

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rūta MIKUČIONIENĖ

PASTATO ENERGINIŲ SAVYBIŲ DARNAUS VALDYMO MODELIS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ENERGETIKA IR TERMOINŽINERIJA (06T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2014

Disertacija rengta 2009–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2273-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-716-1

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014

© Rūta Mikučionienė, 2014

ruta.mikucioniene@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rūta MIKUČIONIENĖ

MODEL OF SUSTAINABLE MANAGEMENT OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE CHARACTERISTICS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENERGETICS AND POWER ENGINEERING (06T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2014.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering – 06T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama pastatų esamos būklės įvertinimo metodai, energijos taupymo priemonių darnaus vertinimo kriterijai, sprendimų priėmimo ir nuolatinio pastato valdymo įrankiai. Pagrindinis disertacijos tikslas – parengti pastato energinių savybių valdymui skirtos nuolat veikiančios ekspertinės sistemos algoritmą, kuriuo darniai įvertinamos pastato atnaujinimo ir efektyvesnio energetinių išteklių vartojimo galimybės. Šia ekspertine sistema galės naudotis pastatų priežiūros planuotojai, valdytojai ir modernizavimo galimybių vertintojai, rengiant pastatų modernizavimo planus, siekiant efektyvesnio ir kokybiškesnio pastatų energijos poreikių valdymo darnumo koncepcijos principu.

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

Pirmajame disertacijos skyriuje nagrinėjami mokslininkų naudojami pastatų vertinimo pagal energijos sąnaudas metodai, taip pat energijos balanso lygtys, skirtos pastatų analizei. Be to, apžvelgiami pastatų modernizavimo vertinimo kriterijai, sprendimų priėmimo metodai, nuolatinio pastato stebėjimo ir analizės principai. Tiek inžinieriai praktikai, tiek mokslininkai tiria, kaip, tiekiant pastatui kuo mažiau energijos, suteikti kokybiškas energetines paslaugas. Atliekami tyrimai, studijos, kuriamos metodikos šiam klausimui spręsti. Šiame skyriuje pateikiama atliktų tyrimų ir sukurtų metodų apžvalga, kurios pagrindu kuriamas pastato energinių savybių valdymo modelis.

Antrajame disertacijos skyriuje pateikiamas sukurtas pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis ir jo veikimo algoritmas. Šis modelis skirtas nuolatiniam pastato valdymui ir stebėsenai bei atnaujinimo galimybių planavimui.

Trečiajame disertacijos skyriuje pateikti rezultatai, gauti atlikus dviejų pastatų modelio veikimo analizę, siekiant patikrinti antrajame skyriuje pateikto pastato energinių savybių darnaus valdymo modelį, jo poveikį pastato valdymo eigai.

Disertacijos tema paskelbta 10 straipsnių: du recenzuojamame periodiniame žurnale, vienas recenzuojamame užsienio periodiniame leidinyje (ISI web of science duomenų bazėje), vienas recenzuojamoje elektroninėje tarptautinėje konferencijoje užsienyje, trys – recenzuojamose tarptautinės konferencijos medžiagoje, trys – recenzuojamose respublikinių konferencijų medžiagoje.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 7 konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

In the dissertation the methods for evaluation of initial state of building, renovation measures applied in practice and scientific research are analyzed. Also multi-criteria methods and application of continual improvement for building sector are analyzed. Aim of the work – to create the algorithm of expert system for management of building energy performance characteristics which sustainably evaluate the potential of building renovation and more effective energy consumption. The results can be used for building maintenance planners, managers and modernization of buildings assessors for preparation of modernization plans for more efficient and better quality of building energy management in concept of sustainability principles.

The dissertation consists of the introduction of the dissertation, 3 chapters, general conclusions, references, authors published works on the topic of dissertation and addenda.

In the first chapter of dissertation the methods for evaluation of building energy consumption and heat balance equations applied in practice and scientific research are analyzed. The criteria of evaluation of energy efficiency measures are reviewed together with decision making methods and principles of continual supervision of building and analysis. The engineers practitioners as well as scientists raise a question how to get qualitative energetics services by supplying less energy. Research, studies are performed; methodologies are created to answer this question. In this chapter research and methods are described which where basis for creation of model of sustainable management of building energy performance characteristics.

The model of sustainable management of building energy performance characteristics, which was created, is presented in the second chapter. This model is designed for continual management and supervision of building and for planning the possibility of building retrofit.

In the third chapter the analysis of case study for two real buildings is performed. The aim of case study is to examine usage of the model described in second chapter and the application of model in the management of the building.

10 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: two articles in the journal indexed by index Copernicus, one article in ISI Web of Science data base, one article in material reviewed during international electronical conference, three articles during international conference and three during the national conferences.

The results of dissertation have been presented in 7 conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Santrumpos

BDK – bendrasis darnumo kriterijus;
CO₂ – anglies dioksidas;
DKSP – daugiakriteris sprendimų priėmimas;
DV – darnus vystymasis;
ETP – energijos taupymo priemonė;
GCA – gyvavimo ciklo analizė;
GDV – grynoji dabartinė vertė;
PAVS – pastatų automatizuotojo valdymo sistema;
PESDVM – pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis;
PSM – paskirstymo sprendimų medis;
VGN – vidinė gražos norma.

Turiny

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. PASTATŲ IR JŲ MODERNIZAVIMO PRIEMONIŲ VERTINIMO, NUOLATINIO STEBĖJIMO METODŲ APŽVALGA	 7
1.1. Pastato energijos sąnaudų vertinimo metodų apžvalga	8
1.2. Faktinių energijos suvartojimų analizės metodai	11
1.3. Energijos suvartojimą lemiantys veiksniai ir suvartojimo išskaidymo metodai	12
1.4. Žmogaus elgesio įtaka pastato energijos suvartojimui	16
1.5. Sprendimų priėmimo ir nuolatinio tobulinimo metodų apžvalga	17

1.5.1. Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai.....	18
1.5.2. Sprendimų medžio metodas.....	19
1.5.3. Nuolat atnaujinamų sprendimų modeliai.....	20
1.6. Sprendimų priėmimo ir nuolatinio tobulinimo metodų apžvalga.....	22
1.6.1. Kriterijai energijos taupymo priemonėms įvertinti.....	22
1.6.2. Pastatų atnaujinimo darnumo kriterijai.....	24
1.7. Komforto sąvoka ir vertinimo metodai	25
1.8. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	27
 2. PASTATO ENERGINIŲ SAVYBIŲ DARNAUS VALDYMO MODELIS	29
2.1. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio koncepcija.....	29
2.2. Energijos balanso lygties sudarymas	31
2.3. Darnumo kriterijų medis	35
2.3.1. Darnaus vertinimo kriterijai.....	36
2.3.2. Darnumo kriterijų medis.....	40
2.4. Žmonių elgesio įtakos pastato energijos suvartojimui įvertinimo metodas.....	42
2.5. Sprendimų medis priemonių optimaliems paketams formuoti	43
2.6. Paskirstymo sprendimų medžio paketų formavimui bandymas	44
2.7. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio algoritmas	48
2.8. Antrojo skyriaus išvados	50
 3. PASTATO ENERGINIŲ SAVYBIŲ DARNAUS VALDYMO MODELIO TAIKYMO REZULTATŲ ANALIZĖ	51
3.1. Objektų modelio taikymui parinkimas	51
3.1.1. Pastato A pirminių duomenų suvestinė	52
3.1.2. Pastato B pirminių duomenų suvestinė.....	54
3.2. Energijos taupymo priemonių įvertinimas	56
3.2.1. Prielaidos naudojamos energijos taupymo priemonėms įvertinti	56
3.2.2. Energijos taupymo priemonių charakteristikos	58
3.3. Darnumo kriterijų svorių analizė.....	62
3.4. Energijos taupymo priemonių paketų analizė.....	63
3.5. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio nuolatinio veikimo atvejo analizė.....	68
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	70
 BENDROSIOS IŠVADOS	73
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	75
 AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	83

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Importance of work	2
Object of the research	2
Aim the work.....	3
Tasks of the work	3
Research methodology.....	4
Scientific novelty	4
Practical value of the achieved results.....	4
Defended propositions.....	5
Approval of the results	5
Dissertation structure.....	6
 1. REVIEW OF EVALUATION METHODS OF BUILDINGS AND RETROFIT MEASURES AND OF METHODS FOR CONTINUAL MONITORING	 7
1.1. Review of evaluation methods of energy consumption in building	8
1.2. Methods of actual energy consumption analysis	11
1.3. Factors influencing the energy consumption and methods of segmentation of consumption	11
1.4. Influence of human behaviour for energy consumption	16

1.5. Review of decision making methods of methods for continual improvement ..	17
1.5.1. Multicriteria decision making methods	18
1.5.2. Decision tree method	19
1.5.3. Models for continually updating decisions	20
1.6. Review of methods for decision making and continual improvements	22
1.6.1. Criteria for evaluation of energy efficiency measures	22
1.6.2. Sustainability criteria for building renovation	24
1.7. Notion of comfort term and evaluation methods	25
1.8. Chapter 1 conclusions and formulation of tasks of dissertation	27
 2. MODEL OF SUSTAINABLE MANAGEMENT OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE CHARACTERISTICS	 29
2.1. The concept of model of sustainable management of building energy performance characteristics	 29
2.2. Creation of energy balance equation	31
2.3. Sustainability criteria tree	35
2.3.1. Criteria of sustainability evaluation	36
2.3.2. Sustainability criteria tree	40
2.4. Method for evaluation of human behaviour influence to energy consumption ..	42
2.5. Decision tree for formation of optimal packets of measures	43
2.6. Trial of distribution decision tree for packets formation	44
2.7. The algorithm of model of sustainable management of building energy performance characteristics	 48
2.8. Chapter 2 conclusions	50
 3. ANALYSIS OF RESULTS OF IMPLEMENTATION OF MODEL OF SUSTAINABLE MANAGEMENT OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE CHARACTERISTICS	 51
3.1. Selection of objects for case study	51
3.1.1. Initial data of building A	52
3.1.2. Initial data of building B	54
3.2. Evaluation of energy efficiency measures	56
3.2.1. Assumptions of evaluation of energy efficiency measures	56
3.2.2. Characteristics of energy efficiency measures	58
3.3. Analysis of weights of sustainability criteria	62
3.4. Analysis of formed measures packets	63
3.5. Analysis of continual operation of model	68
3.6. Chapter 3 conclusions	70
 GENERAL CONCLUSIONS	 73
 REFERENCES	 75
 AUTHORS PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	 83

Įvadas

Problemos formulavimas

Šiuolaikinis ir modernus (*State of the art*) pastatų ir jų atnaujinimo priemonių vertinimas jau suprantamas kaip nuolatinis procesas, o ne vienkartinis veiksmas. Nuolat atnaujinamų sprendimų priėmimo įrankių jau yra sukurta, bet jie dažniausiai remiasi tik ekonominiu vertinimo kriterijumi. Vis dėlto plinta supratimas apie pastatų atnaujinimo visapusę (ne tik ekonominę) naudą, bet stokojama bendresnės nuomonės, kokiais kriterijais remiantis tai turėtų būti vertinama. Dauguma mokslininkų sutaria, kad pastatų vertinimas turi būti atliekamas remiantis ne vienu kriterijumi, apimančiu įvairias su pastatu susijusias sritis: geresnes sąlygas patalpose, poveikio aplinkai mažinimą, pastato būklės pasikeitimą per jo gyvavimo ciklą. Darnaus vystymosi koncepcija dažnai minima, bet ją apibūdinančių kriterijų pastatams vertinti paieška tęsiasi tiek praktikoje, tiek moksle.

Šiame darbe nagrinėjami pastatų esamos būklės įvertinimo metodai, energijos taupymo priemonių darnaus vertinimo kriterijai, sprendimų priėmimo ir nuolatinio pastato valdymo įrankiai.

Darbo aktualumas

Naujos statybos pastatai Europoje sudaro tik mažą dalį visų pastatų. Esami pastatai yra pagrindinis energijos vartotojas pastatų sektoriuje, kurie sudaro apie 99% viso pastatų sektoriaus.

Griežtėjant ES reikalavimams naujai statomiems pastatams didėja atotrūkis tarp energijos sąnaudų esamuose ir naujai statomuose pastatuose. Esamų pastatų nuolatinis valdymas (priežiūra), jų energinio efektyvumo gerinimas darosi vis svarbesnis griežtėjant ES reikalavimams ir tobulėjant technologijoms.

Taigi, didėja komforto sąlygų gerinimo, informavimo apie energijos sąnaudas, jų sumažinimo priemonių paklausa. Kita vertus technologinių galimybių atsiradimas (PAVS sistemos, modeliavimo ir sprendimų priėmimo įrankiai, ekspertinės sistemos) sudaro sąlygas ir poreikį nuolatiniam esamų pastatų energinių savybių valdymui. Kompiuterinėmis modeliavimo priemonėmis vis dažniau pastatai modeliuojami mažesniai energijos poreikiui pasiekti projektavimo metu, bet modeliavimo įrankiai jau naudojamo pastato energijos sąnaudų sumažinimo galimybėms įvertinti naudojami retai (Ignacio Torrens *et al.* 2011).

Nuolatinio energijos sąnaudų stebėjimo problemą dažniausiai sprendžia elektronikos ir automatikos srities mokslininkai. Jų atliekamos studijos nagrinėja valdiklių ir jutiklių veikimo patikimumą (Marinakis *et al.* 2012), klaidų šalinimą (Costa *et al.* 2011), duomenų apdorojimo ir saugojimo problemas (Ahmed *et al.* 2010). Šiose studijose energijos vartojimo efektyvumas dažniausiai suprantamas, kaip galimai sklandžiau veikiančios energetinės sistemos, bet neaptiriamos jų pačių tobulinimo galimybės.

Taip pat kuriami nuolatinio valdymo įrankiai naudojami ir pastatų atnaujinimo galimybėms įvertinti, tačiau pasirenkami vieną ar tik kelias sritis įvertinantys kriterijai (Alanne 2004, Doukas *et al.* 2009). Darnaus vystymosi koncepcija vis plačiau apima visas gyvenimo sritis ir turėtų būti taikoma pastatams vertinti juos atnaujinant, valdant, prižiūrint. Taigi ir šiuolaikinis pastato energijos poreikių valdymas turėtų būti organizuojamas remiantis ne tik ekonomine, bet ir socialine bei aplinkosaugine nauda, t. y. vertinant darnaus vystymosi koncepcijos principu.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – viešosios paskirties pastato energinės savybės, jų (savybių) pokyčių įtaka pastato nuolatiniam valdymui, pasikeitusių charakteristikų darnaus vertinimo kriterijai. Pastato energinių savybių nuolatinis

valdymas čia suprantamas, kaip faktinės informacijos apie pastato būklę pagrindu formuojami sprendiniai veiksmingai prevencinei jo priežiūrai.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – parengti pastato energinių savybių valdymui skirtos nuolat veikiančios ekspertinės sistemos algoritmą, kuriuo darniai įvertinamos pastato atnaujinimo ir efektyvesnio energetinių išteklių vartojimo galimybės.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti pasirinkta spręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti esamas energinių auditų, pastatų vertinimo, monitoringo ir energijos sąnaudų analizės metodikas. Išanalizuoti pastato energijos poreikius, jų priklausomybę nuo įvairių veiksnių, naudojamus energijos sąnaudų balansavimo algoritmus.
2. Sudaryti nuolatiniam pastato valdymui parankią balanso lygtį pastato energinėms savybėms nagrinėti.
3. Išanalizuoti pastatų energinį efektyvumą skatinančių priemonių vertinimo metodus. Apžvelgti mokslininkų naudojamus kriterijus energijos taupymo priemonėms vertinti, kriterijų sąsają su darnaus vystymosi koncepcijos komponentais. Sudaryti darnaus vertinimo kriterijų su juos išreiškiančiais atributais rinkinį energijos taupymo priemonėms įvertinti.
4. Sukurti darnaus vertinimo daugiakriterį metodą energinio efektyvumo didinimo priemonėms pastate vertinti, šioms priemonėms grupuoti į paketus.
5. Parengti pastato energinių savybių valdymo modelio algoritmą, kuriame būtų analizuojamos pastato energinės savybės, siūlomos diegti energijos taupymo priemonės, o jų įtaka pastatui ir aplinkai įvertinta darnumo kriterijais.

Tyrimų metodika

Pastato faktinės energijos sąnaudos analizuojamos perskaičiavus jas į savitąsias sąnaudas ir iš jų sudarant balanso lygtį. Balanso lygtis sudaroma “bottom-up” (iš apačios) metodu pradedant nuo galutinio vartotojo, kai lygybės tikslas yra užtikrinti komfortines sąlygas pastate.

ETP priemonių vertinimas atliekamas daugiakriteriu vertinimu. Kriterijai normalizuojami SAW (*Simple Additive Weighting*) metodu. Nuosekli daugiakriterė ETP ir jų paketų vertinimo metodika sudaryta taikant sprendimų medžio metodą.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie termoinžinerijos ir energetikos mokslui nauji rezultatai:

1. Remiantis jau naudojamomis šilumos balanso lygtimis sudaryta balanso lygtis, skirta pastato energinių savybių darniam valdymui.
2. Sukurtas darnaus energijos taupymo priemonių vertinimo kriterijų medis bendrajam darnumo kriterijui įvertinti, kai per gyvavimo ciklo trukmę vertinama priemonių energijos taupymas, poveikis aplinkai, ekonominis racionalumas ir komfortas.
3. Sprendimų medžio metodu sukurtas algoritmas atnaujinimo priemonių paketams formuoti – atrenkamos pagrindinio ir pagalbinio paketų priemonės.
4. Nuolatiniam pastato energinių savybių stebėjimui ir jų veiksmingumui gerinti sudarytas pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbo rezultatai gali būti naudojami pastatų priežiūros planuotojų, valdytojų ir modernizavimo galimybių vertintojų rengiant pastatų modernizavimo planus, siekiant efektyvesnio ir kokybiškesnio pastatų energijos poreikių valdymo darnumo koncepcijos principu.

Ginamieji teiginiai

1. Savitųjų energijos sąnaudų analizė leidžia atsiriboti nuo klimatinės sąlygų įtakos. Nuolatiniam pastato valdymui, atskirų jo komponentų vertinimui būtina nagrinėti “bottom-up” metodu sudarytą energijos balanso lygtį, susidedančią iš tų komponentų savitųjų energijos sąnaudų.
2. Darnus ETP vertinimas turi apimti ne tik energijos taupymo, poveikio aplinkai ir ekonominę naudą, bet ir pasirinktą ar privalomą komforto lygį patalpose. Analizę pradedant “bottom-up” metodu nuo galutinio vartotojo numatomas reikalingas komforto lygis patalpose. Taip pat darnumas turi būti vertinimas pastato gyvavimo ciklo požiūriu.
3. Būtinų įgyvendinti priemonių nustatymas bei parengtas priemonių grupavimo būdas leidžia užtikrinti komfortines sąlygas pastate po renovacijos ir supaprastina sprendimų priėmimą.
4. Realų energijos ir kitų išteklių vartojimo duomenų stebėsenos ir analizės pagrindu nuolat veikianti derinių parinkimo ir sprendinių parengimo ekspertinė sistema padidina pastato priežiūros ir išteklių naudojimo darnumą, leidžia veiksmingiau naudoti pastatą, priimti savalaikius sprendimus dėl jo atnaujinimo.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra išspausdinti 10 mokslinių straipsnių: du recenzuojamame žurnale, vienas recenzuojamame užsienio žurnale (ISI web of science duomenų bazėje), vienas recenzuojamoje elektroninėje tarptautinėje konferencijoje užsienyje, trys – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose, trys – recenzuojamose respublikinių konferencijų medžiagose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 7 konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Elektroninėje tarptautinėje konferencijoje Slovakijoje „EIIC 2013“.
- Tarptautinėje mokslininkų konferencijoje „Environmental Engineering 2014“ Vilniuje.
- Tarptautinėje Doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencijoje “CYSENI“ 2010 ir 2013 m. Kaune.
- Respublikinėje mokslinėje konferencijoje „Šilumos inžinerija ir technologijos“ 2012 ir 2013 m. Kaune.
- Respublikinėje konferencijoje „Pastatų inžinerinės sistemos“ 2010 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 84 puslapiai, tekste panaudota 15 numeruotų formulių, 29 paveikslai ir 10 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 105 literatūros šaltiniai.

Pastatų ir jų modernizavimo priemonių vertinimo, nuolatinio stebėjimo metodų apžvalga

Šiame skyriuje nagrinėjami mokslininkų naudojami pastatų vertinimo pagal energijos sąnaudas metodai, energijos balanso lygtys pastatų analizei. Taip pat apžvelgiami pastatų modernizavimo vertinimo kriterijai, sprendimų priėmimo metodai, nuolatinio pastato stebėjimo ir analizės principai. Tiek inžinieriai praktikai, tiek mokslininkai nagrinėja klausimą, kaip tiekiant kuo mažiau energijos suteikti pastatui kokybiškas energetines paslaugas. Atliekami tyrimai, studijos, kuriamos metodikos šiam klausimui atsakyti. Šiame skyriuje pateikiama atliktų tyrimų ir sukurtų metodų apžvalga, kurios pagrindu kuriamas pastato energinių savybių valdymo modelis.

Skyriaus tematika paskelbtos 4 publikacijos (Mikučionienė Martinaitis 2010, Valančius Mikučionienė 2010, 2010a, Mikučionienė 2012).

1.1. Pastato energijos sąnaudų vertinimo metodų apžvalga

Pagal standartą LST EN 15603:2008 „Energetinės pastatų charakteristikos. Visuminis energijos suvartojimas ir energetinių parametų apibrėžtis“ metinis energijos suvartojimas turėtų apimti šias paslaugas: šildymą, vėsinimą ir sausinimą, vėdinimą ir drėkinimą, karšto vandens tiekimą, apšvietimą ir kitas paslaugas. Šiame standarte pateikiami du pagrindiniai pastatų vertinimo pagal energijos sąnaudas būdai – tai skaičiuojamasis ir išmatuotasis. Standarte EN 15217:2005 “Energy Performance of Buildings – Methods for Expressing Energy Performance and for Energy Certification of Buildings” jie vadinami „operational rating” (OR) – vertinimas pagal faktinį energijos suvartojimą ir “asset rating” (AR) – vertinimas pagal apskaičiuotas energijos sąnaudas. Palyginus abiejų šių metodų rezultatus skirtumas gali siekti 4 kartus (CEN 2005) jie vadinami „operational rating” (OR) – vertinimas pagal faktinį energijos suvartojimą ir “asset rating” (AR) – vertinimas pagal apskaičiuotas energijos sąnaudas. Palyginus abiejų šių metodų rezultatus skirtumas gali būti iki 4 kartų (Fokaides *et al.* 2011), dažnai rezultatai skiriasi daugiau nei 100% (Rūta Mikučionienė Martinaitis, 2010; Mørck, Thomsen, Rose, 2012). Pagrindinė šiais metodais gautų rezultatų skirtumo priežastis, pasak mokslininkų, yra žmonių elgsenos poveikis energijos suvartojimui (Hernandez *et al.* 2008, Pérez-Lombard *et al.* 2009, Fokaides *et al.* 2011). ir kiti teigia, kad tiksliausia suvartojimų analizė yra paremta faktiniais duomenimis, bet sulyginata su modeliруемaisiais eliminuojant skirtumus, nustačius jų priežastis.

Norint nustatyti skirtumus, turi būti žinomi veiksniai, turintys įtakos energijos suvartojimui. Šie veiksniai gali būti suskirstyti į 4 grupes: klimatas (išorės oro temperatūra, saulės spinduliuotė ir vėjo greitis), pastato šiluminės savybės, žmonių veikla (elektros prietaisų naudojimas, taip pat priskiriamas prie žmonių veiklos) bei pastato priežiūra ir valdymas. (Yu *et al.* 2011) šiuos veiksnius skirsto į 7 grupes, išskirdamas žmonių veiklą į žmonių buvimą, elgseną ir veiklą bei sociologinius ir ekonominius rodiklius (išsilavinimo laipsnį, energijos kainas) ir vidaus oro kokybę. (Yu *et al.* 2011) teigia, kad vidaus oro kokybė yra sąlygojama žmonių.

Standarte LST ISO 13790:2008 „Energetinės pastatų charakteristikos. Patalpoms šildyti ir aušinti sunaudojamos energijos skaičiavimas“ įvardijami trys būdai pastato energijos poreikiui įvertinti: mėnesinis arba sezoninis, paprastasis valandinis ir dinaminis modeliavimas. Mėnesinis arba sezoninis yra apskaičiuojamas fiksuotam periodui (mėnesiui arba sezonui), įvertinant šilumos nuostolius ir pritėkius. Paprastasis valandinis būdas yra supaprastintas dinaminio modeliavimo variantas. Skaičiuojant šiuo metodu, randami kiekvieną valandą reikiamos tiekti energijos srautai, galia. Taip įvertinama žmonių veiklos įtaka

energijos poreikiui ir pritėkiai. Dinaminis modeliavimas leidžia įvertinti visus kintamuosius parametrus ir jų įtaką energijos suvartojimui.

ASHRAE 100-2006 standartas, aprašantis energinių auditų procedūras, energinius auditus skirsto į tris lygius: (1) apžvalginį, (2) energijos apžvalgą ir analizę, (3) detalią analizę. Šie lygiai priklauso nuo auditui parengti skirto laiko, biudžeto, pastato sudėtingumo ir kliento lūkesčių. Šiame standarte sprendimų priėmimo procedūros nėra detalios aprašytos, tai paliekama auditoriui pasirinkti pačiam (Alajmi 2012). ASHRAE rekomendacijose (Guideline 14) pateikiami trys metodai energijos sutaupymui įvertinti: atskiros renovacijos priemonės energijos suvartojimas prieš ir po, viso pastato metodas, kai įvertinamas visas energijos poreikis prieš ir po, kalibruotas modeliavimo metodas (Heo Zavala 2012).

(Wang *et al.* 2012b) skirsto pastatų vertinimą pagal energijos sąnaudas į tris grupes: pagal faktinį suvartojimą (jau anksčiau aprašytas OR metodas), pagal apskaičiuotas energijos sąnaudas (AR) ir hibridinis būdas. Hibridinis metodas yra paremtas teoriniais sumodeliuotais skaičiavimais juos lyginant su faktiniais paklaidoms eliminuoti.

Daugumoje energijos suvartojimo įvertinimo metodikų naudojami rodikliai ir charakteristikos, kitaip tariant vienas reikšminis skaičius, kuris nusako pastato charakteristiką. Daugiausia tai visuminiai šilumos perdavimo koeficientai, dar vadinami *Overall heat transfer coefficient* (Chua Chou 2011), *index of thermal charge* (Botsaris Prebezanos 2004), *overall heat loss coefficient* (Olofsson Andersson 2001, Sjögren *et al.* 2007, Olofsson *et al.* 2009). Ši charakteristika naudojama pastato energiniam parašui apibrėžti, ji dažniausiai apskaičiuojama pagal faktinius duomenis.

Energiniu parašu vadinama kreivė, pavaizduota energijos suvartojimo ir išorės temperatūros diagramoje, kuri sudaroma iš faktinių pastato suvartojimų esant faktinėms išorės temperatūroms. Ši kreivė rodo pastato energijos suvartojimų jautrumą išorės temperatūros pokyčiui. (LST EN 15603:2008). Energinis parašas, kuris turi dvi funkcijas: gali būti prieš (pre) – energinis auditas arba informacija galutinio vartotojo susirūpinimui pažadinti (Belussi Danza 2012). Šis metodas yra naudingas pastatams su stabiliomis vidinėmis ir mažomis saulės (Belussi Danza 2012), kitais atvejais nėra tikslus ir naudojamas tik informaciniam pastato efektyvumui nustatyti (Sjögren *et al.* 2007, 2009), (LST EN 15603:2008). Taip pat energinis parašas gali būti patogi priemonė pastato monitoringui, kaip alternatyva supaprastintam auditui – galima stebėti taškus, esančius toliau nuo pradinės kreivės (Belussi Danza 2012).

JAV mokslininko Tobias Maile sukurta energinio naudingumo palyginimo metodika (Energy Performance Comparison Methodology) padeda nustatyti efektyvumo problemą, kylančią dėl išmatuotų ir sumodeliuotų duomenų skirtumo (Maile *et al.* 2012). Šios metodikos tikslas yra paruošti „atsiliepimus“

(*feedback*) pastato projektui ir eksploatavimui. Šie atsiliepimai parengiami efektyvumo problemų pagrindu ir pateikiamas tolesnis jų poveikis šiluminiam komfortui ir energijos suvartojimui. Šioje metodikoje pastato objektai yra suskirstyti pagal tokią hierarchiją: pastatas, sistema, sistemos dalis, zona, erdvė (patalpa – *space*). Šiuo metodu nustatytos problemos buvo suskirstytos į tris kategorijas: matavimų problemos, modeliavimo problemos ir naudojimo problemos.

1.1 lentelė. Pastatų vertinimo metodų palyginimas

Table 1.1. Comparison of evaluation methods for buildings

Vertinimo kriterijus	Teoriniai arba apskaičiuotieji suvartojimai (AR)	Faktiniai pagal mėnesinius suvartojimus, arba sąskaitas (OR)	Pastatų automatizuoto valdymo sistemos (PAVS) renkami faktiniai suvartojimai
Prieinamumas	Reikalinga tik informacija apie pastatą	Dažniausiai yra prieinama visiems pastatams	Ne visuose pastatuose PAVS yra įrengta. Ne visos PAVS turi duomenų panaudojimo funkciją
Tikslumas	Nėra tikslu, nes neįvertinama nei pastato, nei vartotojo elgsena	Nėra labai tikslu, reikalinga kvalifikuota analizė	Labai geras
Informacija tolesniam modeliavimui	Tolesnis modeliavimas išlieka su tais pačiais netikslumais	Yra galimybė iš mėnesinių suvartojimų sumodeliuoti valandinius.	Labai parankus įrankis modeliavimui remiantis faktiniais duomenimis
Metodika, kurioje naudojamas metodas	Energinio naudingumo sertifikavimas (šalyse pasirinkusiose AR metodą), Visuminis šilumos perdavimo koeficientas	Energinis parašas, Energinis auditas, Monitoringas, Energijos poreikių vadyba	Energinis parašas, Energinis auditas, Monitoringas, Energijos poreikių vadyba

Atlikus esamų pastatų vertinimo pagal energijos sąnaudas metodų apžvalgą, šie metodai buvo suskirstyti į tris grupes. 1.1 lentelėje pateikiamas šių metodų vertinimas trimis kriterijais: prieinamumu, tikslumu ir informacija tolesniam modeliavimui.

Matyti, kad geriausiai pagal šiuos kriterijus įvertinta antra ir trečia metodų grupė, jos grindžiamos faktinių suvartojimų analize.

Mokslininkų atliekamos studijose dažnai modeliuojami teoriniai pastato suvartojimai, neturint galimybės naudoti faktinių (Ballarini Corrado 2009, Saelens *et al.* 2011, Pang *et al.* 2012) teigia, kad mokslininkai naudoja modeliavimo metodus pastato efektyvumui nustatyti kaip tikslesnius, nepaveiktus sistemų sutrikimų. Šių dienų kompiuterinių programų galimybės leidžia net ir turint tik mėnesinį suvartojimą sumodeliuoti energijos suvartojimą pavalandžiui. Aišku toks modeliavimas skiriasi nuo faktinių tokio dažnumo duomenų (Smith *et al.* 2011).

Kadangi dauguma mokslininkų rekomenduoja esamus pastatus vertinti pagal faktinį energijos suvartojimą, nes jis atspindi realų pastato vartojimą: žmonių veiklą, mikroklimato parametrus, esamą (ar nesamą) energijos vartojimo vadybą, taip pat ir pastato energetines savybes. Taip pat dažniausiai energiniai auditai ir detalios esamų pastatų suvartojimų analizės yra rengiamos faktinių suvartojimų pagrindu.

Metodų tikslumas ir detalumas taip pat priklauso ir nuo energijos suvartojimo analizės tikslo: ar tai tik informacija savininkui (energinis parašas, visuminis pastato šilumos perdavimo koeficientas, apžvalginis energinis auditas), ar monitoringas (energinis parašas), ar diegiamų energijos efektyvumo priemonių vertinimas (detali analizė).

1.2. Faktinių energijos suvartojimų analizės metodai

Kuo išsamiau bus įvertinti esami energijos suvartojimai tuo tiksliau galima bus įvertinti diegiamų energijos efektyvumo priemonių nulemtą energijos sutaupymą. Faktinius energijos suvartojimus būtina perskaičiuoti įvertinant tiek skirtingas išorės klimato sąlygas, tiek pastato vartojimo ypatybes. Atskirų metų faktinių klimato duomenų skirtumas gali būti iki 10%. (Wang *et al.* 2012a) Vienas iš dažniausiai naudojamų metodų yra faktinių suvartojimų perskaičiavimas norminėms sąlygoms, arba dar vadinamas energijos suvartojimų normalizavimu (Čiuprinskas Martinaitis 2003, Corgnati *et al.* 2008, Sjögren *et al.* 2009, Martinaitis *et al.* 2010, Smith *et al.* 2011) ir kiti. Taip pat šis metodas nurodomas ir Išsamiojo energijos audito metodikoje, naudojamoje Lietuvoje (LR Ūkio ministerija 2008). Šis metodas naudojamas dviem būdais: perskaičiuojant energijos sąnaudas esant norminėms sąlygoms, arba padalijant

energijos sąnaudas iš faktinių dienolaipsnių, savitosioms energijos sąnaudoms gauti.

Energijos suvartojimams perskaičiuoti, kai sąlygos norminės, reikalingas tos vietovės norminis ir faktinis dienolaipsnių skaičius, kuris priklauso nuo išorės oro temperatūros ir šildymo laikotarpio (dienos, savaitės, mėnesio ar viso sezono, pagal tai, kurio laikotarpio suvartojimus analizuojame). Norminis dienolaipsnių skaičius konkrečiai vietai arba duomenys (išorės oro temperatūra, šildymo laikotarpis) šiam rodikliui apskaičiuoti pateikiami vietiniuose valstybių teisės aktuose remiantis istoriniais klimatiniais duomenų stebėjimais. Norminiai metai dar vadinami standartiniais (*Standard year*) (Corgnati *et al.* 2008), atskaitomaisiais metais (*Reference year*) (Branco *et al.* 2004, Tommerup *et al.* 2007, Androutsopoulos *et al.* 2008, Hens *et al.* 2010, Sourbron Helsen 2011, Saelens *et al.* 2011, Kalamees *et al.* 2012). Lietuvoje šiuos rodiklius aprašo RSN 156 – 94 „Statybinė klimatologija“.

Norint palyginti skirtingose vietovėse (kitų klimatinės duomenų) ir kitaip naudojamus (skirtingos vidaus patalpų temperatūros) pastatus patogesnė yra savitųjų energijos sąnaudų charakteristika, dar vadinama energijos vartojimo efektyvumo charakteristika (Martinaitis *et al.* 2010). Ji nepriklauso nuo išorės oro parametrų ir nuo šildymo trukmės.

Energijos suvartojimų normalizavimas dažniausiai naudojamas energiniame audite. Šiuo būdu patogų lyginti to paties pastato kelis šildymo sezonus, patogų naudoti ekonominiam vertinimui, nes išlieka ta pati energijos suvartojimų išraiška (energijos kiekis, suvartotas per laikotarpį).

1.3. Energijos suvartojimą lemiantys veiksniai ir suvartojimo išskaidymo metodai

Kalbant apie pastato energijos suvartojimų analizę, būtina išanalizuoti veiksnius, nuo kurių priklauso energijos suvartojimas. Taip pat šie veiksniai reikalingi analizuojant suvartojimo skirtumus. 4 pagrindinės energijos suvartojimą lemiančių veiksnių grupės yra (išdėstyta svarbos eile): klimatas (išorės oro temperatūra, drėgmė, saulės spinduliuotė, vėjo greitis), pastato šiluminės savybės, pastato inžinerinės sistemos ir jų eksploatacija, žmonių veikla. (Yu *et al.* 2011) šiuos veiksnius suskirstė į 7 grupes išskirdamas žmonių veiklą į žmonių buvimą (1), elgseną ir veiklą (2), socialinius ir ekonominius veiksnius (išsilavinimo lygis, energijos kaina ir t. t.) (3). Taip skirstant daroma prielaida, kad vidaus patalpų aplinkos kokybę nulemia patys pastato naudotojai.

Savitųjų energijos sąnaudų analizė leidžia atsiriboti nuo klimatinės sąlygų, bet analizuoti likusius veiksnius yra būtina. Du pagrindiniai metodai šildymo galiai išskaidyti yra svorio faktorių metodas ir šilumos balanso metodas (Wang

et al. 2012b). Svorio faktorių metodas dar vadinamas šilumos perdavimo metodu, kurio pagrindas yra šilumos nuostolių, suteikiant jiems svorio koeficientus, vertinimas. Šilumos balanso metodas yra daug tikslesnis, nes šilumos ir šilumos srautai nuo skirtingų energetinių sistemų gali būti įvertinti. Dėl šios priežasties naujos kartos modeliavimo programos sudaromos šilumos balanso metodu (Wang *et al.* 2012b).

Detaliam ir išsamiam auditui parengti pagal faktinius suvartojimus sudaromas šilumos balansas. Visuotinis supaprastintas pastato energijos balansas pagal Europos sąjungos standartą EN 15217:2005 “*Energy performance of buildings – Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings*”:

$$\Phi = H' (\bar{\theta}_1 - \theta_e) + \Phi_a - \eta(A_e I_{sol}) \quad (1.1)$$

čia Φ – vidutinė galia, Φ_a – apima sistemų nuostolius ir vidutinę galią kitoms nei šildymas pastato paslaugoms, H' – pastato šilumos perdavimo koeficientas, $\bar{\theta}_1$ – vidutinė patalpų temperatūra, ηA_e – saulę surenkančio paviršiaus plotas, padaugintas iš panaudojimo koeficiento, I_{sol} – saulės spinduliuotė.

Šioje balanso lygtyje nedetalizuojami sistemų nuostoliai, šilumogražos galimybės kitų nei saulės pritėkių panaudojimas.

Pagal (LR Ūkio ministerija 2008) metodiką pastato audituojamu laikotarpiu suvartojamos šilumos energijos sąnaudų balansas sudaromas pagal (2) formulę:

$$Q_f = Q_A + Q_V + Q_{k.v.} + Q_P + Q_{\text{šg}} + Q_{\text{fn}} \quad (1.2)$$

čia Q_f – pastato faktinės šilumos energijos sąnaudos, atitinkančios atsiskaitomųjų šilumos apskaitos prietaisų faktiniams parodymus audituojamu laikotarpiu, MWh; Q_A – šilumos nuostoliai per išorines pastato atitvaras, Q_V – pastato šilumos nuostoliai dėl vėdinimo ir infiltracijos, $Q_{k.v.}$ – pastato šilumos energijos sąnaudos karšto vandens paruošimui, Q_P – išoriniai ir vidiniai šilumos pritekėjimai į pastato patalpas, $Q_{\text{šg}}$ – šiluma, gaunama iš pastato šilumogražos įrenginių, Q_{fn} – pastato šilumos energijos tiekimo inžinerinių sistemų faktiniai nuostoliai.

Energijos sąnaudų balansavimas aprašomas (Martinaitis *et al.* 2010) iš principo turi tuos pačius dėmenis.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 - Q_N \quad (1.3)$$

čia Q_1 – reikalinga energija (angl. *energy demand*)– energija, kuri turėtų būti pateikta idealia statinio inžinerinių sistemų (SIS) visuma (sistemų nuostoliai nevertinami), kad galutiniam vartotojui suteikti reikiamą paslaugą. Q_2 – energijos vidaus ir išorės pritekis (angl. *gains arba gain*) – energija, patenkanti į patalpas dėl gamtinės aplinkos poveikio (tiesioginė saulės šviesa ir šiluma, pasyvi (išsklaidyta) šiluma ir vėsa, natūralaus vėdinimo šiluma/vėsa) ir vidinių šilumos šaltinių (nuo patalpų naudotojų, apšvietimo, kitų elektrą ir šilumą vartojančių prietaisų, procesų). Q_3 – pastate panaudota energija (angl. *building net energy or useful energy*) – energija, kuri tiekiamą idealiomis statinio inžinerinėmis sistemomis (sistemų nuostoliai neįvertinami), norint suteikti reikalingą šildymo, vėsinimo, vėdinimo, buitinio karšto vandens, apšvietimo paslaugą. Q_4 – įgauta energija – tai šilumogrąža ir pastato atsinaujinanti energija. Šilumogrąža (angl. *recovered loss*) – atgauti nuostoliai, sudarantys atgautiną SIS nuostolių iš šildymo, vėsinimo, vėdinimo, buitinio karšto vandens ir apšvietimo sistemų dalį, apibūdinamą nuostolių panaudos rodikliu. Pastato atsinaujinanti energija – pastato įrangoje iš atsinaujinančių energijos išteklių gauta energija. Q_5 – pateikta energija (angl. – *delivered energy*) – pastatui per jo ribą tiekiamą energija, tenkinant energijos poreikius šildymui, vėsinimui, vėdinimui, buitiniam karštam vandeniui, apšvietimui. Q_N – inžinerinių sistemų nuostoliai.

Energijos balansas pagal (Martinaitis *et al.* 2010), išskaidžius vieną pusę:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 = (t_{in} - t_{ex})z (\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j) \quad (1.4)$$

Iš šios lygties matyti, kad pastatui reikalinga energija priklauso nuo pastato charakteristikų ir išorės bei vidaus temperatūros skirtumo. Bet balanso sudarymas yra reikalingas ir tam, kad būtų galima įvertinti, kiek optimaliai ir su koku mažiausiu galimu perkamosios energijos kiekiu būtų užtikrinamos komfortinės sąlygos pastate. Šiam tikslui pasiekti reikia išplėstinio balanso.

Išplėsta ir detalizuota (4) lygtis:

$$\begin{aligned} \sum Q_{SV,f} = & (t_{in,f} - t_{ex,f})z_f (\sum A_i U_i + c\rho \sum V_j n_j) - \psi_P (Q_{P,ex} + Q_{P,in}) - \\ & - Q_{AEI} - \sum \psi_{R,k} Q_{NR,k} + \sum Q_{Nf,k} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Šioje lygtyje išskiriamas šilumogrąžos panaudojimas ($\sum \psi_{R,k} Q_{NR,k}$), atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimas (Q_{AEI}), sistemų nuostoliai (Q_N), pritekiai skaidomos į vidines ($Q_{p,ex}$) ir išorines ($Q_{p,in}$).

Kaip ir (4) lygtyje švedų mokslininkų (Sjögren *et al.* 2009) naudojama balanso lygtis (6) turi tuos pačius komponentus:

$$K_{\text{tot}}(T_i - T_e) = P_H + P_G = P_{\text{tot}} \quad (1.6)$$

čia K_{tot} – visuminis šilumos perdavimo koeficientas, W/K, P_H – šildymo sistemos galia, P_G – pritekų galia, apimanti elektros prietaisų, žmonių, saulės ir karšto vandens sistemos išskiriamą šilumą, P_{tot} – reikalinga galia.

Lygčių (4) ir (6) pagrindinis skirtumas yra komponentų forma. 4 lygtyje sumuojamas energijos kiekis, Wh, o 6 lygtyje – galia, W. (Sjögren *et al.* 2009) išskaidyta ši lygtis taip:

$$K_{\text{tot}}^*(T_i + T_e) = P_{\text{DH}} - f_{\text{DHW}}Q_{\text{DHW}}(T_{\text{DHW}} - T_{\text{DCW}})c_p\rho + \eta P_E + P_P + P_{\text{SUN}} \quad (1.7)$$

čia P_{DH} – šildymo galia, W/m², f_{DHW} – šalto ir karšto vandens suvartojimo pastate santykis, Q_{DCW} – šalto vandens suvartojimas, m³/s, c_p – savitoji vandens šiluma J/kg K, ρ – vandens tankis, kg/m³, ηP_E – pritekų nuo elektros prietaisų galia, P_P – pritekiai nuo žmonių, W/m², P_{SUN} – saulės pritekiai W/m².

Šioje balanso lygtyje atskirai sumuojamas šilumos poreikis karšto vandens ruošimui ir pagal savo prigimtį detalizuojami pritekiai.

Pastato energijos balansas pagal (Olofsson Andersson 2002):

$$K_{\text{tot}}(t)\theta(t) + P_{\text{dyn}}(t) - P_{\text{sun}}(t) - P_{\text{heat}}(t) - P_{\text{int}}(t) = 0; \quad (1.8)$$

čia $P_{\text{heat}}(t)$ tiekiama energija, $P_{\text{int}}(t)$ – pritekų galia iš vidinių šaltinių, $P_{\text{dyn}}(t)$ – akumuliuota šiluma, $P_{\text{sun}}(t)$ – panaudotos saulės pritekiai.

Ši balanso lygtis aprašyta kaip funkcija, kuri priklauso nuo laiko ir skirta dinaminiam šilumos srautui aprašyti.

Apibendrinant išnagrinėtas balanso lygtis, jų skirtumus galima suskirstyti į kelias grupes. Lygtys skiriasi šilumos išraiškos naudojimu, (1.1) (1.6) balanso lygtyse sumuojama galios išraiška, o (1.2) (1.4) (1.8) balansas sudaromas iš energijos kiekio. Balansuoti energijos kiekį yra patogiau, kai reikalingas greitas duomenų apdorojimas, nes paprastai faktiniai suvartojimai yra gaunami energijos kiekio išraiška. Bet gilesnei ir detaliai analizei geriausiai pastato energijos suvartojimo efektyvumą rodo suvartojimų profilis (reiškiamas vatais, W) valandos laiko tarpo intervalais (Sjögren *et al.* 2009, Smith *et al.* 2011, Pagliarini Rainieri 2012).

Taip pat, aprašytos balanso lygtys ne vienodai vertina šilumos pritekį. 7 lygtyje šilumos pritekiai yra išskaidomi pagal savo prigimtį, t. y. ne tik vidiniai ir išoriniai, bet saulės, žmonių, elektros prietaisų. Toks išskaidymas leidžia

tiksliau nustatyti pritėkių kiekį tam tikru laiku ir juos optimaliai panaudoti, valdyti. (1.1) (1.2) ir (1.7) lygtyse išskirtas ir karšto vandens suvartojimas. (1.3) (1.4) ir (1.6) lygtyse karštas vanduo yra įtrauktas į bendrąjį tiekiamos energijos narį, bet išskaidytose lygtyse priskiriamas prie sistemų nuostolių.

1.4. Žmogaus elgesio įtaka pastato energijos suvartojimui

Technologinis progresas skatina žmones labiau domėtis savo aplinkos kokybe ir jos kaina: šiluminiu komfortu, oro kokybe ir kartu stebėti energijos sąnaudas, jų kitimą. (Wang *et al.* 2012a) atlikta studija parodė, kad metinio energijos suvartojimo nepastovumas vidutinio dydžio biurų pastate gali siekti nuo 28,7 iki 79,2%, tą lemia energijos vartojimo valdymas. Vien profesionali pastato energijos poreikių vadyba ir monitoringas gali sutaupyti nuo 10 iki 40% energijos komerciniuose pastatuose (Ahmed *et al.* 2010).

Mokslininkų (Gaigalis Škėma 2007) parengtame vadove energijos poreikių vadyba apibūdinama kaip veikiantys organizaciniai, techniniai bei elgsenos veiksmas ekonomiškai patikimu būdu energetinėms sąnaudoms minimizuoti. O energijos poreikių vadybos tikslas – skirti dėmesį energijos naudojimui siekiant nenutrūkstamai mažinti energijos suvartojimą ir palaikyti pasiektus pagerinimus. EPV turėtų garantuoti, kad įmonė ar organizacija nuolat atliktų kūrimo, planavimo, įgyvendinimo ir rezultatų patikrinimo politikos veiksmus remdamasi savo naujai sukurta politika. Toks ciklas leidžia atlikti nuolatinį gerinimą, kaip atvaizduota einančiame ratu Demingo cikle (Gaigalis Škėma 2007).

Taip pat pasiektam sutaupymų rezultatui išlaikyti yra reikalingas procesas rikošeto efektui išvengti. Mokslininkų nustatyta, kad rikošeto efektas (*Rebound effect*) gali sumažinti pasiektą energijos taupymo rezultatą iki 15% (Berkhout *et al.* 2000). Taip pat pastebima, kad kuo mažiau energijos suvartoja pastatas, tuo didesnis gali būti rikošeto efektas (Hens *et al.* 2010). Rikošeto efektas psichologų aiškinamas kaip asmeninė teisės (*moral license*) reiškinys (Allcott 2011). Norint šio efekto išvengti reikalinga metodika nuolat primenanti pastato naudotojui apie esamą energijos suvartojimą ir skatinimą išlaikyti pasiektus energijos taupymo rezultatus.

Taip pat mokslininkai vieningai sutaria, kad tinkamas informacijos pateikimas apie jau suvartotą energijos kiekį yra vienas iš energijos taupymo metodų (Räsänen *et al.* 2008, Allcott 2011, Handgraaf *et al.* 2013). (Handgraaf *et al.* 2013) atliktame tyrime, kuriame dalyvavo 83 darbuotojai, dirbantys Olandijoje, buvo skatinami taupyti energiją ir finansinėmis, ir socialinėmis priemonėmis. Elektroniniu paštu jie gaudavo per savaitę suvartotos energijos ataskaitas. Tyrimo metu buvo patvirtintos kelios hipotezės: socialiniai skatinimo

įrankiai yra efektyvesni nei finansiniai skatinimo įrankiai; remiantis socialinio palyginimo teorija, asmeninių suvartojimų palyginimas su kitų žmonių rezultatais yra energijos taupymo skatinimo priemonė.

Socialinio palyginimo teorija, aprašyta (Festinger 1954), kuria remtasi atliekant (Handgraaf *et al.* 2013) tyrimą, vis dažniau naudojama kaip energijos efektyvumo skatinimo priemonė informuojant naudotojus apie jų suvartojimus ir palyginant su tokių pačių poreikių vartotojų suvartojimais (Räsänen *et al.* 2008). Taigi, atliktos studijos ir tyrimai patvirtina, kad geriausias efektyvaus energijos skatinimo įrankis norint pakeisti žmonių elgseną yra socialinis skatinimas rungtyniaujant su tokių pačių poreikių vartotoju.

1.5. Sprendimų priėmimo ir nuolatinio tobulinimo metodų apžvalga

Tobulėjant kompiuterinėms programoms ir didėjant jų prieinamumui atsiranda galimybių naudoti vis tobulesnius sprendimų priėmimo įrankius ar ekspertines sistemas, kuriais galima įvertinti ir pasirinkti siūlomas renovacijos priemones. Kompiuterinėmis programomis jau dažnai modeliuojami projektavimo stadijos pastatai mažesniai energijos poreikiui pasiekti, bet modeliavimo įrankis jau naudojamo pastato energijos sąnaudoms mažinti dar naudojamas retai (Ignacio Torrens *et al.* 2011). Tiek atliekant įprastą energijos vartojimo auditą, tiek modeliuojant pastato energinį efektyvumą, prieš tai atlikus išsamią esamos situacijos analizę, pateikiami pasiūlymai energijos efektyvumui didinti. Pasiūlymų vertinimui ir sprendimų priėmimui reikia pasirinkti formalizuotą metodą ar procedūrą.

Kiekviena šalis turi atskiras metodikas: Jungtinėse Amerikos valstijose galioja ASHRAE standartai, daugumoje pasaulio valstybių yra tik rekomendaciniai nurodymai. Bendros, visoms šalims rekomenduojamos metodikos šiuo metu nėra. Lietuvoje norint įvertinti pastatų, ypač viešųjų, renovacijos galimybes atliekamas Pastatų energijos vartojimo auditas (Martinaitis *et al.* 2010) arba Išsamusis energijos, energijos išteklių ir šalto vandens vartojimo auditas (LR Ūkio ministerija 2008).

(Doukas *et al.* 2009) pateikiamas pažangus sprendimų priėmimo modelis, skirtas intervencijos poreikiui nustatyti ir tipinio jau pastatyto pastato energijos taupymo priemonėms įvertinti. Šio modelio principas paremtas sistetine PAVS (galios, poreikiai ir vartotojo reikalavimai) duomenų analize. Modelis susideda iš 4 dalių: pasiūlymų (modernizavimo priemonių) duomenų bazės, sprendimų priėmimo dalies, patirties, pasiūlymų sąrašo. Modelis veikia tokiu principu: duomenų bazėje yra galimų modernizavimo priemonių sąrašas, sudarytas iš jau įgyvendintų modernizavimo priemonių. Sukaupti duomenys atskiroms

sistemoms (šildymo, vėsinimo, apšvietimo) ir visam pastatui modernizuoti, šių priemonių investicijos ir priežiūros kaštai, galimi sutaupymai. Sprendimai priimami įvertinus pastato rodiklius, kurie lyginami su standartiniais rodikliais, atspindinčiais geriausius jau pastatytų Graikijos pastatų rodiklius. Rodikliai yra skirti 4 kategorijoms: apšvietimui, šildymui – vėsinimui, elektros prietaisams ir bendras pastato energijos efektyvumo rodiklis). Prioritetų sąrašas sudaromas pagal blogiausius rodiklius. Pasiūlymų sąrašas sudaromas remiantis tik ekonominiais kriterijais, įvertinant grynąją dabartinę vertę, atsipirkimo laiką ir vidinę grąžos normą.

Formuojant renovacijos paketus remiantis tik ekonominiu vertinimu ir siekiant kuo mažesnių energijos sąnaudų, renovacija gali gerokai pabloginti vidaus aplinkos kokybę (Brown *et al.* 2013).

Visapusiškam energijos efektyvumo priemonių vertinimui paprastai reikalingas ne vienas kriterijus. Norint įvertinti daugiau nei vieną kriterijų, reikalingas sprendimų priėmimo metodas, galintis įvertinti daugiau nei vieną kriterijų. Dažniausiai ETP vertinimui naudojamas daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas, bet paskutiniu metu vis dažniau įvairiose mokslo šakose taikomas sprendimų medžio metodas.

1.5.1. Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai

Daugiakriteris sprendimų priėmimo (DKSP) (*Multicriteria decision making*) metodas plačiai naudojamas įvairiose srityse. Tai vienas dažniausiai naudojamų metodų pastatų projektavimo ir atnaujinimo galimybėms įvertinti (Wright *et al.* 2002, Alanne 2004, Kaklauskas *et al.* 2005, 2006, Mela *et al.* 2012) ir kiti. DK analizės privalumas tas, kad ji gali susieti investicijų, eksploatacijos kaštų ir žmonių, esančių patalpose šiluminį komfortą (Wright *et al.* 2002). DKSP metodai yra sisteminiai pasiūlymai problemoms su eile atributų ar kriterijų spręsti. Šie atributai gali būti skirtingų matavimo vienetų ir vieni kitiems prieštarauti (Hastings Wall 2007).

Proporcingam atskirų atributų (kurių skaičius neribojamas) visumos įvertinimui yra naudojamas daugiakriteriu sprendimų priėmimo metodu paremtas COPRAS (*the method of multiple criteria complex proportional evaluation*) metodas. Šis metodas leidžia įvertinti kriterijų svarbą ir prioritetus, išreikšti juos skaičiais, kiekvieno atributo svorį (Kaklauskas *et al.* 2010). Visos DKSP metodu paremtos technikos turi šiuos tris pagrindinius žingsnius:

1. Nustatyti tinkamus kriterijus ir alternatyvas.
2. Priskirti skaitines reikšmes atitinkamos reikšmės kriterijams ir poveikį šių kriterijų alternatyvoms.
3. Apdoroti skaitines reikšmes kiekvienos alternatyvos eilės apskaičiavimui.

Šis metodas naudojamas sprendimų priėmimui, kai reikia rinktis iš daug alternatyvų, vertinamų įvairiais aspektais (Mulliner *et al.* 2013).

DKSP metodo principas yra matricos sudarymas, kurios tikslas rasti optimalų sprendinį. Sprendžiamas optimizacijos uždavinys, kurio tikslas rasti sprendimą, tenkinantį dvi sąlygas: sprendimas turi būti galimas (leistinas), t. y. turi priklausyti sprendimų aibei ir sprendimas turi būti geriausias t. y. turi optimizuoti atsižvelgiant į skirtingų dimensijų rodiklių prioritetus (Zavadskas *et al.* 2001).

Naudojant šį metodą vertinamas alternatyvas reikia numatyti iš anksto ir optimalus sprendinys randamas iš jau numatytų alternatyvų. Taip pat kriterijai gali būti prieštaraujantys vienas kitam, o optimalus sprendinys gali visiškai neatitikti vieno iš kriterijų.

Daugiakriterių metodų grupei taip pat priklauso ir daugiatisksliai sprendimų priėmimo metodai, kai kriterijai ar atributai yra priešingų tikslų. Dažniausiai pasitaikantis priešingų tikslų pavyzdys vertinant pastatus yra energijos taupymo ir komforto kriterijų tikslai. Juk energijos poreikius gali sumažinti iki nulio, bet dažniausiai tokiomis sąlygomis komfortas nepasiekiamas.

1.5.2. Sprendimų medžio metodas

Sprendimų medžio (toliau SM) terminas pirmą kartą paminėtas 2002 m. mokslininkų Rusel ir Norvig darbe ir aprašytas kaip „paimantis informaciją apie objektą arba situaciją, aprašytą savybių rinkiniu, ir išvedantis informaciją kaip taip/ne funkciją“ (Aitkenhead 2008).

Sprendimų medžio metodas paskutiniu metu vis plačiau naudojamas skirtingose mokslo srityse klasifikavimo ir prognozavimo uždaviniams spręsti (Aitkenhead 2008, Yu *et al.* 2010). Šio metodo populiarumą lėmė aiški jo struktūra ir suprantamumas (Chandra Paul Varghese 2009). Sprendimų medžiui sudaryti naudojami trys elementai: šakos, mazgai (kurie gali būti skirti sprendimams priimti arba įvykiui pavaizduoti) ir sprendimų rezultatai. Šie elementai sujungiami diagrama, kuri yra šakoto medžio formos, todėl metodas ir vadinamas sprendimų medžiu. Šis metodas yra nuoseklus sprendimų priėmimo įrankis. Sprendimų medyje naudojama seka gali būti vaizduojama įtakos diagrama (*influence diagram*), kuri rodo tik veiksmų seką. Sprendimo rezultatas gaunamas einant nuosekliai nuo pradinio sprendimo iki galutinio rezultato vieninteliu keliu, susidedančiu iš šakų ir mazgų. Šis metodas taip pat kaip ir daugiakriterė analizė skirtas optimizavimo uždaviniui spręsti. Klasikinis sprendimų medžio principas yra pagrįstas veiksmų tikimybėmis, kai įvertinama kiekvienos šakos vertės tikimybė ir tikimybių principu randamas optimumas.

Dar vienas SM tipas yra sprendimų priėmimo algoritmo tobulinimas remiantis statistine į SM sudėtų apskaičiuotų rezultatų analize, įvertintą statistiką

pasitelkiant naujų duomenų vertinimui. Šis metodas panaudotas (Yu *et al.* 2010) pastato energijos poreikio lygiui nustatyti. Per tyrimą buvo susisteminta 55 pastatų, esančių įvairiose Japonijos vietose, duomenys, nuo kurių priklauso pastato poreikiai. Prognozinio SM patikimumas buvo patikrintas su 12 pastatų faktiniais duomenimis. Nustatytas gautų rezultatų patikimumas 92%.

Sprendimų medžio metodo taikymas su pastatais susijusiose studijose dar nėra dažnas (Yu *et al.* 2010). Daugiausia sprendimų medžio metodas naudojamas statybos procesams optimizuoti naudojant prognozavimo SM (Verbruggen *et al.* 2011, Shin *et al.* 2012).

Klasifikavimo SM pastatų atnaujinimo galimybėms įvertinti panaudojo (Alanne 2004) priemonių vertinimo kriterijams sugrupuoti ir atskleidė akivaizdų pranašumą, palyginti su matriciniu (dar vadinama sprendimų lentele) DKSP metodu. Medžio struktūros kriterijų medis formuojamas priskiriant atributų grupes kriterijams ir vertinant viso kriterijaus reikšmę. Taip išlaikomas kriterijų tolygumo principas, kurį galima formuoti kriterijų svoriais. Sprendimų lentelėje taip pat galima priskirti skirtingus svorius kiekvienam atributui, bet modeliuojama su kiekvienu atributu atskirai. O kriterijų medyje galima teikti pirmenybę konkrečiam kriterijui ir atitinkamai bus teikiama pirmenybė to kriterijaus atributams.

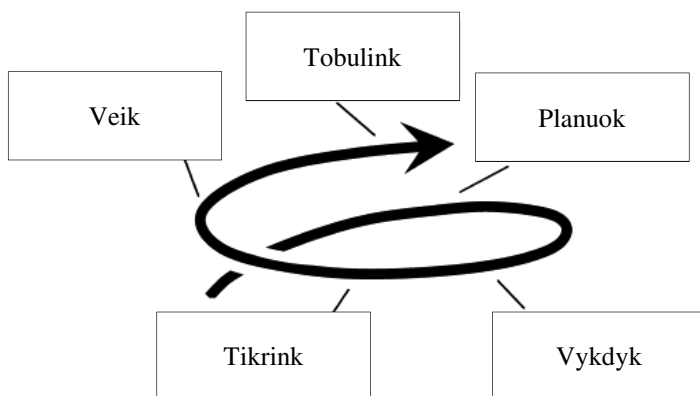
Nuoseklus sprendimų priėmimo metodas yra patogesnis, kai informacija, reikalinga sprendimui priimti, yra nuolat atnaujinama. Jai pasikeitus atnaujinamas ir sprendimų priėmimas (Verbruggen *et al.* 2011). Taigi lyginant su daugiakriteriais sprendimų priėmimo metodais, sprendimų medžiai yra tinkamesni nuolatiniam vertinimui.

1.5.3. Nuolat atnaujinamų sprendimų modeliai

Vienkartinis sprendimų priėmimas nebėra iššūkis šiandieniniam mokslui. Nuolat atnaujinamų sprendimų priėmimo modelis yra nauja kryptis, kurią nagrinėja mokslininkai.

Demingo ciklas sukurtas cikliškiems procesams valdyti ir tobulinti. Klasikinis Demingo ciklas turi keturis taškus: planuok – vykdyk – tikrink – veik (toliau PVTV). Ne vienas mokslininkas pradėjo naudoti Demingo ciklą ir jį „atverti“ diegiant naujoves arba renovacijos priemones (Alanne 2004, Arsovski *et al.* 2009).

1.1 paveiksle pateiktas atvertto Demingo ciklo principas, kaip prie keturių pagrindinių komponentų (Planuok-vykdyk-tikrink-veik) prisideda penktasis komponentas „Tobulink“. Kylanti spiralė šioje schemoje vaizduoja gerėjančią kokybę.



1.1 pav. Atverto Demingo ciklo principas
Fig. 1.1. The principle of opened Deming cycle

Suomių mokslininkas aprašo (Alanne 2004) daugiakriterį renovacijos priemonių vertinimą jų pasirinkimui. Šio metodo principas yra sprendimų priėmimo medis, kurį sudaro pagrindiniai kriterijų mazgai, kuriuos sudaro subkriterijai (*sub-criteria*). Plačiau kiekvienas subkriterijus turi jį aprašantį indikatorį (ar atributą). Skaitinis renovacijos priemonės vertinimas nustatomas daugiakriteriu sprendimų priėmimo metodu. Šis metodas patogus tuo, kad sudarant sprendimų medį susisteminami atributai. Cikliškumas šiame metode pateikiamas Demingo ciklu su „kuprine“. „Kuprinė“ išsisuka iš rato – su funkcija „įvertink ir priimk sprendimą“ ir vėl grįžtama į klasikinio Demingo ciklo ratą. Šis modelis yra baigtinis, priimamas sprendimas dėl priemonės ir ratas nebesisuka.

Arsovski (Arsovski et al 2009) metodas skirtas pramonės įmonių procesams optimizuoti. Procesus nusako trys parametrai: kokybė – quality, produktyvumas – productivity ir lankstumas – flexibility. Parametrų „svoris“ nustatomas pagal tai, kiek yra atsiliekama lyginant su kontrolinės pavyzdinės organizacijos parametrais. Nuolatinio tobulinimo metodas yra paremtas Demingo ciklu. PVTV cikle kokybė gali būti pagerinta kiekvienos planavimo, projektavimo ir detalaus projektavimo fazės metu. Kokybės gerinimo procesas turi 4 fazes: pasiruošimas pakeitimams, pakeitimų planavimas, pakeitimų projektavimas ir pakeitimų pritaikymas ir įvertinimas. Pakeitimų projektavimas (trečioji fazė) atliekamas šešiais subprocesais (subprocesses): procesų identifikavimu, apimčių nustatymu, matavimais ir analize, proceso pakeitimu/optimizavimu, naujojo proceso testavimu, naujojo proceso įdiegimu.

Procesų kokybės vertinimas atliekamas remiantis gamybą aprašančiais kriterijais, tai – užsakymų įvykdymas, viršplaninė eksploatacija, eksploatacijos lankstumas, profilaktinės priežiūros padidėjimas. Šie kriterijai nusako gamybos

pajėgumus, todėl pats metodas netinkamas pastatų auditui, bet jo principas (4 fazės papildančios Demingo ciklą) gali būti naudojamas ir pastatų nuolatinio audito modeliui sudaryti.

Nuolatinio energijos suvartojimų stebėjimo problemą dažniausiai sprendžia elektronikos ir automatikos srities mokslininkai. Jų atliekamos studijos dažniausiai nagrinėja valdiklių ir jutiklių veikimo patikimumą (Marinakis *et al.* 2012), klaidų eliminavimą (Costa *et al.* 2011), duomenų apdorojimo ir saugojimo problemas (Ahmed *et al.* 2010). Šiose studijose energijos vartojimo efektyvumas dažniausiai suprantamas, kaip maksimaliai sklandžiai dirbančios energetinės sistemos. (Ahmed *et al.* 2011) kelia uždavinį optimizuoti keturis pastato elementus (konstrukciją, sistemas, paslaugas ir vadybą) ir jų tarpusavio ryšius.

Apžvelgus sprendimų priėmimo metodus, parankiausi metodai norint įvertinti ETP priemonės daugiau nei vienu kriterijumi yra metodai, paremti daugiakriterine analize. Kai sprendimus lemiantys kriterijai yra sugrupuoti, tai paranku naudoti sprendimų priėmimo medį. Norint sukurti nuolatinę tobulinimo sistemą paranku remtis Demingo ciklo principu, tik taikant jį pastato energijos poreikių analizei, t. y. naudojant pastato efektyvumą nusakančius kriterijus.

1.6. Sprendimų priėmimo ir nuolatinio tobulinimo metodų apžvalga

1.6.1. Kriterijai energijos taupymo priemonėms įvertinti

Energijos taupymo priemonių (ETP) įvertinimas priklauso nuo pasirinktų kriterijų. Dažniausiai naudojamas ekonominis kriterijus, kuris gali būti vertinamas skirtingais atributais. Vienas iš populiariausių, nes lengviausiai apskaičiuojamas ir suprantamas, yra paprastasis atsipirkimo laikas (Chidiac *et al.* 2011).

(Doukas *et al.* 2009) parengtame modelyje yra naudojamas tik ekonominis kriterijus, kuris įvertintas trimis atributais: atsipirkimo laiku, grynąja dabartine verte (GDV) ir vidine grąžos norma (VGN). (Nikolaidis *et al.* 2009) atliktas energijos taupymo priemonių vertinimas ekonominiu kriterijumi, kuriam priskiriami keturi atributai: GDV, VGN, sutaupymų ir investicijų santykis, nuvertėjimą įvertinantis atsipirkimo laikas. (Petersen Svendsen 2012) pateiktas projektuojamų pastatų optimizavimo metodas remiasi ekonominiu kriterijumi – sutaupymais pinigine išraiška, kuri apskaičiuojama sutaupytos energijos kiekį padauginus iš kainos. Ekonominiai rodikliai yra patogūs sprendimams priimti, nes turi aiškius matematinius vertinimo kriterijus ir gali būti įvertinti dviem galimybėmis: „apsimoka – neapsimoka“. Bet naudojant vien tik ekonominio

vertinimo kriterijų neatsiperkančios yra ETP, kurios pagerina pastato kokybę. (Brown *et al.* 2013) siūlomas ETP vertinimo kriterijus yra sudurtinis ekonominio ir gyvavimo ciklo kriterijus, pavadintas gyvavimo ciklo kaina (*life-cycle cost*). Šis kriterijus apskaičiuojamas įvertinant 14 nesugrupuotų rodiklių.

(Alanne 2004) pateiktame modelyje renovacijos priemonės vertinamos dviem kriterijais: reikšme aplinkai ir funkcionalumu. Reikšmė aplinkai įvertinama CO₂ emisijų sumažėjimu, o funkcionalumo kriterijus apibūdinamas 10 aspektų, kurie nusako priemonės įgyvendinimo prieinamumą: kaip lengvai priemonė gali būti įgyvendinta, ar tai reikalauja papildomų darbų, naujų metodų, įvertinamas komfortas, patikimumas, priderinimas prie esamų sistemų, poveikis pastato charakteristikoms, funkcionalumui, patogumui ir servisui. Šis modelis „giliau“ vertina renovacijos priemones, nei vertinimas pagal ekonominį kriterijų, bet neapima kitų svarbių aspektų.

Dažniausiai naudojami 2E ir 3E kriterijų deriniai. 2E – energinė ir ekonominė nauda, arba energinė ir aplinkosauginė nauda. 3E kriterijus – energinė, aplinkosauginė ir ekonominė nauda. Šie kriterijų deriniai plačiai naudojami energijos tiekimo sprendiniams (Oliveira Antunes 2004) naujų pastatų projektavimo metu sprendimams priimti (Lazzaretto Toffolo 2004). Taip pat šie kriterijai naudojami ir pastatų atnaujinimo sprendiniams įvertinti.

(Risholt *et al.* 2013) teigia, kad ne vien tik ekonominė nauda ir sutaupytos energijos kiekis yra svarbus pastato vartotojui, ir šią naudą įvardija „ne – energine nauda“ (*non energy profit*). Jų pristatomus daugiabučių namų renovacijos darnumo vertinimo kriterijus sudaro 4 veiksniai: eksploatacinės savybės (*performance*), ekonominiai veiksniai, funkcionalumas ir socialiniai veiksniai. Socialinius veiksmius apima šiluminio komforto ir oro kokybės pagerinimas, estetiniai pakeitimai, dalyvavimas procese patiems ir renovacijos kompleksiskumas. Šie kriterijai buvo panaudoti dviem renovacijos scenarijams palyginti, kurių tikslas beveik nulinės energijos pastatai.

(Kaklauskas *et al.* 2005) pateiktas daugiakriterės analizės sprendimų priėmimo metodas pastatų atnaujinimo variantams pasirinkti. Šio metodo principas yra kompleksinis ekonominių, kokybės, techninių, ekologinių, klimatinų ir socialinių sąlygų, tradicijų ir vartotojo poreikių tenkinimo įvertinimas. Visa ši informacija suskirstyta į koncepcinius ir kiekybinius kriterijus. Koncepciniai kriterijai nėra aiškiai apibrėžiami. Kiekybiniais priskiriama kaina, estetika, komfortas ir kiti kriterijai, kuriuos galima išreikšti skaičiais.

(Neves *et al.* 2008) atliktoje studijoje ETP nagrinėjamos politiniu aspektu. Daugiakriterė analizė buvo atliekama valstybės skatinamoms ETP atrinkti. Ši analizė atlikta naudojant 10 nesugrupuotų kriterijų: energijos sutaupymai, galios sutaupymai, investicijos, gerovė, įdarbinimas arba ekonominė nauda, kitų išteklių nauda, biudžeto dalis subsidijoms, pajėgumų įvertinimas, rinkos

pokyčiai, strateginių tikslų pajėgumas. Kaip matyti iš šioje studijoje pasirinktų kriterijų, jų pasirinkimas priklauso nuo to, kokių tikslų atliekamas vertinimas. Kadangi dažniausiai pastatų atnaujinimas atliekamas norint sutaupyti pinigų jų eksploatacijai, tai todėl dažniausiai tik ekonominis kriterijus ir pasirenkamas. Bet norint atlikti kompleksinę ETP analizę, turi būti sudarytas deramas kriterijų kompleksas.

Komforto sąlygų užtikrinimas yra būtina pastatų modernizavimo sąlyga. Bet dažnai priemonės, būtinos šiai sąlygai, nėra ekonomiškai naudingos ir nesutaupo energijos. Todėl komforto įvertinimas, jeigu ir įtraukiamas, tai kaip atskiras kriterijus, kurį būtina įgyvendinti.

(Chantrelle *et al.* 2011) aprašomas ETP vertinimas pastato naudotojo atžvilgiu apima keturias sritis: energijos suvartojimą, šiluminį komfortą, kainą ir poveikį aplinkai. Šis vertinimas apima kriterijus, susijusius su pastato naudojimu, bet nevertina pastato gyvavimo ciklo aspektu. Gyvavimo ciklo analizė (GCA) dažniausiai naudojama atskirų pastato elementų vertinimui (Verbeeck Hens 2010), nes vertinant pastatą kaip visumą atsiranda kriterijų, kurių neapima GCA, tai – šiluminis komfortas, oro kokybė.

Apžvelgta ETP vertinimo kriterijų gausa rodo, kad nėra vieno kriterijaus, kuris visapusiškai apibūdintų optimalų modernizavimo priemonių rinkinį.

1.6.2. Pastatų atnaujinimo darnumo kriterijai

Šiuo metu itin populiarėjantis vertinimas darnaus vystymosi (toliau – DV) požiūriu naudojamas ir pastatams, ypač vertinant pastatų atnaujinimą. Pagrindinės darnaus vystymosi nuostatos buvo suformuluotos pasaulio viršūnių susitikime Rio de Žaneire 1992 metais. Darnus vystymasis įteisintas kaip pagrindinė ilgalaikė visuomenės vystymosi ideologija. Šios koncepcijos pagrindą sudaro 3 lygiaverčiai komponentai – aplinkosauga, ekonominis ir socialinis vystymasis (LR Vyriausybė 2003). Kokiais kriterijais įvertinti pastatų atnaujinimą, kaip vertinti pastatą DV principu, vieningos mokslininkų nuomonės nėra. (Brown *et al.* 2013) pastatų atnaujinimą vertina energijos poreikiu pokyčiu, gyvavimo ciklo kaina ir aplinkosauginiu vertinimu, įvardydami juos kaip darnumo kriterijus. (Ghaffarian Hoseini *et al.* 2013b) atliktoje studijoje darnus pastatų vertinimas atliekamas remiantis tokiais kriterijais: ekonomine nauda, energijos suvartojimu, papildoma nauda (į šį kriterijų įeina ir vidaus patalpų oro kokybė) ir poveikiu aplinkai. Šiais kriterijais vadovaujantis siekiama padidinti gerovę, sumažinti išteklių vartojimą, padidinti naudą ir sumažinti poveikį.

Vertinant pastatus darnumo požiūriu visada išskiriamas energijos poreikių arba išteklių sumažėjimas, kuris vertinamas įvairiai: sutaupytos energijos poreikis (Brown *et al.* 2013), sutaupytos ir įkūnytos energijos (atnaujinimo proceso metu) skirtumas (Ghaffarian Hoseini *et al.* 2013b). Šalyse, kuriose

vanduo yra labiau taupomas išteklius nei energija, vertinama sutaupyto išteklių pokytis.

(Mwasha *et al.* 2011) atliko statybų sektoriaus dalyvių (konstruktorių, architektų, konsultantų, aplinkosaugininkų) apklausą norėdami išsiaiškinti, kokie yra svarbiausi darnaus pastatų projektų vertinimo kriterijai. Tyrimo išvadose suformuluotas darnumo kriterijų derinys yra energijos efektyvumas, poveikis aplinkai, prieinamumas, socialinė nauda, medžiagų efektyvumas ir ilgalaikiškumas.

Kiekvienoje studijoje darnumo kriterijai pasirenkami individualiai, tai priklauso nuo studijos analizės požiūrio pobūdžio (politinio, ekonominio, aplinkosauginio) ir kriterijai pasirenkami labai įvairiai. Tačiau kiekvienoje studijoje, kurioje buvo atliekamas darnus vertinimas buvo vertinamas energijos efektyvumas, poveikis aplinkai ir ekonominė nauda.

1.7. Komforto sąvoka ir vertinimo metodai

Dažniausiai naudojamas kriterijus vertinant patalpų kokybę yra šiluminis komfortas (*thermal comfort*) (Djuric *et al.* 2007, Sourbron Helsen 2011, Chantrelle *et al.* 2011, Griego *et al.* 2012).

Šiluminiam komfortui apibrėžti i mokslininkai ir standartų kūrėjai dažniausiai naudoja Fangerio metodą. Tai – geriausiai žinomas ir plačiai naudojamas šiluminio komforto įvertinimo metodas. Fangerio sudarytos lygtys ir lentelės yra pagrįstos žmogaus kūno šiluminiu balansu. Kūno šiluminis balansas pasiekiamas, kai kūno išskiriama šiluma yra lygi šilumos nuostoliams, išskirtiems į aplinką. Pagrindiniai rodikliai, apskaičiuojami Fangerio metodu yra numatomasis vidutinis įvertis (PMV – *Predicted mean vote*) ir numatomasis nepatenkintųjų nuošimtis (PPD – *predicted percentage of disadvantages*) (Standartization 2005, Ahmed *et al.* 2011). Atlikti tyrimai, kuriuose apklausų rezultatai buvo lyginami su apskaičiuotaisiais rodo, kad neįmanoma sukurti tokio šiluminio komforto, kuriuo būtų patenkinti visi žmonės, esantys patalpoje (Hens 2009). Skirtingų šalių standartuose apibrėžiamas 80% arba 90% patenkintųjų procentas, kurio turi siekti pastato projektuotojas. Norint nustatyti PMV rodiklį, reikia įvertinti žmogaus fizinį aktyvumą ir aprangos šiluminę varžą, taip pat išmatuoti aplinkos parametrus: oro temperatūrą, oro judėjimo greitį, oro santykinį drėgnumą ir šiluminio spinduliavimo vidutinę temperatūrą. Šiems matavimams atlikti reikalinga matavimų įranga, kurią sudėtinga ir brangu sumontuoti kiekvienoje patalpoje, kiekvienam žmogui, todėl šie matavimai atliekami retai (Ahmed *et al.* 2011). Fangerio atliktų tyrimų pagrindu sudarytos formulės ir lentelės, parengti standartai, reikalingi projektuojant pastatus, bet

įvertinti šiluminį komfortą naudojamame pastate geriausias ir tiksliausias būdas yra nustatyti, kaip jaučiasi pastate esantys žmonės.

Mokslininkų Dear ir Brager darbai rodo, kad ypač natūraliai vėdinamuose pastatuose šiluminio komforto ribos yra platesnės lyginant su Fangerio nustatytomis (de Dear Brager 2002). Šių mokslininkų aprašytas metodas buvo pavadintas adaptyviojo komforto standartu. Atlikti tyrimai įrodė, kad PMV kriterijus pagal (Standartization 2005) naudojamas šiluminiam komfortui nustatyti, sudaro sąlygas patalpų perkaitinimui šaltojo sezono metu ir pervėsinimui šiltuoju metų laiku (de Dear Brager 2002, Moujalled *et al.* 2008). Adaptyviojo komforto standartu apskaičiuoto šiluminio komforto rezultatai yra daug tikslesni lyginant su apklaustųjų nuomone. Adaptyvusis standartas rodo priklausomybę tarp išorės oro temperatūros ir optimalios vidaus patalpų temperatūros (de Dear Brager 2002), tačiau šis algoritmas tinka tik šiltajam sezonui, nes taikomas, tik kai lauko oro temperatūra yra 10–33 °C. Lietuvos klimato sąlygomis, laikotarpis, kai lauko temperatūra yra aukštesnė kaip 10 °C, vadinamas šiltuoju ir pastatai nėra šildomi.

Atlikti tyrimai rodo, kad vien tik šiluminio komforto užtikrinimas yra nepakankamas komfortinėms sąlygoms patalpoje palaikyti. Fizinį, arba bendrąjį, komfortą patalpoje suformuoja fiziniai ir asmeniniai veiksniai. Fizinio komforto veiksniai: šiluminis komfortas, oro kokybė (vėdinimas), triukšmas ir akustika, apšvietimas ir vaizdas (Frontczak Wargocki 2011). Tuos pačius veiksnius, kaip ir fizinis komfortas, apima ir vidaus aplinkos (mikroklimato) kokybė – *Indoor environment quality* (IEQ) (Frontczak *et al.* 2012, Brown *et al.* 2013). Vidaus aplinkos (mikroklimato) kokybė kartais sutapatinama su oro patalpoje kokybe (*indoor air quality*).

Asmeninio komforto veiksniai yra šie: veikla, drabužiai, prisitaikymas, lūkesčiai ir buvimo trukmė (Frontczak Wargocki 2011). Asmeniniai veiksniai yra individualūs ir juos įvertinti objektyviai sudėtinga. Veikla ir drabužiai dar gali būti (ir yra vertinami), bet prisitaikymas (medžiagų apykaita) ir lūkesčiai yra individualūs ir tik individualus žmogus (anketos ir klausimynai konkrečiam žmogui) gali šiuos veiksnius įvertinti.

Fiziniai komforto veiksniai turi normų numatytas ribas ir gali būti įvertinti (išmatuoti, apskaičiuoti) objektyviai. (Frontczak Wargocki 2011) atliktas tyrimas įvertino visuminio komforto ir atskirų fizinio komforto veiksmų santykius. Šio tyrimo rezultatai rodo, kad visi veiksniai yra panašios svarbos (santykis kito nuo 0,64 iki 0,48). Taigi, negalima išskirti vieno iš veiksmų kaip svarbesnio, tik jų visuma gali užtikrinti fizinį komfortą.

Taip pat tyrimai rodo, kad gerai savijautai patalpoje užtikrinti neužtenka nuolat palaikyti tų pačių komforto parametrų. Sėdimą darbą dirbančiųjų darbo našumas didėja, kai temperatūra kyla iki 21–22 °C. Ir mažėja kai patalpų temperatūra viršija 23 °C. Optimali yra 21,6 °C temperatūra. O darbo

efektyvumą dienos pabaigoje padidina žemesnė (18 °C) temperatūra (Valančius Jurelionis 2012). Ne vieno mokslininko daromos išvados, kad kuo komfortiškiau jaučiasi žmogus, tuo našiau jis dirba, taigi investuoti gerinant oro kokybę patalpose yra finansiškai naudinga.

Taigi norint tiksliai ir objektyviai įvertinti bendrąjį komfortą, neužtenka pamatuoti fizinio komforto parametų, bet individualaus žmogaus, esančio patalpoje komforto poreikis turėtų būti įvertintas.

1.8. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Dauguma mokslininkų rekomenduoja esamus pastatus vertinti pagal faktinius energijos suvartojimus (perskaičiuotus norminiams metams), nes jie atspindi realų pastato vartojimą: žmonių veiklą, mikroklimato parametrus, esamą (ar nesamą) energijos poreikių vadybą, taip pat ir pastato energines savybes.
2. Savitųjų energijos sąnaudų analizė leidžia atsiriboti nuo klimatinių sąlygų, bet būtina analizuoti likusius veiksnius. Šilumos balanso metodas yra žymiai tikslesnis, nes šilumos pritekiai ir šilumos srautai nuo skirtingų energetinių sistemų gali būti įvertinti.
3. Apžvelgta ETP vertinimo kriterijų gausa rodo, kad nėra vieno kriterijaus, kuris visapusiškai apibūdintų optimalų modernizavimo priemonių rinkinį. Todėl parankiausi metodai norint visapusiškai įvertinti ETP, yra daugiakriteriai metodai. Kai sprendimus lemiantys kriterijai yra sugrupuoti, tai paranku naudoti sprendimų priėmimo medį.
4. Kuriant nuolatinę tobulinimo sistemą paranku remtis Demingo ciklo principu, tik pritaikant jį pastato energijos poreikių analizei, t. y. naudojant pastato efektyvumą nusakančius darnumo kriterijus.
5. Mokslininkai dažnai vertina modernizavimo priemones darnaus vertinimo kriterijais, tačiau konkrečių darnaus vystymosi koncepciją įvardijančių kriterijų pastatams vertinti nėra nustatyta. Analizuotose studijose, kuriomis buvo siekiama atlikti darnųjį vertinimą, vertinta pagal energinį efektyvumą, poveikį aplinkai ir ekonominę naudą.
6. Norint tiksliai ir objektyviai įvertinti bendrąjį komfortą, neužtenka pamatuoti fizinio komforto parametų, bet individualaus žmogaus, esančio patalpoje, komforto poreikis turėtų būti įvertintas.
7. Pastato rekonstrukcijos metu pasiektiems energijos taupymo rezultatams išlaikyti ir norint išvengti rikošeto efekto, paaiškinamo asmenine teise, reikalinga nuolat veikianti metodika, primenanti pastato naudotojui apie

esamą energijos suvartojimą ir skatinimą išlaikyti pasiektus energijos taupymo rezultatus.

Remiantis atliktų tyrimų apžvalga pasirinkta spręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti esamas energinių auditų, pastatų vertinimo, monitoringo ir energijos sąnaudų analizės metodikas. Išanalizuoti pastato energijos poreikius, jų priklausomybę nuo įvairių veiksnių, naudojamus energijos sąnaudų balansavimo algoritmus.
2. Sudaryti nuolatiniam pastato valdymui parankią balanso lygtį pastato energinėms savybėms nagrinėti.
3. Išanalizuoti pastatų energinį efektyvumą skatinančių priemonių vertinimo metodus. Apžvelgti mokslininkų naudojamus kriterijus energijos taupymo priemonėms vertinti, kriterijų sąsają su darnaus vystymosi koncepcijos komponentais. Sudaryti darnaus vertinimo kriterijų su juos išreiškiančiais atributais rinkinį energijos taupymo priemonėms įvertinti.
4. Sukurti darnaus vertinimo daugiakriterį metodą energinio efektyvumo didinimo priemonėms pastate vertinti, šioms priemonėms grupuoti į paketus.
5. Parengti pastato energinių savybių valdymo modelio algoritmą, kuriame būtų analizuojamos pastato energinės savybės, siūlomos diegti energijos taupymo priemonės, o jų įtaka pastatui ir aplinkai įvertinta darnumo kriterijais.

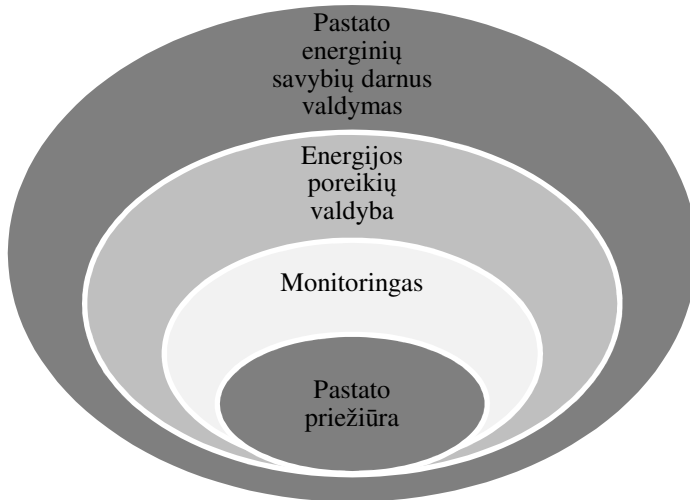
Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis

Šiame skyriuje pateikiamas darbe sukurtas pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis ir jo veikimo algoritmas. Šis modelis skirtas nuolatiniam pastato valdymui ir stebėsenai bei atnaujinimo galimybių planavimui.

Šia tema paskelbtos 4 publikacijos (Mikučionienė Martinaitis 2013a, 2013b, 2013c, Mikučionienė *et al.* 2014).

2.1. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio koncepcija

Pastato energinių savybių darnaus valdymas (toliau – PESDV) apima techninę pastato priežiūrą, nuolatinę energijos suvartojimo stebėseną (monitoringą), energijos poreikių vadybą ir nuolatinę energijos taupymo priemonių (toliau – ETP) vertinimą. Valdymas yra nuolatinis procesas, analizuojantis energijos suvartojimą gana mažais intervalais pagal pastato automatizuotojo valdymo sistemos (PAVS) galimybes.



2.1 pav. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio koncepcija
Fig. 2.1. The concept of model for sustainable building energy performance management

2.1 paveiksle pateiktas pastato darnaus energinių savybių valdymo modelio vaizdas, kuriame schemiškai paaiškinta šio modelio sąvoka ir komforto įtaka kiekviename etape. Pastato priežiūra yra periodinis (ne nuolatinis) pastato savybių patikrinimas įvertinant, ar atitinka konkrečios paskirties pastatui keliamus reikalavimus. Komfortas apžiūros metu vertinamas tik paviršutiniškai: tikrinama, ar atitinka normatyvus tikrinimo metu. Monitoringas yra nuolatinis energijos suvartojimo stebėjimas analizuojant atsiradusius neatitikimus ir identifikuojant jų priežastis. Šiame etape komforto parametrai yra analizuojami ir identifikuojamas jų neatitikimas normoms. Energijos poreikių vadyba taip pat yra nuolatinis energijos suvartojimų stebėjimas, bet kartu skatinant personalą efektyviau naudoti energiją ir racionaliau panaudoti esančią įrangą bei užtikrinti reikiamus komforto parametrus. PESDV modelis apima visus aprašytus etapus ir jo taikymas yra nuolatinis procesas, per kurį ne tik nuolat stebimi energijos poreikiai, kontroliuojami pastato parametrai (tai daro PAVS), bet ir siūlomos energijos taupymo priemonės. Nuolatinio automatizuotojo proceso metu šiuolaikinėmis technologijomis taip pat galima įvertinti kiekvieno žmogaus, esančio pastate, atsiliepimus apie komfortą, ir taip kiekvienas žmogus daro įtaką pastato valdymui, jeigu yra tinkamai motyvuotas.

Komfortas taip pat yra vienas iš PESDV modelio kriterijų vertinant ETP. Atliekant ETP vertinimą sprendimo priėmimo arba sprendimo paramos sistemai yra būtini vertinimo kriterijai. Darnus ir visapusiškas vertinimas atliekamas

naudojant keletą kriterijų, tarp kurių komfortas turėtų būtinai būti. Komforto, kaip kriterijaus, vertinimas gali būti ir dažniausiai yra naudojamas kaip dvinaris kintamasis – arba atitinka tam tikras ribas, arba ne (taip/ne sprendinys). Daugiakriteriuose sprendimų priėmimo įrankiuose komfortas gali būti išreikštas ne vienu atributu, kurių kiekvienas gali turėti savo vertes. Pavyzdžiui atskirai vertinamas kiekvienas fizinio komforto parametras (šiluminis komfortas, oro kokybė, akustinis komfortas ir apšvietumas) numatant jo ribas arba reikalavimą atitikti konkrečius parametrus. Bet kaip anksčiau aprašyti komforto vertinimo metodai rodo, nėra konkrečių komforto verčių, kurios būtų universalios, todėl ETP komforto kriterijaus vertinimas dvinariu kintamuoju supaprastina sprendimo priėmimo įrankio valdymą ir duoda tokį pat rezultatą, kaip kiekvieno komforto veiksnio vertinimas atskirai.

2.2. Energijos balanso lygties sudarymas

Atsižvelgiant į 1 skyriuje aprašytas balanso lygtis ir norimus gauti rezultatus, buvo sudaryta pastato išteklių energijos balanso lygtis, kurios pagrindu veiktų pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis. Ši lygtis reikalinga išteklių balansui sudaryti, nuolatinio energinio audito algoritmui įgyvendinti.

Pastato išteklių energijos balanso lygtis, apima į pastatą patenkančius išteklius: šilumą, elektrą ir karštą vandenį.

Lygtis sudaroma laikantis principo, kad techninės pastato sistemos (*technical building systems*) teikia pastatui paslaugas (*building services*): tiekia šilumą, elektrą ir karštą vandenį. Šie terminai pagal (LST ISO 13790:2008) apibrėžia:

Techninės pastato sistemos – šildymo, vėsinimo, vėdinimo, karšto vandens, apšvietimo ir elektros gamybos įranga. Bet tikslingiau būtų naudoti terminą energetinės pastato sistemos, nes visos aprašytos pastato sistemos apima energetinių paslaugų teikimą

Paslaugos pastatui – patalpų mikroklimato sąlygų, karšto vandens, apšvietimo ir kitų paslaugų teikimas techninėmis pastato sistemomis.

Pagal standartą visuminį komfortą apibrėžia ir vėsa, bet į energijos balansą ji neįtraukiama, nes tai priešingos krypties procesas – šiluma yra šalinama. O balansas sudaromas maksimalių šilumos panaudojimo galimybių įvertinimui, kartu užtikrinant šiluminį komfortą naudojamose patalpose.

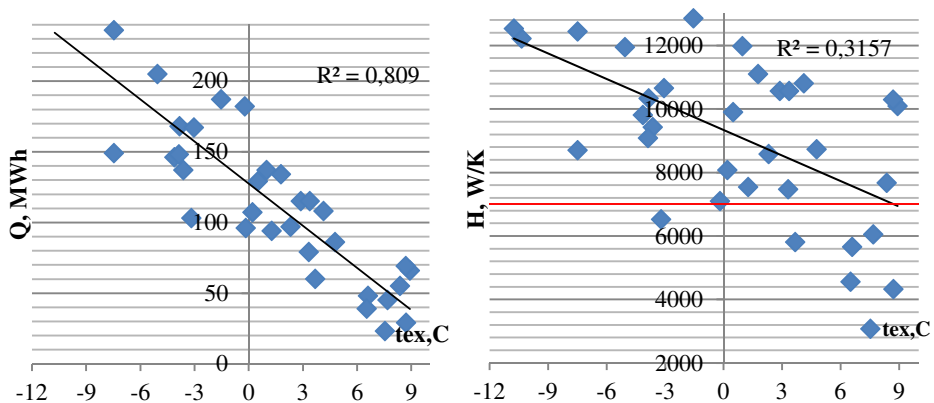
Atlikus esamų balanso lygčių apžvalgą, šiame darbe siūloma tokia išteklių energijos balanso lygtis (2.1):

$$\sum Q_{\text{del,f}} = (t_{\text{int,f}} - t_{\text{ext,f}})z_f(\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j) - \eta_T(Q_P - \eta Q_E - Q_S) - \sum \eta_{R,k} Q_{R,k} + \sum Q_{L,k} \quad (2.1)$$

čia: $\sum Q_{del,f}$ – tiekami į pastatą ištekliai, kWh, $(t_{int,f} - t_{ext,f})z_f$ – nagrinėjamo periodo dienolaipsnių charakteristika, $(\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j)$ – pastato savitieji šilumos nuostoliai W/K, η_T – pritėkių panaudos koeficientas, priklausantis nuo vidaus patalpų temperatūros ir sistemų kontrolės priemonių netobulumo, Q_p – pritėkiai nuo žmonių, kWh, η_{QE} – pritėkiai nuo elektros prietaisų, kWh, Q_s – saulės pritėkiai, kWh, $\sum \eta_{R,k} Q_{R,k}$ – šilumogrąžos įrenginių sugrįžtanti šiluma, $\sum Q_{L,k}$ – sistemų nuostoliai, kWh.

Ši lygtis sudaryta (Martinaitis *et al.* 2010) pagrindu, tik eliminuotas atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimas, nes šiame etape balansas yra nagrinėjamas tik pastato ribose. Pastato ribos apibrėžia tik patį pastatą, nevertinant energijos gamybos ir tiekimo iki pastato. Be to pritėkiai yra išskaidyti pagal savo prigimtį kaip (Sjögren *et al.* 2009). Toks išskaidymas padeda siekiant nulinės energijos pastato charakteristikų po renovacijos. Beveik nulinės energijos pastato pagrindinis šilumos šaltinis yra pritėkiai, todėl jų naudojimas turi būti valdomas, optimizuojamas.

Mokslininkų naudojamas balanso lygties pagrindas yra arba energijos sąnaudos (Q), arba savitosios energijos sąnaudos (H). Atlikta šių sąnaudų panaudojimo lyginamoji analizė.



2.2 pav. Pastato 35 mėnesių energijos sąnaudų Q ir savitųjų energijos sąnaudų pasiskirstymas

Fig. 2.2. Energy consumption Q and specific energy consumption H of 35 months of building

2.2 paveiksle pateikta 5 metų (35 mėnesių) mėnesinių šilumos sąnaudų Q ir savitųjų šilumos sąnaudų H pasiskirstymas pagal išorės oro temperatūrą. Energijos sąnaudų pasiskirstymo determinacijos koeficientas yra didelis (0,809), kai to paties laikotarpio savitųjų sąnaudų determinacijos koeficientas yra beveik

tris kartus mažesnis (0,316). Šilumos sąnaudos tiesiogiai priklauso nuo išorės oro temperatūros, todėl ir jų determinacijos koeficientas yra didelis, o savitosios sąnaudos, kurioms klimato įtaka neįvertinta, rodo sąnaudų nepastovumą ir yra pagrindinė informacija apie efektyvų ar neefektyvų pastato energijos naudojimą.

2.2 paveiksle dešinėje pateiktame grafike horizontali linija rodo modeliuojamas savitąsias sąnaudas idealiu atveju. Idealus atvejis modelyje suprantamas kaip nesikeičiantys inžinerinių sistemų efektyvumo rodikliai, ir tolygi žmogaus veiklos įtaka energijos sąnaudoms.

Todėl išteklių energijos balansas sudaromas iš savitųjų sąnaudų, kad vidaus ir išorės klimatiniai duomenys būtų eliminuojami ir nagrinėjami tik pastato energines savybes nusakantys rodikliai. Šiam tikslui abi balanso lygties pusės dalijamos iš dienolaipsnių charakteristikos.

$$\sum Q_{H,f} = (t_{int,f} - t_{ext,f})z_f(\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j) - \eta_T(Q_P - \eta_E Q_E - Q_S) - \sum \eta_{R,k} Q_{R,k} + \sum Q_{L,k} : (t_{int,f} - t_{ext,f})z_f \quad (2.2)$$

Gaunamas toks galutinis išteklių balansas:

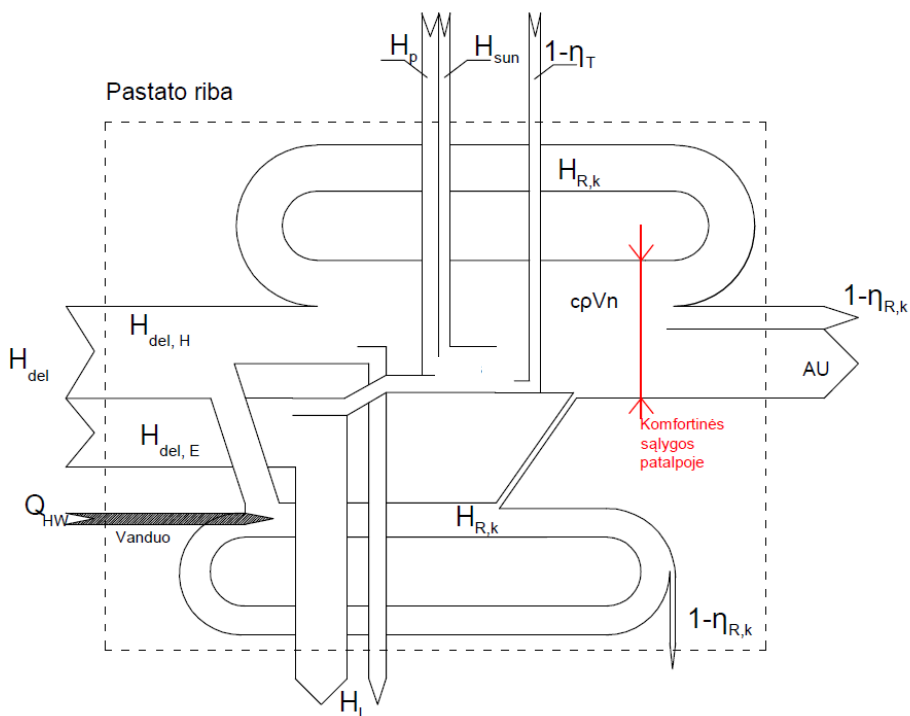
$$\sum H_{del} = (\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j) - \eta_T(H_P + \eta_E H_E + H_S) - \sum \eta_{R,k} H_{R,k} + \sum H_{L,k} \quad (2.3)$$

čia H_{del} – savitosios išteklių sąnaudos, W/K; $(\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j)$ – savitieji šilumos nuostoliai W/K; η_T – priteklių panaudojimo koeficientas priklausantis nuo vidaus temperatūros ir sistemų kontrolės priemonių netobulumo; H_P – šilumos pritekiai nuo žmonių, W/K η_E – priteklių nuo elektros prietaisų panaudojimo koeficientas; H_E – savitosios elektros sąnaudos, W; H_S – pritekiai nuo saulės, W/K; $\eta_{R,k}$ – šilumogražos koeficientas; $H_{R,k}$ – savitoji sugrąžintoji šiluma iš vedinimo ir nuotekų sistemų, W/K; H_L – inžinerinių sistemų šilumos nuostoliai, W/K.

Grįžtant prie koncepcijos, kad tikslas yra užtikrinti komforto sąlygas, balanso lygtį geriau rašyti „bottom up“ metodu, pradedant nuo galutinio vartotojo (Fleiter *et al.* 2011). Balanso tikslas ir rezultatas yra šilumos srauto $(\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j)$ formuojama oro ir paviršių temperatūra patalpoje. Taigi pagal šį principą perrašoma balanso lygtis (2.3):

$$\sum A_i u_i + c\rho \sum V_j n_j = \sum H_{del} + \eta_T(H_P + \eta_E H_E + H_S) + \sum \eta_{R,k} H_{R,k} - \sum H_{L,k} \quad (2.4)$$

Išteklių srautai ir balanso principas vaizduojamas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Išteklių energijos balanso diagrama

Fig. 2.3. Diagram of energy balance of resources

Norint detaliau pateikti išteklių kompleksiškumą 2.1 lentelėje aprašyti įeinantys ir išeinantys iš pastato ištekliai kiekviename balanso dėmenyje.

2.1 lentelė. Įeinantys ir išeinantys ištekliai šilumos balanse

Table 2.1. Ingoing and outgoing resources in the heat balance

Dėmuo	Įeinantys ištekliai	Išeinantys ištekliai
H_{del}	Šiluma, elektra, vanduo	-
$(\sum A_i u_i + c_p \sum V_j n_j)$	-	šiluma
H_p	šiluma	šiluma
H_E	elektra	šiluma
H_{SUN}	šiluma	šiluma
$H_{R,k}$	Šiluma (karštas vanduo)	Šiluma (karštas vanduo)
H_L	Šiluma elektra, vanduo	Šiluma, elektra, vanduo

Tiekiamos energijos srautas yra dviejų tipų: energija (šiluma ir elektra) ir vanduo. Elektros srautas turi du kelius. Vienas iš jų yra elektra suvartojama apšvietimui, elektros ir pagalbiniais prietaisams (auxiliary appliances – siurbiai ir ventiliatoriai). Balansas yra paremtas šilumos srautų analize, todėl šilumos srauto atžvilgiu kai šiluma (šiuo atveju elektros energija virtusi šiluma) yra nepanaudota patalpų šildymui, ji įvertinama kaip nuostoliai (H_L). Panaudota patalpų šildymui šiluma išsiskirianti nuo elektros prietaisų vertinama kaip šilumos pritekiai nuo elektros prietaisų (H_E). Toks šilumos gautos nuo elektros prietaisų išskaidymas yra reikalingas elektros energijos suvartojimo netolygumui išlyginti, kai H charakteristika išskaičiuojama remiantis ilgesnio laikotarpio suvartojimų vidurkiu.

Vanduo, patenkantis į pastatą 10–12 °C temperatūros, vadinamas šaltu vandeniu. Pastate vanduo pašildomas iki 50–55 °C temperatūros (buitinis karštas vanduo). Dalis šilumos, suteiktos karštam vandeniui ruošti, lieka pastate kaip karšto vandens sistemos nuostoliai (bet nuostoliai tik karšto vandens sistemos atžvilgiu). Didžioji dalis šilumos, suteiktos karštam vandeniui, prarandama (pastato ribų atžvilgiu) su nuotekomis. Tačiau šiluma, esanti nuotekų sistemoje, gali būti panaudota šilumogrąžiu naujo vandens pašildymui ($H_{R,k}$). Tokiu atveju karšto vandens sistemos nuostoliai (pastato atžvilgiu) sudaro tik šilumogrąžos įrenginio nesugrąžinamą dalį.

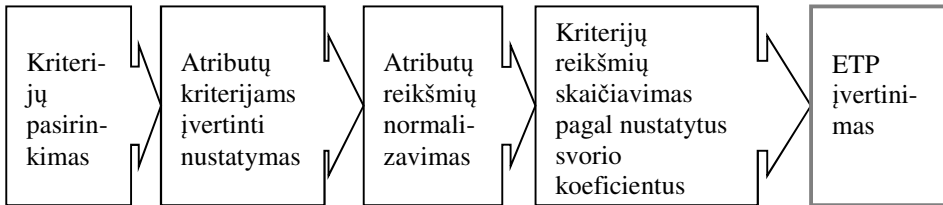
Pastatui tiekiamą šilumą vartojama karštam vandeniui ruošti, patalpoms šildyti ir dalis virsta šilumos nuostoliais sistemoje. Komforto užtikrinimo patalpose šilumos srautas turi 2 komponentus: šilumos nuostoliai (AU) ir oro kaita ($c_p V n$).

Pateiktoji balanso lygtis ir srautų diagrama sudaryta pastato energinių savybių valdymo modelio savitųjų nuostolių analizei atlikti. Čia aptartas detalus pritekčių ir atskirų šilumos srautų išskaidymas leis įvertinti ETP energinį efektyvumą ir šilumogrąžos panaudojimo galimybes, kartu užtikrinant, kad po modernizacijos patalpose bus komfortinės sąlygos.

2.3. Darnumo kriterijų medis

Pastatų atnaujinimo daugiatisliam (daugiakriteriam) vertinimui, kai naudojami priešingo tikslo kriterijai, reikalinga aiški veiksmų seka. Kriterijų ir juos išreiškiančių atributų pasirinkimas nėra pakankama informacija sprendimų priėmimo ar paramos sistemai. Kiekvienas kriterijų išreiškiantis atributas turi skirtingus matavimo vienetų, skirtingas tikslo funkcijas, todėl reikalingas atributų normalizavimas (Kaklauskas *et al.* 2005).

Kriterijus galima išskirti suteikiant skirtingus svorio koeficientus, arba, norint įvertinti tik kažkuriuo vienu aspektu, pasirinkti tik dalį kriterijų. Veiksmų seka, kuri naudojama PESDVM, pateikta 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Veiksmų seka energijos taupymo priemonėms įvertinti

Fig. 2.4. Sequence of operations for energy efficiency measures evaluation

Kriterijų pasirinkimas, kaip ir jų svorio koeficientų nustatymas, priklauso nuo to, kokio rezultato tikisi sprendimų priėmėjas (Alanne 2004). Skirtingų svorio koeficientų nustatymas naudojamas atskirų kriterijų prioriteto suteikimui.

2.3.1 poskyryje detaliau pateikiamas kriterijų ir juos išreiškiančių atributų, naudojamų PESDV modelyje vertinant atskiras ETP.

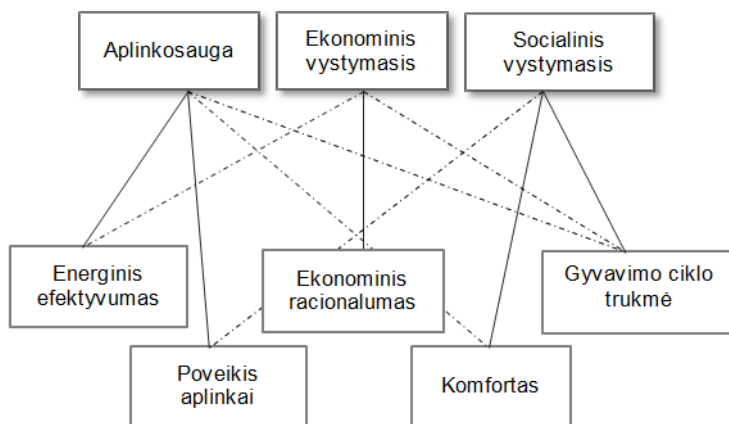
2.3.1. Darnaus vertinimo kriterijai

Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelyje pasirinkta priemonės vertinti remiantis darnaus vystymosi koncepcijos principais.

Darnaus vystymosi koncepcijos komponentams išreikšti buvo pasirinkta penkių kriterijų vertinimo sistema. Remiantis mokslininkų naudojamais pastatų atnaujinimo vertinimo kriterijais buvo atrinkti penki kriterijai, priklausantys trims darnaus vystymosi koncepcijos komponentams, tai – energinis efektyvumas (EE), poveikis aplinkai (PA), ekonominis racionalumas (ER), komfortas (K) ir pastato gyvavimo ciklo trukmė (GCT). Šie penki kriterijai (2.5 pav.) atspindi tiesioginę komponento sąsają (pavaizduota ištisine linija) ir netiesiogines kitų komponentų sąsajas (pavaizduota punktyrine linija).

Pateiktoje scheme matyti, kad kriterijus „Gyvavimo ciklo trukmė“ yra „darniausias“, turi tris sąsajų linijas, nes gali apimti ir aplinkosaugos ir ekonominio ir socialinio vystymosi komponentus. Pastato efektyvaus naudojimo ciklo pailginimas sudaro sąlygas naudotis kokybišku pastatu, kuriame užtikrinamos vartotojui reikalingos gyvenimo arba darbo sąlygos, tai skatina socialinį vystymąsi. Kokybiška pastato eksploatacija sumažina pastato naudojimo kaštus, taip gaunama ekonominė nauda. Efektyvesnis gamtinių išteklių vartojimas mažina aplinkos taršą, t. y. stiprina aplinkos apsaugą. Tačiau vertinant ETP visapusiškai vien tik pastato gyvavimo trukmės kriterijaus

nepakanka. Vertinant visapusiškai turėtų būti atskirai vertinamas energinis efektyvumas, poveikis aplinkai, ekonominis racionalumas ir komfortas. O kiekvienam kriterijui išreikšti būtina nustatyti jį apibūdinančius atributus.



2.5 pav. Darnaus vystymosi komponentų sąsaja su pasirinktais penkiais kriterijais
Fig. 2.5. Coherence of sustainable development components with five defined criteria

EE kriterijus pirmiausia tenkina darnaus vystymosi koncepcijos principus (Užšilaitytė Martinaitis 2010, Chantrelle *et al.* 2011, Risholt *et al.* 2013, Xu Chan 2013) ir dažniausiai apibrėžiamas kaip sutaupyta energija. Sutaupyta energija yra skirtumas metinių energijos suvartojimų (perskaičiuotų norminiams metams) prieš ir po renovacijos. Sutaupyta energija gali būti skirtingos formos (elektra arba šiluma), todėl norint įvertinti sutaupyta energiją universaliai, turėtų būti atliktas perskaičiavimas į pirminę energiją. Pirminės energijos sutaupymas yra universalesnis EE atributas, nes įvertina ne tik sutaupyta energiją, bet ir atsinaujinančios energijos panaudojimą.

Sutaupyta energija yra skaičiuojama, kai energetinės paslaugos suteikiamos tinkamai ir komforto sąlygos yra tenkinamos pastato naudojimo metu. Energija gali būti taupoma keičiant vidaus patalpų oro parametrus (temperatūros, oro kaitos), kai pastatas nėra naudojamas. Dauguma viešosios paskirties pastatų nenaudojami visą parą (24 valandas), todėl galima sutaupyti energijos nakties ir savaitgalių metu.

Dar vienas atributas, apibūdinantis EE – šiluminės galios pokytis. Šis atributas išryškina kompleksinės renovacijos naudą ir kelių priemonių pasirinkimą vienu metu. Pavyzdžiui, sienų šiltinimas atskirai nesumažins šilumos šaltinio galios, jeigu tuo pačiu metu nebus atlikta šilumos punkto ar katilo renovacija.

Pirminės energijos sutaupymas ir šiluminės galios sumažinimas yra du atributai, kurie kartu apibūdina EE kriterijų ir įvertina ETP darnaus vystymosi koncepcijos atžvilgiu įvertindami ir suvartojamos pirminės energijos ir kiekį ir priemonių kompleksiskumą.

Vienas iš dažniausiai naudojamų darnumo kriterijų yra poveikis aplinkai PA (Užšilaitytė Martinaitis 2010, Chantrelle *et al.* 2011, Risholt *et al.* 2013). PA gali būti išreikštas kaip poveikis klimato kaitai (vienetai – kg CO₂ ekvivalento), ozono sluoksnio plonėjimas, rūgštėjimas ir kitais teršalais, išskirtais į orą (Blom *et al.* 2010). Dažniausiai vertinamas poveikis klimato kaitai, kuris išreiškiamas išskirtų CO₂ dujų ekvivalentų skaičiavimu. Tačiau renovacijos poveikis aplinkai yra dvejopas. Viena vertus, mažinant energijos suvartojimą sumažinamas teršalų išsiskyrimas. Kita vertus, priemonių diegimas prisideda prie taršos didinimo gaminant ir transportuojant statybines medžiagas, pačios rekonstrukcijos metu. PA kriterijus gali būti išreikštas šiais dviem atributais (sutaupyta tarša ir išskirtais teršalais renovacijos proceso metu) arba sutaupytos ir išskirtos taršos santykiu. Šis santykis įvertina ETP poveikį aplinkai visapusiškai, taigi vienu atributu įvertinama ir nauda, ir žala aplinkai. Vieno atributo naudojimas palengvina skaičiavimo procesą sprendimų priėmimui ir yra patogesnis naudoti.

Ekonominio racionalumo kriterijus ER tiesiogiai vertina vieną iš DV koncepcijos komponentų – ekonominį vystymąsi. Dažniausiai naudojami ER atributai – atsipirkimo laikas, grynoji dabartinė vertė (GDV) ir vidinė grąžos norma (Martinaitis *et al.* 2004) – atspindi tik finansinę pastatų atnaujinimo naudą. Grynoji dabartinė vertė ir vidinė grąžos norma rodo pinigų vertę laike. Dažniausiai abu šie atributai naudojami kartu, bet pinigų vertei laike išreikšti pakanka vieno iš jų. GDV yra informatyvesnė, kai pinigų srautai nėra vienodi kiekvienais metais (Osborne 2010). Taigi ji geriau atspindi pinigų srauto vertę laike, kai per vertinamąjį laikotarpį yra reikalingos papildomos investicijos ETP įgyvendinti.

Atsipirkimo laikas gali būti paprastasis ir tikrasis. Tikrasis atsipirkimo laikas atspindi pinigų nuvertėjimą per laiką, yra objektyvesnis tuo atveju kai atsipirkimo laikas yra ilgesnis nei vieni metai. Pastatų atnaujinimo planavimui yra labai svarbus pradinių investicijų poreikis. Šis atributas leidžia priemones susikirstyti į mažų ir didelių investicijų reikalaujančias ETP.

Pastatų atnaujinimo nauda taip pat gali būti išreikšta sutaupytos energijos kaina (SEK) (Martinaitis *et al.* 2004, 2007). Šis atributas leidžia palyginti ETP diegimą su situacija, kai nediegiamos jokios priemonės. Jeigu SEK vertė yra didesnė už perkamos energijos kainą, tai rodo, kad naudingiau tos priemonės nediegti, nes pirkti energiją yra pigiau. SEK yra apskaičiuojama investicijų ir diskontuotų sutaupymų per priemonės gyvavimo laiką santykiu.

ETP diegimas, ypač pastato apvalkalo atnaujinimas, taip pat didina ir pastato vertę. Pastato elemento būklės atkūrimas gali būti vertinamas pastato

elemento būklės atkūrimo koeficientu. Šis koeficientas priklauso nuo elemento gyvavimo laiko ir nuo esamo elemento amžiaus (Martinaitis *et al.* 2004). Šis rodiklis keičiasi kiekvienais metais, todėl tikslinga naudoti atliekant nuolatinį pastato vertinimą. Pastato vertės padidėjimas apskaičiuojamas pastato elemento atstatymo koeficientą dauginant iš esamos pastato vertės ir to elemento svorio koeficiento viso pastato atžvilgiu. Šis atributas įvertina ir teikia pirmenybę didelių investicijų reikalaujančioms ETP, tačiau visų pirma toms, kurios privalomos nusidėvėjusio pastato elemento atstatymui (Užšilaitytė Martinaitis 2010).

Atlikta ER atributų analizė rodo, kad siekiant visapusiškai įvertinti ekonominę ir finansinę naudą energijos taupymo priemonės turi būti vertinamos ne vien tik tikroju atsipirkimo laiku, GDV ir pradinėmis investicijomis, bet ir sutaupytos energijos kaina, taip pat turėtų būti įvertintas pastato vertės padidėjimas.

Kompleksinis ir darnus ETP vertinimas dažniausiai reikalauja ir reikiamo komforto lygio užtikrinimo. Komforto terminą mokslininkai traktuoja skirtingai. Dažniausiai naudojami kriterijai patalpų kokybei įvertinti yra įvardijami kaip šiluminis komfortas (Djuric *et al.* 2007, Sourbron Helsen 2011, Chantrelle *et al.* 2011, Griego *et al.* 2012) arba patalpų oro kokybė (*indoor environmental quality – IEQ*) (Juan *et al.* 2010, Frontczak *et al.* 2012, Brown *et al.* 2013). Šiluminis komfortas įvertinamas tik šiluminėmis vidaus patalpų charakteristikomis, tačiau atlikti tyrimai rodo, kad žmonės skundžiasi ne tik netinkama oro temperatūra, bet ir kitais komforto veiksniais, oro kokybė yra lygiai taip pat svarbi (Frontczak *et al.* 2012, Valančius Jurelionis 2012).

Visuminis komfortas apima fizinį ir asmeninį komfortą. Fizinio komforto, apimančio šiluminį komfortą, oro kokybę, akustiką ir apšvietimą, parametrai apibrėžiami valstybių teisiniuose reglamentuose ir gali būti įvertinti objektyviai. Asmeninis komfortas priklauso nuo žmogaus fizinių ir asmeninių savybių. Taigi norint užtikrinti visuminį komfortą, neužtenka vien tik nustatytų parametrų palaikymo, būtina atsižvelgti ir sudaryti sąlygas žmogui pačiam reguliuoti komfortą užtikrinančius parametrus. Vertinant ETP komforto kriterijus gali tik įvertinti galimybę užtikrinti parametrus arba ne – sprendimą priimti, atsakant į dvinarį klausimą (taip/ne).

Įtaka pastato gyvavimo ciklo trukmei taip pat turėtų būti vertinama kaip darnumo kriterijus (Risholt *et al.* 2013). Netiesiogiai pastato gyvavimo trukmė, kurią galima išreikšti efektyvaus naudojimo trukme, gali būti ir energetiniu, aplinkosauginiu ar ekonominiu kriterijumi. Vis dėlto, norint apskaičiuoti ETP poveikį pastato gyvavimo trukmei, turėtų būti vertinamas pastato nusidėvėjimas ir ETP poveikis tam nusidėvėjimui sumažinti (Užšilaitytė *et al.* 2010). Remiantis (Užšilaitytė Martinaitis 2010) rekomenduojamas pastatų atnaujinimo periodiškumas 20 m.

Pastato gyvavimo ciklo trukmė įvertinama pastato gyvavimo ciklo analizės (GCA) metodu, kai nagrinėjamos trys pastato gyvavimo fazės: sukūrimo, naudojimo ir sunaikinimo/perdirbimo. ETP vertinimas GCA metodu jau buvo nagrinėjamas (Rogoža 2013).

2.3.2. Darnumo kriterijų medis

Remiantis penkiais darnumo kriterijais, buvo sudarytas bendrojo darnumo kriterijaus (BDK) medis, kurio kriterijai nusakomi atributais ir tikslo funkcijomis. Bendrojo darnumo kriterijaus medis pateiktas 2.6 paveiksle. Kriterijų medis turi „kamieną“ – bendrąjį darnumo kriterijų, kurio reikšmė yra informacija sprendimų priėmėjui. Penkios „šakos“ yra atskiri kriterijai. Kiekvieną iš kriterijų nusako skirtingi atributai, išreiškiami skirtingais matavimo vienetais, todėl, kaip ir atliekant bet kokią kitą daugiakriterį vertinimą, normalizuojamos kriterijų ir atributų vertės.

Šiam vertinimui buvo pasirinktas populiariausias ir plačiausiai taikomas daugiakriterio vertinimo atributų normalizavimo metodas – SAW (*Simple Additive Weighting*) metodas (Abdelhamid 2012, Chen 2012). Šis metodas grindžiamas analizuojamų alternatyvų verčių palyginimu su geriausiu rezultatu ir nuotolio nuo geriausios vertės įvertinimu. Kai tikslo funkcija yra maksimizavimas, tai normalizuotoji vertė apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$z_i = \frac{x_i}{\max_i x_i} \quad (2.5)$$

čia x_i atributo i reikšmė.

Kai tikslo funkcija yra minimizavimas, tai normalizuotoji vertė apskaičiuojama pagal šią formulę:

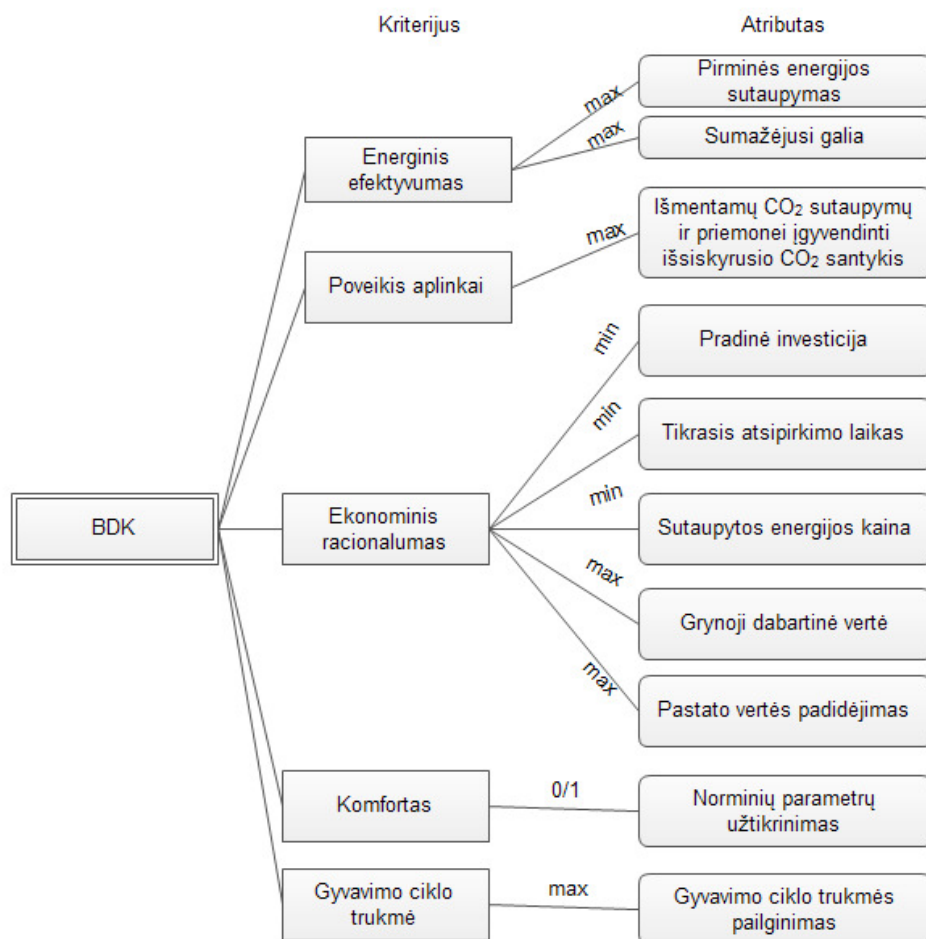
$$z_i = \frac{\min_i x_i}{x_i} \quad (2.6)$$

Bendrasis darnumo kriterijus apskaičiuojamas pagal tiesinę funkciją:

$$\text{BDK}_i(z_i, w_i) = \sum (z_i \times w_i) \quad (2.7)$$

čia w_i – atributo x_i svorio koeficientas.

Normalizuotosios atributų vertės sumuojamos ir nustatoma kiekvieno kriterijaus, sudarančio BDK, vertė.



2.6 pav. Bendro darnumo kriterijaus medis su kriterijais, atributais ir atributų optimizavimo funkcijomis

Fig. 2.6. General sustainability criteria tree with criteria, its attributes and functions of optimization

Kriterijų svorio koeficientai gali būti vienodi arba kiekvienam kriterijui gali būti suteiktas skirtingas svorio koeficientas.

Svorio koeficientų reitingavimas ir svarbiausių kriterijų nustatymas priklauso nuo politinių, socialinių, psichologinių veiksnių, turinčių įtakos sprendimų priėmimui. Tai yra uždavinys sprendimų priėmėjui.

BDK paskirtis yra atskirų priemonių ir suformuotų paketų vertinimo išraiška pastato energinių savybių darnaus valdymo modelyje. BDK reikšmė paskirstymo sprendimų medžio metodu naudojama priemonėms skirstyti į pagrindinį ir papildomų priemonių paketus.

2.4. Žmonių elgesio įtakos pastato energijos suvartojimui įvertinimo metodas

Kiekviena valstybė turi nustačiusi kitimo ribas patalpų mikroklimato parametrams patalpose. Bet dažnai kai mikroklimato parametrai patalpoje atitinka normų nustatytuosius (Lietuvoje, kai atitinka (LR Sveikatos apsaugos Ministerija 2009)) žmonės (daugiau nei 20%) nesijaučia komfortiškai (Muhič Butala 2004, Frontczak Wargocki 2011).

Vienus fizinio komforto pastate veiksnius galima kontroliuoti ir reguliuoti, kitiems koreguoti reikalinga pastato rekonstrukcija. Akustinio komforto neužtikrinsi, jeigu pastate nėra garso izoliacijos. Ir dažniausiai šis veiksnys administraciniuose pastatuose yra pastovus. Apšviestumas gali būti koreguojamas vietiniais šviesos šaltiniais, bet paprastai vieną kartą pakoregavus apšvietimo įrenginius, paros režimą, šis veiksnys ilgą laiką atitinka komfortinius parametrus. Šiluminis komfortas kinta nuo klimatinio pokyčių ir nuo šildymo sistemos reguliavimo inertiškumo. Oro kokybė yra pats nepastoviausias veiksnys, kintantis nuolat – tai priklauso nuo žmonių kiekio ir vėdinimo sistemos. Taigi, norint racionaliai nuolat valdyti pastato energines savybes, būtina informacija apie žmogaus savijautą patalpoje ir jo veiklą.

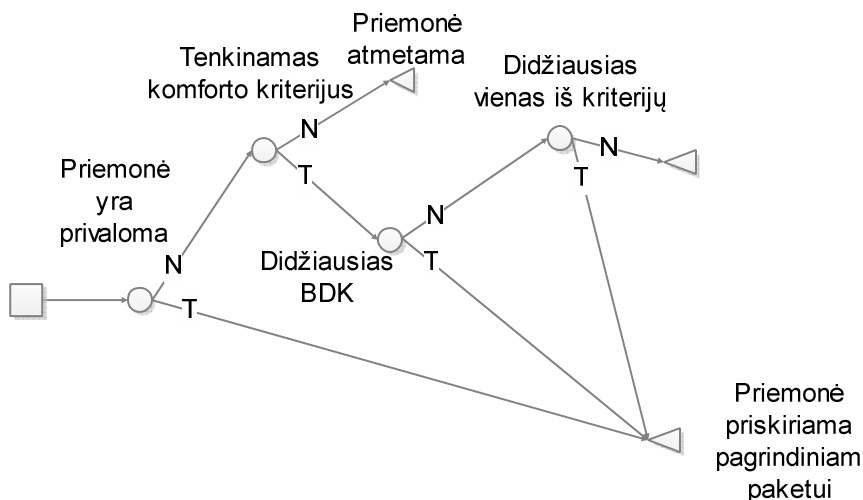
Pastato energijos poreikis apskaičiuojamas įvertinus išorės klimatinės sąlygas, pastato konstrukcijų šilumos laidumą, energetinių sistemų efektyvumą ir žmonių buvimo įtaką. Žmogaus įtaka energijos suvartojimui gali būti aktyvi ir pasyvi. Pasyvi įtaka – tai žmogaus buvimo sukelti šilumos pritėkiai. Aktyvi įtaka – tai žmogaus veikla, tiesiogiai lemianti energijos poreikius: elektros prietaisų naudojimas ir mikroklimato parametrų valdymas patalpoje esančiomis priemonėmis (termostatais ir pan.). Elektros prietaisų naudojimas dažniausiai tiesiogiai susijęs su veikla, vykdoma pastate, ir tik iš dalies su pačiu žmogumi, jeigu prietaisai naudojami neefektyviai. Patalpos mikroklimato parametrų valdymas patalpoje esančiomis priemonėmis gali būti visiškai automatizuotas, nesudarant galimybės žmogui pačiam reguliuoti šilumos ir oro kiekių, patenkančių į patalpą. Bet dažniausiai paliekama galimybė reguliuoti individualiai. Šilumos kiekis reguliuojamas termostatais, esančiais prie šildymo prietaisų. Oro kiekis mechaninėje vėdinimo sistemoje reguliuojamas tam skirtais vožtuvais. Taip pat esant galimybei motyvuotas žmogus gali keisti patalpos mikroklimato parametrus pagal savo komforto poreikį. Ankstesniame skyriuje

pateikti metdai skirti objektyviems komforto kriterijams įvertinti, o tiesioginis žmogaus reguliavimas pagal jo individualius poreikius leidžia efektyviau valdyti pastatą.

2.5. Sprendimų medis energijos taupymo priemonių optimaliems paketams formuoti

Kai atskiros ETP priemonės yra įvertintos, kitas uždavinys sprendimų priėmėjui yra ETP paketų formavimas. Vienas iš būdų yra visų įmanomų kombinacijų konstravimas ir jų vertinimas. Pavyzdžiui iš penkių ETP formaliai galima sukonstruoti 31 kombinaciją, o iš 10 – 1023 kombinacijas. Šią problemą gali išspręsti paketų formavimo optimizavimas.

Nuoseklus prioriteto suteikimas ir ETP paskirstymas į pagrindines ir papildomas priemones gali optimizuoti paketų formavimą. Pagrindinių priemonių parinkimui buvo skirtas paskirstymo sprendimų medis, pateiktas 2.7 paveiksle. Optimizavimo seka prasideda nuo privalomųjų priemonių išskyrimo. Privalomosios priemonės yra nustatomos per pastato vertinimo stadiją, algoritmo pradžioje.

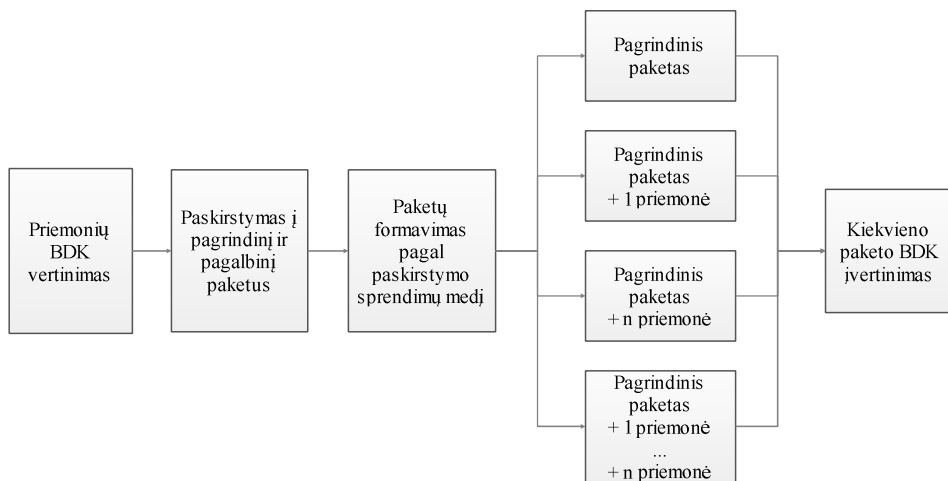


2.7 pav. Energijos taupymo priemonių paskirstymo sprendimų medis paketų formavimui

Fig. 2.7. Distribution decision tree of energy efficiency measures packet formation

Priemonių skirstymas pradedamas komforto kriterijumi. Priemonės, netenkinančios komforto reikalavimų, yra atmetamos. Tada į pagrindinį paketą atrenkama priemonė, kurios BDK vertė didžiausia. Taip pagrindiniam paketui priskiriamos priemonės, kurių bent vienas iš kriterijų turi maksimalią vertę.

Paketų formavimo seka pateikta 2.8 paveiksle. Pagrindinį paketą sudaro privalomos ir darnumo požiūriu geriausios priemonės. Likusios priemonės iš eilės pridamos prie pagrindinio paketo ir formuojami kiti paketai, kaip parodyta 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Energijos taupymo priemonių paketų formavimo seka
Fig. 2.8. Sequence of energy efficiency measures packets formation

Toks paketų formavimas skirtas paketų skaičiui optimizuoti. Trijų žingsnių seka mažiausiai tris priemones priskiria pagrindiniam paketui. Taigi iš penkių priemonių atsitiktiniu būdu galima suformuoti 31 paketą, o naudojant paskirstymo medį suformuojami tik 4 paketai. Esant didesniai priemonių skaičiui optimizavimo įtaka dar akivaizdesnė.

2.6. Paskirstymo sprendimų medžio paketų formavimui bandymas

Sudaryto paskirstymo sprendimų medžio veikimo principui ir paketų optimizavimo naudai įvertinti buvo atliktas bandymas. Buvo analizuojamas konkretus atvejis. Atvejo analizei pasirinktas pastatas, pastatytas prie 30 metų Birštone, Lietuvoje. Jis nebuvo kompleksiskai atnaujintas, tik pakeisti langai

neįrengiant mechaninio vėdinimo. Faktinės metinės šilumos sąnaudos, perskaičiuotos norminiams metams, yra 162 kWh/m^2 . Analizei pasirinktos 5 pasiūlytos priemonės: išorinių sienų šiltinimas (ETP1), stogo šiltinimas (ETP2), šilumos punkto keitimas (ETP3), šildymo sistemos rekonstrukcija (ETP4), mechaninio vėdinimo su šilumogrąža įrengimas (ETP5).

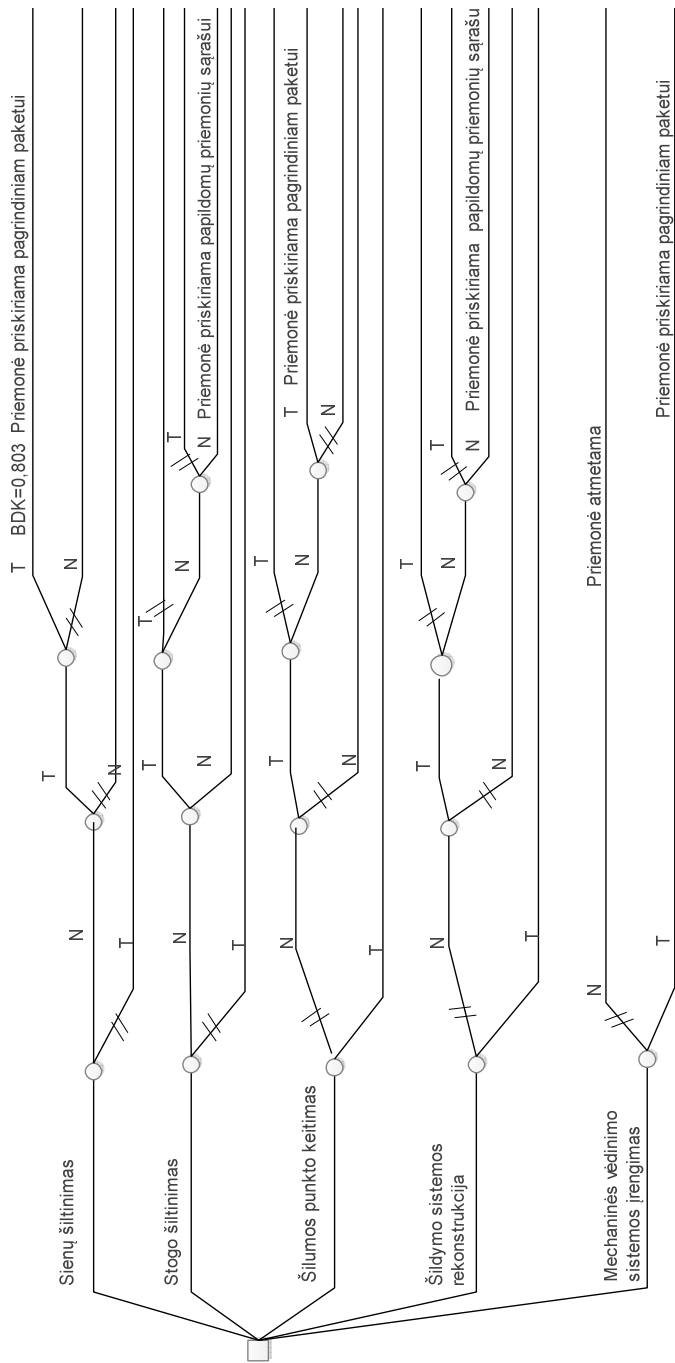
BDK apskaičiuotas kiekvienai priemonei atskirai pagal 2.6 paveiksle pateiktą BDK medį. Naudojant PSM buvo suformuotas pagrindinis priemonių paketas. 2.9 paveiksle pavaizduotas šio atvejo PSM detalizuojant kiekvieną šaką ir mazgą.

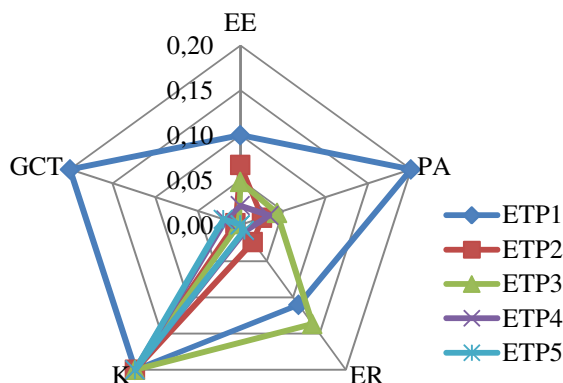
Suformuotas pagrindinis paketas su trimis priemonėmis: privalomu mechaniniu vėdinimu, sienų šiltinimu, nes šios ETP yra didžiausia BDK reikšmė, ir šilumos punkto keitimu, nes šios ETP vieno iš kriterijų (šiuo atveju EK) reikšmė yra didžiausia. Kiti paketai formuojami prie pagrindinio paketo pridedant likusias ETP (šiuo atveju šildymo sistemos modernizaciją ir stogo šiltinimą). Pagal 2.8 paveiksle pateiktą seką suformuojami 4 priemonių paketai. Taigi vietoj galimų 31 alternatyvių paketų, sprendimų priėmėjui reikia nagrinėti tik 4 paketus.

Suformuoti paketai vertinami taip pat pagal 2.6 paveiksle pateiktą BDK medį. Tačiau vertinant paketus kiekvienos priemonės atributų reikšmės nesumuojamos aritmetiškai, o vertinama priemonių įtaka viena kitai. Pagrindiniai pokyčiai atsiranda energijos efektyvumo kriterijaus reikšmėje, nes vertinant priemones kompleksiskai atsiranda galimybė sumažinti bendrąją šilumos galią pastate. Taip pat svarbu įvertinti energijos sutaupymo įtaką diegiant kelias priemones vienu metu.

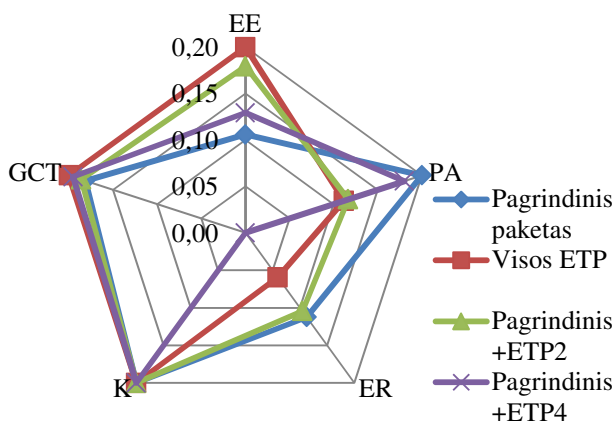
Atskirų priemonių ir suformuotų paketų kriterijų reikšmės pavaizduotos 2.10 ir 2.11 pav. Polinėse diagramose (*polar diagram*) pavaizduotos kiekvienos priemonės (kairėje) ir atskirų paketų (dešinėje) kriterijų vertės. Šių diagramų principas yra kuo didesnę plotą apibrėžia ETP kreivė, tuo didesnė yra BDK vertė. Taip pat jose patogų lyginti kiekvieno kriterijaus vertes.

Lyginant atskirų priemonių BDK vertes, akivaizdu, kad ETP1 (sienų šiltinimas) yra didžiausia reikšmė, o antra pagal apibrėžiamą plotą yra ETP3 (šilumos punkto keitimas). Diagramoje su paketų kriterijų reikšmėmis matyti, kad didžiausia BDK reikšmė yra paketo, kuriame įtrauktos visos numatytos priemonės. Palyginimui, paketų (2.10 pav. dešinė pusė) BDK reikšmės kinta nuo 0,672 iki 0,762, taigi skirtumas yra tik 12%. Atskirų priemonių BDK vertės yra tarp 0,227–0,803 reikšmių. Šis pavyzdys parodo, kad PSM suformavus tik keturis paketus, sprendimų priėmėjui reikia nagrinėti tik geriausiai įvertintus paketus, užtikrinančius komforto reikalavimus.





2.10 pav. Atskirų priemonių darnumo kriterijai
Fig. 2.10. Sustainability criteria of separate measures



2.11 pav. Suformuotų paketų darnumo kriterijai
Fig. 2.11. Sustainability criteria of formed packets

Paskirstymo sprendimų medžio panaudojimo pavyzdys puikiai iliustruoja paketų formavimo proceso optimizavimą, kai atrenkami tik naudingiausi darnumo požiūriu paketai. O bendrojo darnumo kriterijaus reikšmės leidžia priemones ir jų paketus įvertinti ne tik ekonominiu požiūriu, bet ir kompleksiškai: pagal naudą žmogaus gerovei, supančiai aplinkai, pastato būklei bei energinių išteklių tausojimui.

2.7. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio algoritmas

Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio koncepcija buvo realizuota integruojant darbe parengtus tikslingos struktūros energijos balanso lygtį, darnumo kriterijų sąranką ir jų vertinimo medį, žmonių elgesio įtakos vertinimą bei sprendimų medį energijos taupymo priedams formuoti. Darbe sukurtas pastato energinių savybių modelio algoritmas, skirtas viešiesiems pastatams ir jų energetiniams ištekliams efektyviau naudoti. Pirminėje stadijoje suvedami duomenys apie pastatą: vietovė, namo planas, orientacija, aukštingumas, atitvarų plotai, šiluminės charakteristikos, inžinerinių sistemų tipai, susisteminama ir papildoma pastato architektūrinė informacija. Taip pat suvedama informacija apie sąnaudas, apskaitos prietaisus, suvedami ir sisteminami turimi suvartojimo duomenys, informacija apie esamas patalpų komforto sąlygas (vidaus patalpų temperatūra, santykinė drėgmė, oro kokybė, apšviestumas).

Parengta ekspertinė sistema pastato energinių savybių valdymui, kuria įvertinamos pastato atnaujinimo ir efektyvesnio energetinių išteklių vartojimo galimybės.

Turint informaciją apie pastatą, faktiniai išteklių suvartojimai perskaičiuojami į savituosius nuostolius ir išskaidomi pagal anksčiau aprašytą balanso lygtį. Tolesnė algoritmo eiga pateikta 2.12 paveiksle.

Balanso lygties dedamosios, kad būtų paprasčiau jas analizuoti, suskirstytos pagal tai, nuo kokių parametrų jos priklauso ir kas jas gali paveikti.

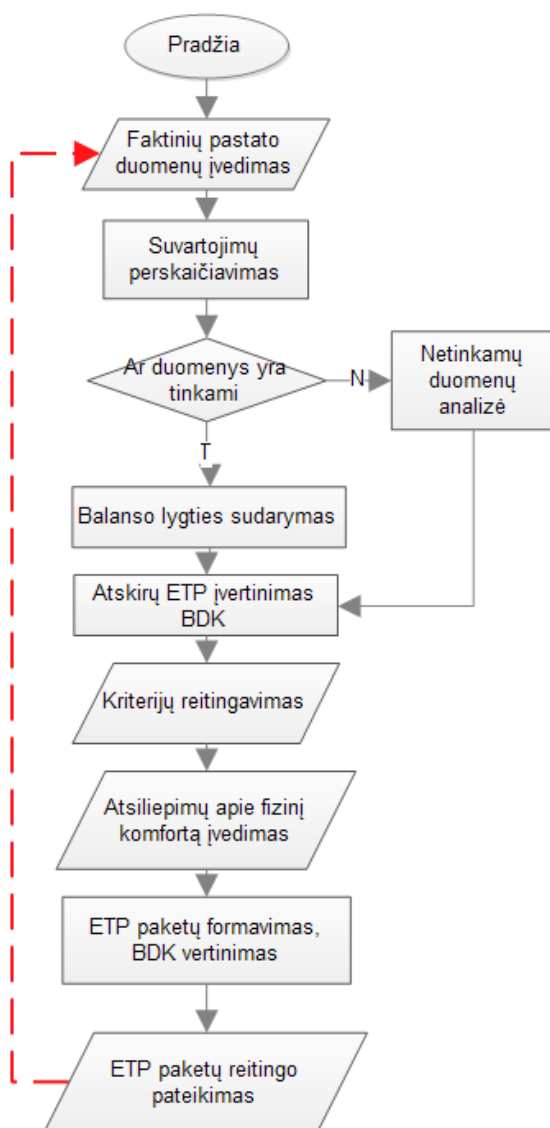
Sprendimų priėmimo algoritmas yra atliekamas pagal 2.5 poskyryje aprašytą procedūrą, kai įvertinamos ETP priemonės atskirai apskaičiuojant jų BDK, tada grupuojami paketai pagal paskirstymo sprendimų medį ir įvertinamas optimalus modernizavimo priemonių paketas. Algoritmas kartojamas nuolat, ir pasikeitus parametrams skaičiavimai atliekami iš naujo. Punktyrinė linija vaizduoja nuolatinį sistemos veikimą.

Visą algoritmą galima suskirstyti į 4 dalis:

1. Duomenų įvedimas, apdorojimas ir analizė.
2. ETP priemonių vertinimas.
3. Paketų sudarymas ir reitingavimas pagal BDK.
4. Pasiūlymų pateikimas.

Pirmoji algoritmo dalis yra skirta esamos duomenų analizei – tai periodiškai atnaujinamas detalus energijos vartojimo auditas.

Kriterijų reitingavimo dalis yra skirta įvesti papildomus apribojimus sprendimų priėmimui. (Pvz. galima įvesti maksimalią galimą investicijų sumą).



2.12 pav. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio algoritmas
Fig. 2.12. The algorithm of the model of sustainable management of building energy performance

Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio algoritmas sudarytas pritaikant jį ir kaip sprendimų priėmimo ar ekspertinę sistemą ir kartu, jis skirtas

nuolatiniam pastato valdymui ir stebėsenai bei atnaujinimo galimybių planavimui.

2.8. Antrojo skyriaus išvados

1. Parengta balanso lygtis ir sudaryta srautų diagrama pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio savitųjų nuostolių analizei atlikti. Balanso lygtis sudaryta savitųjų sąnaudų pagrindu, nes šių sąnaudų determinacijos koeficientas yra mažesnis (analizuojant šiame skyriuje pateiktą pavyzdį determinacijos koeficientas yra mažesnis beveik tris kartus) ir rodo sąnaudų neapibrėžtumą, o ne jų priklausymą nuo klimatinės sąlygų.
2. Detalus pritėkių ir atskirų šilumos srautų išskaidymas leidžia įvertinti energijos taupymo priemonių energinį efektyvumą ir šilumogrąžos panaudojimo galimybes.
3. Darnus ETP vertinimas gali būti atliktas tik taikant daugiau nei vieną kriterijų. Darnaus vertinimo kriterijų kompleksas turi apimti ir susidėti iš vertinimo įvairiais aspektais: energetikos, aplinkosaugos, ekonomikos, higienos ir statybos. Sudarytas kriterijų medis ETP darniam vertinimui, pagal kurį nustatomas priemonės ar paketo bendrasis darnumo kriterijus, įvertinantis energijos taupymą, poveikį aplinkai, ekonominį racionalumą, komfortą ir pastato gyvavimo trukmės pailginimą.
- 4.
5. Kriterijų svorių jautrumo analizė rodo, kad penkių kriterijų atveju nežymus kriterijų svorių skirtumas įtakos rezultatams neturi.
6. Sudarytas priemonių grupavimo algoritmas, paremtas nuosekliu sprendimų medžio metodo principu, supaprastina sprendimų priėmimo procedūrą. Jis ženkliai sumažina galimų paketų skaičių, atrinkdamas tik tuos, kurie užtikrina komforto sąlygas ir turi darnumo kriterijų reikšmes.
7. Sukurtas pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis yra nuolat veikianti ekspertinė sistema, kuri siūlo diegti energijos taupymo priemones, o jų įtaka pastatui ir aplinkai įvertinta bendruoju darnumo kriterijumi, skirta nuolatiniam pastato energinių savybių stebėjimui.

Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio taikymo rezultatų analizė

Siekiant patikrinti 2 skyriuje pateikto pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio pritaikomumą, jo poveikį pastato valdymo eigoje atlikta modelio veikimo analizė dviem pastatams.

Skyriaus tematika paskelbta 3 straipsniai: (Mikučionienė Martinaitis 2014, Mikučionienė *et al.* 2014a, 2014b).

3.1. Objektų modelio taikymui parinkimas

Pastatų nuolatinio valdymo modelio įdiegimas aktualiausias visuomeniniams pastatams. Jų vartotojai dažniausiai nėra pastato valdytojai ir jų įpročių keitimas skatinant efektyviau vartoti energiją yra svarbus ne tik pastato valdytojo, bet ir valstybės mastu.

Visuomeninio sektoriaus pastatų modernizavimas yra valstybės darnaus vystymosi politikos dalis, taip pat priemonė Europos Sąjungos direktyvų nuostatomis įgyvendinti.

Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis yra sukurtas visuomeniniams pastatams, neišskiriant jų funkcinės paskirties. Atvejo analizė buvo atlikta dviem skirtingų charakteristikų pastatams, tuo įrodant PESDVM universalumą.

3.1.1. Pastato A pirminių duomenų suvestinė

Pastatas A yra meno mokykla Birštono mieste, pastatyta 1972 m, 2 aukštų. Pastato plotas šildomas plotas 1195,93 m². Priimta vidutinė patalpų temperatūra šildymo sezono metu yra 16 °C. Pastatui šiluma tiekama iš miesto centrinių šilumos tinklų. Šilumos sąnaudų apskaita registruojama vieną kartą per mėnesį.

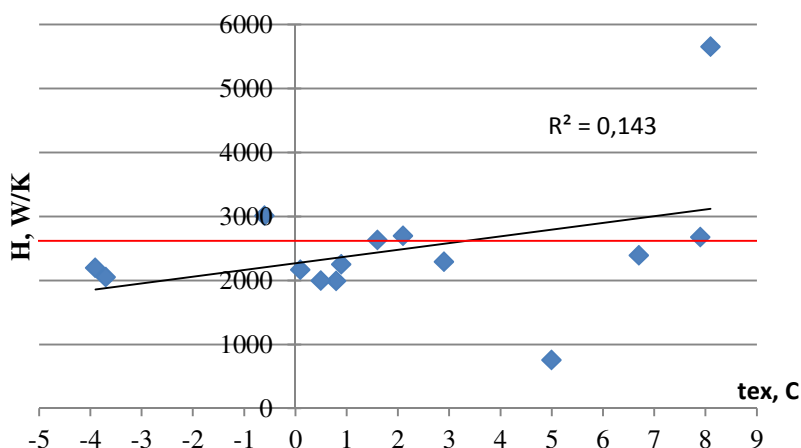
3.1 lentelė. Pastato A šiluminės charakteristikos

Table 3.1. Thermal characteristics of the building

Išorės atitvaros pavadinimas	Šilumos perdavimo koeficientas U W/(m ² K)	Išorės atitvaros plotas A , m ²	H , W/K	Dalis šiluminiame balanse
Išorinės sienos	1,2	759,4	911,28	0,35
Langai	1,6	337,24	539,58	0,21
Lauko durys su tambūru	0,8	8,39	6,71	0,00
Stogas	0,7	938,87	657,21	0,25
Pirmojo aukšto grindys	0,8	780,00	624,00	0,24
Dėl infiltracijos, natūralaus ir mechaninio vėdinimo			272,82	0,10
Savitieji nuostoliai			3011,61	
Pritėkiai nuo žmonių			-45,66	-0,02
Pritėkiai nuo elektros prietaisų			-182,63	-0,07
Pritėkiai nuo saulės			-164,76	-0,06
Savitieji nuostoliai			2618,56	1,00

Pastato atitvarų charakteristikos nustatytos remiantis pastate atliktų matavimų duomenimis.

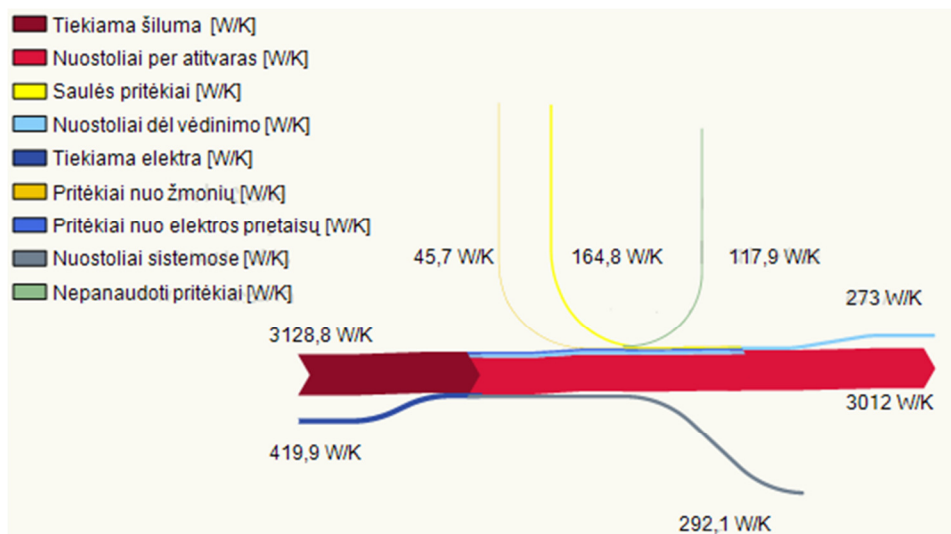
Pirminė pastato sąnaudų analizė atlikta remiantis pastato valdytojo pateiktais 2 metų mėnesio intervalo šilumos sąnaudų duomenimis ir vieno metų mėnesio intervalo elektros sąnaudų duomenimis. Šilumos sąnaudų analizė atlikta perskaičiavus sąnaudas į savituosius šilumos nuostolius, kaip pateikta 3.1 paveiksle.



3.1 pav. 14 mėnesių faktinės šilumos sąnaudos perskaičiuotos į savitąsias sąnaudas.
Raudona linija – savitieji šilumos nuostoliai

Fig. 3.1. Actual energy consumption of 14 months computed to specific consumption (divided by degreedays). Red line – specific heat losses

Pagal perskaičiuotas sąnaudas buvo sudarytas šilumos balansas, aprašytas 2 skyriuje. Jo rezultatas pateiktas 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Pastato A Šilumos balanso diagrama

Fig. 3.2. Heat balance diagram of building A

3.1.2. Pastato B pirminių duomenų suvestinė

Pastatas B yra administracinis pastatas Vilniaus mieste, pastatytas 2004 metais, 12 aukštų, turi PAVS sistemą. Pastato šildomas plotas yra 7194,36 m². Pastate yra nuomojami biurai, vidutinis pastato užimtumas 95%. Pasirinkta vidutinė patalpų temperatūra šildymo sezono metu yra 18 °C. Pastatui šiluma tiekama iš miesto centrinių šilumos tinklų. Nors pastate yra įrengta PAVS sistema, bet nėra galimybių sistemingai kaupti duomenis. Energijos sąnaudų analizė atlikta remiantis mėnesio duomenimis. Pastato šiluminės charakteristikos pateiktos 3.2 lentelėje. Karšto vandens suvartojimas pastate yra labai mažas, karštas vanduo ruošiamas vietiniuose elektriniuose šildytuvuose, todėl ir sąnaudų analizėje atskirai neišskiriamas.

3.2 lentelė. Pastato A šiluminės charakteristikos

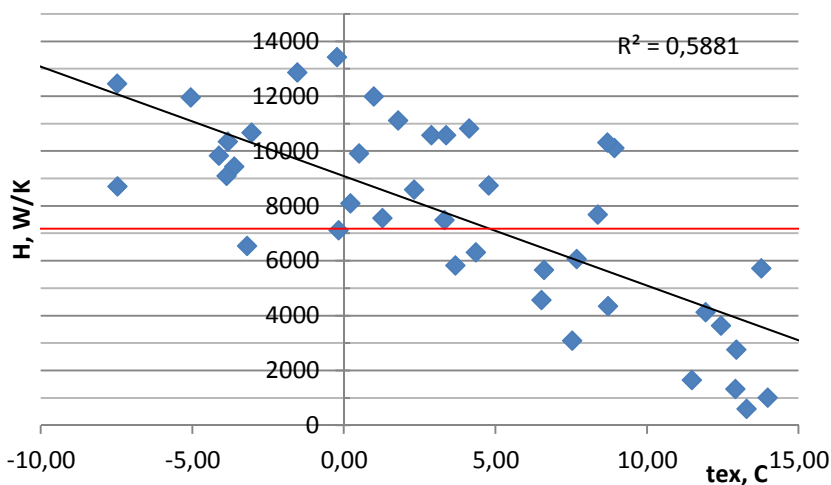
Table 3.2. Thermal characteristics of the building

Išorės atitvaros pavadinimas	Šilumos perdavimo koeficientas U W/(m ² K)	Išorės atitvaros plotas A , m ²	H , W/K	Dalis šiluminiame balanse
Išorinės sienos	0,49	3038	1489	0,16
Langai	1,262	2660	3357	0,36
Lauko durys	1,7	160,4	273	0,03
Sukamosios durys	5,5	15,6	86	0,01
Stogas	1,19	690	821	0,09
Pirmojo aukšto grindys	0,35	690,00	242	0,03
Nuostoliai dėl infiltracijos, natūralaus ir mechaninio vėdinimo			3131	0,33
Savitieji nuostoliai			9398	1,00
Pritėkiai nuo žmonių			300	
Pritėkiai nuo elektros prietaisų			1200	
Pritėkiai nuo saulės			1688	
Savitieji nuostoliai su pritėkiais			7166	

Pastato atitvarų charakteristikos nustatytos remiantis pastate atliktų matavimų duomenimis.

Pirminė pastato sąnaudų analizė atlikta remiantis pastato valdytojo pateiktais 5 metų mėnesio intervalo sąnaudų duomenimis (35 mėnesių). Šilumos

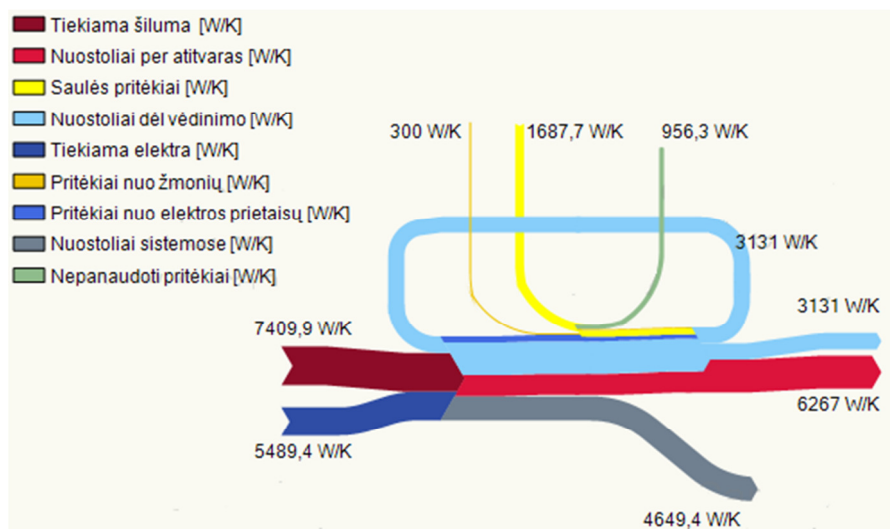
sąnaudų analizė atlikta perskaičiavus sąnaudas į savituosius šilumos nuostolius, kaip pateikta 3.3 paveiksle.



3.3 pav. 35 mėnesių faktinės šilumos sąnaudos perskaičiuotos į savitąsias sąnaudas.

Raudona linija – sąvitiesji vidutiniai šilumos nuostoliai

Fig. 3.3. Monthly actual energy consumption computed to specific consumption (divided by degreedays). Red line – specific heat losses



3.4 pav. Pastato B šilumos balanso diagrama

Fig. 3.4. Heat balance diagram of building B

Pagal perskaičiuotas sąnaudas buvo sudarytas šilumos balansas, aprašytas 2 skyriuje. Jo rezultatas pateiktas 3.4 paveiksle.

Šilumos balansą sudaro dviejų rūšių energija: šiluma ir elektra. Bet balanso pagrindas yra šiluma, todėl elektros suvartojimas įvedamas savitųjų elektros sąnaudų forma, o elektros dalis, panaudota ne šilumai išskirti (elektros prietaisams veikti, šviesai skleisti ir kita), balanse yra pateikiama kaip šilumos nuostoliai.

3.2. Energijos taupymo priemonių įvertinimas

Pagal 3.1 skyriuje pateiktas charakteristikas matyti, kad abiejų pastatų esamų atitvarų charakteristikos neatitinka šiuo metu galiojančių techninių reglamentų. Taip pat ES direktyva (Parlamento *et al.* 2012) reglamentuoja vis griežtėjančius reikalavimus pastatų atitvarų šiluminėms charakteristikoms, todėl numatomų priemonių sąraše yra visų atitvarų šiluminių charakteristikų gerinimas. Dėl technologijų pažangos, inžinerinių sistemų sprendiniai per paskutinį dešimtmetį patobulėjo ir atsirado daug efektyvesnių technologijų, todėl į ETP sąrašą įtraukiama šilumos punkto modernizacija, vėdinimo rekuperatorių įrengimas arba keitimas, apšvietimo sistemos keitimas.

Kadangi PESDV modelis apima ir energijos poreikių vadybą, tai yra numatytas vartotojų elgsenos keitimas siekiant sumažinti tiek šilumos, tiek elektros sąnaudas.

3.2.1. Prielaidos naudojamos energijos taupymo priemonėms įvertinti

Energinio efektyvumo atributams įvertinti naudojami pirminės energijos perskaičiavimo koeficientai ir CO₂ emisijų rodikliai yra parinkti pagal esamus miestų, kuriuose yra tiriamieji pastatai, duomenis, pateiktus STR 2.01.09:2012. Rodiklių vertės pateiktos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Prielaidos naudotos energijos gamybos rodikliams

Table 3.3. Assumptions for implementation of energy efficiency measures

Energijos gamybos būdas	Pirminės energijos perskaičiavimo rodiklis	CO ₂ emisijų rodikliai kgCO ₂ /kWh
AB „Birštono šiluma“	0,52	0,097
Elektros įvairių gamybos būdų vidurkis	2,8	0,6
Šilumos iš šilumos tinklų Lietuvos vidurkis	1,3	0,29

Sudarytas siūlomų priemonių katalogas, kurį sudaro 10 ETP tipų. Tačiau siūlomos priemonės pastatams parenkamos individualiai, pagal esamas pastato charakteristikas. Investicijos nustatytos įvertinus vidutinės rinkos kainas ir remiantis sustambintais rinkos rodikliais. Priemonių įgyvendinimo emisijų kiekis apskaičiuotas įvertinus emisijas medžiagoms pagaminti ir transporto taršą. Gyvavimo ciklo analizė atlikta 100 metų laikotarpiui, pagal Tarpvyriausybės specialistų grupės klimato kaitos klausimais nustatytą 100 metų modelį (GWP_{100}) (LST EN ISO 14044). Duomenys diegiamų priemonių CO_2 emisijoms įvertinti buvo generuojami SIMA PRO kompiuterine programa.

3.4 lentelė. Priemonių prielaidos energijos taupymo priemonių įdiegimui

Table 3.4. Assumptions for implementation of energy efficiency measures

ETP aprašymas	Elemento svorio koeficientas	Elemento efektyvaus naudojimo gyvavimo trukmė, m	Elemento gyvavimo trukmė
1. Sienų šiltinimas iki A+ klasės reikalavimų	0,35	30,00	100
2. Stogo šiltinimas iki A+ klasės reikalavimų	0,03	10,00	30
3. Trisluoksnių langų įrengimas	0,04-0,12	30,00	40
4. Tambūro įrengimas	0,00	0,00	40
5. Grindų ant grunto perdangos šiltinimas	0,01-0,06	65,00	100
6. Šilumos punkto modernizacija	0,03	15,00	15
7. Šildymo sistemos modernizacija su reguliavimo galimybėmis. Energiją taupanti elgsena	0-0,035	30,00	40
8. Vėdinimo sistemos su rekuperatoriais keitimas	0,035	30,00	40
9. Apšvietimo lempučių keitimas	0,02	10,00	10

Pastato elementų efektyvaus naudojimo gyvavimo trukmė nustatyta pagal (LST EN 15459:2008) ir (Užšilaitė 2010). Elementų svorio koeficientai pagal Užšilaitės disertacijoje atliktus apibendrinimus (Užšilaitė 2010). Pastato dalys ar elementai nėra vienodi pagal jų svarbą keliamiems reikalavimams ir jų funkcinei paskirčiai. Remiantis (Užšilaitė 2010) fizinė atskiro pastato

elemento dalis nustatoma pagal pastato ir jo elementų bei dalių kainas. Pastato dalies svorio koeficientas parodo jo kainos santykį su viso pastato kaina.

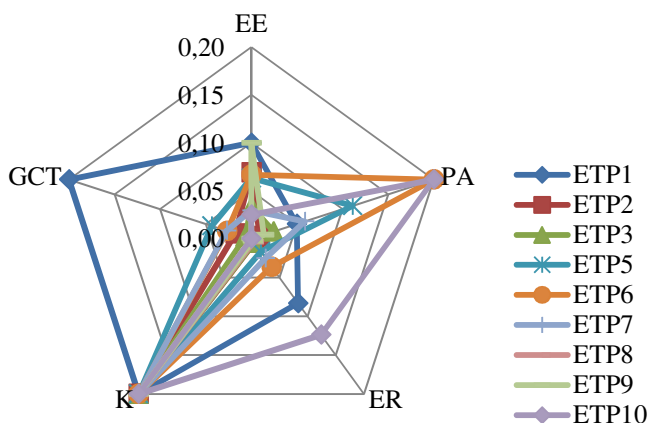
3.4 lentelėje yra pateiktos prielaidos 9 ETP įvertinti. 10 ETP yra Elektros prietaisų naudojimą taupanti elgsena – pastato naudotojų švietimo veikla, ir jai papildomi įrengimo kaštai nereikalingi.

3.2.2. Energijos taupymo priemonių charakteristikos

Pagal 3.1 poskyryje pateiktas esamas pastato charakteristikas ir prielaidas, aprašytas 3.2.1 poskyryje, buvo apskaičiuotos kiekvienos ETP aprašytų atributų vertės. ETP vertinime buvo naudotos normalizuotos kiekvieno atributo vertės. Šios vertės pateikiamos 3.5 ir 3.6 lentelėse.

Įvertinus kiekvienos ETP atributų vertes, jos normalizuojamos pagal kiekvienam atributui priskirtas tikslo funkcijas. 3.5–3.6 paveiksluose pateikta abiejų pastatų kiekvienos priemonės atskiro kriterijaus vertė pagal 5 darnumo kriterijus: energinį efektyvumą (EE), poveikį aplinkai (PA), ekonominį racionalumą (ER), komfortą (K), gyvavimo ciklo trukmę (GCT). 3.7 paveiksle pateikta kiekvieno pastato atskirų ETP BDK verčių palyginimas.

3.5–3.6 paveiksluose pateiktų diagramų principas yra, kad kuo didesnę plotą apibrėžia ETP kreivė, tuo didesnė yra BDK vertė. Taip pat jose patogų lyginti kiekvieno kriterijaus vertes. Kuo kriterijaus reikšmė yra labiau nutolusi nuo centro, tuo jo svarba yra didesnė.



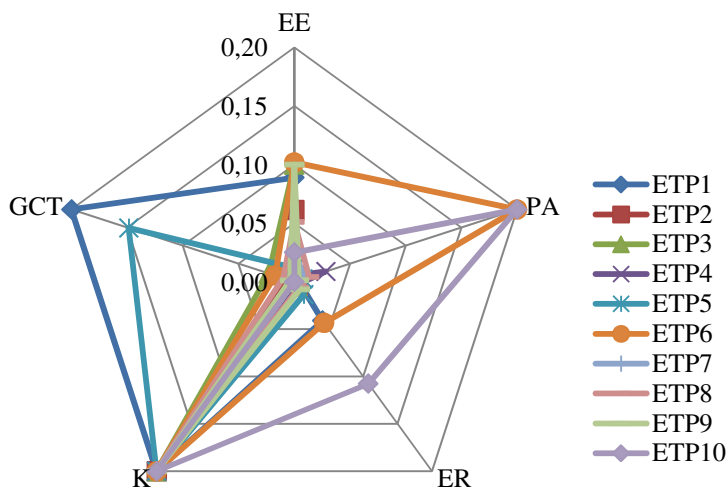
3.5 pav. Pastato A Atskirų energijos taupymo priemonių kriterijų vertės
Fig. 3.5. Criteria values of separate energy efficiency measures of building A

3.5 lentelė. Pastato A energijos taupymo priemonių atributų vertės
Table 3.5. Attributes values of energy efficiency measures of building A

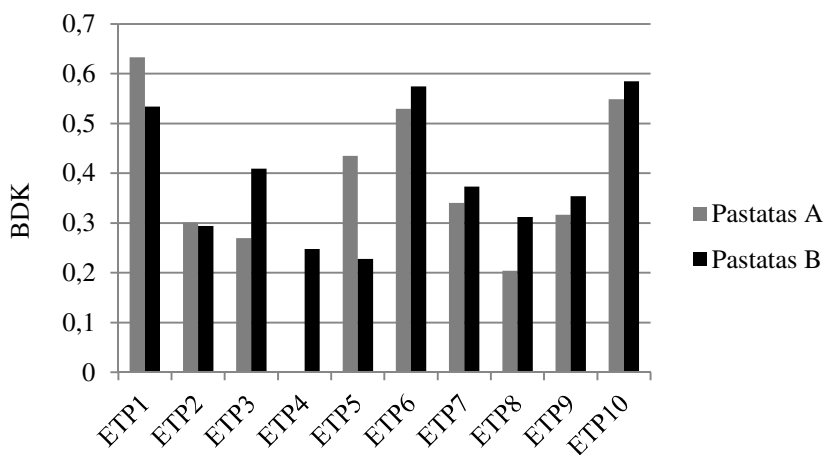
ETP kodas	Pirminės energijos sutaupymai, MWh	Sumažėjusi šilumos galia, kW	Išmetamo CO ₂ sutaupymo ir priemonei įgyvendinti išsiskyrusio CO ₂ santykis	Pradinė investicija, Lt	Tikrasis atsipirkimo laikas, m.	Sutaupytos energijos kaina, Lt	Grynoji dabartinė vertė, Lt	Pastato vertės padidėjimas	Pastato gyvavimo ciklo pailginimas, m
ETP1	36,1	32,50	8,18	227820	13,46	167,42	166823	107450	9,56
ETP2	25,0	22,53	1,47	234717,5	22,63	248,81		9210	0,84
ETP3	12,0	10,79	4,01	212249	85,78	469,77		12280	0,32
ETP5	22,9	20,59	18,23	218400	23,22	253,33	33785	36840	2,08
ETP6	12,0	10,84	65,58	30000	4,69	66,093	100301	9210	1,26
ETP7	10,7	9,64	0,32	47437	8,86	117,57	68991	10745	1,29
ETP8	-0,4	-0,37	-0,15	150000				10745	
ETP9	20,1	3,36	2,25	106733,7	96,00	758,89		6140	0,00
ETP10	5,0	0,84	65,58	1	1,00	0,0284	15840	0	0,00

3.6 lentelė. Pastato B energijos taupymo priemonių atributų vertės
Table 3.6. Attributes values of energy efficiency measures of building B

ETP kodas	Pirminės energijos sutaupymai, MWh	Sumažėjusi šilumos galia, kW	Išmetamo CO ₂ sutaupymo ir priemonėi įgyvendinti išsiskyrusio CO ₂ santykis	Pradinė investicija, Lt	Tikra-sis atsipirkimo laikas, m.	Sutaupyti os energijos kaina, Lt	Grynoji dabartinė vertė, Lt	Pastato vertės padidėjimas	Pastato gyvavimo ciklo pailginimas, m
ETP1	133,6	44,84	3,03	911400	73,67	452,38		1400000	2,275
ETP2	91,9	30,84	2,93	172500	9,46	124,51	10230,69	120000	0,2
ETP3	150,1	50,39	2,55	1674126		13548		480000	1,05
ETP4	8,2	2,75	23,69	9818	5,73	8,51	25702,52	0	
ETP5	17,7	5,94	6,38	193200		334,72		40000	0,0825
ETP6	76,6	25,69	166,80	30000	1,77	51,98	300037,02	120000	0,45
ETP7	38,3	12,85	8,19	287774	127,95	249,47		0	0
ETP8	76,5	25,67	11,11	60000	3,64	11,00	17141,51	140000	0,2625
ETP9	779,1	121,38	10,35	647492,4	5,39	474,89	128048,04	80000	0,2
ETP10	194,8	30,35	166,80	1	0,00	0,00	614260,01	0	



3.6 pav. Pastato B Atskirų energijos taupymo priemonių kriterijų vertės
Fig. 3.6. Criteria values of separate energy efficiency measures of building B



3.7 pav. Atskirų energijos taupymo priemonių bendrojo darnumo kriterijaus vertės
 kiekvienam pastatui

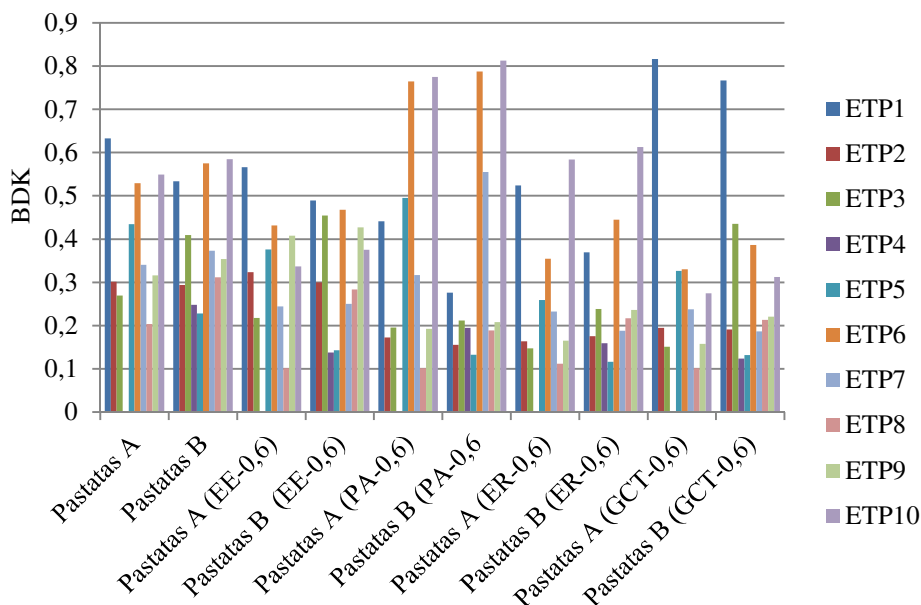
Fig. 3.7. General sustainability criteria values of separate energy efficiency measures

Iš 3.7 paveikslo matyti, kad atskirų priemonių BDK vertės skirtingiems pastatams yra nuo 0,2 (kai tik komforto kriterijui yra suteikiama vertė) iki 0,633.

Tiek geriausios, tiek blogiausios BDK atžvilgiu priemonės yra labai skirtingos, vienos taupančios šilumą, kitos elektrą, priemonės atitvarų charakteristikoms gerinti ir inžinerinių sistemų atnaujinimas. Tad tik daugiakriteris vertinimas, išreikštas skirtingais kriterijais, gali būti naudojamas joms palyginti ir įvertinti.

3.3. Darnumo kriterijų svorių analizė

Įvertinus abiem pastatams siūlomas renovacijos priemonės ir apskaičiavus kiekvienos jų bendrąjį darnumo kriterijų buvo atlikta darnumo kriterijų svorių jautrumo analizė. Analizė atlikta keturiais scenarijais, kiekviena iš jų išryškinant vieną iš kriterijų. Kriterijau išryškinimas atliktas jam suteikiant 0,6 svorio vertę. Bazinio varianto ir keturių scenarijų rezultatai pateikti 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Energijos taupymo priemonių bendrojo darnumo kriterijaus vertės esant skirtingiems scenarijams

Fig. 3.8. Values of general sustainability criteria to different scenarios of energy efficiency measures

Energinio efektyvumo kriterijaus svorio sureikšminimas iki 0,6, kitų kriterijų svorių vertes paliekant po 0,1, sumažino bendrąjį darnumo kriterijų visais atvejais ir labiau išryškino daugiau sutaupančias ETP (sienų šiltinimą,

šilumos punkto keitimą ir LED apšvietimo įrengimą). Bet ETP reitingavimo eilė beveik nepakito.

Poveikio aplinkai kriterijaus sureikšminimas išryškino ne tik labiausiai energiją taupančias priemones, bet ir tas priemones, kurioms įrengti reikia mažiau išteklių, t. y. ir mažiau emisijų paskleidžiama jas diegiant. Šiuo atveju ETP reitingavimo eilė pasikeitė senesniame pastate ir aukščiausias BDK vertes gavo priemonės, buvusios 2–4 vietose (pakilo į 1–3 vietas). Taip pat atsirado didesnė BDK vertės atskirtis tarp atskirų priemonių.

Ekonominio racionalumo kriterijaus sureikšminimas reitingavimo iš esmės nepakeitė, tik išryškino greičiau atsiperkančias priemones. Gyvavimo ciklo trukmės kriterijaus svorio pakeitimas iki 0,6 išryškino ETP labiausiai veikiančias pastato atitvarų būklę, bet pats ETP reitingavimas nepakito.

Kriterijų svorių jautrumo analizė, atlikta keturiems scenarijams, rodo, kad didžiausi BDK verčių pokyčiai atsiranda esant aplinkosauginiam scenarijui. Taigi keičiantis politinei situacijai, ir atsiradus didesniai dėmesiui aplinkosaugai, būtų racionalu PESDV modelyje suteikti skirtingus svorius šiam kriterijui. Kitais atvejais vienodų svorių suteikimas atskiriems darnumo kriterijams yra geriausiai darnaus vystymosi koncepciją atspindintis BDK vertinimas.

3.4. Energijos taupymo priemonių paketų analizė

Įvertinus atskiras priemones ir apskaičiavus BDK, atliekamas kiekvieno pastato ETP grupavimas į pagrindinį ir pagalbinį sąrašus paskirstymo sprendimų medžio, aprašyto 2.6 poskyryje, principu. Kiekvienu PSM žingsniu atrinktos priemonės pateiktos 3.7 lentelėje.

Pirmasis PSM žingsnis yra komforto vertinimas, kurį turi atitikti visos pasiūlytos priemonės. Privalomos priemonės yra nustatomos vertinant pastato pirminius duomenis. Privalomųjų priemonių sąrašė pirmiausia yra energijos poreikių vadybai reikalingos priemonės, šildymo sistemos reguliavimo galimybių įrengimas ir elektros prietaisų energiją taupančios elgsenos skatinimas.

Kitos privalomos priemonės skirtos šiuo metu galiojančių reikalavimų užtikrinimui. Pagrindinis reikalavimas yra mechaninio vėdinimo būtinumas viešosios paskirties pastatuose. Taip pat į privalomų priemonių sąrašą įtraukiamas nusidėvėjusių inžinerinių sistemų būtinas keitimas.

Antru žingsniu atrenkamos priemonės, kurių BDK vertė didžiausia. Pastato A sienų šiltinimas yra priemonė, kurios BDK rodiklis yra didžiausias, nes pastatas yra gerokai senesnis ir atitvarų modernizavimas jam reikalingesnis nei naujesnės statybos pastatui.

Priemonės, kurių bent vienas kriterijus pasiekė aukščiausią ribą, abiejuose pastatuose buvo beveik tos pačios (sutapo 4 iš 6). Tai rodo, kad apskritai pastatuose, ar senesniuose ar naujesniuose, reikia spręsti panašias problemas, pastatų amžius turi įtakos tik pirmojo būtinumo priemonėms.

3.7 lentelė. Pagrindinių paketų informacija

Table 3.7. The information about basic packets

PSM žingsnis	Pastatas A	Pastatas B
Privalomosios priemonės	ETP6 Šilumos punkto modernizacija ETP7 Šildymo sistemos modernizacija ETP8 Mechaninės vėdinimo sistemos įrengimas ETP10 Elektros prietaisų energiją taupanti elgsena	ETP7 Šildymo sistemos modernizacija ETP10 Elektros prietaisų energiją taupanti elgsena
Priemonė, kurios BDK vertė didžiausia	ETP1 Sienų šiltinimas	ETP10 Elektros prietaisų energiją taupanti elgsena
Bent vieno iš kriterijų didžiausia vertė	ETP9 Apšvietimo lempučių keitimas	ETP1 Sienų šiltinimas ETP3 Langų keitimas ETP6 Šilumos punkto modernizacija ETP9 Apšvietimo lempučių keitimas
Pagrindinio paketo priemonės	ETP1 ETP6 ETP7 ETP8 ETP9 ETP10	ETP1 ETP3 ETP6 ETP7 ETP9 ETP10

Abiem atvejais PSM suformavo pagrindinį paketą iš 6 priemonių. Suformavus pagrindinį paketą, toliau formuojami paketai prie pagrindinio

paketo pridedant papildomų priemonių. 3.8 lentelėje pateikta informacija apie abiem pastatams suformuotus pagrindinius ir pagalbinius paketus.

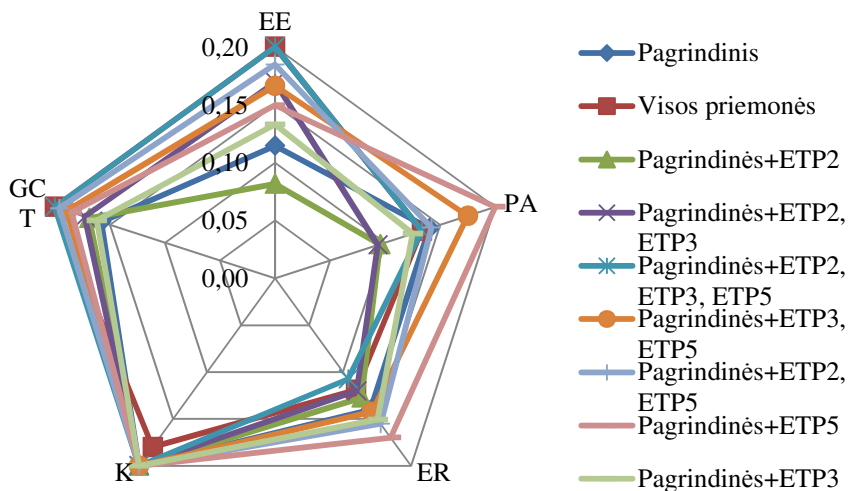
3.8 lentelė. Paskirstymo sprendimų medžio suformuotų paketų informacija

Table 3.8. Information about formed packets by distribution decision tree

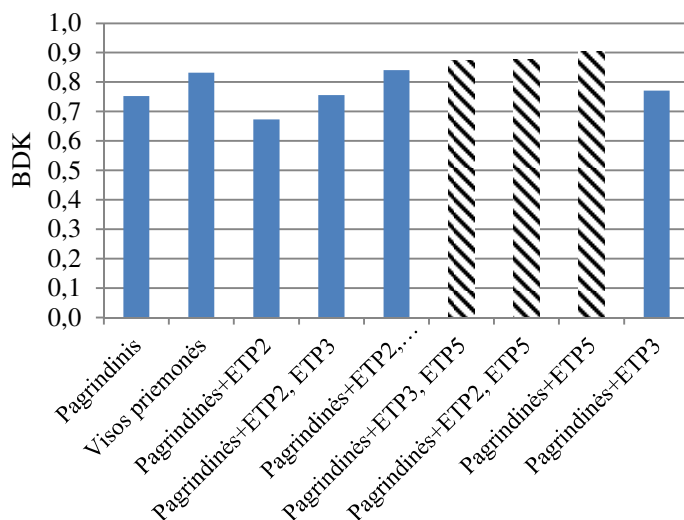
Pastatas	Pagrindinio paketo priemonės	Pagalbinės priemonės	Suformuota paketų	Geriausio paketo BDK
A	6	3	9	0,909
B	6	4	24	0,906

Pagrindinis paketas abiem atvejais buvo suformuotas iš 6 priemonių, nors privalomų priemonių skaičius nebuvo vienodas: Pastate A buvo 4 privalomos priemonės, o pastate B tik 2, nes pastas B yra modernesnis ir jame jau yra įdiegtos šiuolaikinius reikalavimus atitinkamčios priemonės. A pastato atveju buvo suformuota 9 paketai, o B atveju 24 paketai. Tačiau analizėje pateikiama 10 geriausių paketų vertės.

3.9 ir 3.11 paveiksluose pateikti abiejų pastatų paketų atskiri kriterijai, o 3.10 ir 3.12 paveiksluose pateiktos paketų BDK vertės bei išryškinti geriausi trys geriausi paketai pagal BDK vertes – šių paketų stulpeliai yra dryžuoti.

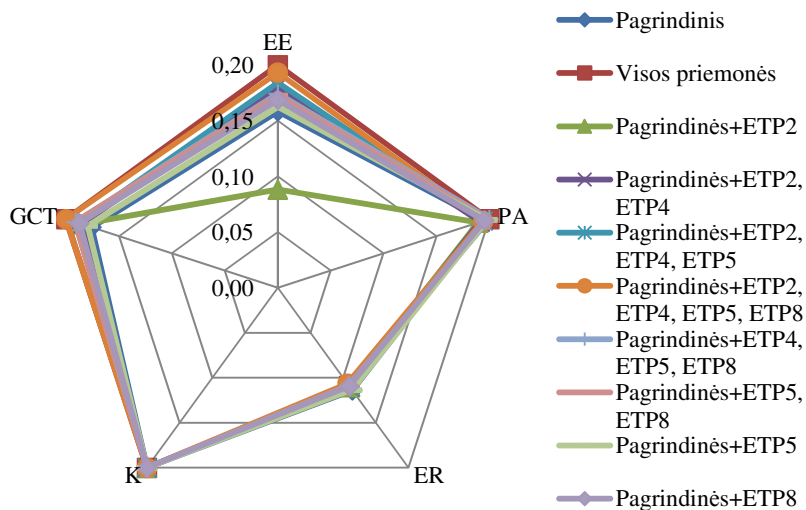


3.9 pav. Pastato A energijos taupymo priemonių paketų kriterijų vertės
Fig. 3.9. Criteria values of energy efficiency measures packets of building A



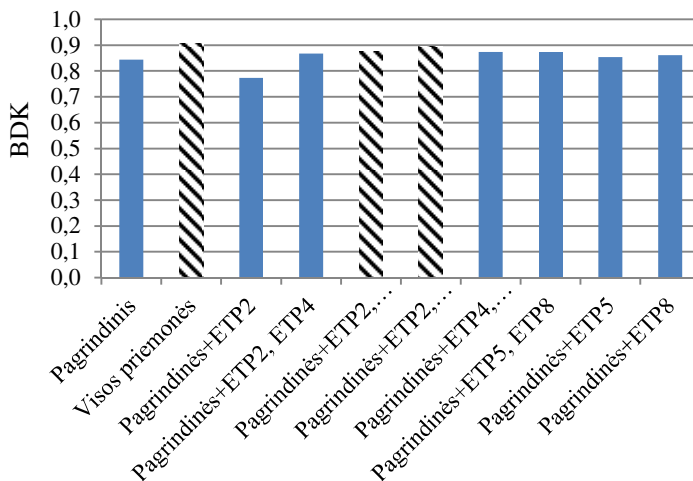
3.10 pav. Pastato A paketų bendrojo darnumo kriterijaus vertės

Fig. 3.10. General sustainability criteria values of packets of building A



3.11 pav. Pastato B energijos taupymo priemonių paketų kriterijų vertės

Fig. 3.11. Criteria values of energy efficiency measures packets of building B



3.12 pav. Pastato B paketų bendrojo darnumo kriterijaus vertės

Fig. 3.12. General sustainability criteria values of packets of building B

Abiem pastatams sudarytų paketų, kurių kiekvieno pagrindą sudaro pagrindinės priemonės, visos BDK vertės yra didesnės nei atskirų priemonių. A pastato geriausios ETP BDK = 0,633, o paketų BDK yra 0,673–0,904 reikšmių intervale. Panašūs skaičiai gauti atlikus ir pastato B vertinimą: Geriausios ETP BDK = 0,585, o paketų BDK yra 0,773–0,909 reikšmių intervale.

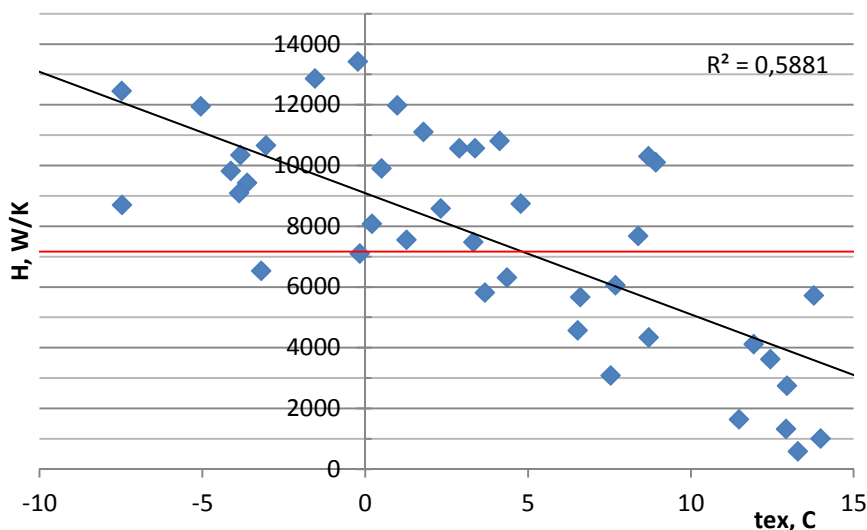
Palyginus 3.9 ir 3.11 paveiksluose pateiktus duomenis su atskirų priemonių kriterijų vertėmis (3.5–3.6 pav.) matyti, kad paketų formavimas turi akivaizdžią naudą, kiekvieno atskiro kriterijaus vertės artėja prie maksimumo kiekviename pakete, kai vertinant atskiras priemones vos kelių priemonių apibrėžiamas plotas buvo didesnis už 0,5.

3.10 ir 3.12 paveiksluose dryžuotai pažymėti trys geriausi paketai. Abiejų pastatų geriausių paketų sudėtis skiriasi, bet išlieka kompleksiskumo tendencija. Taip pat abiejų pastatų analizė rodo, kad beveik visų paketų ekonominio racionalumo kriterijus turi mažiausią vertę. Šie rezultatai rodo, kad vertinimas bendrojo darnumo kriterijumi visapusiškai įvertina ETP priemonių naudą darnaus vystymosi koncepcijos požiūriu.

3.5. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio nuolatinio veikimo atvejo analizė

Kadangi PESDVM yra nuolatinis procesas, atnaujinantis rezultatus, tai ši atvejo analizė atliekama modelio rezultatams patikrinti pakitusiomis pirminėmis sąlygomis.

Pirmiausia modelis išbandytas papildžius esamus šilumos suvartojimus vienu kalendorinių metų prognozuojamais duomenimis, jei šiluma būtų naudojama šiek tiek efektyviau. Šio atvejo šilumos sąnaudų analizė pateikta 3.13 paveiksle. Matyti, kad duomenų pasiskirstymas yra daug geresnis, nes koreliacijos koeficientas yra artimesnis vienetui.

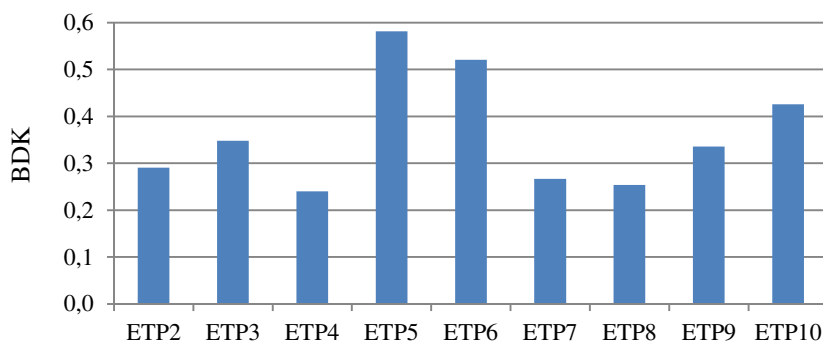


3.13 pav. Savitųjų šilumos sąnaudų koreliacijos tiesės sudaryta pagal prognozuojamo atvejo duomenis

Fig. 3.13. Correlation line of specific heat consumption constructed by data of predicted case

Pasikeitus pradinėms sąlygoms pasikeitė ir šilumą taupančių priemonių atributų vertės, bet kadangi atributų verčių normalizavimas yra paremtas palyginimo principu, o priemonių reitingas nepasikeitė, tai normalizuotos reikšmės irgi nepasikeitė.

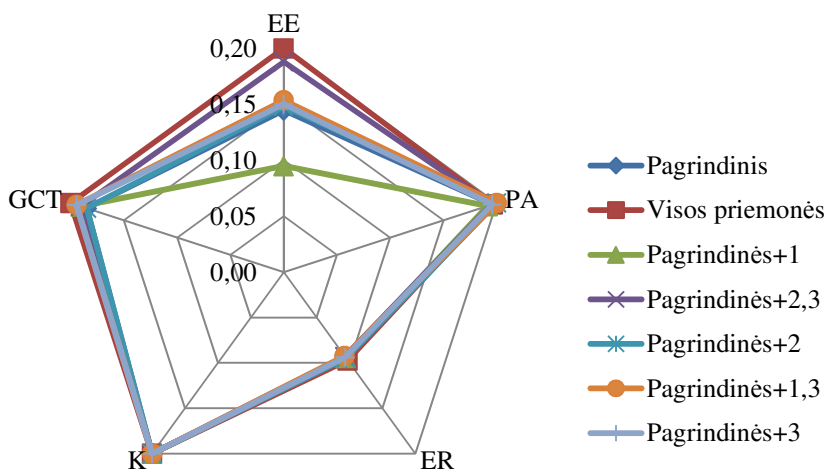
Antras atvejis analizuojamas kai prognozuojamas įdiegtas sienų šiltinimas. Atskirų priemonių BDK pateiktas 3.14 paveiksle.



3.14 pav. Atskirų priemonių bendrojo darnumo kriterijaus vertės prognozuojant sienų šiltinimą

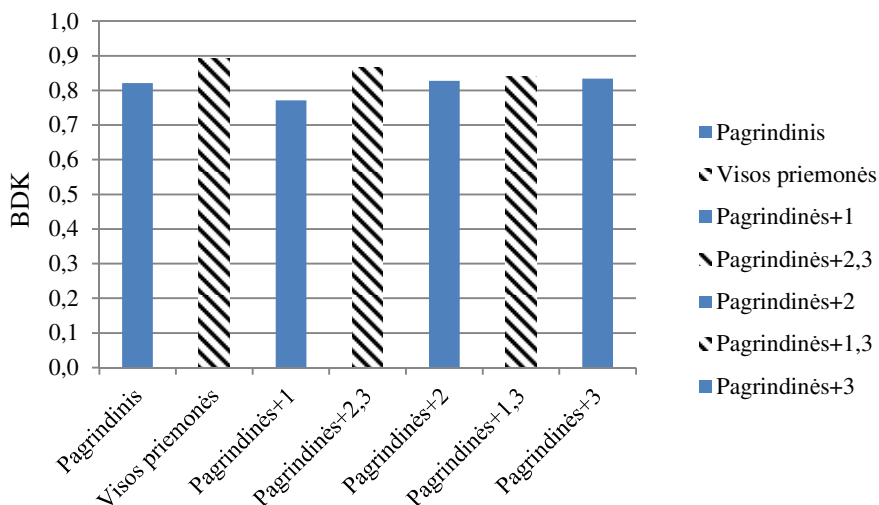
Fig. 3.14. General sustainability criteria values of separate energy efficiency measures when walls insulation is predicted

Nors atskirų priemonių BDK vertės pasikeitė, bet jų prioritetas nepasikeitė. Tačiau pagerėjo priemonių, kurių BDK pirminiame variante buvo panašus į sienų šiltinimo BDK, charakteristikos. Pagrindiniai pokyčiai įvyko formuojant pagrindinį paketą, nes šiuo atveju jį sudaro 6 priemonės iš 9.



3.15 pav. Atskirų priemonių kriterijų vertės įvertinus prognozuojamą sienų šiltinimą

Fig. 3.15. Criteria values of separate energy efficiency measures, when walls insulation is predicted



3.16 pav. Paketų bendrojo darnumo kriterijaus vertės, įvertinus numatomą sienų šiltinimą

Fig. 3.16. General sustainability criteria values of packets, when walls insulation is predicted

Kadangi papildomos priemonės lieka tik trys, tai PSM sugeneravo 7 paketus. 3.15 paveiksle matyti šių paketų atskirų kriterijų vertės. O 3.16 paveiksle palyginimui pateiktos BDK vertės kiekvienam paketui.

Ši atvejo analizė taip pat patvirtino išvadą, kad priemonių grupavimas lemia žymiai geresnius rezultatus nei atskiros priemonės. Kadangi pagrindinis paketas šiuo atveju buvo iš daugiau priemonių nei pradiniu atveju, tai ir visų paketų BDK vertės yra didesnės nei pirminiu atveju.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Pastato energinių savybių darnaus valdymo modelio taikymo analizė dviem skirtingiems pastatams rodo, kad priemonių vertinimas penkiais darnumo kriterijais leidžia nustatyti priemonių teikiamą kompleksinę naudą pastatui.
2. Kriterijų svorių jautrumo analizė, atlikta keturiems scenarijams, rodo, kad didžiausi BDK verčių pokyčiai atsiranda esant aplinkai saugiam scenarijui. Taigi keičiantis politinei situacijai ir daugiau dėmesio skiriant aplinkosaugos klausimams, būtų racionalu PESDV modelyje suteikti skirtingus svorius šiam kriterijui. Kitais atvejais

vienodų svorių suteikimas atskiriems darnumo kriterijams yra geriausiai darnaus vystymosi koncepciją atspindintis BDK vertinimas.

3. Atlikta modelio taikymo analizė rodo, kad atskirų priemonių diegimas nėra toks naudingas vertinant darnumo kriterijais, kaip kompleksinis pastato atnaujinimas. Visais atvejais geriausia BDK rodiklio reikšmė buvo paketų, kurių priemonių skaičius yra didesnis nei pagrindinio paketo. Pavienių priemonių didžiausia bendrojo darnumo kriterijaus reikšmė yra tik 0,633, kai sugrupuotų paketų bendrojo darnumo kriterijaus vertės yra 0,673–0,909 reikšmių intervale, ir artėja link vieneto – maksimalios BDK reikšmės.
4. Pagrindinio paketo darnumo rodiklių reikšmės visais atvejais neturi didžiausių verčių, bet pagrindinio paketo, kaip pagrindo kitiems paketams formuoti, nauda matoma išskiriant būtinausias priemones darniam pastato valdymui užtikrinti.
5. Nagrinėtų dviejų pastatų analizė bendruoju darnumo kriterijumi rodo, kad beveik visiems paketams ekonominio racionalumo kriterijus turi mažiausią vertę. Šie rezultatai atskleidžia, kad vertinimas bendruoju darnumo kriterijumi visapusiškai įvertina ETP priemonių naudą darnaus vystymosi koncepcijos atžvilgiu.

Bendrosios išvados

1. Atlikta esamų energinių auditų, pastatų vertinimo, monitoringo ir energijos sąnaudų analizės apžvalga rodo, kad metodų tikslumas ir detalumas priklauso nuo analizės tikslo, kuris dažniausiai yra tik vienas (įvertinti esamas sąnaudas, atnaujinimo priemonių įtaką, pasirinkti sprendimų priėmimą, pastato valdymo įrankį). Tačiau nėra vienos nuolatiniam pastatų valdymui skirtos ekspertinės sistemos, kuri apimtų esamų sąnaudų analizę, darnų priemonių vertinimą, paketų formavimą ir sprendimo parengimą jo priėmimui.

2. Balanso lygtis, sudaryta savitųjų energijos sąnaudų pagrindu, be kita ko, rodo ir sąnaudų neapibrėžtumą, o ne priklausymą nuo klimatinių sąlygų, todėl tinka žmogaus elgsenai analizuoti ir pastato energinių savybių valdymui įvertinti.

3. Darnus ir visapusiškas energijos taupymo priemonių vertinimas turėtų būti atliekamas remiantis kriterijų kompleksu, kuriuo vertinama energinis efektyvumas, poveikis aplinkai, ekonominis racionalumas, komfortas ir pastato gyvavimo ciklas. Energijos taupymo priemonių vertinimas bendruoju darnumo kriterijumi apima pastato energijos sąnaudas, poveikio aplinkai potencialą, pastato nusidėvėjimo laipsnį ir komforto sąlygas prieš priemonių diegimą ir jas įdiegus, o ne vien ekonominę naudą.

4. Sudarytas priemonių grupavimo algoritmas, paremtas nuosekliu sprendimų medžio metodu, supaprastina sprendimų priėmimo procedūrą,

atrenkami tik tie, kurie užtikrina komforto sąlygas ir turi dideles darnumo kriterijų reikšmes. Pagrindinių priemonių paketo sudarymas sumažina galimų alternatyvų skaičių iki 2% visų matematiškai galimų alternatyvų.

5. Energijos taupymo priemonių paketų formavimas rodo, kad kompleksinis energijos taupymo priemonių diegimas turi daugiau įtakos pastato efektyviam valdymui nei pavienių priemonių diegimas. Pavienių priemonių didžiausia bendrojo darnumo kriterijaus reikšmė 0,633, o sugrupuotų paketų bendrojo darnumo kriterijaus verčių intervalas 0,673–0,909, t. y. paketų bendrojo darnumo kriterijaus reikšmės yra didesnės nei atskirų priemonių bendrojo darnumo kriterijaus vertės.

6. Sukurtas pastato energinių savybių darnaus valdymo modelis, skirtas nuolatiniam pastato energinių savybių stebėjimui, jų gerinimui diegiant pastato energijos poreikių vadybos principus, ir vertinant galimas modernizavimo priemones bendruoju darnumo kriterijumi. Jis leidžia parinkti didesnio veiksmingumo sprendimus.

7. Dviejų skirtingų pastatų energinių savybių darnaus valdymo modelio atvejo analizė įrodė, kad modelis yra tinkamas tiek pastatams, pastatytiems iki 1990 m., tiek priskiriamiems prie naujos statybos pastatų. Taip pat modelis tinkamas įvairios paskirties viešiesiems pastatams, kaip pastatų priežiūros ir valdymo įrankis. Jis gali būti naudojamas analizuojant naujai projektuojamų pastatų alternatyvas.

Literatūra ir šaltiniai

Teisinės literatūros sąrašas

EN 15217:2005 Energy performance of buildings – Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings. Briuselis: 2005. 55 p.

Europos parlamento ir tarybos komisija. 2012. Europos parlamento ir tarybos direktyva 2012/27/ES. Briuselis: 2012. 25 p.

ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria Ergonomics of the thermal environment – Analytical determ. 52 p.

LST EN 15603:2008 Energy performance of buildings – Overall energy use and definition of energy ratings. Vilnius, 2008. 62 p.

LST EN 15459:2008 „Energetinės pastatų charakteristikos. Pastatų energetinių sistemų ekonominio vertinimo procedūra“ Vilnius: 2008. 50 p.

LST EN ISO 14044:2006 Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Reikalavimai ir nurodymai. Vilnius: 2006. 54 p.

LST ISO 13790:2008 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling Vilnius: 2008 162 p.

LR Sveikatos apsaugos ministerija. 2009. Lietuvos Respublikos higienos norma HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“. Vilnius: 2009. 4 p.

LR Vyriausybė. 2003. Nacionalinė darnaus vystymosi strategija. Vilnius: 2003. 83 p.

LR Ūkio ministerija. 2008. Išsamiojo energijos, energijos išteklių ir šalto vandens vartojimo audito atlikimo viešojo naudojimo paskirties pastatuose metodika. Vilnius: 2008. 17 p.

Respublikinė statybos norma RSN 156 – 94 „Statybinė klimatologija“. Vilnius: 1994. 155 p.

STR 2.01.09:2012. Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas. Vilnius: 2012.

Mokslinės literatūros sąrašas

Abdelhamid, R. 2012. A Decision Support System for Performance Evaluation. *IJCA Special Issue on “Computational Intelligence & Information Security” CIIS 2012*:1–8.

Ahmed, A.; Korres, N. E.; Ploennigs, J.; Elhadi, H.; Menzel, K. 2011. Mining building performance data for energy-efficient operation. *Advanced Engineering Informatics* 25:341–354.

Ahmed, A.; Ploennigs, J.; Menzel, K.; Cahill, B. 2010. Multi-dimensional building performance data management for continuous commissioning. *Advanced Engineering Informatics* 24:466–475.

Aitkenhead, M. J. 2008. A co-evolving decision tree classification method. *Expert Systems with Applications* 34:18–25.

Alajmi, A. 2012. Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings* 47:122–130.

Alanne, K. 2004. Selection of renovation actions using multi-criteria “knapsack” model. *Automation in Construction* 13:377–391.

Allcott, H. 2011. Social norms and energy conservation. *Journal of Public Economics* 95:1082–1095.

Androutsopoulos, A.; Bloem, J. J.; van Dijk, H. a. L.; Baker, P. H. 2008. Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components. *Building and Environment* 43:189–196.

Arsovski, Z.; Pavlovic, A.; Arsovski, S.; Mirovic, Z. 2009. Improving the Quality of Maintenance Processes by Using Information Technology. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 55:701–714.

Ballarini, I.; Corrado, V. 2009. Application of energy rating methods to the existing building stock: Analysis of some residential buildings in Turin. *Energy and Buildings* 41:790–800.

Belussi, L.; Danza, L. 2012. Method for the prediction of malfunctions of buildings through real energy consumption analysis: holistic and multidisciplinary approach of Energy Signature. *Energy and Buildings* 55:715–720.

Berkhout, P. H. G.; Muskens, J. C.; Velthuisen, J. W. 2000. Defining the rebound effect *Energy policy* 28:425–432.

Blom, I.; Itard, L.; Meijer, A. 2010. LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. *Building and Environment* 45:2362–2372.

Botsaris, P. N.; Prebezanos S. 2004. A methodology for a thermal energy building audit. *Building and Environment* 39:195–199.

Branco, G.; Lachal, B.; Gallinelli, P.; Weber, W. 2004. Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. *Energy and Buildings* 36:543–555.

Brown, N. W. O.; Malmqvist, T.; Bai, W.; Molinari, M. 2013. Sustainability Assessment of Renovation Packages for Increased Energy Efficiency for Multi-family Buildings in Sweden. *Building and Environment* 61:140–148.

Chandra, B.; Paul Varghese, P. 2009. Moving towards efficient decision tree construction. *Information Sciences* 179:1059–1069.

Chantrelle, F. P.; Lahmidi, H.; Keilholz, W.; El Mankibi, M.; Michel, P. 2011. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy* 88:1386–1394.

Chen, T.-Y. 2012. Comparative analysis of SAW and TOPSIS based on interval-valued fuzzy sets: Discussions on score functions and weight constraints. *Expert Systems with Applications* 39:1848–1861.

Chidiac, S. E.; Catania, E. J. C.; Morofsky, E.; Foo, S.; 2011. A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings. *Energy and Buildings* 43:614–620.

Chua, K. J.; Chou, S. K.; 2011. A performance-based method for energy efficiency improvement of buildings. *Energy Conversion and Management* 52:1829–1839.

Corgnati, S. P.; Corrado, V.; Filippi, M. 2008. A method for heating consumption assessment in existing buildings: A field survey concerning 120 Italian schools. *Energy and Buildings* 40:801–809.

Costa, A.; Keane, M. M.; Torrens, J. I.; Corry, E. 2011. Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit. *Applied Energy* 101:310–316.

Čiuprinskas, K.; Martinaitis, V. 2003. Correction of a designed building's heat balance according to its real heat consumption. *Journal of civil engineering and management* IX:98–103.

De Dear, R. J.; Brager, G. S. 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings* 34:549–561.

Djuric, N.; Novakovic, V.; Holst, J.; Mitrovic, Z. 2007. Optimization of energy consumption in buildings with hydronic heating systems considering thermal comfort by use of computer-based tools. *Energy and Buildings* 39:471–477.

Doukas, H.; Nychtis, C.; Psarras, J. 2009. Assessing energy-saving measures in buildings through an intelligent decision support model. *Building and Environment* 44:290–298.

Festinger, L. 1954. A Theory of Social Comparison Processes. *Human relations* 7(2):117–140.

Fleiter, T.; Worrell, E.; Eichhammer, W. 2011. Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15:3099–3111.

Fokaides, P. a.; Maxoulis, C. N.; Panayiotou, G. P.; Neophytou, M. K. -a.; Kalogirou, S. a. 2011. Comparison between measured and calculated energy performance for dwellings in a summer dominant environment. *Energy and Buildings* 43:3099–3105.

Frontczak, M.; Andersen, R. V.; Wargocki, P. 2012. Questionnaire survey on factors influencing comfort with indoor environmental quality in Danish housing. *Building and Environment* 50:56–64.

Frontczak, M.; Wargocki P. 2011. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment* 46:922–937.

Gaigalis, V.; Škëma, R. 2007. Energetikos vadybos vadovas. Kaunas: 2007. p. 75.

GhaffarianHoseini, A., N. D. Dahlan, U. Berardi, A. GhaffarianHoseini, N. Makaremi, and M. GhaffarianHoseini. 2013. Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25:1–17.

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* 52:540–449

Handgraaf, M. J. J.; Van Lidth de Jeude, M. A.; Appelt, K. C. 2013. Public praise vs. private pay: Effects of rewards on energy conservation in the workplace. *Ecological Economics* 86:86–92.

Hastings, S. R.; Wall, M. 2007. Sustainable Solar Housing: Volume 1 - Strategies and Solutions. p. 315.

Hens, H.; Parijs, W.; Deurinck, M. 2010. Energy consumption for heating and rebound effects. *Energy and Buildings* 42:105–110.

- Hens, H. S. L. C. 2009. Thermal comfort in office buildings: Two case studies commented. *Building and Environment* 44:1399–1408.
- Heo, Y.; Zavala, V. M. 2012. Gaussian process modeling for measurement and verification of building energy savings. *Energy and Buildings* 53:7–18.
- Hernandez, P.; Burke, K.; Lewis, J. O. 2008. Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: An example for Irish primary schools. *Energy and Buildings* 40:249–254.
- Ignacio Torrens, J.; Keane, M.; Costa, A.; O'Donnell, J. 2011. Multi-Criteria optimisation using past, real time and predictive performance benchmarks. *Simulation Modelling Practice and Theory* 19:1258–1265.
- Yu, Z.; Fung, B. C. M.; Haghighat, F.; Yoshino, H.; Morofsky, E. 2011. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. *Energy and Buildings* 43:1409–1417.
- Yu, Z.; Haghighat, F.; Fung, B. C. M.; Yoshino, H. 2010. A decision tree method for building energy demand modeling. *Energy and Buildings* 42:1637–1646.
- Juan, Y.-K., Gao, P.; Wang, J. 2010. A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement. *Energy and Buildings* 42:290–297.
- Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Naimavicienė, J.; Krutinis, M.; Plakys, V.; Venskus, D. 2010. Model for a Complex Analysis of Intelligent Built Environment. *Automation in Construction* 19:326–340.
- Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Raslanas, S. 2005. Multivariant design and multiple criteria analysis of building refurbishments. *Energy and Buildings* 37:361–372.
- Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Raslanas, S.; Ginevicius, R.; Komka, A.; Malinauskas, P. 2006. Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. *Energy and Buildings* 38:454–462.
- Kalamees, T.; Jylhä, K.; Tietäväinen, H.; Jokisalo, J.; Ilomets, S.; Hyvönen, R.; Saku, S. 2012. Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings* 47:53–60.
- Lazzaretto, A.; Toffolo, A. 2004. Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design. *Energy* 29:1139–1157.
- Maile, T.; Bazjanac, V.; Fischer, M. 2012. A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance. *Building and Environment* 56:241–251.
- Marinakis, V.; Doukas, H.; Karakosta, C.; Psarras, J. 2012. An integrated system for buildings' energy-efficient automation: Application in the tertiary sector. *Applied Energy* 101:6–14.

- Martinaitis, V.; Kazakevičius, E.; Vitkauskas, A. 2007. A two-factor method for appraising building renovation and energy efficiency improvement projects. *Energy Policy* 35:192–201.
- Martinaitis, V.; Rogoža, A.; Bikmanienė, I. 2004. Criterion to evaluate the “twofold benefit” of the renovation of buildings and their elements. *Energy and Buildings* 36:3–8.
- Martinaitis, V., Rogoža, A.; Čiuprinskas, K. 2010. Pastatų energijos vartojimo auditas. Vilnius: Technika, 108 p.
- Mela, K.; Tiainen, T.; Heinisuo, M. 2012. Comparative study of multiple criteria decision making methods for building design. *Advanced Engineering Informatics*.
- Mørck, O.; Thomsen, K. E.; Rose, J. 2012. The EU CONCERTO project Class 1 – Demonstrating cost-effective low-energy buildings – Recent results with special focus on comparison of calculated and measured energy performance of Danish buildings. *Applied Energy* 97:319–326.
- Moujalled, B., Cantin, R.; Guarracino, G. 2008. Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. *Energy and Buildings* 40:2215–2223.
- Muhič, S.; Butala, V. 2004. The influence of indoor environment in office buildings on their occupants: expected–unexpected. *Building and Environment* 39:289–296.
- Mulliner, E.; Smallbone, K.; Maliene, V. 2013. An assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method. *Omega* 41:270–279.
- Mwasha, A.; Williams, R. G.; Iwaro, J. 2011. Modeling the performance of residential building envelope: The role of sustainable energy performance indicators. *Energy and Buildings* 43:2108–2117.
- Neves, L. P., Martins, A. G.; Antunes, C. H.; Dias, L. C. 2008. A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency. *Energy Policy* 36:2351–2363.
- Nikolaidis, Y.; Pilavachi, P. a. ; Chletsis, A. 2009. Economic evaluation of energy saving measures in a common type of Greek building. *Applied Energy* 86:2550–2559.
- Oliveira, C.; Antunes, H. 2004. A multiple objective model to deal with economy–energy–environment interactions. *European Journal of Operational Research* 153:370–385.
- Olofsson, T.; Andersson, S. 2001. Long-term energy demand predictions based on short-term measured data. *Energy and Buildings* 33:85–91.
- Olofsson, T., Andersson, S. 2002. Overall heat loss coefficient and domestic energy gain factor for single-family buildings *Energy and Buildings* 37:1019–1026.
- Olofsson, T., Andersson, S.; Sjögren, J.-U. 2009. Building energy parameter investigations based on multivariate analysis. *Energy and Buildings* 41:71–80.
- Osborne, M. J. 2010. A resolution to the NPV–IRR debate? *The Quarterly Review of Economics and Finance* 50:234–239.

- Pagliarini, G.; Rainieri, S. 2012. Restoration of the building hourly space heating and cooling loads from the monthly energy consumption. *Energy and Buildings* 49:348–355.
- Pang, X.; Wetter, M.; Bhattacharya, P.; Haves, P. 2012. A framework for simulation-based real-time whole building performance assessment. *Building and Environment* 54:100–108.
- Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; González, R.; Maestre, I. R. 2009. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings* 41:272–278.
- Petersen, S.; Svendsen, S. 2012. Method for component-based economical optimisation for use in design of new low-energy buildings. *Renewable Energy* 38:173–180.
- Räsänen, T.; Ruuskanen, J.; Kolehmainen, M. 2008. Reducing energy consumption by using self-organizing maps to create more personalized electricity use information. *Applied Energy* 85:830–840.
- Risholt, C. B.; Time, B.; Hestnes, A. G. 2013. Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings -based on energy, economy and home quality indicators. *Energy and Buildings* 60:217–224.
- Rogoža, A. 2013. Alternatyviųjų daugiabučio namo aprūpinimo energija sistemų gyvavimo ciklo daugiakriterė analizė. *Mokslas - Lietuvos ateitis* 5:423–428.
- Saelens, D.; Parys, W.; Baetens, R. 2011. Energy and comfort performance of thermally activated building systems including occupant behavior. *Building and Environment* 46:835–848.
- Shin, Y.; Kim, T.; Cho, H.; Kang, K.-I. 2012. A formwork method selection model based on boosted decision trees in tall building construction. *Automation in Construction* 23:47–54.
- Sjögren, J.-U.; Andersson, S.; Olofsson, T. 2007. An approach to evaluate the energy performance of buildings based on incomplete monthly data. *Energy and Buildings* 39:945–953.
- Sjögren, J.-U.; Andersson, S.; Olofsson, T. 2009. Sensitivity of the total heat loss coefficient determined by the energy signature approach to different time periods and gained energy. *Energy and Buildings* 41:801–808.
- Smith, A.; Fumo, N.; Luck, R.; Mago, P. J. 2011. Robustness of a methodology for estimating hourly energy consumption of buildings using monthly utility bills. *Energy and Buildings* 43:779–786.
- Sourbron, M.; Helsén, L. 2011. Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings. *Energy and Buildings* 43:423–432.
- Tommerup, H.; Rose, J.; Svendsen, S. 2007. Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Denmark in 2006. *Energy and Buildings* 39:1123–1130.

- Užšilaitytė, L.; Martinaitis, V. 2010. Pastato renovacijos periodiškumo įtaka jo gyvavimo ciklo energijos sąnaudoms. *Energetika*:146–153.
- Valančius, R.; Jurelionis, A. 2012. Impact of temperature variation on energy consumption and productivity of the occupants in office buildings. *Energetika* 58:141–147.
- Verbeeck, G.; Hens, H. 2010. Life cycle inventory of buildings: A calculation method. *Building and Environment* 45:1037–1041.
- Verbruggen, A.; Al Marchohi, M.; Janssens, B. 2011. The anatomy of investing in energy efficient buildings. *Energy and Buildings* 43:905–914.
- Wang, L.; Mathew, P.; Pang, X. 2012a. Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building. *Energy and Buildings* 53:152–158.
- Wang, S.; Yan, C.; Xiao, F. 2012b. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy and Buildings*. 55:873–888.
- Wright, J. a.; Loosemore, H. a.; Farmani; R. 2002. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings* 34:959–972.
- Xu, P.; Chan, E. H. W. 2013. ANP model for sustainable Building Energy Efficiency Retrofit (BEER) using Energy Performance Contracting (EPC) for hotel buildings in China. *Habitat International* 37:104–112.
- Zavadskas, E.; Kaklauskas, A.; Banaitienė, N. 2001. Pastato gyvavimo proceso daugiakriterinė analizė. Vilnius:Technika.380 p. ISBN 9986-05-441-9.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Valančius, K.; Mikučionienė, R. 2010a. “Use efficiency” projektas – tikslai, gairės, tarpiniai rezultatai, *Mokslas – Lietuvos ateitis*. 5 (2): 115–118. ISSN 2029-2341.

Mikučionienė, R.; Martinaitis, V.; Keras, E. 2014a. Evaluation of energy efficiency measures sustainability by decision tree method. *Energy and Buildings* 76:64–71. (ISI Web of Science)

Mikučionienė, R.; Rogoža, A; Martinaitis, V. 2014b. Pastatų atnaujinimo darnaus vertinimo kriterijų įtakos analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis*. 6 (4): 421–426. ISSN 2029-2341.

Straipsniai kituose leidiniuose

Mikučionienė, R; Martinaitis, V. 2014. The model of sustainable management of building energy performance characteristics. 9-osios tarptautinės konferencijos „*Environmental Engineering 2014*“ straipsnių rinkinys. eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9

Mikučionienė, R; Martinaitis, V. 2013a. Physical comfort in the management of building energy performance characteristics, *2nd Electronic International Interdisciplinary*

Conference 2013 (EIIC 2013): proceedings. Vol. 2. Zilina: Publishing Institution of the University of Zilina, 429–432. ISSN 1338-7871.

Mikučionienė, R; Martinaitis, V. 2013b. Criteria for evaluation of energy efficiency measures in the management of building energetic characteristics, *10th International Conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2013)*, Kaunas: LEI, 285–293 ISSN 1822-7554.

Mikučionienė, R; Martinaitis, V. 2010. Building energy consumption following energy certificate vis a vis of real energy consumption data, *7-oji doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „Jaunoji energetika 2010“ = 7th conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2010)*. Kaunas: LEI, 164–170 ISSN 1822-7554.

Mikučionienė, R; Martinaitis, V. 2013c. Fizinio komforto vertinimas pastato fizinių savybių valdyme, *„Šilumos energetika ir technologijos – 2013“ konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas : Technologija, 181–186. ISSN 2335-2477.

Mikučionienė, R. 2012. Šilumos sąnaudų analizė šildymo sezono pradžioje ir pabaigoje, *„Šilumos energetika ir technologijos – 2012“ konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 209–214. ISSN 2335-2477.

Valančius, K; Mikučionienė, R. 2010b. "USE Efficiency" - goals, benchmarks, mediate results, *13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2010 m. teminės konferencijos "Pastatų inžinerinės sistemos" straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 129–132. ISBN 9789955285601.

Rūta MIKUČIONIENĖ

PASTATO ENERGINIŲ SAVYBIŲ
DARNAUS VALDYMO MODELIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Energetika ir termoinžinerija (06T)

MODEL OF SUSTAINABLE
MANAGEMENT OF BUILDING
ENERGY PERFORMANCE
CHARACTERISTICS

Technological Sciences,
Energetics and power engineering (06T)

2014 11 03. 8,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius