modelling tools and multipurpose decision making methods flexibly.
3. Using the Matlab suite and Microsoft Excel, the inputted assessment model algorithm allows generating the selection of a rational BESS while changing variables of the solution and scenarios of the integration of renewable energy technologies.
4. The assessment model operates on the basis of defined target criteria – quantitative (energy and economic efficiency, environmental impact) and qualitative (comfort, functionality), thus enabling to achieve a rational solution for energy supply of a building under specific conditions of climate and the purpose of the building.

Practical value of the research findings

The model of integrated assessment proposed by this study would enable to select a rational energy supply system in the stage of building planning after possible passive and active measures of energy consumption efficiency as well as renewable energy technologies are assessed.

The algorithm of a model is described in the environment of MATLAB software that has a result output to MS Excel program. Thus, this model may be used by a consumer who wants to perform a comprehensive analysis as well as multi-criteria assessment of the energy demand of a building and alternative energy supply systems.

Defended statements

1. Integral-holistic assessment of a building and its energy supply system that encompasses combinations of modelling tools and optimisation algorithms allows fulfilling requirements for high efficiency buildings.
2. The compiled model of integrated BESS assessment allows performing a comprehensive analysis of building energy demand and energy supply systems as well as determining a rational solution on the basis of selected assessment criteria – energy efficiency, environmental impact, economic, comfort and functionality.
3. Selecting a rational BESS has the most influence over the energy performance of a building due to efficiency measures of passive energy consumption, applied to building envelopes leading to insignificant decrease of primary energy and CO₂ emissions in the total energy balance.

4. A low-energy single family building located in a cold climate zone may achieve a 60% utilisation share of renewable energy resources (hereinafter – RER) if biofuel energy technologies are used to ensure the thermal demand.
5. The environmental impact may be reduced to 3 kgCO₂/m² and RER utilisation may amount to 97 % in the total building energy consumption balance if biofuel and solar energy technologies are selected in order to ensure the energy demand of the building.
6. The application of multi-criteria decision making method leads to the most critical criterion that alters the final rank of alternative priorities influencing the reliability of a rational solution.

The approval of the research findings

9 scientific articles have been published on the topic of this dissertation: one in a science journal that has been included in the ISI Web of Science list (Džiugaitė-Tumėnienė *et al.* 2012); two in science journals that have been included in databases approved by the SCL (Džiugaitė-Tumėnienė ir Medineckienė 2013; Džiugaitė-Tumėnienė ir Lapinskienė 2014); five in the reviewed material of an international conference (Džiugaitė-Tumėnienė ir Streckienė 2014; Medineckienė ir Džiugaitė-Tumėnienė 2014; Džiugaitė-Tumėnienė ir Jankauskas 2013, 2011, 2010); one in the material of a national conference (Džiugaitė-Tumėnienė 2013).

The results of research performed in the dissertation were disclosed in five scientific conferences:

- 9th international conference ‘Environmental Engineering’, Vilnius, 2014;
- 13th international conference of doctorate students and young scientists ‘CYSENI 2013’, 2013, Kaunas;
- 8th international conference ‘Environmental Engineering’, Vilnius, 2011;
- 10th international conference of doctorate students and young scientists ‘CYSENI 2010’, 2010, Kaunas;
- National conference ‘Thermal energy and technologies 2013’, 2013, Kaunas.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of the introduction, 3 chapters, conclusions, a reference list, a list of publications and annexes. The volume of this dissertation is 146 pages, 34 figures, 26 tables and 5 annexes. 190 references have been used.

1. Energy supply for low-energy buildings and the overview of its assessment methods

In the first chapter the concepts of high energy performance buildings, the assessment and certification systems of such buildings, indicators of energy efficiency used in the EU and applied passive as well as active efficiency measures of energy consumption

are overviewed. The overview has shown that comparing low-energy buildings located in different countries is beside the purpose, because not only there are differences in climate conditions, but also in the methods for assessing energy performance that determine the indicators of energy efficiency (Kurnitski *et al.* 2014). The variations in values of the indicators of the latter are determined by specific requirements for thermal characteristics of building envelopes, comfort in winter and summer, maintained microclimate parameters, air quality, RER utilisation, orientation of a building, glazing area, amount of heat inflow, established in each country. The overview of scientific research has shown rapidly increasing attention to strategies, recommendations and methods dedicated to optimally achieving high energy performance of buildings while taking external climate conditions, specifics of an area, requirements for room microclimate, and economic efficiency into account (Evins 2013, Attia *et al.* 2013, Stevanovic 2013, Machairas *et al.* 2014, Nguyen *et al.* 2014). In order to reach this goal, integrated assessment which combines modelling measures and optimisation methods is used in studies.

Based on the presented overview of methods dedicated to optimisation of building energy properties, it is evident that parametric analysis performed using modelling measures is a suitable method only for solving linear issues of optimisation. However, in order to solve multicriteria optimisation problems of energy properties of high-efficiency buildings when functions and limitations of the goal are non-linear, combinations of modelling tools and compiled optimisation algorithms are applied (Hasan *et al.* 2008; Bambrook *et al.* 2011; Griego *et al.* 2012; Ihm ir Krarti 2012; Eisenhower *et al.* 2012). Results of performed studies where combinations of building energy modelling tools and optimisation methods were applied show that energy demand of a building located in a cold climate zone may be reduced by 20 to 30%. Usually, the goal functions of reducing the environmental impact and increasing the economic efficiency are optimised in these studies.

In order to achieve the optimisation of properties of zero-energy buildings and the optimal level in terms of resources, methods of consistent search optimisation are applied in the studies. Genetic optimisation algorithms are more often used to optimise architectural and constructional variables of a building without taking the influence of energy supply technologies into account. Design variables, such as the form of the building, orientation, measurements of walls, width of insulation of walls and roof, materials, type of windows, ratio of windows to walls, thermal capacity of a building, air tightness, intensity of lighting, characteristics of technical systems, and shading tools, are typical to the optimisation of building energy properties,

In order to optimise complex hybrid energy supply systems and combinations thereof, evolutionary, genetic and particle swarm optimisation algorithms that generate better results in comparison to other methods are applied. Optimisation variables of these systems are as follows: optimal capacity, minimal costs, possibility of electric energy supply losses, reliability of systems, construction, and management. Multi-criteria decision making methods are applied to the projects of RER technology planning and integration as well as solving problems of centralised and decentralised energy supply. In conclusion, it can be said that due to different application areas, a universal assessment methodology for a building and its energy supply is hard to formulate; meanwhile, vari-

ous methodological measures that are currently in use each have their own benefits and disadvantages.

2. Compiling an integrated assessment method of the energy supply of a low-energy building

In this chapter a compiled integrated assessment method for the energy supply system of a low-energy building is presented. The model aims at determining an efficient system in terms of energy, environmental impact, economy, comfort and functionality. The integrated assessment methodology for a building and its energy supply applied in the process of this study is described; it encompasses DesignBuilder and Polysun modelling tools, systemic analysis of BESS technologies and their combinations, multicriteria decision making method WASPAS, sensitivity analysis performed using the imitation Monte Carlo method as well as statistical analysis of samples of the significance values of criteria.

In order to determine an efficient in terms of energy, environmental impact, comfort and functionality system of low-energy building energy supply (hereinafter – LEBES), an algorithm of the integrated assessment model for low-energy building energy supply system, applied in the process of this study is provided (Fig. S1). The compiled model allows performing a comprehensive analysis of building energy demand and technologies of energy supply system as well as recognising an efficient solution in terms of the selected assessment criteria (i.e. energy efficiency, environmental impact, economy, comfort and functionality). The integrated assessment model for LEBES consists of the following stages:

1. Determining the passive and active efficiency measures of energy consumption and combinations thereof.
2. Compiling the balances of low-energy building variants using the DesignBuilder modelling tool.
3. Modelling technology combinations of energy supply of low-energy building variants using the Polysun simulation tool.
4. Determining the energy efficiency of energy supply systems of low-energy buildings, using systemic analysis.
5. Defining multi-criteria assessment criteria and indicators determining it.
6. Compiling a coupling matrix of energy demand of a low-energy building and distribution of energy flows in the energy supply system. Generating and processing values of the indicators using MatLab and MS Excel software.
7. Determining significances of multi-criteria assessment criteria following the results of a subjective expert assessment and applying the pair comparison method AHP.
8. Selecting and applying a method of multi-criteria decision making.

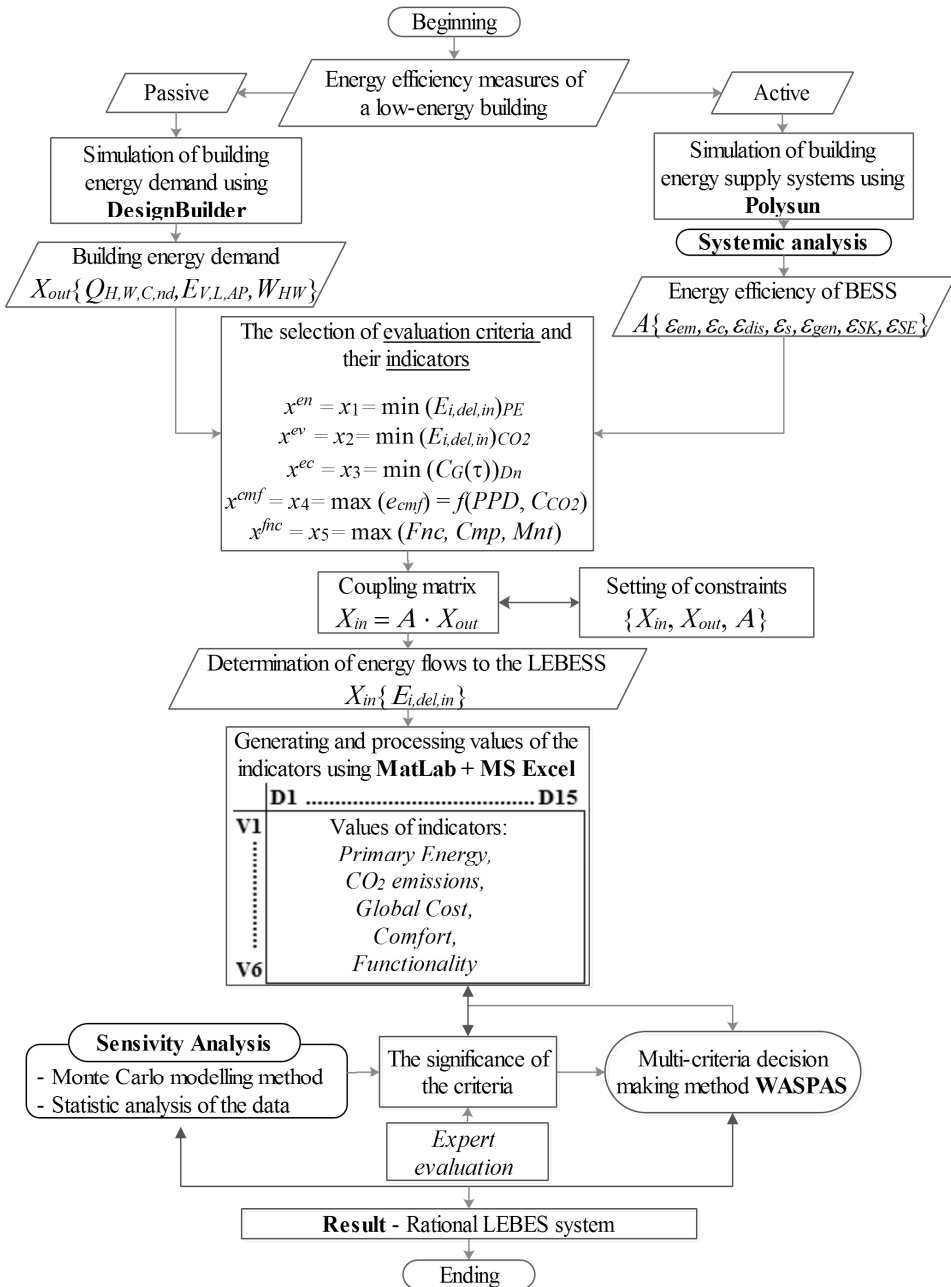


Fig. S1. An algorithm of the integrated assessment model for LEBES

9. Compiling a matrix of decision making based on the selected method for multi-criteria decision making.
10. Determining the result, i.e. an efficient LEBES in terms of energy efficiency, environmental impact, economic efficiency, comfort and functionality.
11. Determining the sensitivity of multi-criteria solution to the significance of criteria, applying significance values of criteria generated using Monte Carlo modelling method as well as statistic analysis.
12. Assessing the reliability of multi-criteria solution based on the results of statistic analysis (the most common value of the grade and the most common and the frequency of repetition of the most common grade value).

In this study a single family residential building is selected as a low-energy case study. It has been decided to adopt architectural (form and room arrangement) and constructional solutions of an actual house, the implementation of which led to achieving energy performance class A (STR 2.01.09:2012). To perform the analysis of the energy properties of this building, possible passive (thermal insulation, low heat transfer and solar heat gain coefficients of windows, air tightness, passive sun protection measures) and active (high efficiency ventilation system, integration of RER technologies) efficiency measures of energy consumption are foreseen.

The building has one floor, the total heated area is 160.24 m², and the volume is 480.72 m³. The main facade is oriented to the north-east. Three main zones are distinguished in the building: a living-dining room, kitchen and bedrooms with auxiliary premises. The window-to-wall ratio is 16 %; the largest glazed facade 17.5 m² in area is situated in the south facade. The structural system of the house is a residual formworks system constructed from polystyrene foam blocks filled with concrete mixture.

The heat transfer coefficients of the variants (V1 to V6) of low-energy building constructions as well as other main indicators are selected. Varying heat transfer coefficients of elements of building envelope and solar heat gain coefficients of windows were selected as the main indicators influencing the difference between the energy demands of the six selected building variants. For each variant of the building adjustable external blinds orientated to the south for sun protection are foreseen.

In order to perform complex assessment of various possible combinations, the study is limited to the most common energy supply technologies applied in practice. 15 combinations of different energy supply technologies are foreseen for the examined low-energy building; the combinations consist of differing energy generators (transformers), volumes of accumulator capacities and equal floor heating system as well as mechanical ventilation system with thermal recuperation.

During the research two scenarios of building energy supply were selected using solar cell systems of different power:

- Solar cell system of 200 W_p power which is required to ensure the operation of the circulation pump of 45 W power in the solar collector system. This stand-alone system consists of solar cell modules, battery charger, accumulator, inverter, and input panel. In this case, the operation of circulation pump in the solar collector system coincides with the electricity produced by the solar cell system.

- Solar cell system of 4.5 kW_p power, when a consumer who has built a solar plant for his or her own demand pays for electricity from national electricity networks at the end of the year. It is assumed that if the electricity amount consumed in a year equals to the amount produced, no money is paid for the electricity; if the amount consumed exceeds the amount produced, relevant sum has to be paid and if the amount produced exceeds the amount consumed, the surplus is bought for the market price.

Table S1 only provides different technologies of generating and transforming sub-systems that form different energy supply systems of a low-energy single family house.

Table S1. Technologies of energy supply system of low-energy single family housing

Fuel	Notation	BESS technologies
Firewood	D1	Biofuel (firewood) boiler
	D2	Biofuel (firewood) boiler and solar collectors
	D3	Biofuel (firewood) boiler, solar collectors and solar cells
Pellet	D4	Pellet boiler
	D5	Pellet boiler and solar collectors
	D6	Pellet boiler, solar collectors and solar cells
Natural gas	D7	Condensing gas boiler
	D8	Condensing gas boiler, solar collectors
	D9	Condensing gas boiler, solar collectors and solar cells
Electricity	D10	Air-water heat pump
	D11	Air-water heat pump, solar collectors
	D12	Air-water heat pump, solar collectors and solar cells
	D13	Ground-water heat pump
	D14	Ground-water heat pump, solar collectors
	D15	Ground-water heat pump, solar collectors and solar cells

Using the PolySun modelling tool, models of these formulated energy supply systems for each variant of the building are compiled.

3. The application of the integrated assessment model of the energy supply of a low-energy building

In order to test the applicability of the integrated assessment model of the energy supply system for a low-energy building, in this chapter the assessment of six variants of the energy demand for a low-energy single family building and combinations of BESS technologies intended to ensure this energy demand is performed.

When compiling the energy balance of a low-energy single family house, the energy demand for heating, ventilation, domestic hot water, lighting, and domestic electrical

appliances was assessed. The results of energy modelling for the building using the DesignBuild modelling tool are presented in Figure S2.

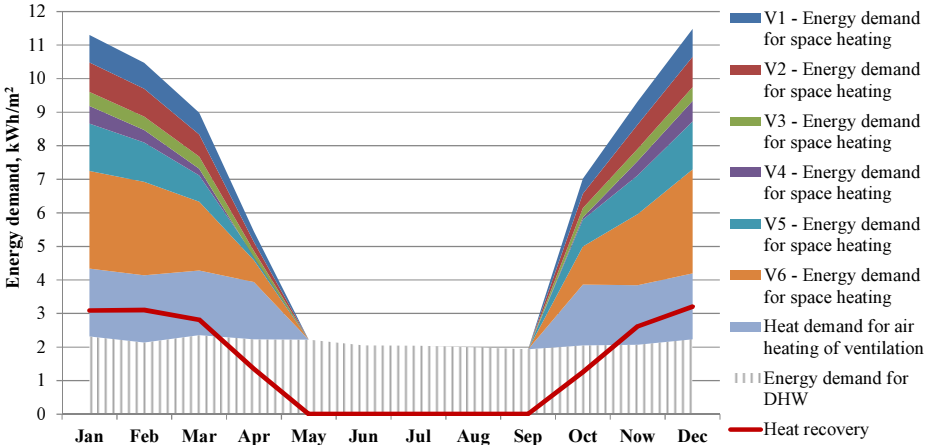


Fig. S2. The energy demand of the low energy house for space heating, ventilation and domestic hot water

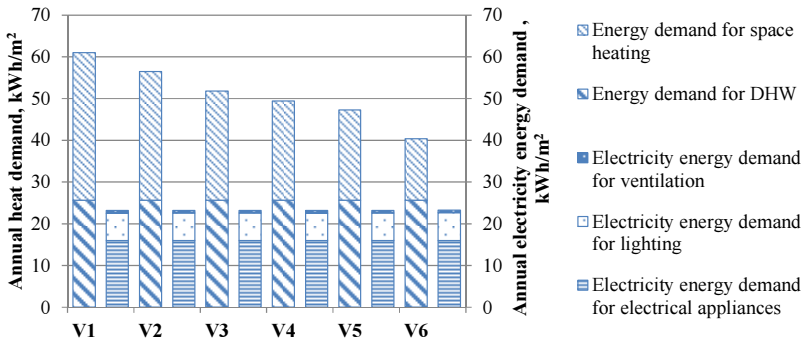


Fig. S3. The energy balance of the low energy house

The energy demand for domestic hot water preparation (25.6 kWh/m²) and ventilation (13.2 kWh/m²) is the same for all selected variants of the building. In the case of the V1 variant the resulting energy demand for space heating is the highest (35.5 kWh/m²) and could be reduced to 14.7 kWh/m² if the properties of the building envelope coincided with those in the V6 variant.

The electricity demand for heating, ventilation, domestic hot water, lighting and domestic electrical appliances were assessed in this study (Figure S3). The electricity demand for BESS circulatory pumps is assessed separately due to varying electricity expenditure resulting from each BESS technology combination.

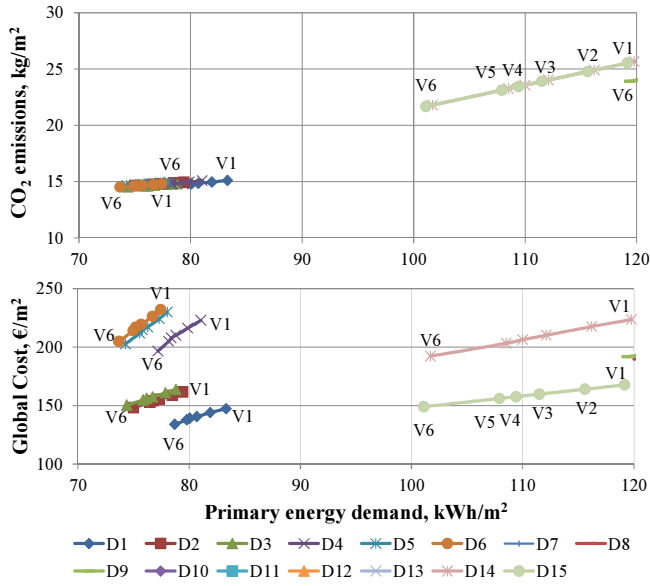


Fig. S4. Rational BESS with regard to CO₂ emissions and global cost in 1st scenario

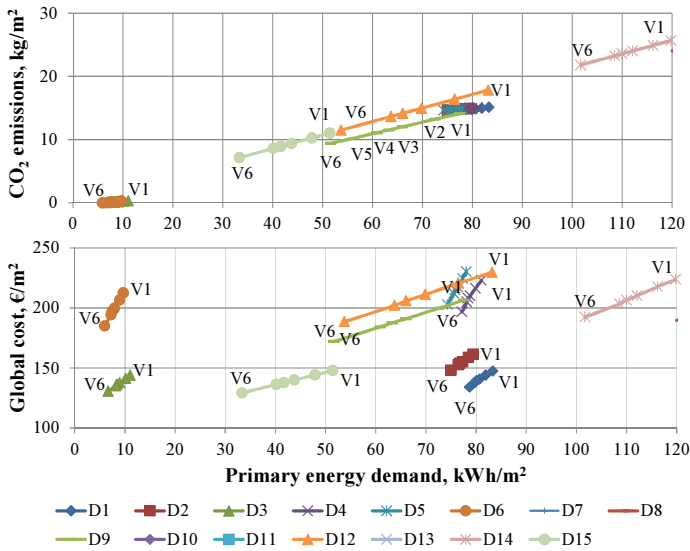


Fig. S5. Rational BESS with regard to CO₂ emissions and global cost in 2nd scenario

To summarise the results of the search for a rational BESS technology combination when systems are assessed separately in terms of each criteria, it is evident that in the case of the first scenario (Figure S4) the D6 combination is a rational solution in terms of energy and ecology. However, if economic rationality is aimed at, D1 or D7 combination should be selected if the most functional system is desired.

In the case of the second scenario (Figure S5) the D6 combination remains a rational solution in terms of energy and ecology. In terms of general costs, the D3 combination becomes rational for building variants V1 to V5. However, the assessment results have shown that the general cost indicator values for the D3 combination are only 2 % higher on average than the values of the D15 combination. The D15 combination becomes rational in the case of V6 building variant, when the energy demand for a building is the lowest. If the amount of electricity produced by the solar cell system was increased, the D15 combination would be a rational solution in terms of general costs for the selected building variants.

The derived results of combination assessment show that discrepancy between the rationality indicators (primary energy, CO₂ emissions, global cost, comfort, functionality) in each combination complicates the final solution. Thus, the assessment of BESS technology combinations is performed applying the multi-criteria decision making method WASPAS. The derived results are presented in Figure S6.

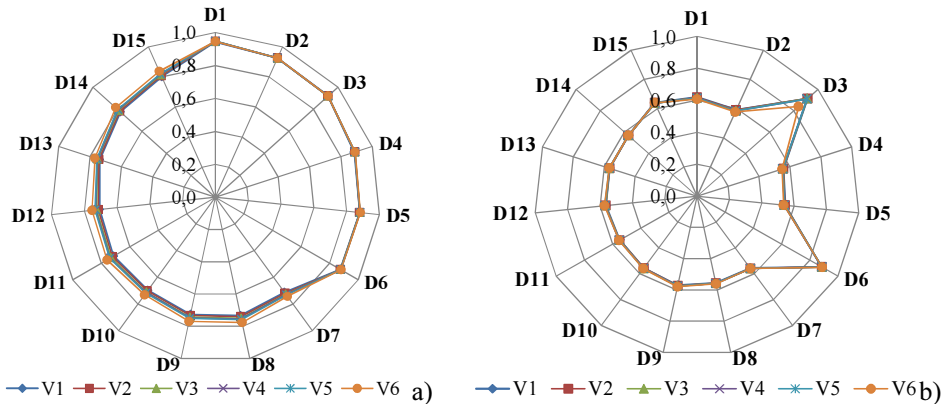


Fig. S6. Rational BES system: a) in case of the 1st scenario is D1, b) in case of the 2nd scenario is D3

Figure S6.a shows that in the first scenario the rational combination for all variants of the building is the D1 combination, when the main generator of heat is a biofuel (firewood) boiler and the electricity is supplied by national electricity networks. The comparison of different variants of the building has shown that the highest combination rationality value is achieved in the case of the V4 building variant (Table S2).

Results presented in Table S2 show that the additional insulation of building constructions, when U_{walls} is increased by 67 %, U_{roof} – by 54 %, $U_{groundfloor}$ – by 60 % and the $U_{windows}$ is decreased by 46 %, determines only a 5.5 % decrease of the primary ener-

gy, a 2.4 % decrease of CO₂ gas emissions and a 9 % decrease of total costs, when compared to the results of the V1 variant. These results show that the selection of a rational BESS technology combination has the biggest influence over the energy performance of a building.

Table S2. The efficiency values of the indicators of the system D1

Variants	Primary energy demand, kWh _{PE} /m ²	CO ₂ emissions, kgCO ₂ /m ²	Global Cost, €/m ²	Comfort, %	Functionality, %	Rational combination	Values of rationality
V1	83.3	15.1	147.2	85.5	67.1	D1	0.94386
V2	81.9	15.0	143.9	85.9	67.1	D1	0.94635
V3	80.7	14.8	140.6	86.0	67.1	D1	0.94704
V4	80.1	14.8	139.1	86.6	67.1	D1	0.94733
V5	79.8	14.8	137.7	86.0	67.1	D1	0.94727
V6	78.7	14.7	133.9	86.3	67.1	D1	0.94614

In the case of the second scenario (Figure S6.b) the rational combination for building variants V1 to V5 is D3, where the main generator of heat is a biofuel (firewood) boiler with integrates solar energy technologies. However, for the building variant V6 the rational combination is D6, where the main generator of heat is a pellet boiler with integrated solar energy technologies. The comparison of different variants of the building has shown that the highest rationality value of the D3 combination is achieved in the case of V2 building variant (Table S3).

Table S3. The efficiency values of the indicators of the systems D3 and D6

Variants	Primary energy demand, kWh _{PE} /m ²	CO ₂ emissions, kgCO ₂ /m ²	Global Cost, €/m ²	Comfort, %	Functionality, %	Rational combination	Values of rationality
V1	11.1	0.29	143.9	85.5	60.3	D3	0.9130
V2	10.1	0.24	141.1	85.9	60.3	D3	0.9140
V3	9.0	0.15	137.6	86.0	60.3	D3	0.9130
V4	8.4	0.10	136.4	86.6	60.3	D3	0.9095
V5	8.1	0.10	135.1	86.0	60.3	D3	0.9098
V6	5.9	0.01	185.1	86.3	62.9	D6	0.8897

The results provided in Tables S2 and S3 show that in the case of the first scenario when the rational combination D1 and the building variant V4 are selected, the requirements for low-energy and passive buildings may be satisfied. In the case of the second scenario when the rational combination D3 and the building variant V2 are selected the requirements for nearly-zero energy buildings may be satisfied.

In order to make a multi-criteria decision, the subjective significance values of criteria are used. To determine the reliability of the derived rational solution, a sensitivity analysis in terms of the significance of criteria is performed. The sensitivity analysis has been performed for the first scenario. After performing a pair comparison analysis of the results of significance values of five criteria provided by 28 experts, it has been determined that significance values for each criterion distribute according to the normal distribution. Using the Monte Carlo modelling in the MS Excel environment 662 significance values of criteria, distributed according to the normal distribution law, are generated in the [0.05; 0.5] interval. Results of systemic analysis of the significance values of criteria show that the average spread of values around the mean is low (the standard deviation is 0.060 to 0.063). It is assumed that the variation in significant values of random criteria used for deciding on the final solution is sufficient for testing the reliability of BESS technology combinations.

Table S4 presents the results of a statistic analysis of the rationality of building energy supply technology combinations for building variants V1, V2, V3, V4, V5, and V6.

Table S4. The results of rationality of combinations of technology for building variants V1 to V6

Variants	Rational combination	The most critical criteria	Exceptions
V1	D1 (99.2 %)	x_3	D4 ($x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3, x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3, x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$); D2 ($x_2 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_3, x_4 \succ x_1 \succ x_2 \succ x_5 \succ x_3$)
V2	D1 (99.5 %)		D4 ($x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3, x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3, x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$)
V3	D1 (99.5 %)		
V4	D1 (99.7 %)		D4 ($x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3, x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3$)
V5	D1 (99.7 %)		
V6	D1 (99.5 %)		

For combinations of each variant the most common values of ranks in combinations and their frequencies are indicated which show the final solution and its reliability. In the case of the V1 variant, a rational technology combination for building energy supply system is D1 with a reliability of 99.2 %. The analysis of the results of the V1 variant have shown that other rational solutions are possible in the sample of 662 random values, when significances of criteria distribute in the following order of priority:

- $x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3, x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_3, x_4 \succ x_1 \succ x_5 \succ x_2 \succ x_3, ,$ i.e. the economic criteria loses its significance [0.016; 0.038], whereas the functionality of a combination [0.225; 0.293], energy efficiency [0.187; 0.328] and the ensured comfort [0.151; 0.289] gain significance – the D4 combination becomes a rational solution;
- $x_2 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_3, x_4 \succ x_1 \succ x_2 \succ x_5 \succ x_3,$ i.e. the economic criteria loses its significance [0.039; 0.076], whereas the environmental impact of the combina-

tion [0.199; 0.331] and the ensured comfort [0.198; 0.326] gain significance – the D2 combination becomes a rational solution.

The results show that an efficient combination for the selected variants of the building is D1. This final result is stable, dominates all other selected combination in terms of each variant, when the standard deviation of values of criteria significance is about 0.060. A statistic analysis of the results has shown that the most critical criterion that influences the distribution of values of rationality of combinations is economic rationality (x_3). The rank of combinations varies when the variation in the value of the economic criteria is higher than 61 %.

When analysing the results of statistical analysis of the building variants it becomes evident that the building variant V4 slightly dominates when compared to other selected building variants ($V4 > V5 > V3 > V2 > V6 > V1$) with a reliability of 73 %. These results show that it is not necessary to achieve exceptionally high requirements for the building envelop, but it is crucial to foresee a rational combination of BESS technology in order to achieve efficient energy consumption in a building.

General conclusions

1. The overview of performed scientific studies has shown that rapid technical development of modern integrated renewable energy technology and increase of efficiency in building energy consumption leads to simultaneous application of simulation tools and optimisation methods, additionally reducing the building energy demand by 20 % to 30 %.
2. The integrated assessment model for building energy supply system compiled and applied in this work, which allowed determining the efficient energy supply system in the case of efficient building energy demand out of six variants of building energy demand and 15 systems of BESS ensuring the latter in terms of energy, environmental impact, economic, comfort and technical functionality.
3. The results of the study show that the selection of a rational BESS technology combination has the biggest influence over the energy performance of a building, because the additional insulation of building constructions when the heat transfer coefficient of walls is increased by 67 %, roof – by 54 %, ground floor – by 60 % and the heat transfer coefficient of windows is decreased by 46 % determines only a 5.5 % decrease of the primary energy and a 2.4 % decrease of CO₂ gas emissions and 9 % of total costs.
4. Applying the compiled model has allowed to determine that in Lithuania and countries with similar climate zones the efficient solution, after implementing all the necessary requirements, is:
 - 4.1. For low-energy, passive single family houses:
 - the heat transfer coefficients of building envelopes: walls – 0.11 W/m²K, roof – 0.09 W/m²K, floor – 0.12 W/m²K, windows – 0.80 W/m²K;

- the system of energy supply for a building is a biofuel (firewood) boiler; the electricity is supplied from the national electricity networks. The highest value of efficiency for this variant is gained when the primary energy demand is $80 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2$, the amount of CO_2 gas emission is $14.8 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, and the share of renewable resources is 58 %;
- 4.2. For nearly-zero energy single family houses:
- the heat transfer coefficients of building envelopes: walls – $0.15 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, roof – $0.13 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, floor – $0.15 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, windows – $0.80 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;
 - the system of energy supply for a building is a biofuel (firewood) boiler, a solar collector system 7.2 m^2 in area; the electricity is supplied from the national electricity networks as well as a solar cell system of 4.5 kW_p power. The highest value of efficiency for this variant is gained when the primary energy demand is $10.1 \text{ kWh}_{PE}/\text{m}^2$, the amount of CO_2 gas emission is $0.24 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, and the share of renewable resources is 97.4 %;
5. When the multi-criteria decision making method is applied, the reliability of an efficient solution amounts to 99.5 % when significance values for each criterion distribute according to the normal distribution.
6. The sensitivity analysis of an efficient BESS technology combination in terms of criteria sensitivity has shown that economic criterion has the most influence over the distribution of values of combination efficiency. The rank of combinations rank varies when the variation in the value of the economic criteria is higher than 61 %.

Priedai*

A priedas. Mažaenergio pastato energinis naudingumas

B priedas. Pastato mikroklimato sistemų užtikrinamo šiluminio komforto parametrai nuo V1 iki V6

C priedas. Pastato aprūpinimo energija sistemos D1 energinio efektyvumo vertinimas

D priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Rasa DŽIUGAITĖ-TUMĖNIENĖ
MAŽAENERGIO VIENBUČIO NAMO
APRŪPINIMO ENERGIJA INTEGRUOTAS VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (02T)

INTEGRATED ASSESSMENT OF ENERGY SUPPLY
OF A LOW-ENERGY HOUSE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2015 05 18. 14,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius