

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

**Darius BIEKŠA**

**PASTATO INŽINERINIŲ SISTEMŲ  
PROCESŲ INTEGRAVIMO  
VERTINIMAS TAIKANT  
EKSERGIJOS KRITERIJŲ**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
ENERGETIKA IR TERMOINŽINERIJA (06T)

Vilnius  LEIDYKLA  
TECHNIKA 2008

Disertacija rengta 2003–2007 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

**Darbo mokslinis vadovas**

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

**Konsultantas**

doc. dr. Artur Rogoža (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1448 M mokslo literatūros knyga

ISBN

© Biekša, D., 2008

# Reziუმė

Ženklią dalį pasauliniame galutinės energijos vartojimo balanse, apie 40 %, užima energijos dalis, suvartojama pastatuose. Komfortinių sąlygų palaikymas ir gerinimas gyvenamojoje, darbo ar poilsio aplinkoje yra natūralus kiekvieno žmogaus poreikis. Pastaruoju metu stebimas ryškus mokslinių tyrimų suaktyvėjimas didinint energijos vartojimo pastatuose efektyvumą.

Nepaisant aktualios problematikos, nuoseklios, darnia energetikos plėtra grindžiamos pastatų energetinio efektyvumo vertinimo metodikos iki šiol nėra. Daugelio tyrėjų naudojami metodai neįvertina skirtingų analizuojamų energijos srautų kokybinių potencialų, nekreipiamas dėmesys į skirtingus sistemų veikimo režimus jų eksploatavimo metu.

Darbo tikslas – įvertinti galimybes taikyti procesų ir sistemų integracijos metodą viešųjų pastatų mikroklimato sistemų projektavime, naudojime bei normavime, sukuriant individualius procesus ir visą įrenginių sistemą aprėpiančią priemonių kompleksą, kurio dėka būtų padidintas energijos vartojimo pastate termodinaminis naudingumas.

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, pagrindinės išvados, naudotos literatūros sąrašas. Disertaciniame darbe pastato inžinerinių sistemų tyrimui panaudoti trys metodai: sisteminė analizė, gyvavimo ciklo analizė ir termodinaminė (ekserginė) analizė. Sisteminės analizės naudojimas leidžia apibrėžti pastato inžinerinių sistemų elementus bei jų tarpusavio ryšius. Pasitelkus gyvavimo ciklo analizę nustatomi eksergijos poreikiai per visą sistemos gyvavimo laikotarpį. Ekserginės analizės naudojimas leidžia atlikti termodinamiškai teisingą skirtingų energijos rūšių palyginimą.

Įvade nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta darbe naudojamų metodų apžvalga. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Antrajame skyriuje pateiktas darbe taikomos tyrimo metodikos aprašymas, pristatomas sukurtas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis.

Trečiajame skyriuje pateikiami gauti tyrimų rezultatai bei pristatoma jų analizė.

Disertacijos tema paskelbtos 2 mokslinės publikacijos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose. Disertacijos tema perskaityti 5 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

# Abstract

A significant part of world energy consumption balance, approx. 40 %, is utilized in buildings. Maintenance of comfortable conditions and improvement in the living, working or recreational environment is a desire for every human. Therefore it is no surprise that there has been a sudden increase in scientific research in the field of building' energy efficiency.

Despite the relevance of the problem there is no sustaining methodology for evaluating building' energy efficiency by applying sustainable energy development approach. The majority of the researchers don't assess different potential of the analyzed energy flows nor systems operational regimes.

The aim of the work is to evaluate the possibilities for applying exergetical process and system integration method in the design, operation and normalization of the office building service systems: to prepare design solutions that increase buildings' service systems' thermodynamical efficiency and covers individual processes and elements' chain systems.

The thesis is divided into the introduction and three main chapters, conclusions, a list of literature and a list of publications.

In this work the building service systems' analysis incorporates three interconnected methods: system analysis, life cycle and thermodynamical analysis. Application of system analyses enables an estimation of service system's elements (subsystems) and their interconnections. Life cycle analysis allows estimation of total exergy demand through the whole system's life cycle. Thermodynamical analysis provides tools for the proper calculation and comparison of different quality energy.

The introduction is dedicated for a presentation to the problem and its topicality. There are also formulated purposes and tasks of the work; the used methods and novelty of solutions are described; author's publications and structure of the thesis are presented.

The first chapter covers an analysis of existing publications related with problems of the thesis. At the end of the chapter the conclusions are formulated.

The second chapter introduces research methodology and describes created thermodynamical model of building service systems'.

The third chapter covers research results and their analysis.

The results of thesis were announced in 5 conferences in Lithuania and abroad. The main statements of the dissertation were published in 2 scientific journals.

## Žymėjimai

### Santrumpos

AMKS	aktyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema;
ATD	antras termodinamikos dėsnis;
CŠT	centralizuotas šilumos tiekimas;
GCA	gyvavimo ciklo analizė;
PIS	pastato inžinerinė sistema;
PE	pirminė energija;
PTD	pirmas termodinamikos dėsnis;
PMKS	pasyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema;
SA	sisteminė analizė;
ST	sistemų teorija.

---

# Turinys

Rezumė.....	III
Abstract.....	IV
Žymėjimai.....	V
Įvadas .....	1
<b>1. Literatūros ir atliktų tyrimų analizė .....</b>	<b>7</b>
1.1. Sisteminė analizė.....	8
1.1.1. Hierarchinis sistemų sandaros principas.....	9
1.1.2. Pagrindinės sistemų charakteristikos.....	11
1.1.3. Sistemos modeliavimo etapai .....	11
1.1.4. Sisteminis operatorius.....	12
1.2. Gyvavimo ciklo analizė .....	12
1.2.1. Gyvavimo ciklo analizės raida .....	14
1.2.2. Gyvavimo ciklo analizės fazės .....	15
1.2.3. Duomenų rinkimo metodai .....	16
1.2.4. Duomenų detalumo lygmuo .....	17
1.2.5. Gyvavimo ciklo analizės tipai .....	17
1.2.6. Gyvavimo ciklo analizės vertinimo kriterijai .....	18
1.3. Ekserginės analizės principai .....	19
1.3.1. Ekserginio vertinimo metodo „formalizavimas“ .....	20
1.3.2. Emergijos principas .....	22
1.3.3. Ekserginio vertinimo taikymo atvejai ir raida kitų tyrėjų darbuose .....	23
1.4. Pirmojo skyriaus išvados .....	25
1.5. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką .....	26
<b>2. Tyrimo metodika.....</b>	<b>27</b>

2.1. Pastato sistemos energijos srautai.....	28
2.1.1. Pastato mikroklimatas .....	31
2.1.2. Metinių energijos poreikių įvertinimas .....	35
2.1.3. Klimatinių sąlygų formalizavimas .....	36
2.1.4. Patalpai tiekiamų energijos srautų struktūra .....	37
2.2. Pastato inžinerinių sistemų energijos poreikiai .....	38
2.2.1. Sistemų energijos poreikiai jų gyvavimo laikotarpiu.....	39
2.2.2. Pastato AMKS energijos srautų identifikavimas .....	40
2.3. Inžinerinių sistemų termodinaminis modelis.....	43
2.3.1. Tipinės pastato inžinerinės sistemos .....	44
2.3.2. Šildymo sistema .....	45
2.3.3. Vėdinimo sistema.....	50
2.3.4. Vėsinimo sistema .....	52
2.3.5. Apšvietimo sistema .....	53
2.3.6. Patalpos mikroklimato modeliavimas .....	53
2.3.7. Teorinis pastato modelis .....	55
2.4. Antrojo skyriaus išvados .....	56
<b>3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė.....</b>	<b>57</b>
3.1. Šildymo sezono metu veikiančių pastato inžinerinių sistemų tyrimo rezultatai .....	57
3.2. Šiltojo sezono metu veikiančių pastato inžinerinių sistemų tyrimo rezultatai .....	62
3.3. Metiniai eksergijos poreikiai „prie pastato sienos“ .....	63
3.4. Mikroklimato kondicionavimo sistemų optimizavimo galimybės .....	64
3.4.1. Pastato inžinerinių sistemų integracijos 1 atvejis.....	65
3.4.2. Pastato inžinerinių sistemų integracijos 2 atvejis.....	68
3.4.3. Pastato inžinerinių sistemų integracijos rezultatų palyginimas.....	70
3.5. Tyrimo rezultatų jautrumo analizė.....	72
3.6. Eksergijos poreikis per sistemų gyvavimo laikotarpį.....	74
3.7. Trečiojo skyriaus išvados .....	76
<b>Bendrosios išvados.....</b>	<b>79</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>81</b>
<b>Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema .....</b>	<b>87</b>





---

# Ivadas

## Darbo aktualumas

Stebint pasaulinės bendruomenės vystimosi tempus bei ryškėjančias tendencijas, aplinkos apsauga ir efektyvus bei geidžiamai mažėjantis išteklių naudojimas tampa pirmieji siekiais, kurių įgyvendinimui užtikrinti vien atskirų šalių pastangų deja, nepakanka.

Tarptautinės visuomenės susirūpinimą blogėjančia situacija puikiai iliustruoja pastaruju metu prasidėję precedento neturintys procesai. Visų pirma, tai su Kioto protokolu [28] susijusių mechanizmų įgyvendinimas, kurie pirmą kartą suteikia svarius ekonominius svertus sprendžiant aplinkosaugines problemas pasauliniu mastu. Papildomai, atskiros šalys rodo sektinas iniciatyvas griežtindamos išteklių naudojančių įrenginių efektyvumo reglamentavimą, taikydamos darnaus išteklių naudojimo planavimo metodus, rengdamos plačias visuomenės informavimo akcijas.

Galima drąsiai teigti, kad energijos gamybos, tiekimo ir vartojimo grandinė yra be abejonės didžiausias antropogeninės veiklos poveikį aplinkai indikuojantis veiksnys. Tačiau energijos ištekliai, kurie jau kelis šimtmečius funkcionavo kaip valstybių ekonomikos katalizatoriai, pastaruju metu privalo sulaukti papildomo, kritiško požiūrio siekiant užtikrinti bent dalinį daromos žalos neutralizavimą.

Ženklią dalį pasauliniame galutinės energijos vartojimo balanse, apie 40 % [16], užima energijos dalis, suvartojama pastatuose. Komfortinių sąlygų palai-

kymas ir gerinimas gyvenamojoje, darbo ar poilsio aplinkoje yra natūralus kiekvieno žmogaus poreikis, tad pastaruoju metu stebimas ryškus mokslinių tyrimų suaktyvėjimas ties energetinio efektyvumo didinimo problematika pastatuose neturėtų stebinti.

Nepaisant aktualios problematikos, nuoseklios, darnia energetikos plėtra grindžiamos pastatų energetinio efektyvumo vertinimo metodikos iki šiol nėra. Daugelio tyrėjų naudojami metodai neįvertina skirtingų analizuojamų energijos srautų kokybinių potencialų. Kokybinis srautų vertinimas dažniausiai atliekamas analizės pabaigoje pritaikant pirminės energijos koeficientus [15], kurie nustatomi ne analitiniu būdu ar remiantis termodinaminės analizės principais, bet sukauptais statistiniais išteklių naudojimo duomenimis ar politinių diskusijų keliu.

Energijos poreikių skaičiavimai patalpų šildymui, vėdinimui ar aušinimui remiasi energijos balansų sudarymu, kurie savo ruožtu vertinami pagal pirmojo termodinamikos dėsnio (PTD) nuostatas. Pagal šį dėsnį, energija yra apibrėžiama kaip absoliučiai likvidi, t. y. ji niekur nedingstanti, o tik keičianti savo formą. Remiantis šia koncepcija yra vertinamos pastatuose diegiamų energijos efektyvumo didinimo priemonių naudos, sutaupytos energijos kiekiai ir pan.

Tačiau pastatuose susidarantys energijos srautai skiriasi ne tik kiekybiniais, bet ir kokybiniais parametrais. Tradiciškai susiklosčiusi situacija, kuomet santykinai žemai temperatūrai patalpoje palaikyti sunaudojami aukštą kokybinį potencialą turintys energijos šaltiniai. Vertindami gaminamos energijos galutinį vartotoją, gautume, kad aukštą kokybinį potencialą turinti energija sunaudojama (iššvaistoma) žemo potencialo, apie  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , šilumai gauti. Ši situacija turi būti keičiama visų pirma maksimaliai panaudojant pastato viduje ir išorėje susidarantį energijos pritekėjimus ar jų nuvedimo būdus. Analizuoti į pastatą tiekiamų ir jo viduje susidarantį srautų efektyvumo didinimo galimybes būtina taikyti naują, energijos kokybinius parametrus identifikuojančią metodą. Šiame darbe naudojamas termodinaminės analizės metodas, kuris pagrįstas antruoju termodinamikos dėsniu (ATD), skelbiančiu energijos nuvertėjimo arba neišvengiamo entropijos generavimo principą. Energijos kokybinę vertę nusakantis kriterijus – eksergija, parodo energijos potencialą atlikti naudingą darbą, sistemos ir aplinkumos parametrams artėjant į pusiausvyrą. Šio kriterijaus naudojimas leidžia atlikti ATD požiūriu teisingą skirtingų energijos (rūšių) srautų palyginimą ir analizę bei užtikrina darnios energetikos plėtros procesą.

Apibendrinant gali teigti, kad pagrindinė **problema** iškylanti pastato inžinerinių sistemų vertinime ir analizėje yra ta, kad tiek pačios inžinerinės sistemos, tiek diegiamų energijos efektyvumo didinimo priemonių vertinimas remiasi PTD. Dar daugiau, sistemos yra nagrinėjamos tik tai esant projektinėms sąlygom, nekreipiant dėmesio į skirtingų sistemų veikimo režimus jų eksploataavimo periodu.

## Tyrimų objektas

Tyrimo objektu pasirinktos visuomeninės paskirties pastatų mikroklimato kondicionavimo sistemos. Tyrimas apima šildymo, vėdinimo, vėsavimo, apšvietimo sistemų ir jų elementų analizę charakteringais sistemų eksploatavimo periodais. Darbe nagrinėjamo ekserginio vertinimo metodo taikymas tiriant eksergijos vartojimo efektyvumo didinimo galimybes pastatuose.

## Darbo tikslas

Darbo tikslas – įvertinti galimybes taikyti procesų ir sistemų integracijos metodą viešųjų pastatų mikroklimato sistemų projektavime, naudojime bei normavime, sukuriant individualius procesus ir visą įrenginių sistemą aprėpiantį priemonių kompleksą, kurio dėka būtų padidintas energijos vartojimo pastate termodinaminis naudingumas.

## Darbo uždaviniai

1. Sukurti teorinį pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį, skirtą pastato inžinerinėse sistemose ir jų elementuose vykstančių energijos transformacijos procesų kokybiniam ir kiekybiniam tyrimui.
2. Nustatyti minimalius pastato eksergijos poreikius „prie pastato sienos“, formuluojant inžinerinį uždavinį išoriniams energijos tiekėjams pateikti iki pastato ribos pakankamo potencialo ir kiekio energiją.
3. Užtikrinti galimai minimalų pastato eksergijos poreikį „prie pastato sienos“, t. y. atitinkantį pastato MKS šiandieninėmis techninėmis priemonėmis galimo pasiekti veikimo integralumo laipsnį.
4. Atlikti pastato inžinerinių sistemų analizę, įvertinant ne tik normines sistemų parinkimo sąlygas, bet ir tų sistemų susietus darbo režimus.
5. Nustatyti „prie pastato sienos“ susidarančio eksergijos poreikio struktūrą, identifikuoti skirtingų energijos formų dedamąsias.

## Ginamieji teiginiai

1. Disertacinis darbas remiasi nuostata, kad šiuo metu naudojami energijos vartojimo efektyvumo didinimo vertinimo metodai, paremti vien PTD nuostatomis, nėra pakankami. Siekiant užtikrinti darnų energetikos procesą būtina taikyti metodus įvertinančius energijos kokybės parametrus.

2. Pastate veikiančių inžinerinių sistemų vertinimas kaip vieningos integruotos sistemos leidžia sumažinti bendrą pastatui tiekimos eksergijos poreikį.

3. Pastato inžinerinių sistemų tyrimas turi apimti ne tik projektines sąlygas, bet ir kitus charakteringus sistemų veikimo režimus. Tai leidžia nustatyti atskirų sistemos elementų įtaką eksergijos poreikio formavimuisi sistemų eksploatacijos periodu ir nustatyti galimas sistemų integracijos vietas.

## Tyrimų metodai

Šiame darbe pastato inžinerinių sistemų tyrimui panaudoti trys metodai, tai sisteminė analizė, gyvavimo ciklo analizė ir termodinaminė (ekserginė) analizė. Sisteminės analizės naudojimas leidžia identifikuoti pastato inžinerinių sistemų elementus bei jų tarpusavio ryšius. Pasitelkus gyvavimo ciklo analizę nustatomi eksergijos poreikiai per visą sistemos gyvavimo laikotarpį. Ekserginės analizės naudojimas leidžia atlikti termodinamiškai teisingą skirtingų energijos rūšių palyginimą.

## Mokslinis darbo naujumas

1. Sukurtas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis, leidžiantis analizuoti tiek atskirose pastato inžinerinėse sistemose, tiek jų elementuose vykstančius energijos transformavimo procesus. Tai įgalina įvertinti pačių sistemų ir įdiegiamų energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių termodinaminį naudingumą

2. Sukurtas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis panaudotas pastato inžinerinių sistemų tyrimui, įvertinant charakteringus jų veikimo periodus.

3. Nustatyti patalpai ir pastato inžinerinėms sistemoms tiekiamos eksergijos kiekiai ir struktūra skirtingais eksploatacijos periodais.

## Darbo aktualumas ir praktinė nauda

Darbe nagrinėjama tematika yra aktuali, nes apima kokybiškai naują ir iki šiol mažai taikytą energijos srautų vertinimo metodą. Atliekamas pastato inžinerinių sistemų tyrimas apima ne tik ekserginės galios poreikių analizę esant nepalankiausioms išorės sąlygoms, bet ir detaliam analizuojami eksergijos srautai charakteringais sistemų veikimo periodais.

Darbe pateikiamas energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių vertinimo metodas leidžia nustatyti ekserginį inžinerinių sistemų efektyvumą,

kuris įgalina termodinaminiu požiūriu teisingai orientuoti darnią energetikos plėtrą.

## **Darbo rezultatų apibavimas**

Disertacijos tema paskelbtos 2 mokslinės publikacijos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose.

Disertacijoje teikiama medžiaga buvo skelbiama 5 konferencijose:

1. Doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Jaunoji energetika“ LEI, Kaunas, 2006.
2. Mokslinėje konferencijoje „Šilumos energetika ir technologijos“ KTU, Kaunas, 2006.
3. Tarptautiniame kongrese „E-nova 2006: Intelligente Energiesysteme“ Studienzentrum Burgenland, Pinkafeld, 2006.
4. 6-oje tarptautinėje konferencijoje „Energija pastatams“, Vilnius, 2004.
5. Respublikinės mokslinė konferencija „Inžinerinės sistemos“ VGTU, Vilnius, 2004.

## **Disertacijos struktūra**

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, pagrindinės išvados, naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 96 puslapių, kuriuose pateikti 38 paveikslai, 3 lentelės ir 82 literatūros šaltiniai.



## Literatūros ir atliktų tyrimų analizė

Šiame darbe nagrinėjamos pastato inžinerinių sistemų efektyvumo didinimo galimybės. Tyrime naudojama sistemų efektyvumo sąvoka sutapdinama su termodinaminio efektyvumo apibrėžimu, kuomet sistemų tobulumas yra įvertinamas remiantis ne tik PTD balanso lygtimis, bet integruojant ir ATD nuostatas. Siekiant sėkmingai įvykdyti tyrimui iškeltus tikslus, būtina paruošti nuodugnią bei struktūrizuotą vykdytinų tiriamųjų darbų metodiką.

Atsižvelgiant į tiriamąjį objektą – pastatų inžinerines sistemas, jų analizei neišvengiamai tenka naudoti sisteminės analizės metodą (1.1 skyrius), leidžiantį nustatyti ryšius tarp atskirų sistemas sudarančių elementų bei sistemos veikimą valdančias funkcijas. Sisteminės analizės panaudojimas leidžia sukurti pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį.

Tyrimas neapsistoja vien ties momentinių sistemų darbo režimų analizę, bet ir įvardija pirminės energijos (PE) poreikius per pilną sistemų gyvavimo laikotarpį. Tuo tikslu darbe yra pristatoma bei pritaikoma gyvavimo ciklo analizė (1.2 skyrius).

Energijos transformavimo procesų efektyvumas darbe yra vertinamas tiek kiekybiniu, tiek kokybiniu požiūriais. Tokio vertinimo įgyvendinimui pasitelkiama eksperimentinė analizė (1.3 skyrius). Būtent kokybiniu požiūriu atliekamas pastato inžinerinių sistemų energijos poreikių vertinimas įvairiais sistemų veikimo periodais išskiria šį darbą iš eilės kitų tyrėjų atliktų darbų. Jis leidžia atlikti termodinamiškai teisingą skirtingų energijos rūšių kokybinį palyginimą.

## 1.1. Sisteminė analizė

Sisteminė analizė (SA) arba sistemų teorija (ST) yra tarpdisciplininė mokslo sritis, nagrinėjanti sistemas kaip visumą. Bendrosios sistemų teorijos pradininkas yra biologas Karl Liudwig von Bertalanffy [74], kuris praėjusio amžiaus pradžioje susirūpino vis didėjančia skirtingų mokslo krypčių tarpusavio izoliacija. Jis teigė: „fizikas, biologas ar sociologas, vaizdžiai tariant, yra užsidarę savo privačiose visatose ir ištraukti žodį iš tokio kokono yra labai sunku“. Jo iškeltos idėjos, apjungiančios platų disciplinų spektrą, tapo moderniosios sisteminės analizės pagrindu.

SA didžiausias dėmesys yra skiriamas sistemų kompleksiskumo ir tarpusavio sąveikos savybių tyrimams. Analizė grindžiama sisteminio arba „sveiko mąstymo“ principu, kuris savo ruožtu remiasi į sudėtingų, visų pirma, techninių sistemų ribų, struktūros, savybių, veikimo, elementų ir procesų, apimančių medžiagų, energijos ir informacijos srautų bei vyraujančių jėgų tarpusavio sąveikos, bendrojo integralumo, o taip pat sąveikos su apsuptimi atpažinimui reikalingas žinias [50].

Egzistuoja daugybė sąvokos „sistema“ apibrėžimų. Informacinių srautų sistemų tyrimuose nusistovėjęs apibrėžimas skelbia, kad sistema yra sudaryta iš tarpusavyje susietų dalių, kurios sąveikauja siekdamos įvykdyti tam tikrus tikslus [70]. Toks aiškinimas yra universalus, tačiau nagrinėjant sudėtingas, gamtoje sutinkamas, tame tarpe ir technines, sistemas vertėtų naudoti platesnį šios sąvokos apibūdinimą, kuris byloja, kad sistemos, kaip ją sudarančių elementų ir ryšių tarp jų visumos savybės, yra didesnės nei atskirų jos elementų [81]. Atskirai surinkti elementai, kurių nesaisto tarpusavio ryšiai, nesudaro sistemos, todėl galima konstatuoti, kad neatsiejamas sistemos egzistavimo požymis yra sinergijos arba holizmo efektas.

Sisteminės analizės taikymas yra paplitęs kuriant ar nagrinėjant technines sistemas. Techniniu sistemų kūrimo proceso metu sudaromi fiziniai (mazgų make-tai, prototipai ir kt.), grafiniai (brėžiniai, schemas, grafikai ir kt.), matematiniai (loginės diagramos, optimizavimo lygtys ir kt.), analitiniai modeliai, siekiant nustatyti ir įvertinti sistemos elementų ryšius, optimizuoti šių funkcionavimą [52].

Techninė sistema – tai nustatyta tvarka tarpusavyje sąveikaujančių elementų visuma, kuri skirta nustatytai naudingai funkcijai atlikti [81].

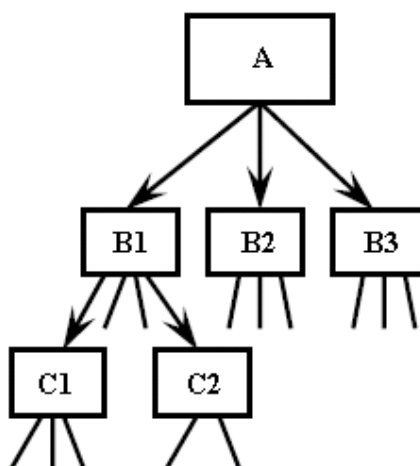
Viena iš pagrindinių šio darbo idėjų yra bendrosios pastato inžinerinės sistemos (arba komfortinių sąlygų užtikrinimo sistemos) sąvokos išskėlimas. Tiek moksliniuose tyrimuose, tiek praktiniame jų taikyme nusistovėjo požiūris, kuomet patalpų komfortines sąlygas užtikrina atskiros pastate funkcionuojančios inžinerinės sistemos, kurių tarpusavio sąveika menkai vertinama. Darbe siekiama kilstelti šią nusistovėjusią nuostatą į vienu rangu aukštesnį sistemos hierarchinį lygmenį, t. y. atskiros pastato inžinerinės sistemos turėtų būti laikomos aukštesnio lygmens sistemos – bendrosios pastato inžinerinės sistemos – posistemė. Ver-



ta paminėti, kad minėtas sistemų struktūrizavimas yra nuoseklus žingsnis būdingas, vykdant sisteminės analizės modeliavimo etapus, tačiau inžineriniuose tyrimuose bendrosios pastato inžinerinės sistemos koncepcija, kaip tyrimo objektas, lyg šiol nėra plačiai nagrinėta.

### 1.1.1. Hierarchinis sistemų sandaros principas

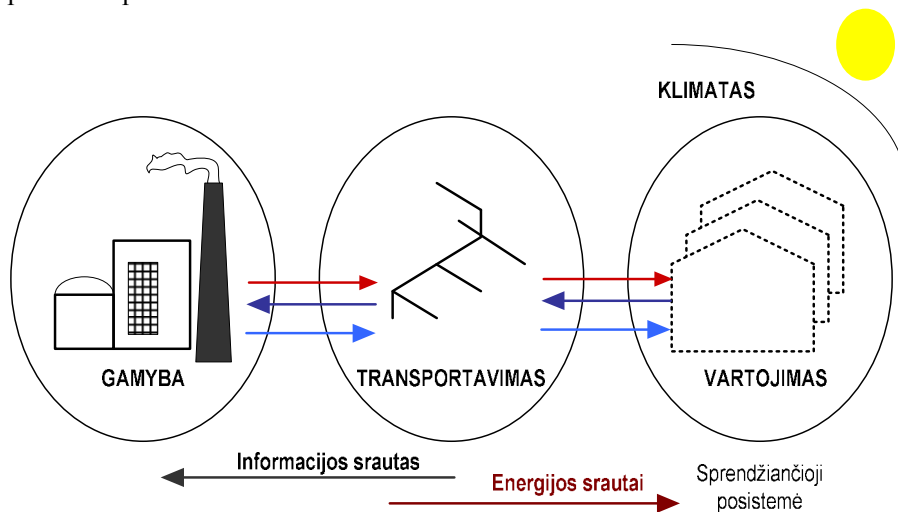
Techninės sistemos neegzistuoja pačios savaime. Realybėje kiekviena sistema B yra aukštesnės sistemos A – viršsistemės – dalis. Kaip aukštesnės sistemos dalis, sistema B sąveikauja su kitais viršsistemės elementais. Sistemos lygmuo hierarchinėje struktūroje yra apibūdinamas nurodant jos rangą [41, 38, 45]. 1 paveiksle pateikiama sistemų hierarchinės struktūros schema.



1 pav. Sistemų hierarchinė struktūra

Sistemą B sudarantys elementai taipogi gali būti laikomi žemesnio rango sistemomis, taip vadinamomis posistemėmis. Kaip matyti iš 1 paveikslo, sistemų hierarchinė struktūra yra sudaryta iš lygmenų/rangų. Tam pačiam rangui priklausančios sistemos yra panašaus sudėtingumo bei vykdo panašias funkcijas. Sistema gali būti veikiamą aukštesnio arba to paties rango sistemų, tuo tarpu posistemų įtaka sistemai yra silpna. Remiantis šia nuostata patogų aiškinti uždarytų ir atvirųjų sistemų termodinaminę sampratą [38]. Nagrinėjamos sistemos atžvilgiu daug didesnio rango sistema gali būti laikoma uždara sistema, o nagrinėjama sistema daug didesnio rango sistemos atžvilgiu – atvirąja [74]. Šiame darbe nagrinėjamų pastato inžinerinių sistemų atžvilgiu klimatas yra laikomas uždara sistema.

Sistemų valdymas hierarchinėje struktūroje atliekamas informaciniais signalais, kuriuos siunčia „sprendžiančiosios“ sistemos arba elementai turintys „tikslius“. Parankus pavyzdys sistemų hierarchinės struktūros iliustravimui yra aprūpinimo šiluma energetinė techninė sistema. Principinė tokios sistemos schema pateikta 2 paveiksle.



2 pav. Aprūpinimo šiluma techninė sistema

Pateiktoje schemoje (2 pav.) matyti, kad aprūpinimo šiluma techninę sistemą sudaro trys posistemės (elementai): gamyba, transportavimas ir vartojimas. Žvelgiant iš istorinės perspektyvos buvo nusistovėjusi samprata, kad „sprendžiantysis“ sistemos elementas yra gamyba. Atsigręžus į netolimą praeitį tokia situacija buvo įprasta, kuomet pirmoje eilėje buvo kuriama energijos generavimo sistema (dažnai su perspektyviniu galios pertekliumi), kuri palaipsniui būdavo „aplipdoma“ naujais energijos vartotojais. Toks energetinių sistemų plėtros ir juolab planavimo metodas tapo praktiškai neįmanomas ir ekonomiškai nepagrįstas liberalizuotos energetikos sąlygomis, kuomet perspektyvinis energijos poreikių atsiradimas tampa sunkiai prognozuojamas. Šiandieninėje energetikos sektoriaus plėtroje vis plačiau naudojamas integruotas energijos išteklių planavimo metodas, didelį dėmesį skiriantis energijos vartotojų poreikių valdymui (angl. demand side management). Šio metodo esmė yra nuoseklų energijos planavimo procesą užtikrinančių priemonių naudojimas, siekiant patenkinti energijos vartotojo poreikius. Metodo taikymo tikslas – nustatyti tokią aprūpinimo energija sistemos struktūrą, kuri tenkintų finansinius, ekonominius, aplinkosauginius, energijos tiekimo saugumo, darnios plėtros ir kitus reikalavimus. Kokybiškam integruoto energijos išteklių planavimo proceso įgyvendinimui naudojama aibė įrankių, ku-

riuos galima būtų grubiai suskirstyti į dvi grupes: ekonometriniai metodai ir „iš apačios į viršų“ (angl. bottom up) optimizaciniai metodai [60].

### 1.1.2. Pagrindinės sistemų charakteristikos

SA skelbia, kad kiekviena apibrėžta sistema, t. y. sistema su nustatytomis ribomis, turi turėti elementus, atributus ir elementų tarpusavio sąveika nusakančius ryšius.

Elementu vadinamas tam tikras materialus, energetinis ar informacinis objektas, pasižymintis tyrėjui svarbiomis savybėmis, tačiau vidinė jo sandara (struktūra) nėra analizuojama. Elemento savybes apibūdinanti informacija vadinama elemento atributais. Ryšiais yra nusakomi tyrėjui svarbūs materijos, energijos ar informacijos manai tarp elementų [79].

Pagal sistemos ribas kertančius arba nekertančius materijos ir energijos srautus sistemos skirstomos į atskirus tipus. Kuomet per sistemos ribą nevyksta jokie materijos ir energijos mainai, tokia sistema vadinama izoliuota. Didžiąja dalimi tokios sistemos yra kuriamos laboratorijose eksperimentiniams tikslams. Jeigu per sistemos ribas materijos mainai nevyksta, o energijos srautų judėjimas įmanomas – turime uždarąją sistemą. Termodinamikos teorijoje tokios sistemos vadinamos adiabatinėmis, kuomet sistemos vidinė energija gali būti pakeista tik atvedus arba nuvedus nuo sistemos energiją darbo pavidalu.

Atvira sistema vadinama tokia sistema, kurios ribas kerta tiek materijos, tiek energijos srautai. Tai bene plačiausiai paplitęs aplinkoje sistemų tipas [50]. Taipogi yra išskirti tokie sistemų tipai kaip morfologinės, kaskadinės, veiksmo – atoveiksmio, kontrolės sistemų, ekosistemos, tačiau plačiau šiame darbe jos nagrinėjamos.

### 1.1.3. Sistemos modeliavimo etapai

Sudėtingų techninių sistemų analizė turi būti atliekama laikantis nuoseklumo ir žemiau pateikiamo metodinio eiliškumo. Nepaisant egzistuojančių sistemų įvairovės pagrindiniai sisteminio modeliavimo etapai esti tie patys [52, 79].

1. Sistemos tikslo funkcijos nustatymas, kuri nusako sistemos gebėjimą išreikšti savo savybes ir pertvarkyti darbo objektą į reikiamą būseną ar formą prie tam tikrų sąlygų, t. y. turi būti apibrėžta sistemos materialioji, energetinė ar informacinė išėiga. Pavyzdžiui katilo sistemos išėiga – šiluma (srautas, temperatūra ir t. t.).

2. Pagrindinių sistemos dalių (elementų) išskyrimas ir jų tarpusavio sąveikos ryšių identifikavimas. Šiame etape vykdoma pirminė sistemos struktūros analizė, ryšių kryptčių nustatymas, t. y. įvardijami didžiausią įtaką sistemai turintys elementai.

3. Sistemoje vykstančių procesų identifikavimas, jų įtakos sistemai bei veikimo sąlygų nustatymas. Stebimos sistemos funkcionavimo stadijos/fazės, šuoliai, būsenos kitimai, t. y. nustatoma pagrindinių pokyčių sistemoje dinamika ir veikiantys faktoriai.

4. Sistemos ir ją supančios aplinkos ryšių nustatymas, sistemos įeigos parametru paieška. Įvardijama, kokia forma ryšiai įgyvendinami: materijos, energijos ar informacijos srautais.

5. Neapibrėžtumų ir atsitiktinumų įtakos įvertinimas sistemos funkcionavimui, matematinis jų formalizavimas.

6. Sistemos struktūrizavimas, rangavimas sistemos tikslo funkcijos atžvilgiu, pagrindinių ryšių nustatymas. Iki šio etapo sistemos analizę gali atlikti žmogus, neturintis specifinių žinių apie atskirus sistemos elementus, tačiau tęsiant modeliavimą būtinas atskirų sistemos elementų specifinių žinių turėjimas.

7. Sistemos valdymo mechanizmo užrašymas, kuris apima ribinių valdymo parametrų nustatymą, veikimo režimus, elementų savybių kitimo seką sistemos veikimo periodu.

#### 1.1.4. Sisteminis operatorius

Vykdamas esamų sistemų analizę ir norint suprasti kodėl atskira sistema egzistuoja tokioje formoje ar būsenoje, turi tokias posistemas ir pan., būtina atsekti sistemos vystymosi seką, t. y. nustatyti kaip sistema evoliucionavo laike. Šiai procedūrai atlikti naudojamas sisteminis operatorius [77] ar kitaip vadinama devynių ekranų talentingo mąstymo schema.

## 1.2. Gyvavimo ciklo analizė

Šiame skyriuje bus trumpai supažindinama su gyvavimo ciklo analize (angl. life-cycle analysis). Pristatomos pagrindinės jos taikymo sritys. Supažindinama su chronologiniais raidos etapais, pateikiami sąryšiai su kitais naudojami analizės metodais. Apžvelgiamos svarbesnės problemos, su kuriomis susiduriama naudojant GCA.

Gyvavimo ciklo analizės (GCA) naujumas ir visuotinio taikymo patrauklumas pasireiškia tuo, kad į sprendimų priėmimo procesą šalia materialinių ir energetinių sąnaudų yra įtraukiami aplinkosauginiai bei socialiniai aspektai. GCA procedūros yra įtrauktos į aplinkos apsaugos valdymo standartą ISO 14000 [68], kuris padeda įmonėms laikantis teisinio reglamentavimo mažinti jų vykdomos veiklos sukeltą neigiamą poveikį aplinkai. Energetikos srityje (ir ne tik) GCA, kaip vienas iš sisteminės analizės metodų, yra paremtas holistiniu požiūriu, kuomet energijos aprūpinimo proceso vertinime nustatomos tiek materialiosios, tiek nematerialiosios sąnaudos, kurių pastarosios apima veiklų intervalą nuo projekto

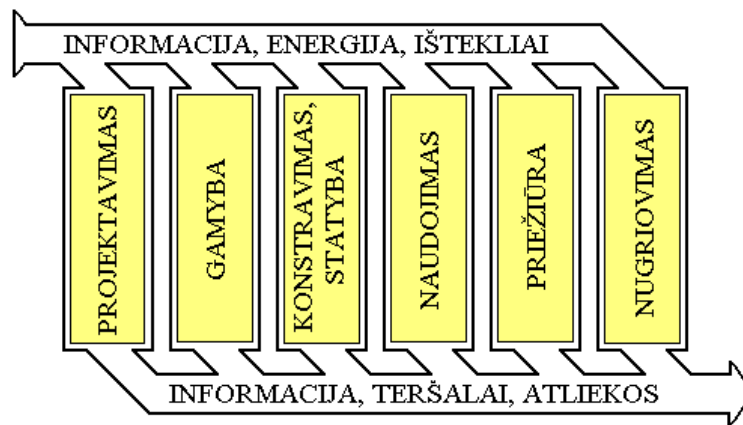
konceptijos sugeneravimo iki žemės kokybinių funkcijų atstatymo projektui pasibaigus. Pavyzdžiui, pasirinkus pastatą kaip GCA tyrimų objektą, materialioms sąnaudoms būtų priskiriami kaštai pastato projektavimui, statybai, priežiūrai, remontui, nugriovimui ir pan. Nematerialioms išlaidoms būtų priskiriamos sąnaudos už padarytą žalą aplinkai gaminant pastato elementus, pastato eksploatacijos metu sunaudojamos energijos gamybos metu sukeltą poveikį ir t. t.

Vienas iš didžiausių iššūkių naudojant GCA yra tas, kad nuolat reikia operuoti naudojantis negalutiniais bei nevisiškai patikimais duomenimis. Pagrindines tyrėjo gaunamų duomenų iškraipymo priežastis galima įvardina, kaip:

1. Klaidingas išankstinis įsitikinimas dėl „teisingo“ srautų, su skirtingais matavimo vienetais, kiekybinio palyginimo;
2. Aklas tikėjimas nepatikimais duomenimis iš konfidencialaus šaltinio;
3. Duomenų tikrinimas, neatliekant medžiagų srauto balanso [52].

Nepaisant aukščiau išvardintų priežasčių, sietinų su tyrėjo kokybinėmis sąvybėmis, galimos ir kitos priežastys, ypač jei duomenys yra globalūs. Tam įtakos gali turėti skirtingų pramonės procesų ir ekonominės veiklos lygiai skirtinguose regionuose, nevienodų technologijų naudojimas vienuose procesuose ir, pagaliau, skirtingi proceso įeigos parametrai: skirtinga produkcijos bei žaliavų kokybė ir pan.

Labai svarbu visos analizės metu išlikti objektyviu ir nuosekliu, neatmetant galimų sprendimų dėl išankstinio tyrėjo įsitikinimo, kuris, kaip gali paaiškėti, buvo neteisingas. Svarbu pateikti, apibudinti tyrime taikytas prielaidas.



3 pav. Struktūrinė GCA schema

Gyvavimo ciklo analizė – tai objekto (sistemos) tiesioginių ir netiesioginių veiksmų aplinkai ir visuomenei nustatymas per visas jo gyvavimo fazes: gamybą,

įrengimą, naudojimą, priežiūrą ir sunaikinimą. 3 paveiksle pateikiama principinė GCA vaizdavimo schema.

Kiekvieno iš gyvavimo ciklo etapų įėigą sudaro informacija, energija ir ištek-liai. Savo ruožtu išėigoje yra pagaminama informacija, teršalai ir atliekos.

Gyvavimo ciklo analizė – tai metodas, apimantis veiksmų etapus, įvertinantis galimus veiksnius ir interpretuojant rezultatus, kurie susiję su produkto ar proce-so įtaka žaliavoms, energijai ir aplinkai, nuo jų atsiradimo iki sunaikinimo. Iš GCA apibrėžimo galima daryti išvadą, kad bendrinis GCA objektas – žaliavų pakartotinio panaudojimo galimybė. GCA galima apibūdinti kaip mokslinę ir techninę tyrimų sistemą.

### 1.2.1. Gyvavimo ciklo analizės raida

GCA ištakomis galima laikyti energijos vartojimo optimizavimo studijas, ku-rios buvo atliekamos įvairiose pramonės šakose, kuriose buvo juntami energijos vartojimo suvaržymai. Palaipsniui analizė, taikyta vien energijos vartojimo efektyvumo didinimo sričiai, prasiplėtė įtraukdama energijos išteklių nagrinėjimą. Tyrimams toliau vystantis, studijos apėmė ne tik sistemos įėigos bei ir išėigos analizę, taip suformuodamos pagrindinius GCA principus. GCA analizės studijų pirmtake yra laikomas 1969 metais kompanijos Coca-cola atliktas darbas, ku-riame įvertintas pilnas produkto poveikis aplinkai nuo jo gamybai naudojamų medžiagų gavybos lygmens iki atliekų tvarkymo. Analizei plečiantis ir apjun-giant vis didesnį nagrinėjamų objektų ratą, atsirado daugiau giminingų tyrimų tipų, tokių kaip pilnutinis įvertinimas (angl. total assessment), išorinių kaštų įvertinimas (angl. including externalities) arba mažiausių sąnaudų planavimas (angl. least cost planning). Iškilė klausimas dėl GCA naudojamų vienetų normalizavi-mo bei svorio vienetų įvedimo. Priimant sprendimus apimančius trumpą ar vidu-tinį laikotarpį, pinigai kaip matavimo bei vertinimo vienetas yra patogūs ir pla-čiai taikomi, tačiau vertinat sprendimus ilgalaikėje perspektyvoje pinigai, kaip matavimo vienetas, tampa nepatikimas. Visų pirma tai susiję su pinigų savybe nuvertėti laikui bėgant, papildomai atsiranda netikslumai dėl pinigų vertės svyra-vimų ir neadekvačių (kad ir trumpalaikių) išteklių kainos susiformavimo rinkoje ir pan. Atsižvelgiant į sutiktus sunkumus, naudoti pinigus kaip matavimo vienetą buvo atsisakyta. Buvo nutarta, kad energija yra universalesnis matavimo vienetas už pinigus. Tačiau energijai taip pat būdinga nuvertėjimo savybė, tad ilgainiui vertinimuose buvo pasirinkta naudoti energijos kokybę apibūdinantis kriterijus – eksergija, kuris plačiau pristatomas 1.3 skyriuje.

Pirmoji GCA buvo atlikta energijos srityje, savyje apjungusi atskiras energe-tines technologijas ir visą energijos teikimo sistemą. Iš karto buvo pastebėta, kad reikalingų duomenų gavimas yra didelė problema. To išdavoje, GCA žvilgsnis nukrypo į individualius produktus, nes jiems reikalingų duomenų gavimas buvo

paprastesnis. Iki šiol išlieka atviras duomenų rinkimo ir kaupimo klausimas [46, 9].

Gyvavimo ciklo analizės metodikos vystyme aktyviai dalyvauja Aplinkos toksikologijos ir chemijos bendrija (angl. SETAC), kurios pirmieji darbai šioje srityje pasirodė 1991 metais. Bendruomenės pasiūlytas GCA fazių skirstymas buvo priimtas ir integruotas į ISO 14000 standartus.

1992 metais buvo pristatyta pirmoji eko-ženklų (angl. eco-labeling) priskyrimo schema, kurios pagrindinis tikslas – skatinti įmones savo veikloje diegti darnaus vystymosi principus bei sudaryti skaidresnes sąlygas vartotojams identifikuoti tokias įmones ir jų gaminamą produkciją.

1996 metais Prancūzijoje buvo išleistas pirmasis GCA standartas NF X30-300. Po metų pradėta leisti tarptautinių standartų serija ISO 14040, 41, 42, 43 reglamentuojanti skirtingas GCA metodo pakopas. Sekantis GCA formalizavimas apėmė 1999–2001 metais išleisti ISO 14020, 25, 48, 49 standartai, kurie reglamentuoja techninės dokumentacijos rengimą komunikacijos, aplinkosauginių veiklos krypčių bei darbo metodų srityse. 2006 Lietuvos standartizacijos departamentas išleido LST EN ISO 14040 ir LST EN ISO 14044, kuriuose apjungti anksčiau minėti standartai. Kaip tiesioginį GCA taikymą praktikoje reikia paminėti direktyvą 2005/32/EB [17], kuri nustato ekologinio projektavimo reikalavimų energiją vartojantiems gaminiams nustatymo sistemą, kurioje GCA įvardijama kaip būtina vertinimo priemonė.

### 1.2.2. Gyvavimo ciklo analizės fazės

GCA apima daugelį pakopų ir jas lydinčių procedūrų, todėl pastaruoju metu bendrąjį gyvavimo ciklo analizės pavadinimą vis dažniau ima paminėti atskirus etapus atitinkantys pavadinimai, tarp kurių yra gyvavimo ciklo inventorinė analizė (angl. life cycle inventory), būvio ciklo įvertinimas (angl. life cycle assessment) [35]. Taipogi dažnai sutinkamos sąvokos – „nuo lopšio iki kapo“ analizė (angl. cradle to grave analysis), Eko balansavimas (angl. eco-balancing), medžiagų srautų analizė (angl. material flow analysis).

Pagal tarptautinis aplinkos apsaugos vadybos standartą, skiriamos tokios GCA vykdymo stadijos:

1. LST EN ISO 14040:2007 Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Principai ir sandara (ISO 14040:2006). Pakeičia LST EN ISO 14040:2002, LST EN ISO 14041:2002, LST EN ISO 14042:2002, LST EN ISO 14043:2002 [34].
2. LST EN ISO 14044:2007 Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Reikalavimai ir nurodymai (ISO 14044:2006). Pakeičia LST EN ISO 14040:2002, LST EN ISO 14041:2002, LST EN ISO 14042:2002, LST EN ISO 14043:2002 [34].

Sėkmingam GCA atlikimui reikalingas išankstinis apsisprendimas dėl būtino tyrimo objekto detalumo lygio. Jeigu nagrinėjama visa sistema, lygiai svarbu nustatyti ribas tarp tiriamos sistemos ir viršsistemės. Būtent šie klausimai apsprendžia būsimų darbų sudėtingumą ir tuo pačiu apimtį. Šie būsimos GCA apribojimai erdvėje reikalingi sėkmingam duomenų rinkimui, apsidraudžiant nuo per didelio smulkmeniškumo, taip pat suteikiant galimybę jausti operuojamos sistemos posistemų proporcingumą.

### 1.2.3. Duomenų rinkimo metodai

Šaltinyje [52] pateikiamos 3 skirtingos duomenų kaupimo metodų grupės:

1) Statistinės analizės metodas remiasi konkrečių pramonės šakų publikuotais statistiniais duomenimis. Šiuo atveju duomenys yra apibendrinti, kuomet ne visada įmanomas tolesnis jų skaidymas į dedamasias. Metodas pasižymi mažomis darbo sąnaudomis, tačiau reikalauja didelio duomenų šaltinio patikimumo.

2) Įeigos išeigos analizės metodas remiasi nacionalinėmis ekonomikos įeigos-šieigos lentelėmis, kuriomis remiantis analizuojami atskirų energetinių sektorių piniginiai srautai bei juos atitinkančios energetinės sąnaudos. Tokiu atveju gaunamas lyginamasis dydis parodantis energetines sąnaudas vieno BNP vieneto gamybai. Suprantama, kad turint tokio tipo duomenis lengva operuoti. Bet kokį produktą ar procesą, turintį fiksuotą piniginę vertę, galima išreikšti energetiniais vienetais. Šis metodas labai jautrus ekonominiams svyravimams. Atsižvelgiant į GCA vertinamo periodo ilgalaikiškumą – duomenų tikslumas mažas.

3) Procesų analizės metodas remiasi duomenų rinkimu, nagrinėjami tiesioginiai ir netiesioginiai įvairių procesų energijos ir medžiagų srautai. Šis metodas yra patikimiausias ir tiksliausias, tačiau yra sudėtingas ir imlus darbui. Nagrinėjant dideles sistemas procesų analizės metodas yra per brangus. Šiuo atveju neverta pamiršti anksčiau minėtų duomenų iškraipymo priežasčių: dviejų identišku procesų duomenys gauti procesų analizės metodu gali skirtis, jeigu, pavyzdžiui, skirtingas naudojamos technologijos lygis ar skiriasi įeigos savybės.

4) Remiantis [61], duomenų rinkimų metodams galima priskirti ir integruotą gyvavimo ciklo duomenų rinkimo metodą. Šio būdo esmė būtų informacijos apie kiekvieno GC etapą sisteminimas ir kaupimas. Pagrindinis akcentas yra dedamas kiekvienos objekto arba sistemos gyvavimo fazės metu sukauptos patirties apibendrinimui. Galiausiai nustatomi ryšiai tarp atskirų etapų. Panašaus pavyzdžio apibendrinta informacija šiuo metu yra Japonijoje, realizuota taip vadinamose ekonomikos ryšio lentelėse (angl. economy relation tables) [46]. Pagal jas galima atsekti sąnaudas vienoje ar kitoje pramonės šakoje. Galima būtų teigti, kad šis būdas yra detalesnis įeigos-šieigos analizės metodo variantas.

Realiuose tyrimuose retai kada sutinkamas kuris nors vienas duomenų rinkimo metodas. Dažnai naudojamas jų visų mišinys, įgalinantis pasinaudoti jų geriausiomis savybėmis – mišrus metodas. Duomenys skirstomi į pagrindinius ir



papildomus [52]. Pagrindiniais laikomi tie duomenys, kurie sudaro didžiąją sąnaudų dalį. Jiems gauti naudojamas procesų analizės metodas, užtikrinantis tikslumą. Likusieji duomenys gali būti įeigos-išeigos analizės būdu gauti duomenys.

#### 1.2.4. Duomenų detalumo lygmuo

Labai svarbus klausimas, susijęs su duomenimis, yra jų detalumo lygio pasirinkimas. Tolesniame darbe remiuosi metodu, pristatytu V. Martinaičio knygoje [38]. Šiame šaltinyje yra pristatytas keturių lygių pirminės energijos (PE), reikalingos produktui pagaminti, klasifikacija:

- 1 lygmuo: tiesioginiai energijos poreikiai procesui ir transportavimui;
- 2 lygmuo: tiesioginiai energijos poreikiai procese dalyvaujančių medžiagų gamybai ir transportavimui;
- 3 lygmuo: tiesioginiai energijos poreikiai procese naudojamų žaliavų ir gamybos priemonių (mašinų) gamybai bei transportavimui;
- 4 lygmuo: tiesioginiai energijos poreikiai mašinoms, gaminančioms 3 lygmens mašinas, ir transportavimui.

Visi keturi lygmenys susistemina duomenų rinkimą pagal realius jos valdytojus. Nepaisant pateikto detalumo, minėtas modelis gali atsekti sunaudotos PE poreikį produktams, kurie sekančiame gamybos etape tampa žaliavoms. Konkrečiu atveju, imant vėdinimo sistemos elementą – ventiliatorių, PE sąnaudas galima nustatyti tik medžiagoms iš kurių sudarytas ventiliatorius. Informacijos, kokia PE dalis buvo sunaudota galutinio produkto gamybos procese, nebuvo rasta.

Minėtas keturių energetinių lygmenų modelis stipriai susišaukia su pirmąja gyvavimo ciklo faze – sukūrimu. Viso skiriamos trys pagrindinės objektų (sistemų) gyvavimo ciklo fazės, tai jau minėtas sukūrimas, naudojimas ir sunaikinimas.

Remiantis [4], sukūrimo fazę galima smulkinti į sistemos sukūrimą ir montavimą, įvertinant PE sąnaudas transportavimui. Naudojimas skiriamas į naudojimą ir priežiūrą, kuri gali būti korekcinė ir prevencinė. Prevencinės priežiūros terminas panaudotas A. Rogožos darbe [52] reiškia tokią objektų arba ištiesos sistemos elementų priežiūrą, kai jos elementai keičiami iš anksto nustatytais periodais, taip užtikrinant minimaliausią poveikį aplinkai energetiniu, aplinkosauginiu bei socialiniu požiūriais. Sunaikinimo fazė savo ruožtu gali būti skirstoma į išmontavimą, įvertinant transportavimą, ir perdirbimą. Jeigu perdirbimas neįmanomas, būtina įvertinti objekto sunaikinimui skiriamas energijos sąnaudas.

#### 1.2.5. Gyvavimo ciklo analizės tipai

GCA fazių analizės modelis (angl. chain analysis) plačiai naudojamas. Tačiau svarbu nepamiršti į vertinimus įtraukti lygiagrečių grandinių daromus poveikius. Jeigu į nagrinėjamą objekto (sistemos) grandinę (fazių seką) įsiskverbia

kitų objektų (sistemų) veiksniai, juos būtina integruoti. Kokią išorinių (lygiagrečių) grandinių veiksmų dalį verta integruoti paranku paaiškinti pavyzdžiu. Tarkime, techninės sistemos naudojimo fazėje (grandinės naudojimo žingsnyje) naudojama įranga, kuri tiekama iš gamintojo, kuriam, savo ruožtu, šie techninės sistemos įrenginiai sudaro 30 % visos gamybos. Esant tokiai situacijai, į techninės sistemos gyvavimo ciklo analizę būtina integruoti išorinius 30 % įrangos gamintojo daromo poveikio (energetinio, aplinkosauginio, socialinio).

Naudojant sistemos lygių analizę, skirtingai nuo fazių analizės, kiekvieno sistemos įrenginio poveikiai skaičiuojami atskirai. Šiuo atveju paprasčiau išvengti to paties poveikio dvigubo priskyrimo.

Trečias sistemos analizės metodas yra dalinė sistemos analizė. Dažniausiai šis analizės metodas naudojamas tiriant energetikos sektorių. Pagrindinis bruožas yra tas, kad šiuo atveju energetinis sektorius analizėje yra tiesioginis tyrimų objektas, o kitos ūkio šakos tik papildo analizę.

#### 1.2.6. Gyvavimo ciklo analizės vertinimo kriterijai

GCA yra svarbus sprendimų priėmimų įrankis, leidžiantis išsirinkti geriausias alternatyvas, vertinant ne trumpalaikius sprendimus, bet užtikrinant palankiausias sąlygas ateinančioms kartoms. Pagrindiniai kriterijai, kurie turi būti vertinami atliekam gyvavimo ciklo analizę, pagal [30] gali būti suskirstyti į:

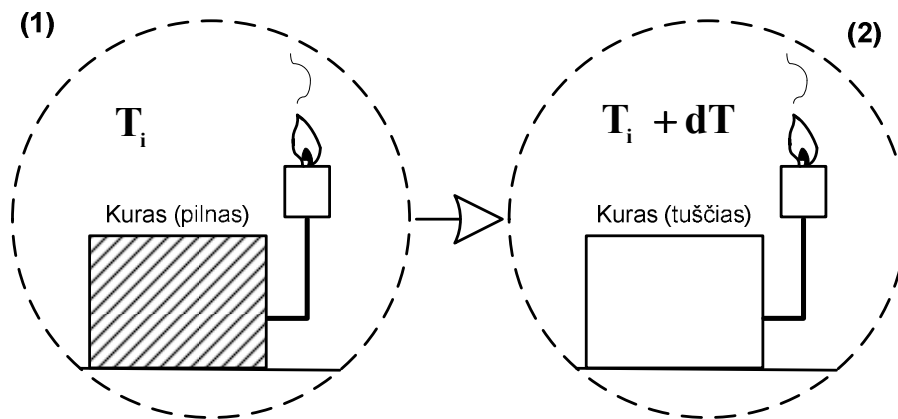
- Ekonominius poveikius: tiesioginiams valdytojams ir nacionalinei ekonomikai, įsiskolinimai, įdarbinimas ir pan.
- Poveikius aplinkai: teritorijų naudojimas, triukšmo lygis, vizualinis poveikis, vietinė žemės, vandens, oro ir biotos tarša, regioninė bei globalinė tarša, poveikis atmosferai – įtaka klimato kaitai.
- Socialinius poveikius: poreikių tenkinimas, poveikis sveikatai ir darbo aplinkai, rizika, stambių avarių pasekmių įvertinimas.
- Saugumo veiksnius: tiekimo (funkcionavimo) užtikrinimas, teisingo išteklių panaudojimas, saugumo užtikrinimas nuo teroristinių išpuolių.
- Patikimumo veiksnius: sistemų sutrikimo, planavimo neapibrėžtumo ir galimų ateities pokyčių atvejais.
- Vystimosi veiksnius: produktų ar technologijų suderinamumas su visuomenės siekiais.

Politinius veiksnius: kontrolės reikalavimų užtikrinimas, atvirumas decentralizacijai fizinių bei sprendimų priėmimų lygmenyje.

### 1.3. Ekserginės analizės principai

Šalia 1.2 skyriuje pristatyto sisteminės analizės metodo – gyvavimo ciklo analizės – darbo tiriamasis objektas yra nagrinėjamas ekserginės analizės požiūriu.

Energija naudojama praktiškai visuose prietaisuose ir procesuose. Pagal energijos tvermės dėsnį, tuo pačiu ir pirmąjį termodinamikos dėsnį ji niekur nedingsta, t. y. negali būti sunaikinta. Energija, įeinanti į sistemą darbo (elektros), šilumos ar medžiagų srautų pavidalu atitinkamai lygi sistemos pagamintuose produktuose ir šalutiniuose produktuose sukauptiems jos kiekiams. Tačiau nagrinėjant energijos vartojimo efektyvumo klausimus vien toks pagrindimas nėra pakankamas.



4 pav. Energijos transformavimas uždaroje sistemoje [56]

Pavyzdžiui, 4 paveiksle pavaizduota uždara sistema A, kurioje patalpintas mažas kiekis kuro ir jį supanti aplinka pripildyta oro. Tarkime kuras yra sudeginamas. Oksidacijos reakcijai pasibaigus gaunamas šiltesnis degimo produktų ir oro mišinys. Vertinant pirmo termodinamikos dėsnio pagrindu energijos kiekiai uždaroje sistemoje A pradinėje būsenoje ir po kuro oksidacijos išliko tokie patys. Tačiau logiška manyti, kad kieto kuro techninės panaudojimo galimybės yra kur kas platesnės nei šilto oro. Tai galėtų būti kuro deginimas gaminant elektros energiją, gaunant aukštą parametru garą ir pan., tuo tarpu žemos temperatūros šilumos panaudojimo galimybės yra ribotos. Galima konstatuoti, kad sistema pradinėje būsenoje turėjo didesnę potencialą nei galutinėje. Taip pat verta pastebėti, kad vykdant bet kokius tarpinius energijos transformavimo procesus, galutiniame rezultate bus gauta žemo potencialo energija. Energijos transformavimo proceso metu dėl procesų negrįžtamumo patiriamas aukšto energijos potencialo

sunaikinamas. Todėl, nors kiekybinė energijos išraiška išlieka nepakitusi, procesų metų negrįžtamai prarandamas energijos potencialas.

Ši reiškinį apibrėžia antras termodinamikos dėsnis, kuris nusako šilumos ir mechaninio darbo tarpusavio transformacijos kokybinius santykius bei sąlygas, kurioms esant tokios transformacijos galimos. Jis teigia, kad realūs procesai yra negrįžtami, kuriuose darbo kūno entropija visada didėja ir sukuriamas plėtimosi darbas visada mažesnis negu grįžtamajame procese.

Ekserginė analizė apjungia savyje minėtus termodinamikos dėsnius ir įgalina vykdyti energijos degradacijos skaičiavimus, kuriuose vertinama termodinaminių negrįžtamumų įtaka t. y. paskaičiuojami patiriami termodinaminiai nuostoliai [58, 43]. Kertinis analizės principą nusakantis dydis yra eksergija. Ji parodo medžiagos ir energijos išteklių tinkamumą veiksmui (darbingumą) [38]. Kitais žodžiais tariant eksergija parodo sistemos potencialą atlikti naudingą darbą sistemos ir aplinkumos parametrams artėjant į pusiausvyrą.

### 1.3.1. Ekserginio vertinimo metodo „formalizavimas“

Pagal 1.3 skyriuje pateiktą eksergijos apibrėžimą matematinė šio parametro išraiška užrašoma pasinaudojant priklausomybe [7]:

$$E = \left( U - T_0 S + PV + \sum \mu_i N_i + \frac{v^2}{2} + zg \right) - \left( U - T_0 S + PV + \sum \mu_i N_i + \frac{v^2}{2} + zg \right)_0 ; \quad (1)$$

čia  $U$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $\mu_i$ ,  $N_i$ ,  $v$ ,  $z$ ,  $g$  – atitinkamai reiškia vidinę energiją, apsupties temperatūrą, slėgį, cheminį potencialą, molekulių skaičių, greitį, aukštį ir laisvojo kritimo pagreitį. Indeksas  $_0$  parodo, kad parametrai atitinka apsupties būseną. Kaip matyti iš priklausomybės, eksergiją galima laikyti kintamu parametru, kuris tiesiogiai priklauso nuo pasirenkamos aplinkumos būsenos. Aplinkumos būseną gali būti pasirenkama atitinkanti sistemos aplinkos parametrus arba natūralios aplinkos būseną, kuri nėra pusiausvyroje su sistema [66]. Šiame darbe yra laikomasi nuostatos, kad aplinkumos būseną yra laikoma natūralios aplinkos (klimato) būseną. Esant šiai sąlygai, eksergijos sąvoka gali būti prilyginta Gibbs'o ir Helmholtz'o laisvosios energijos supratimui.

Nagrinėjant sudėtingas technines sistemas, kuriose energijos srautai yra pernešami skirtingais būdais, paranku išskaidyti pateiktą pilnutinę eksergijos išraišką (1) į dedamąsias, nusakančias konkrečias eksergijos srautų pernešimo formas.

Pagal pirmą termodinamikos dėsnį iš  $m$  tinklų sudarytoje sistemoje (5 pav.) vykstančių energijos procesų kiekybinio vertinimo balansas aprašomas pagal išraišką:

$$\sum_k [\dot{E}_{e,k}^{+,-}] + \sum_j [\delta \dot{Q}_j^{+,-}] + \dot{Q}_a^{+,-} + \sum [\dot{W}_{e,n}^{+,-}] = 0; \quad (2)$$

čia

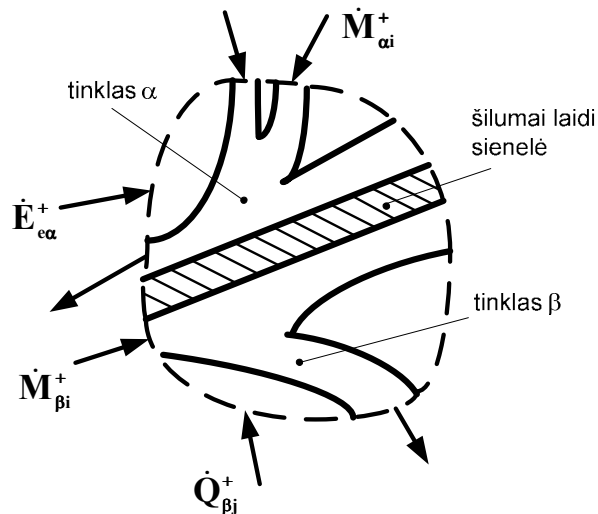
$\dot{E}_{e,k}^{+,-}$  – galia-techninis darbas (pagal apibrėžimą – eksergija), gautas (+) arba atiduotas (–) sistemos per įrenginį  $k$ ;

$\dot{Q}_j^{+,-}$  – galia-šiluma, gauta (+) atiduota (–) sistemos per įrenginį  $j$ ;

$\dot{Q}_a^{+,-}$  – galia-šiluma, gauta (+) atiduota (–) atmosferai, kurios temperatūra  $T_a$ ;

$$\dot{W}_{e,n}^{+,-} = \left\{ \sum_i [h_{czi} \cdot \dot{M}_i^{+,-}] - \frac{dU_{ecz}}{dt} \right\}_n; \quad (3)$$

$\dot{W}_{e,n}^{+,-}$  – efektyvioji virsmo (transformavimo) galia, gauta (+) atiduota (–) sistemos per tinklą  $n$ .



5 pav. Dviejų tinklų termodinaminė sistema [7]

Sudarant eksergijos balansą 5 paveiksle pavaizduotai sistemai gaunama išraiška:

$$\sum_k [\dot{E}_{e,k}^{+,-}] + \sum_i \left[ \int \left( 1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \delta \dot{Q}_i^{+,-} \right] +$$

$$+ \sum_n \left\{ \sum_j [(h_{cz,j} - T_a s_j) \dot{M}_j^{+,-}] - \frac{d}{dt} (U_{ecz} - T_a s) \right\}_n - T_a \frac{\delta S^i}{dt} = 0. \quad (4)$$

Bendroji eksergijos balanso forma sistemai sudarytai iš  $m$  tinklų yra:

$$\sum_k [\dot{E}_{e,k}^{+,-}] + \sum_i [\dot{E}_{q,i}^{+,-}] + \sum_n [\dot{E}_{w,n}^{+,-}] = \dot{L} \geq 0; \quad (5)$$

čia

$\dot{E}_{e,k}^{+,-}$  – techninio darbo galia, gauta (+) arba atiduota (–) sistemos per įrenginį  $k$ ;

$\dot{E}_{q,j}^{+,-}$  – šiluminės eksergijos galia, gauta (+) atiduota (–) sistemos per įrenginį  $j$ ;

$\dot{E}_{w,n}^{+,-}$  – virsminės (transformavimo) eksergijos galia, gauta (+) atiduota (–) sistemoje.

Šiame darbe atliekamame pastato inžinerinių sistemų tyrime efektyvumo kriterijumi pasirinkta eksergija.

### 1.3.2. Emergijos principas

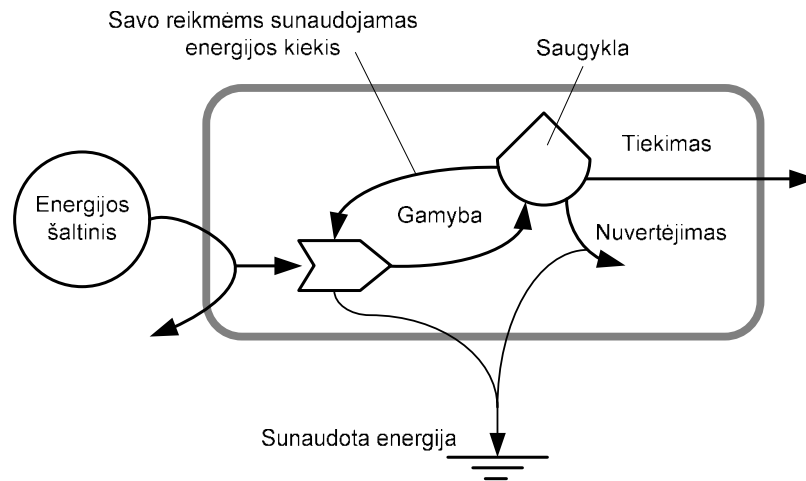
Apjungus jau minėtus sisteminės analizės, gyvavimo ciklo analizės ir kokybinio energijos potencialo – eksergijos – įvertinimo metodus buvo išvystytas kokybiškai naujas, kompleksinis sistemų nagrinėjimo būdas – emerginis vertinimas (angl. *emergy evaluation*).

Šio metodo pradininku yra laikomas biologas Howard Thomas Odum, kuris sukūrė teoriją apie ekosistemų išlikimo mechanizmą, paremta efektyviausiu energijos transformacijos principu ekosistemos hierarchinėje struktūroje [25]. Dažnai šis principas vadinamas ketvirtuoju termodinamikos dėsniumi arba didžiausios galios principu, kitaip vadinamu A. Lotkos dėsniumi.

Sistemų, tame tarpe ir techninių sistemų, struktūros vystymosi mechanizmas yra paremtas energijos srautų hierarchine priklausomybe. Principinė energijos srautų transformacijos hierarchinė schema pateikta 6 paveiksle.

Pateiktoje diagramoje, einant nuo kairės į dešinę, pastebima, kad absoliutinis energijos kiekis mažėja, tačiau transformacijos išėjoje gaunama galimai aukščiausios kokybės energija (priklausomai nuo transformacijos proceso efektyvumo, siekiama patirti kaip įmanoma mažesnius energijos nuostolius).

Atsižvelgiant į tai, kad energijos srautai kiekviename etape yra transformuojami, po ko gaunamas mažesnis skaičius, bet aukšto potencialo srautų, galima tvirtinti, kad tokia sistema turi hierarchinę priklausomybę. Atitinkamai gautieji srautai maitina hierarchiniu laipteliu aukščiau stovinčius srautus ir t. t. Šių energijos srautų grandinių egzistavimą galima laikyti universaliu dėsniu, kurį paranku taikyti analizuojant organizmus, ekosistemas, Žemėje vykstančius procesus ir pan.



6 pav. Energijos srautų transformacijos hierarchinė schema

Pagal apibrėžimą emerggija įvertina anksčiau atliktą darbą, kuris buvo panaudotas gaminant tam tikrą produktą arba paslaugą. Kitais žodžiais tariant emerggija galima būtų vadinti sistemos eksurgijos investiciją gaminant tam tikrą produktą ar paslaugą. Skirtingai nuo eksurginės analizės, kuri vertina vien esamuoju momentu turimos eksurgijos kiekį, emergginis vertinimas parodo visą kumuliacinį eksurgijos kiekį, reikalingą produkto gamybai. Šio metodo vertinimo atskaitos tašku yra laikoma uždara Žemės sistema, į kuria energija patenka tik saulės radiacijos keliu. Tokiu būdu emerggijos matavimo vienetu yra pasirinkti Saulės akumuluoti džauliai (angl. solar embodied joules).

### 1.3.3. Eksurginio vertinimo taikymo atvejai ir raida kitų tyrėjų darbuose

Žvelgiant į eksurginio vertinimo raidą tyrėjų darbuose, galima pastebėti, kad nuo novatoriškos idėjos eksurgijos koncepcija vis plačiau yra taikoma tiek mokslininkų veikloje, tiek praktinėse srityse. Galima stebėti keletą eksurginio vertini-

mo metodo evoliucijos krypčių: tai pramonės srityje plačiai taikomas procesų integracijos metodas ir analitinis ekserginis vertinimas, apimantis labai platų nagrinėjamų objektų spektrą, pradedant atskirų procesų analize [6, 39, 21], baigiant globalių ekosistemų ekserginiais modeliais [65, 67, 64]. Dažnai ekserginė analizė pristatoma, kaip darnaus sistemų vystymosi rodiklius nusakanti priemonė [54, 73, 2].

Procesų integracijos metodas, kaip jau minėta, sulaukė didelio dėmesio nagrinėjant pramoninius energijos srautų transformacijos procesus. Pirmosios energetinės krizės metais šis būdas tapo viena pagrindinių priemonių didinant energijos vartojimo efektyvumą. Reikia pastebėti, kad šio metodo esmė visų pirma remiasi į energijos srautų grafinių vaizdavimą ir atitinkamai galimų energijos vartojimo optimizavimo sričių identifikavimą [48, 12]. Didžiaja dalimi, tai siejasi su likutinės energijos panaudojimo arba atgavimo organizavimu instaliuojant šilumokaičių tinklus. Metodo pagrindinė idėja būtų maksimaliai didžiausias energijos potencialo panaudojimas „įdarbinant“ atliekinę energiją.

Antroji taikomo ekserginio vertinimo pusė apima daugiau analitinių energetinių procesų traktavimą. Šioje srityje yra paskelbta nemažai mokslinių darbų nagrinėjančių energetines sistemas (elektros gamybos schemas, šilumos generatoriai ir pan.) [14, 78, 71, 44, 69]. Eksergijos principo taikymas, kaip jau buvo minėta, didesnio dėmesio sulaukė išpopuliarėjus darnaus energetinio planavimo idėjoms. Buvo atpažinta, kad eksergijos kriterijus gali būti traktuojamas kaip universalus indikatorius vertinant energetinių procesų virsmo termodinaminį (absoliutų) efektyvumą, savyje integruojantį tiek energetinį, tiek ekologinį aspektus. Vienas ryškiausių tyrėjų šioje srityje gali būti laikomas M. Shukuya, kuris savo darbuose įrodinėjo eksergijos, kaip darnaus vystymosi kriterijaus taikymo būtinybę [57, 44, 56]. Mokslinėje visuomenėje, pripažinus šio metodo svarbą, buvo suburta grupė tyrėjų, kurie 1999–2003 dirbo ties tarptautinės energetikos agentūros leidžiamų gairių priedu Nr. 37, kurio pagrindiniu tikslu ir buvo įvardijamas racionalaus energijos vartojimo skatinimas, įdiegiant žemo energetinio potencialo ir aplinkai darnius energijos šaltinius (angl. IEA ECBCS Annex 37). Priedo kūrimo išdavijoje, darbo grupė susibūrė į visuomeninę organizaciją Low Exergy Systems in Buildings arba, sutrumpintai, LowEx.Net [72]. Organizacijos veiklos tikslas yra plėsti tyrimus šioje srityje. Buvo suorganizuoti teminiai seminarai 2004 gegužę Stokholme, 2004 spalį Eindhovene, 2005 balandį Padovoje. 2006 metais nuspręsta ASHRAE organizacijoje įkurti padalinį, kurio veiklos sritis apimtų darnių pastatų ekserginio vertinimo tyrimus.

Kaip vieną artimiausių šiame darbe nagrinėjamai problematikai galima būtų išskirti vokiečių tyrėją D. Schmidt, kuris savo darbuose [56] nagrinėja pastato inžinerinių sistemų termodinaminį efektyvumą, žematemperatūrinio šildymo ir aukštatemperatūrinio šaldymo taikymo ekserginį vertinimą. Pastato energetinė sistema yra skaidoma į atskirus elementus: generavimas, perdavimas, saugojimas, reguliavimas, atidavimas ir pan. Užsidavus projektines sąlygas yra paskai-



čiuojamos tokių sistemų segmentų eksergijos galių poreikis. Darbe nurodoma kaip keistųsi ekserginis galios poreikis, jeigu pastate būtų keičiami šilumos generavimo šaltiniai.

Šį metodą savo darbuose taikė ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto šildymo ir vėdinimo katedros tyrėjai V. Martinaitis, K. Čiuprinskas, A. Rogoža.

#### 1.4. Pirmojo skyriaus išvados

Energijos vartojimas bei jo augimas tampa globaline problema, kurios sprendimui turi būti naudojami darnaus išteklių planavimo metodai.

Energijos gamybos, tiekimo ir vartojimo pastatuose grandinė yra ženkliai didesni pasauliniame energijos vartojimo balanse. Pastatuose sunaudojamos energijos kiekis siekia 40 % [16]. Atitinkamai ir diegiamos energijos efektyvumo didinimo priemonės leistų pasiekti juntamus energijos sutaupymus.

Siekiant vystyti darnią energetikos plėtrą būtinas kokybiškai naujas požiūris į energetines sistemas. Jos negali būti vertinamos tik kaip atskiros, izoliuotos sistemos. Turi būti nustatoma ne tik pačios sistemos struktūra, bet ir jos ryšiai su ją supančiomis sistemomis ir viršsistemėmis. Šį klausimą nagrinėja sisteminės analizės metodas, kuris yra panaudojamas šiame darbe.

Atlikus pastato inžinerinių sistemų analizę ir nustačius jos tarpusavio ir ryšius su aplinka, buvo pateikta nauja energijos gamybos, tiekimo ir vartojimo grandinės schema. Joje, priešingai nuo anksčiau naudotos sampratos, galutinis energijos vartotojas yra laikomas „sprendžiančiuoju“ sistemos elementu. T. y. būtent vartotojas turi diktuoti energijos gamintojui, kiek ir kokios kokybės energijos jam reikia, kad efektyviausiu būdu patenkintų savo poreikius.

Siekiant atlikti visapusišką energijos sistemų ar energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių įvertinimą, negalima apsiriboti tam tikru sistemos veikimo momentu ar laikotarpiu nagrinėjimu. Būtina atlikti sistemos gyvavimo ciklo analizę, kuri apimtų sistemų projektavimo, gamybos, įrengimo, naudojimo, priežiūros ir nugriovimo etapus.

Trečiasis metodas, kuris yra taikomas šiame darbe, nagrinėja energijos kokybės klausimą. Šiuolaikiniuose pastatuose naudojama įvairių rūšių energija, todėl natūraliai iškyla jų tarpusavio palyginimo problema. Dabartinėje praktikoje tokios energijos formos kaip elektra ir šiluma yra vertinamos PTD šviesoje, t. y. laikoma, kad jos lygiavertės. Tačiau akivaizdu, kad šių energijos formų kokybė smarkiai skiriasi. Šiame darbe skirtingų energijos formų vertinimui naudojamas ekserginio vertinimo metodas, leidžiantis įvykdyti termodinamiškai teisingą energijos kokybės įvertinimą.

Kitų autorių darbuose, nagrinėjančiuose energetines sistemas, ekserginis vertinimas jau kurį laiką sėkmingai naudojamas. Tačiau pastato inžinerinės sistemos, kaip tyrimo objektas, tik neseniai susilaukė deramo tyrėjų dėmesio.

Atlikus kitų tyrėjų darbų apžvalgą buvo nustatyta, kad ekserginio vertinimo taikymas pastatų inžinerinių sistemų vertinime vis dar nėra plačiai paplitęs ir didžiaja dalimi apima pradinę sistemų analizę esant statinėms projektinėms sąlygoms.

## 1.5. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Atlikus apžvalgą galima teigti, kad pastate vykstantiems energijos transformacijos procesams yra skiriamas didelis tyrėjų dėmesys. Kalbant apie pastatų inžinerines sistemas, pastebėta, kad šalia kitų autorių atliktų sistemų ir atskirtų jų mazgų tyrimų, ekserginis vertinimas nėra taip plačiai paplitęs, kaip stebima pramonės procesuose.

Skirtingai nuo Schmidt [56] darbe pateiktos pastato inžinerinių sistemų eksergijos galios poreikių analizės, kuomet pastato inžinerinės sistemos nagrinėjamos išskirtinai užduotomis statinėmis projektinėmis sąlygomis, šiame darbe sutelkiamas dėmesys įvairiems sistemų veikimo režimams.

Darbe nagrinėjami charakteringi sistemų veikimo periodai, kurių metu analizuojami sistemos ir jų elementuose susidarantys eksergijos srautai. Tokiu būdu tyrimas yra praplečiamas analizuojant ne tik ribinėmis sąlygomis veikiančias sistemas bet ir nustatant pilnus eksergijos poreikius vertinamaisiais periodais. Atliekama sistemų analizė įgalina nustatyti eksergijos vartojimo efektyvumo didinimo vietas bei parinkti galimas optimizavimo ir integracijos priemones.

Pastato inžinerinės sistemos darbe vertinamos taikant gyvavimo ciklo analizę, t. y. nustatomas eksergijos poreikis ne tik sistemų naudojimo periodu, bet ir jos poreikis gamybai, priežiūrai bei sunaikinimui.

Darbe apibrėžiama pastato techninė sistema įvardijama kaip pagrindinė, t. y. sprendžiančioji aprūpinimo energija sistemos dalis. Teigiama, kad būtent pastatas diktuoja tiekimos jam energijos kokybinius ir kiekybinius parametrus.

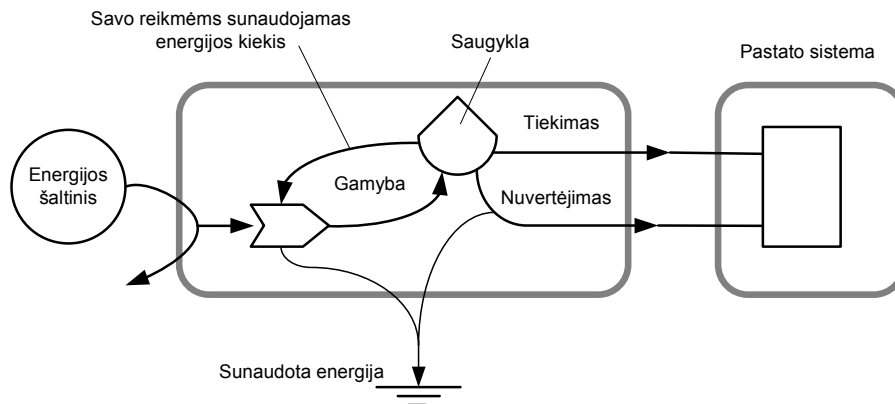
# 2

---

## Tyrimo metodika

Energija prieš pasiekdama pastato sistemos ribą pereina ištisą seką transformacijų, kurios gali būti nagrinėjamos kaip energijos srautų grandinės (apžvelgtos 1.3.2 skyriuje). Principinė tokios energijos srautų grandinės schema pateikta 7 paveiksle. Kaip matyti iš pateiktos schemos, kiekvieno energijos transformacijos proceso metu patiriamas energijos nuvertėjimas. Dalis energijos sunaudojama pačiam konversijos procesui, dalis taipogi grįžta kaip pamaitinimas į prieš tai buvusią žemesnę grandį. Schemoje atitinkamai yra išskirtos energijos generavimo-tiekimo ir vartojimo arba konkrečiai pastato sistemos. Remiantis A. J. Lotka suformuluotu sistemų savęs organizavimo principu [74], energetinės grandinės formuojasi maksimalios galios perdavimo principu. Analogiškai ir 7 paveiksle pavaizduotoje schemoje energijos transformacijų seka turėtų užtikrinti maksimalų eksergijos kiekį galutiniame grandinės taške (patalpoje). Vertinant iš šios pozicijos, daroma prielaida, kad eksergija, kuri yra tiekama į pastatą (kerta pastato sistemos ribas), yra pagaminta ir perduota pačiu efektyviausiu būdu (tai jokių būdu nereiškia efektyviausio galimo būdo, bet atitinka turimą techninį lygį), tai

yra, pastato išorėje vykstantys energijos transformacijos procesai nėra vertinami, o priimami kaip neišvengiama duotybė.



7 pav. Energijos srautų grandinė

Ši nuostata atitinka vieną pagrindinių atliekamo tyrimo uždavinių – nustatyti minimalų eksenergijos kiekį įvertinant jos struktūrą, kuris turi būti tiekiamas pastatui iš išorinio tiekėjo tuo pačiu užtikrinant užduotas komfortines sąlygas patalpoje. Detaliau energijos gamybos ir tiekimo sistemos nenagrinėjamos. Visas tolimesnis vertinimas bus atliekamas žvelgiant iš pastato sistemos pozicijų.

Siekiant toliau analizuoti pastato inžinerinės sistemą, pravartu nustatyti jos ryšius su kitais sistemos elementais, identifikuoti ją valdančią viršsistemę.

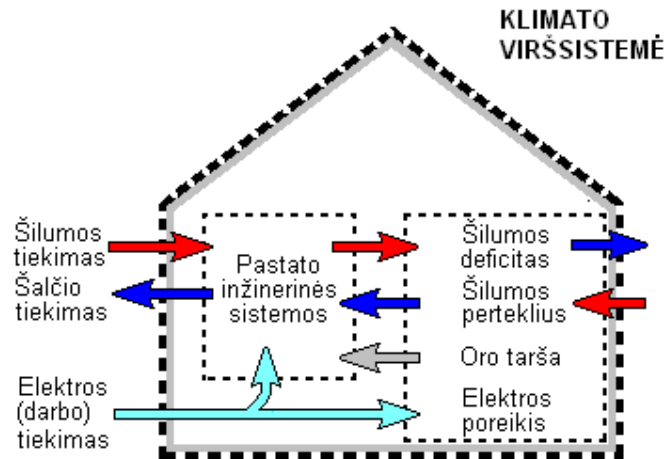
Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (1A, 2A).

## 2.1. Pastato sistemos energijos srautai

Pastatas yra sudėtinga inžinerinė sistema. Jos funkcionavimas tiesiogiai priklauso tiek nuo ją sudarančių elementų, tiek nuo jos viršsistemėje vykstančių procesų. Šiuo atveju viršsistemė yra laikoma pastato sistemos apsuptis, kuri savyje apjungia visus pastatą vienai ar kitaip veikiančius išorinius faktorius, tokius kaip atmosferos oras, saulės spinduliuotė, krituliai, vėjas ir panašiai. Viršsistemės įtaką pastato sistemai galima laikyti tiesiogiai nekontroliuojama, tačiau santykinai prognozuojama. Šiame darbe detalesnė pastato sistemos viršsistemės analizė nėra atliekama. Svarbu paminėti, kad šilumos tiekimo grandinėje šilumos vartotojas yra aukščiausią rangą turinti sistema. Šilumos teikimo bei gamybos sistemos yra to paties rango, tačiau šilumos vartotojų sistema yra laikoma sprendžiančioji.

Atskiro pastato sistemą galima suskirstyti į tris atskirus tarpusavyje glaudžiai santykiaujančius elementus. Tai pastato konstrukcinė dalis – atitvaros, patalpa

arba erdvė, kurioje užtikrinamos komfortinės sąlygos ir, trečiasis elementas, tai pastato inžinerinės sistemos. Principinė pastato posistemų schema pateikta 8 paveiksle.



8 pav. Pastato sistemą sudarančių elementų schema

Pastato architektūriniai sprendimai, optimalių aitvarų derinių nustatymas turi didžiulę įtaką, apsprendžiančią busimuosius pastato energijos poreikius. Savaimė suprantama, kad racionalūs aitvarų derinių parinkimo sprendimai, priimti pastato projektavimo stadijoje, leidžia užtikrinti mažesnius energijos poreikius pastato eksploatavimo laikotarpiu. Pastato aitvarų šiluminio varžų optimizavimas yra viena iš plačiai nagrinėjamų energijos suvartojimo efektyvumo pastate didinimo sričių [59, 37, 42, 53]. Pastatams, orientuotiems Lietuvos ir šaltesnėse klimatinėse zonose, tai visų pirma leidžia nustatyti tinkamiausią balansą tarp reikalingų šildymo ir vėsinimo poreikių, kaip pavyzdžiui, nepasvertai didelis pastato sienų izoliavimas nors ir sumažina energijos poreikį šildymui, neišvengiamai padidina energijos poreikius vėsinimui. Atitinkami teisingi architektūriniai sprendimai pastato aitvarų kompozicijai, savo ruožtu, leidžia maksimaliai išnaudoti susidarantius išorinius ir vidinius energijos pritekėjimus. Tokių pastatų statyba šiuo metu vis dar nėra plačiai paplitusi. Didžiąja dalimi tai yra vienetiniai demonstraciniai projektai, kuriems suprojektuoti ir įgyvendinti buvo pasitelkti novatoriški sprendimai (angl. state of art solutions).

Antras pastato sistemos elementas yra patalpa, kurioje turi būti palaikomos komfortinės sąlygos, kurios šiame darbe apibrėžiamos kaip pageidaujama terminė aplinka bei būtinas tiekti šviežio oro kiekis į patalpą. Patalpos posistemę gali-

ma laikyti sprendžiančiąją, nes būtent nuo jos būsenos parametrų priklauso kitų pastato elementų, ypačingai pastato inžinerinių sistemų, funkcionavimas.

**1 lentelė.** Pastato inžinerinės sistemos bei joms būdingi srautai ir režimai

Pastatų inžinerinės (pasaugų) sistemos		Vyraujantys srautai*			Vyraujantys režimai**		
		En	M	I	N	S	B
A.1	Šalto vandens						
A.2	Nuotekų						
A.3	Atliekų						
B.1	Karšto vandens						
B.2	Šildymo						
B.3	Vėdinimo						
B.4	Oro kondicionavimo						
C.1	Kuro (dujinio, skysto, kieto)						
C.2	Šilumos šaltinio (punktas, katilinė)						
D.1	Apšvietimo						
D.2	Elektros prietaisų						
E.1	Transporto (lif-tai, eskalatoriai, takeliai)						
F.1	Ryšų						
F.2	Saugos						
F.2.1	Gaisrinės						
F.2.2	Turto						
	Iėjimo						
F.3	Sistemų vadybos						
F.3.1	Apskaitos						
F.3.2	Monitoringo						
F.3.3	Administravimo						

\* - Vyraujantys srautai: En – energija, M – medžiaga, I – informacija;

\*\* - Vyraujantys režimai: N – nuolatinis, S – sezoninis, B – budintis.

Galima išskirti tris patalpos aplinkos terminės būsenos situacijas:

I. Patalpoje yra susidaręs šilumos deficitas. Šiuo atveju vykstant nestacionariems šilumos mainams patalpos aplinkai atiduodamas šilumos srautas viršiją į patalpą tiekiamą, patenkantį šilumos srautą. Susidaręs šilumos deficitas turi būti

kompensuojamas papildomu šilumos srautu į patalpą iki kol nusistovi terminė pusiausvyra. Iš esmės tokia situacija susidaro šildymo sezono metu, kuomet pastatos būtina nuolatos šildyti.

II. Patalpoje yra susidaręs šilumos perteklius. Atitinkamai į patalpą tiekiamas arba pritekantis šilumos srautas viršija iš patalpos dirbtinai nuvedamą arba patalpos aplinkai natūraliai atiduodamą šilumos srautą. Perteklinė šiluma turi būti aktyviai nuvedama. Tokia situacija susidaro nešildymo sezono metu, kai dėl vidiniu (žmonės, įranga) ir išorinių (saulės radiacija) šilumos pritekėjimų patalpą būtina papildomai vėsinti, t. y. šalinti šilumos perteklių.

III. Trečioji sąlyga, kurią būtina įvertinti, tai patalpoje esančio oro kokybė. Natūralu, kad naudojamoje (o dažnai ir nenaudojamoje) patalpoje susidaro oro teršalai, kuriuos būtina nuolatos šalinti. Šviežio oro tiekimas turi didelę įtaką patalpoje sukuriamoms komfortinėms sąlygoms, taip pat smarkiai įtakoja patalpos mikroklimato sąlygoms palaikyti sunaudojamos energijos kiekį.

Galima teigti, kad patalpos terminės aplinkos parametrus didžiaja dalimi apsprendžia pastato konstrukcija ir vidiniai išsiskyrimai, kai tuo tarpu patalpos oro kokybės parametrai tiesiogiai priklauso nuo patalpos naudojimo režimo bei vietinių teršalų išsiskyrimo šaltinių. Sąveika tarp pastato atitvarų ir patalpos posistemų akivaizdi.

Trečiasis pastato sistemos elementas – pastato inžinerinės sistemos. Jų funkcija – aktyviai reguliuoti komfortines sąlygas patalpoje. Savo ruožtu pastato inžinerinės sistemos galima skirstyti pagal energijos naudojimo intensyvumą, transportuojamų medžiagų srautus ir panašiai. Apibendrintas sistemų skirstymas pateikiamas 1 lentelėje.

Iš 1 lentelėje pateikto pastato inžinerinių sistemų aprašo matyti, kad pastate egzistuoja didelė įvairovė sistemų, atsakingų už skirtingas pastato funkcijas. Visų sistemų analizė bei juo labiau bendro darbo organizavimas, yra ambicingas uždavinys, link kurio turėtų būti einama. Šiame darbe, dėl tyrimo sudėtingumo, apsiribojama tikrai tų sistemų analize, kurios turi didžiausią įtaką pastato mikroklimato energiniam balansui. Tokiomis sistemomis laikomos šildymo, vėdinimo, vėsinimo bei apšvietimuos sistemos.

### 2.1.1. Pastato mikroklimatas

Patalpos energijos poreikius apsprendžia trys pagrindiniai veiksniai: patalpai keliami komforto reikalavimai, patalpos sistemą ribojančių atitvarų termodinaminės savybės ir patalpos (pastato) apsuptis. Pradedant nagrinėti patalpos energijos poreikių struktūrą pravartu apibrėžti komfortinių sąlygų palaikymo patalpoje mechanizmą.

Patalpos sistema, kurioje turi būti palaikomos komfortinės sąlygos, ir aplinkumos sistema nagrinėjamoju periodu, pavyzdžiui šildymo sezono laikotarpiu, nėra termodinaminėje pusiausvyroje. Patalpos oro temperatūra būna aukštesnė už

išorės oro, t. y. dėl atsiradusio temperatūrų potencialų skirtumo vyksta šilumos mainai, atitinkamai patalpos sistema patiria šilumos nuostolius. Tam, kad patalpoje nuolatos būtų išlaikomos komfortinės sąlygos, į patalpos sistemą privalo būti tiekimas šilumos nuostolius kompensuojantis energijos srautas.

Patalpos sistemos ribas kertantys šilumos nuostoliai gali būti kompensuojami pasitelkiant pasyviają ir aktyviają mikroklimato kondicionavimo sistemas.

Pasyviajai mikroklimato kondicionavimo sistemai, sudarytai iš pastato atitvarų yra priskiriami energijos srautai, kurie nėra (negali būti) aktyviai kontroliuojami. Tai šilumos pritekis nuo saulės spinduliuotės, pastato konstrukcijose akumuluota šiluminė energija, pritekėjimai nuo žmonių, apšvietimo sistemos, patalpoje naudojamų elektros prietaisų. Šilumos srautai nuo aukščiau išvardintų energijos šaltinių negali būti traktuojami kaip nuolatiniai, jie sąlyginai menkai prognozuojami, būdingas generuojamų srautų intensyvumo nepastovumas. Nepaisant ribotų tokių energijos srautų valdymo galimybių, jų generuojami šilumos srautai privalo būti maksimaliai panaudojami. Šie šilumos pritekiai yra traktuojami, kaip energijos srautai nuo atsinaujinančių šaltinių.

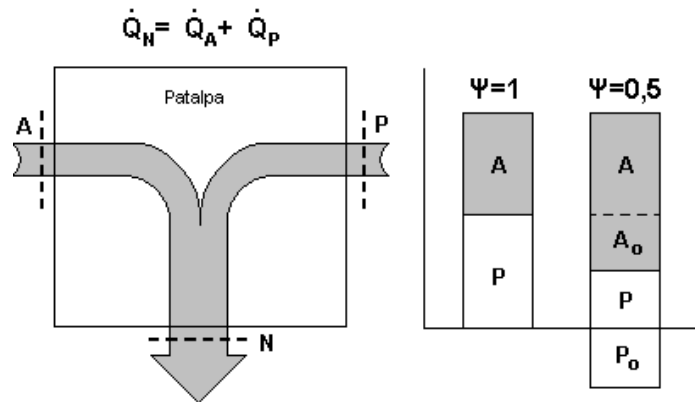
Tais atvejais, kuomet pasyviosios mikroklimato kondicionavimo sistemos (PMKS) generuojamo šilumos srauto nepakanka šilumos nuostoliams padengti, arba šilumos pritekų paprasčiausiai nėra, pasitelkiama aktyvioji mikroklimato kondicionavimo sistema.

Aktyviają mikroklimato kondicionavimo sistemą (AMKS) sudaro energijos tiekimo techninės sistemos, kurių perduodama energija yra gaunama deginant (transformuojant) kurą (energiją). Šios sistemos turi energijos gamybos (transformacijos), perdavimo ir atidavimo posistemas. Prie šių sistemų taip pat priskiriamos ir atsinaujinančius energijos šaltinius naudojančios techninės sistemos.

Principinė į patalpą tiekiamų energijos srautų schema pateikta 9 paveiksle. Kaip jau buvo minėta, patalpos šilumos nuostoliai (pjūvis N) yra dengiami kompensuojamaisiais energijos srautais iš PMKS (pjūvis P) ir AMKS (pjūvis A).

Lygiagretus šių srautų valdymas yra sudėtingas uždavinys, PMKS srautų kontrolė yra ribota, o jų išsiskyrimo dinamika sąlyginai sunkiai prognozuojama. AMKS energijos srautas tiesiogiai priklauso nuo PMKS generuojamo energijos srauto panaudojimo laipsnio, kuris apibūdinamas koeficientu  $\Psi$ .





9 pav. Energijos srautų principinė schema

Idealiu atveju (9 pav.) galėtų būti panaudojamas visas iš pasyviosios sistemos gaunamas energijos srautas ( $\Psi = 1$ ), tuomet patalpoje būtų palaikomos pageidaujamos komforto sąlygos ir pareikalaujamas minimalus energijos srautas iš aktyviųjų sistemų  $Q_A + Q_P$ . Tačiau realybėje, dėl techninių sistemų reguliavimo funkcijų ribotumo (sistemų reakcijos laiko), sistemų šiluminio inertiškumo AMKS sistemos nesugeba lanksčiai ir savalaikiai reaguoti į atsirandančius šilumos pritekėjimus. Tokiu atveju, energijos srautas iš aktyviosios sistemos tampa dydžiu  $Q_{A_o}$  didesnis negu faktiškai reikalingas. Patalpoje susidaro tiekiamų energijos srautų perteklius  $Q_{P_o}$ , pažeidžiantis patalpos termodinaminį balansą. Patalpoje neišlaikomos komfortinės sąlygos, išsiderina MKS reguliavimas, tikėtina, kad patalpa bus papildomai priverstinai vėdinama kompensuojant perteklinį energijos srautą  $Q_{P_o}$ .

Atvirkštinis procesas stebimas šiltuoju metų periodu, kuomet energijos pertekliniai pritekėjimai iš PMKS privalo būti dirbtinai nuvedami, t. y. AMKS veikia ne papildydama PMKS generuojamą energijos srautą, bet neutralizuodamos jų sukuriamą energijos perteklių, t. y. vėsindama.

Apibendrinus galima teigti, kad į patalpą tiekiamas šilumos srautas, skirtas kompensuoti šilumos nuostoliams, susideda iš dviejų tarpusavyje stipriai sąveikaujančių komponentų: šilumos pritekio ir techninių sistemų perduotos šilumos.

Į patalpą reikalingas tiekti energijos srautas apskaičiuojamas sudarant patalpos galių balansą [32]:

$$P_h = \sum \Phi_{el} + \sum \Phi_{\psi} + \Phi_v ; \quad (6)$$

čia

$\Phi_{el}$  – šilumos nuostoliai per atitvaras, W;

$\Phi_{\psi}$  – šilumos nuostoliai per ilginius šiluminius tiltelius, W;

$\Phi_v$  – šilumos nuostoliai dėl patalpos vėdinimo, W.

Šilumos srautas per patalpą ribojančias atitvaras apskaičiuojami pagal formulę:

$$\Phi_{el} = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot k_u \cdot (1 + \Delta k_o + \Delta k_w + \Delta k_h + \Delta k_d); \quad (7)$$

čia

U – atitvaros (atitvaros dalies) šilumos perdavimo koeficientas, W/(m<sup>2</sup>·K);

A – atitvaros (atitvaros dalies) plotas, m<sup>2</sup>;

$\theta_i$  – projektinė vidaus temperatūra, °C;

$\theta_e$  – projektinė išorės temperatūra, °C;

$k_u$  – pataisa, jeigu atitvara tiesiogiai nesusisiekia su išorės oru;

$\Delta k_o$ ,  $\Delta k_w$ ,  $\Delta k_h$ ,  $\Delta k_d$  – atitinkamai pataisos dėl atitvaros padėties pasaulio šalių atžvilgiu, dėl vėjo įtakos, dėl šildymo prietaisų rūšies, dėl išorės durų.

Šilumos nuostoliai per ilginius šiluminius tiltelius apskaičiuojami pagal formulę:

$$\Phi_{\psi} = \Psi \cdot l \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot k_u; \quad (8)$$

čia

$\Psi$  – ilginio šilumos tiltelio šilumos perdavimo koeficientas, W/m·K;

l – ilginio šilumos tiltelio ilgis, m.

Šilumos nuostoliai dėl patalpos vėdinimo apskaičiuojami pagal formulę:

$$\Phi_{ev} = c \cdot \rho_i \cdot L_{ev} \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot (1 - \eta_{hr}); \quad (9)$$

$$\Phi_{in} = c \cdot \rho_i \cdot L_{in} \cdot (\theta_i - \theta_e); \quad (10)$$

$$L_{in} = n_{in} \cdot A_p \cdot h \cdot \Delta k_c \cdot (1 + \Delta k_b) \cdot (1 + k_g). \quad (11)$$

Skaičiavimai atliekami taikant projektines temperatūras, atspindinčias tikėtinas blogiausias priimtinas išorės sąlygas. Skaičiuojant patalpos energijos poreikius šildymo sistemai sąlygoms, kurios skiriasi nuo projektinių, naudojama priklausomybė:

$$P = P_h \cdot \frac{\theta_i - \theta}{\theta_i - \theta_e}; \quad (12)$$

čia

$P$  – šilumos poreikis, esant  $\theta$  išorės oro temperatūrai, W;

$P_h$  – atitinka, projektinį (maksimalų) energijos poreikį, W.

Svarbu paminėti, kad pritekio šilumos srautai patalpos galios balanse nėra vertinami.

Skaičiuojant metinius patalpoje sunaudojamos šilumos kiekius sudaromas šilumos kiekių balansas, kuris įvertina patalpoje atsirandančius šilumos pritekėjimus.

$$Q = Q_{cl,\psi} + Q_v - \Psi \cdot (Q_s + Q_z + Q_c); \quad (13)$$

čia  $\Psi$  – šilumos poreikių panaudojimo daugiklis, kuris parodo, kokią dalį nuo esamų šilumos pritekėjimų gali būti panaudota. Kitais žodžiais tariant šis rodiklis apibūdina šildymo sistemos lankstumo laipsnį reaguoti į atsirandančius šilumos pritekėjimus.

Šildymo sezono energijos kiekiams įvertinti paranku naudoti dienolaipsnių metodą, kuris paremtas bazinės ir išorės temperatūrų skirtumo kumuliacine trukme.

### 2.1.2. Metinių energijos poreikių įvertinimas

Energijos poreikių įvertinimui skaičiuojamuoju periodu galima pasitelkti skirtingus būdus, kurie savo ruožtu remiasi [38]:

- Vidutine vertinamo sezono temperatūra  $T_m$  ir trukme  $z_{ss}$ ;
- Pilnutinės apkrovos trukme  $b_z$ ;
- Kumuliacine temperatūrų skirtumo trukme bazinės temperatūros  $T_b$  atžvilgiu.

Paskutinytis būdas dar vadinamas dienolaipsnių metodu. Šio energijos poreikių vertinimo būdo ištakos siejasi su biologijos sritimi, kurioje energijos kiekių vertinimo problematika taipogi yra svarbi. Vertinamojo periodo dienolaipsniai skaičiuojami iš patalpos oro temperatūros  $T_b$  atimant periodo išorės oro vidutinę temperatūrą  $T_m$  ir skirtumą dauginant iš parų skaičiaus periode:

$$DL = (T - T_m) \cdot N; \quad (14)$$

čia

$T$  – patalpos vidaus oro temperatūra, K;

$T_m$  – vertinamo periodo vidutinė išorės oro temperatūra, K;

$N$  – skaičiuojamo periodo parų skaičius.

Sąryšis tarp naudojamų skirtingų energijos poreikių vertinimo būdų pateikiamas priklausomybėje:

$$Q_{ss} = \dot{Q}_{max} \cdot \frac{T_{in} - T_m}{T_{in} - T_{ex}^c} \cdot z_{ss} = \dot{Q}_{max} \cdot b_z = \frac{\dot{Q}_{max}}{T_{in} - T_{ex}^c} \cdot DL_{ss} \quad (15)$$

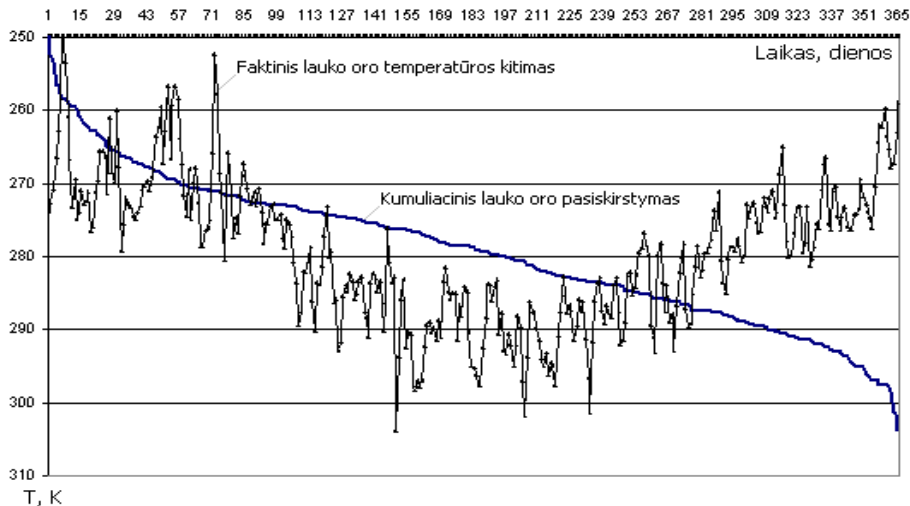
Iš priklausomybės (15) matyti, kad energijos poreikių skaičiavimas remiasi tuo pačiu skaičiavimo mechanizmu, tik jo įgyvendinimas atliekamas pasitelkus skirtingas priemones.

Toliau darbe energijos poreikių vertinimui bus naudojamas dienolaipsnių metodas.

### 2.1.3. Klimatinių sąlygų formalizavimas

AMKS energijos srautai, kaip galima matyti iš (7) ir (11) priklausomybių, tiesiogiai priklauso nuo išorės oro temperatūros, todėl išorinių sąlygų formalizavimas yra būtinas.

Energijos poreikių skaičiavimui patogiu naudoti kumuliacinį išorės temperatūrų grafiką, kuris pateiktas 10 paveiksle.



10 pav. Kumuliacinis išorės oro temperatūrų grafikas

Energijos poreikių skaičiavimui patogiu naudoti kumuliacinį išorės temperatūrų grafiką, kuris pateiktas 10 paveiksle.

Kumuliacinis išorės temperatūrų grafikas parodo atskirų temperatūrų suminę trukmę nagrinėjamoju periodu. Grafike pateiktas lauko oro temperatūrų kitimas proporcingas į patalpą tiekiamam energijos srautui. Ilgametį temperatūrų

pasiskirstymą atitinkanti matematinė temperatūros kumuliacinio pasiskirstymo funkcija yra [38]:

$$Z(T) = N \cdot \frac{1 + \tanh(a(T - T_m))}{2}, \quad (16)$$

čia

$N$  – nagrinėjamo periodo trukmė paromis;

$a = c / S_d$ ;

$c$  – regionui būdingas pastovusis dydis;

$S_d$  – paros vidutinės temperatūros standartinė nuokrypa.

Sudarant dienolaipsnių trukmės grafikus (analogiškus išorės temperatūrų kumuliaciniams grafikams) skirtingos ilgumos klimatinėms zonoms, galima pastebėti, kad kiekvienu atveju AMKS veikimo sąlygos skiriasi. Pastebima bendra tendencija, kad judant kryptimi nuo sąšalio link pusiaujo, energijos poreikių kiekiai ir struktūra keičiasi. Tai leidžia daryti prielaidą, kad negalima naudoti vieningo „universalus“ pastatų MKS komplekso, kuris tiktų visoms klimatinėms zonoms. Galima teigti, kad kiekvienas atvejis turi būti nagrinėjamas individualiai, parenkant būtent tai konkrečiai klimatinei zonai tinkančias pastato inžinerines sistemas.

Remiantis šia nuostata, šiame darbe baziniam vertinimui nagrinėjamos Lietuvos klimatinėse sąlygose dažniausiai naudotinos pastato inžinerinės sistemos.

Svarbu paminėti, kad naudojant dienolaipsnių metodą (taip pat ir kitus paminėtus vertinimo būdus) energijos poreikių įvertinimui, paskaičiuojamas energijos kiekis reikalingas tiekti į patalpą neišskiriant, kuri jo dalis bus tiekama iš AMKS, o kuri dengiama iš PMKS. Todėl AMKS dalis gautame sraute turi būti nustatoma iš bendro reikalingo energijos kiekio atimant patalpoje atsirandančius energijos pritekėjimus, įvertinant techninių sistemų reakcijos laiką.

#### 2.1.4. Patalpai tiekiamų energijos srautų struktūra

Darbe daroma prielaida, kad didžiausią įtaka patalpoje atsirandantiems pritekėjimams daro saulės spinduliuotė. Ši nuostata gali būti paremta tendencija, kad pastaruoju metu sparčiai didėjant buities įrangos ir apšvietimo prietaisų energijos vartojimo efektyvumui, energijos vartojimas, o tuo pačiu ir šilumos pritekis nuo šių prietaisų, mažėja. Pastato atitvarų šiluminė inercija, be abejonių, atlieka reikšmingą funkciją patalpos komfortinių sąlygų reguliavime, tačiau priimama, kad šiluminė inercija iš esmės įtakoja energijos srautų intensyvumą, bet nekeičia reikalingo tiekti energijos kiekio (kai nevertinamas protarpinis šildymas).

### *Ekserginiai dienolaipsniai*

Aukščiau aptartas energinių dienolaipsnių skaičiavimo metodas leidžia nustatyti į patalpą reikalingą tiekti energijos kiekį. Analogiškas principas yra taikomas skaičiuojant ekserginius dienolaipsnius, kurie savo ruožtu apibūdina į patalpą reikalingą tiekti eksergijos kiekį [40]. Tiek energijos kiekis, tiek joje esanti eksergijos dedamoji gali būti identifikuojama kaip būtinas energijos kiekis patalpoje, kurioje turi būti palaikomos komfortinės sąlygos. Tolesniame pastato inžinerinių sistemų tyrime šis energijos kiekis apibūdina bazinį arba būtinąjį lygmenį.

## **2.2. Pastato inžinerinių sistemų energijos poreikiai**

Ankstesniame skyriuje buvo apibrėžtas būtinas energijos kiekis, tiekiamas į patalpą. Taip pat buvo užsiminta, kad vien šio kiekio nepakanka dėl PIS veikimo pobūdžio, t. y. pastato inžinerinės sistemos pačios naudoja ir patiria nuostolius transportuodamos ir transformuodamos energijos srautus. Šioje vietoje labai svarbu akcentuoti, kad būtinieji energijos srautai, kurie privalo būti tiekiami patalpai, yra vienareikšmiškai užduodami pastatą supančios klimato viršsistemės – klimato sąlygomis bei paties pastato konstrukcinės sistemos sandara ir kompozicija.

Šiame darbe priimama nuostata, kad pastato konstrukcinė sistema nėra detaliau analizuojama, t. y. architektūrinių ir kompozicinių sprendimų derinimas pastato estetiniu ir energijos vartojimo efektyvumo požiūriais nėra vertinami.

Pagrindinis dėmesys darbe skiriamas pastato inžinerinių sistemų efektyvumo didinimo galimybių tyrimui. Kaip jau buvo minima aptariant kitų tyrėjų darbus, energijos efektyvumo didinimas pastatuose, nors ir yra populiarus tematika, iki šiol buvo nagrinėjamas gan fragmentiškai, analizuojant atskiras sistemas, neteikiant didesnio dėmesio jų tarpusavio sąveikų analizei. Pastato energijos efektyvumo didinimo klausimas dažniausiai analizuojamas iš PTD pozicijų [5, 8, 51, 27].

Bendruoju atveju, energijos vartojimo efektyvumo didinimas pastatuose gali būti nagrinėjimas apimant skirtingus analizės detalumo lygmenis. Juos galima būtų suskirstyti į keturias grupes:

Procesų lygmuo – apima fundamentalią procesų analizę ir, kaip taisyklė, reikalauja gilaus atskiro reiškinio tyrimo, todėl šiame lygmenyje apsiribojama darbu arba ribinių parametrų, įtakančių procesų eigą, keitimu ir analize. Galima teigti, kad tikėtinas energijos efektyvumo didinimas labiau susietas su atskirų specializuotų mokslo sričių pažanga, nei pačių procesų taikymo sistemose galimybėmis.

Elementų lygmuo – apima atskirų sistemų elementų – blokų analizę. Galima būtų teigti, kad šiame lygmenyje keliamas uždavinys – rasti kiekvieno elemento optimalias veikimo sąlygas.

Atskiras, inžinerinės sistemos, lygmuo apima tęstinę elementų lygmens analizę, kuomet atskiri elementai sujungiami į sistemą, kuri, savo ruožtu, užtikrina aukščiausią efektyvumą. Pagrindinės tyrimo sritys apima sistemos elementų dydžio (galios) įvertinimą bei elementų veikimo režimų analizę. Svarbu paminėti, kad vertinant atskiras inžinerines sistemas pradinės sąlygos nekeičiamos, t. y. tarp lygmenų esanti hierarchinė priklausomybė apsprendžia jų tarpusavio ryšius, kuomet aukštesnio rango sistema valdo žemesnį rangą turinčias sistemas.

Pastato inžinerinių sistemų grupės lygmuo – apima grupės ar visų pastato inžinerinių sistemų tyrimą. Tai bene mažiausiai dėmesio sulaukusi efektyvumo didinimo priemonių grupė tyrėjų tarpe.

### 2.2.1. Sistemų energijos poreikiai jų gyvavimo laikotarpiu

Netrukus PIS tyrimas privalės būti praplėstas įtraukiant ir GCA. Jau dabar, remiantis galiojančia direktyva 2005/32/EB [17], nustatančia ekologinio projektavimo reikalavimų energiją vartojantiems gaminiams nustatymo sistemą, siekiama integruoti aplinkosauginius aspektus į energiją vartojančių gaminių projektavimą. Taip norima pagerinti energiją vartojančio gaminio aplinkosauginį veiksmingumą per visą gaminio gyvavimo ciklą. Įsigaliojus šią direktyvą lydintiems teisės aktams, projektavimo procesas privalės apimti ne tik pastato inžinerinių sistemų galios poreikių vertinimą, bet taipogi turės įvertinti ilgalaikę priimamų inžinerinių sprendinių įtaką aplinkai.

Šiame darbe yra nustatomas pastato inžinerinių sistemų eksergijos poreikis per norminius metus bei per jų gyvavimo laikotarpį. Tam tikslui papildomai yra nusakomi eksergijos poreikiai sistemų sukūrimui bei sunaikinimui. Duomenys apie tiriamų sistemų eksergijos poreikius jų gamybos bei sunaikinimo etapams yra paimami iš kitų autorių darbų [10, 46, 9, 55, 12].

Bendrosios pastato inžinerinės sistemos gyvavimo laikotarpis yra parenkamas pagal pagrindinių sistemos elementų gyvavimo trukmę. Remiantis [3, 19], pastato inžinerinėms sistemos, tokioms kaip šildymas ir vėdinimas, gyvavimo trukmė parenkama pagal didžiausių elementų arba mechaninės dalies vyraujančią gyvavimo trukmę. Dažniausiai kontrolės ir reguliavimo elementų tarnavimo trukmės yra trumpesnės ir siekia 10–15 metų, kai tuo tarpu sistemų mechaninės dalies tarnavimo laikas sudaro 25–30 metų. Šiame darbe priimama, kad vidutinė pastato inžinerinių sistemų gyvavimo trukmė siekia 25 metus.

Taip pat šiame darbe detalčiau neanalizuojama energijos poreikiai sistemų sukūrimui bei sunaikinimui. Reikalingi duomenys paimami iš jau atliktų tyrėjų darbų šiomis temomis [9, 12].

### 2.2.2. Pastato AMKS energijos srautų identifikavimas

Ankstesniuose skyriuose buvo aptarti bazinių energijos ir eksergijos poreikių įvertinimo mechanizmai. Aptarti energijos kiekiai privalo būti tiekiami į patalpą tam, kad joje būtų palaikytos užduotos komfortinės sąlygos. Tačiau šalia bazinių energijos poreikių pastatui būtinas papildomas energijos srautas, kuris suvartojamas AMKS'e, šių veikimui užtikrinimui. Jį sudaro slėgikių elektros (darbo) poreikiai, nuostolių kompensavimui dengti reikalingi energijos srautai ir pan.

Pagrindiniai energijos srautai pastato AMKS susidaro transportuojant šilumnešį, orą ar suslegiant šaldymo agentą.

Energijos srautas reikalingas fluido transportavimui randamas iš priklausomybės:

$$E_p = \Delta p \cdot \dot{V}; \quad (17)$$

čia

$\Delta p$  – patiriami slėgio nuostoliai tinkle, Pa;

$\dot{V}$  – šilumnešio ar oro debitas, m<sup>3</sup>/s.

Slėgio nuostolių nustatymui tinkle naudojama priklausomybė [38]:

$$\Delta p = \sigma \cdot \dot{V}^2; \quad (18)$$

čia  $\sigma$  – tinklo pasipriešinimo charakteristika, apskritojo skerspjūvio kanalui apskaičiuojama pagal formulę:

$$\sigma = \left( \frac{1 \cdot \lambda}{d} + \sum \zeta \right) \frac{\rho}{2} \left( \frac{4}{\pi \cdot d^2} \right)^2; \quad (19)$$

čia

$\lambda$  – hidraulinės trinties nuostolių koeficientas;

$\sum \zeta$  – vietinių kliūčių pasipriešinimo koeficientų suma.

Apytiksluose vertinimuose slėgio nuostoliai dėl trinties vertinami dalimi  $\varepsilon$  nuo visų slėgio nuostolių (nuostoliai dėl trinties ir vietinėse kliūtyse). Rodiklis priklauso nuo sistemos masto, pavyzdžiui, gyvenamo pastato šildymo sistemai rekomenduojama naudoti 0,65 [82 **Error! Reference source not found.**]. Tuomet išraiška yra supaprastinama iki:

$$\sigma = \frac{1 \cdot \lambda}{d \cdot \varepsilon} \frac{\rho}{2} \left( \frac{4}{\pi \cdot d^2} \right)^2. \quad (20)$$

Kaip žinia pastato šildymo sistemos nuostoliai nustatomi pagal didžiausius slėgio nuostolius (nepatogiausią) turintį žiedą. Šio žiedo ilgis atitinka (21) pri-



klausomybėje pateiktą dydį  $l$ . Ilgiausio žiedo ilgį galima nustatyti pagal išraišką [38]:

$$l = \frac{f \cdot A_b}{h \cdot n} + 2h \cdot n; \quad (21)$$

čia

$f$  – pastato bendrojo ploto  $A_b$  ir išorinių sienų plotų  $A_s$  santykio reikšmė;

$h$  ir  $n$  – atitinkamai lygus pastato aukšto aukščiui ir aukštų skaičiui.

Formulėje (20) be įvertintų trinties ir vietinių kliūčių (alkūnių, sujungimų ir pan.) slėgio nuostolių, būtina įvertinti ir nuostolius susidarancius kituose kontūro elementuose, t. y. šilumokaičiuose, filtruose, vožtuvuose ir t. t.

Svarbu paminėti, kad priklausomybėje (17) nurodomas reikalingas energijos srautas apibūdina galią, kuri turi būti suteikta fluido srautui, t. y. kad būtų nugalėtos hidraulinės trinties jėgos. Tačiau, atsižvelgiant į egzistuojančius kinetinės energijos perdavimo srautui principus, neišvengiamai patiriami energijos nuostoliai. Vertinant pilnutinį energijos poreikį slėgikliams, būtina atsižvelgti į pasiekiamą faktinį įrenginių efektyvumo lygį.

Pastatų inžinerinėse sistemose sutinkamos trys slėgikių rūšys: ventiliatoriai, siurbliai ir kompresoriai.

Ventiliatorių, kaip vienu imliausių energijai vėdinimo (oro kondicionavimo) sistemos elementų tyrimas, turi tiesioginę įtaką energijos sąnaudų pastate mažinimui. Yra apskaičiuota, kad 18–20 % Europoje pagamintos elektros energijos yra suvartojama būtent ventiliatoriuose [13]. Tai pat yra prognozuojama, kad esti 30 % energijos sutaupymo galimybė įdiegus vienintelę priemonę – teisingą ventiliatorių dydžio parinkimą [13]. Ventiliatorių technologija bene viena ilgiausiai gyvuojančių fluido transportavimo sričių ir tiesą sakant inovacijos ar šuoliai jos efektyvumo didinime nėra dažni. Paskutinis rimtesnis ventiliatoriaus konstrukcijos patobulinimas, lėmęs prie ryškaus efektyvumo šuolio buvo atliktas dar 1938 metai, nuo tol šių įrengimų efektyvumas tepaaugo 4 %. Nepaisant to, energijos suvartojimo ventiliatoriuose efektyvumo didinimas yra aktuali problema, kuri ir dabartyje nestokoja tyrėjų ir gamintojų dėmesio.

Plačiausiai naudojamo išcentrinio ventiliatoriaus efektyvumas gali būti apskaičiuojamas naudojantis formule:

$$E_v = \frac{\dot{V}_o \cdot \Delta p}{\eta_f \cdot \eta_p \cdot \eta_v \cdot \eta_k}; \quad (22)$$

čia

$P_f$  – elektrinė galia, tiekiamą į ventiliatorių, kW;

$V$  – transportuojamo oro srautas, m<sup>3</sup>/s;

$\eta_F$  – ventiliatoriaus darbo rato efektyvumas;

$\eta_P$  – perdavimo efektyvumas;

$\eta_V$  – variklio efektyvumas;

$\eta_K$  – kontrolės efektyvumas.

Trumpai apie atskiras ventiliatoriaus įrenginio efektyvumą lemiančias dalis bei šiuo metu pasiektą faktinį modernumo lygį, kurį kaip tik ir nusako ventiliatoriaus darbo rato, perdavimo, variklio ir kontrolės efektyvumai. Ventiliatoriaus darbo rato efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo jo tipo. Pasiekti ventiliatoriaus darbo rato efektyvumai pagal tipus pasiskirsto taip:

- 1) darbo ratas su atgal lenktomis aerodinaminėmis mentėmis 86–88 % [29];
- 2) darbo ratas su į priekį lenktomis mentėmis 65–72 %;
- 3) darbo ratas su stačiomis mentėmis 50–67 %.

Nepaisant pateiktų akivaizdžių efektyvumo skirtumų atskiriems tipams įdiegimo kaštai kaip įprasta mažiausi žemiausią efektyvumą rodančiam tipui. Tai bene ir nulemia neefektyvų, tačiau ganėtinai platų darbo ratų su stačiomis mentėmis naudojimą.

Galia nuo variklio veleno ventiliatoriaus darbo ratui perduodama naudojant trapecinių diržų pavaras, kurių efektyvumas savo ruožtu siekia iki 98 %. Aišku sukamojo momento perdavimas gali būti įgyvendinamas ne vien panaudojant diržinę pavarą bet ir tiesiogiai tvirtinant ventiliatoriaus darbo ratą prie variklio veleno ir t. t.

Variklio efektyvumas siekia 80 %. Aišku šis lygis numato optimalias veikimo sąlygas. Jeigu variklis yra parinktas per didelis arba darbo režimas skiriasi nuo projektinio, variklio efektyvumas neišvengiamai kris.

Akivaizdu, kad sistemos projektuotojui tenka didžiulė atsakomybė parinkti tokius įrenginius, kurie būtų ne vien pigūs instaliuoti, bet ir generuotų mažiausias sąnaudas visu savo gyvavimo laikotarpiu. Taigi gyvavimo ciklo analizė neišvengiamai turės būti įtraukta priimant inžinerinius sprendimus.

Siekiant reglamentuoti, tuo pačiu ir paskatinti pastatų energijos vartojimo efektyvumo didinimą pastatuose, rengiamose ES normose atsirado nauja sąvoka – savitoji ventiliatoriaus galia (angl. specific fan power). Šis dydis nusako energijos kiekį, kuris sunaudojamas pastate oro transportavimui. Į jį įeina visų pastate esančių ventiliatorių (tiek tiekimam orui, tiek šalinamam) sunaudojama energija. Matematinė šio dydžio išraiška:

$$P_{SFP} = \frac{\Delta p}{\eta_{Tot}}. \quad (23)$$

Orientacinės šio parametro reikšmės yra 2 kW/(m<sup>3</sup>/s) naujiems negyvenamosios paskirties pastatams ir 2,5 kW/(m<sup>3</sup>/s) modernizuojamiems seniems to paties tipo pastatams [31].

Kaip žinia, oro transportavimui naudojami ventiliatoriai ne tik suteikia srautui kinetinę energiją, bet, dėl atsirandančių trinties jėgų, pakelia transportuojamo fluido temperatūrą. Šiam temperatūros pokyčiui įvertinti naudojama formulė:

$$\Delta T_F = \frac{P_F \cdot R_{F,R}}{\rho \cdot c}; \quad (24)$$

čia

$\Delta T_F$  – temperatūros pokytis, K/(m<sup>3</sup>/s);

$P_F$  – elektrinė galia, tiekiamą į ventiliatorių, kW;

$R_{F,R}$  – elektros energijos transformacijos oro srautui santykis;

$\rho$  – oro tankis, kg/m<sup>3</sup>;

$c$  – oro savitoji šiluma, J/(K\*kg).

Į ventiliatorių tiekiamos elektrinės galios transformavimo santykis, priklausomai nuo naudojamo įrenginio tipo, pateiktas 2 lentelėje.

**2 lentelė.** *Ventiliatoriaus galios transformavimo santykis*

Variklio pozicija	Santykis
Variklis oro sraute	0,9
Variklis ne oro sraute	0,6
Nežinoma pozicija	0,75

Pašildymas turi dvejopą įtaką – šildymo sezono metu jis sumažina reikalingos šilumos kiekį, bet šiltuoju laikotarpiu, kuomet reikalingas patalpos vėsinimas, papildomas šilumos išsiskyrimas didina vėsinimo poreikius.

### 2.3. Inžinerinių sistemų termodinaminis modelis

Pastato inžinerinės sistemos yra sudėtingos techninės sistemos turinčios gausybę jas įtakančių tiek tarpusavio, tiek išorinių ryšių. Prieš sudarant pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį, būtina nustatyti šias priklausomybes ir užrašyti jų matematinės funkcijas [36, 49, 24].

Pastato inžinerinių sistemų funkciją sudaro nepriklausomi kintamieji, nusakantys energijos poreikio patalpoje formavimąsi, ir priklausomi kintamieji, apibūdinantys sistemų veikimą, jų režimus ir pan. Pastato inžinerinių sistemų funkcija matematiškai gali būti užrašyta kaip:

$$Y_t = F_t(X_t). \quad (25)$$

Priklausomybėje naudojamas indeksas  $t$  reiškia, kad ši funkcija priklauso nuo laiko.

<b>funkcijos reikšmė</b>	<b>funkcija</b>	<b>argumentas</b>
Pastato inžinerinių sistemų ekspozicijos srautai	Pastato inžinerinių sistemų struktūra	Patalpos šiluminio balanso parametrai
	Sistemų valdymo strategijos	Patalpos komfortinių sąlygų parametrai
	Pastato naudojimo režimai	Lauko oro temperatūrų kitimo seka
		Transportuojamų srautų kiekiai
		Sistemų elementų efektyvumas

**11 pav.** Pastato inžinerinių sistemų funkcijos komponentai

Funkcijos argumentą sudaro nepriklausomi ir priklausomi kintamieji. Nepriklausomiems kintamiesiems galima priskirti tokius parametrus, kaip laiko oro temperatūra bei saulės radiacijos intensyvumas. Šių parametru kitimo sekos yra nežinomos, tačiau sąlyginai prognozuojamos.

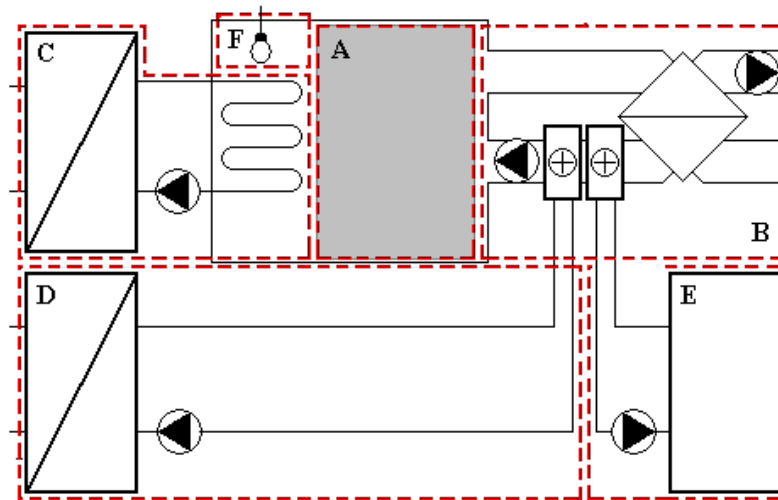
Priklausomiems kintamiesiems gali būti priskirtos pastato atitvarų termodinaminės charakteristikos, pastato inžinerinėse sistemose naudojamų elementu techninės charakteristikos, patalpos komforto sąlygas apibūdinantys parametrai.

Sąsają tarp turimų argumentų aibės ir funkcijos reikšmės determiniškumo užtikrina taisyklės, nurodančios funkcijos argumentų tarpusavio santykius.

### 2.3.1. Tipinės pastato inžinerinės sistemos

2.1.3 skyriuje buvo minima, kad kiekvienai atskirai klimatinei zonai būdingas skirtingas, savitas pastato inžinerinių sistemų derinys, t. y. negalima pasiimti vieno sistemų komplekso ir sėkmingai jį taikyti skirtingose klimatinėse sąlygose, todėl, tiriant pastate vykstančių energijos transformavimo procesus, būtina apibrėžti, kokios pastato inžinerinės sistemos bus vertinamos.

Kaip buvo minima 2.1 skyriuje, idealiu atveju turėtų būti tiriamos visos pastato inžinerinės sistemos bei jų tarpusavio sąveika, bet, įvertinant tokios sistemos tyrimo sudėtingumą, šiame darbe nagrinėjamos tik tokios sistemos, kurios turi didžiausią įtaką pastato energetiniam balansui. Prie tokių energijai imlių sistemų priskiriamos šildymo, vėdinimo, vėsinimo bei apšvietimuos sistemos.



12 pav. Principinė pastato inžinerinių sistemų schema

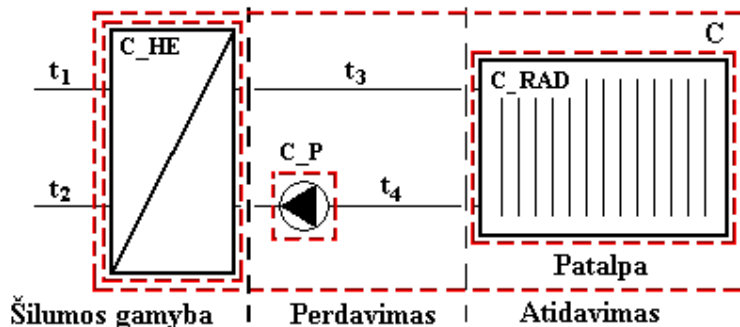
Siekiant detalizuoti pastate naudojamų sistemų derinį, būtina konkretizuoti atskirų sistemų tipą, elementus, įvardinti jų veikimo režimus ir pan. Neišvengiamai iš grupės galimų variantų privalu apsisistoti ties vieninteliu, todėl darbe nagrinėjamos labiausiai paplitusios pastato inžinerinių sistemų schemos. 12 paveiksle pateikiama principinė pastato inžinerinių sistemų schema.

Darbe priimama nuostata, kad pasirinktas pastato inžinerinių sistemų kompleksas gali būti apibūdintas kaip bazinis, šiuo metu pastatuose labiausiai paplitęs.

12 paveiksle A sistema atitinka patalpą, kurioje privalu išlaikyti komfortines sąlygas. Sistema B yra pastato vėdinimo sistemos agregatas, o sistema D apibrėžia šilumnešio tiekimo į vėdinimo agregatą sistemos ribas. Sistema C yra patalpos šildymo sistema, kai tuo tarpu sistema E nusako patalpos vėsinimo sistemą.

### 2.3.2. Šildymo sistema

Darbe pasirinkta nagrinėti dvivamzdė radiatorinė šildymo sistema. Šiluma į patalpas tiekama iš pastato šilumos punkto, kuriam šiluma savo ruožtu tiekama iš miesto centralizuotų tinklų. Šilumos srautas miesto centralizuotose šilumos tinkluose reguliuojamas kiekybiškai [22]. Priimama, kad tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra siekia  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , grąžtamo –  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Šilumos srauto tiekimas į patalpą atliekamas reaguojant į besikeičiančias klimatinės sąlygas.



13 pav. Šildymo sistema ir ją sudarantys elementai

Pagal šiuo metu plačiai taikomas nepriklausomas šilumos vartotojų prijungimo prie CŠT schemas, šilumos srautas pastatų vidaus uždareme kontūre reguliuojamas kokybiniu principu. T. y. energijos srautas, tiekiamas į pastato šildymo sistemą, kurioje cirkuliuoja pastovus debitas, valdomas reguliuojant pastato šildymo sistemos kontūro šilumnešio srautą. Modelyje priimta, kad šilumnešio kontūruose tiek šildymo, tiek vėdinimo sistemose, grįžtamo vandens temperatūra lygi  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , t. y. kintantis šilumos srautas yra perduodamas keičiant tiekiamo šilumnešio temperatūrą (debitas pastovus). Šildymo sistemos schema su pavaizduotais sistemos elementais pateikiama 13 paveiksle.

Darbe nagrinėjami sistemų elementai yra traktuojami kaip „juodosios dėžės“ – t. y. skaičiavimuose vertinami tikrai elementų (posistemų) ribas kertantys eksergijos srautai. Paties elemento viduje vykstantys procesai nėra analizuojami.

C\_HE – sroviniis plokšteliais šilumokaitis užtikrinantis šilumos mainus tarp miesto centralizuotų šilumos tinklų ir pastato vidaus šildymo sistemos kontūro. PTD stacionariam srautiniam procesui elementui C\_HE, kuomet nėra vertinami srautų kinetinės ir potencijos energijos pokyčiai, užrašomas taip:

$$\sum[\dot{E}^{+,-}] + \sum[\dot{Q}^{+,-}] + \sum[h \cdot \dot{M}^{+,-}] = 0; \quad (26)$$

čia

$\sum[\dot{E}^{+,-}]$  – sistemai perduodama (nuvedama) galia-techninis darbas, W.

Elementui C\_HE darbas neperduodamas (nenuvedamas), todėl

$$\sum[\dot{E}^{+,-}] = 0;$$

$\sum[\dot{Q}^{+,-}]$  – sistemai perduodama (nuvedama) galia-šiluma, W. Priimama,

kad elemente C\_HE šilumos mainai su aplinka nevyksta, t. y. yra daroma

prielaida, kad elemente šilumos nuostoliai nepatiriami (laikoma, kad šilumos izoliacija yra ideali) –  $\sum [Q^{+,-}] = 0$ ;

$\sum [h \cdot \dot{M}^{+,-}]$  – į sistemą patenkančių (paliekančių) pilnujų entalpijų suma arba viršminė energija, W.

Įvertinus elemento C\_HE energijos srautus, užrašoma elemento energijos balanso lygtis:

$$\dot{M}_{\text{CŠT}} \cdot h_1 + \dot{M}_V \cdot h_4 = \dot{M}_{\text{CŠT}} \cdot h_2 + \dot{M}_V \cdot h_3; \quad (27)$$

čia

$\dot{M}_{\text{CŠT}}$  – masinis CŠT sistemos vandens debitas, kg/s;

$\dot{M}_V$  – masinis vandens debitas pastato nepriklausomoje šildymo sistemoje, kg/s;

$h_1, h_2$  ir  $h_3, h_4$  – atitinkamai CŠT šilumnešio tiekiamo ir grįžtamo srauto entalpijos ir pastato šildymo sistemos šilumnešio tiekiamo ir grįžtamo srauto entalpijos, J/kg.

Vandens srauto entalpijų skirtumas  $\Delta h$  skaičiuojamas pagal empirinę priklausomybę [7]:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 4,1855 \left\{ 0,996185(t_2 - t_1) + \frac{0,0002874}{100^{5,26}} \times \right. \\ \left. \times \frac{(t_2 + 100)^{6,26} - (t_1 + 100)^{6,26}}{6,26} + \frac{0,011160}{\ln 10} [10^{-0,036t_2} - 10^{-0,036t_1}] \right\}. \quad (28)$$

Pertvarkius (27) lygtį gaunama:

$$\dot{M}_{\text{CŠT}} (h_1 - h_2) = \dot{M}_V (h_4 - h_3). \quad (29)$$

Remiantis energinio balanso analogija (26) užrašomas elemento C\_HE ekserginis balansas:

$$\sum [\dot{E}_w^{+,-}] = \dot{L}; \quad (30)$$

čia

$\dot{E}_w^+$  – eksergijos transformacijos srautas suteiktas sistemai, W;

$\dot{E}_w^-$  – viršminės eksergijos srautas, W;

$\dot{L}$  – proceso metu patirti eksergijos nuostoliai.

Detalizuojant ekserginio balanso lygtį galima užrašyti taip:

$$\dot{M}_{\text{CŠT}}(k_1 - k_2) = \dot{M}_v(k_4 - k_3) + \dot{L}; \quad (31)$$

čia  $k_1, k_2$  ir  $k_3, k_4$  – atitinkamai CŠT šilumnešio tiekiamo ir grįžtamo srauto koentalpijos ir pastato šildymo sistemos šilumnešio tiekiamo ir grįžtamo srauto koentalpijos, J/kg. Atkreiptinas dėmesys, kad ekserginėje analizėje svarbu metodiškai teisingai užrašyti energijos ir eksergijos pirmines balanso lygtis. Skubotas entalpijų ar koentalpijų skirtumo užrašymas balanso lygtyje ekserginėje analizėje gali duoti neteisingus rezultatus.

Balanso (29) nariai gali būti apskaičiuojamas pagal priklausomybes:

$$\dot{E}_w^+ = \dot{M}_{\text{CŠT}} \cdot \Delta k = \dot{M}_{\text{CŠT}} \cdot (\Delta h - T_a \Delta s); \quad (32)$$

čia

$T_a$  – aplinkos (šiuo atveju, išorės oro) temperatūra, K;

$\Delta s$  – CŠT šilumnešio srauto entropijos pokytis elemente C\_HE, J/(kg·K). Entropijos pokytis vandens srautui skaičiuojamas pagal empirinę formulę [7]:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 4,1855 \left\{ 0,996185 \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{0,0002874}{100^{5,26}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{(t+100)^{5,26}}{t+273} dt + \right. \\ \left. + 0,011160 \int_{t_1}^{t_2} \frac{10^{-0,036t}}{t+273} dt \right\}. \quad (33)$$

Atitinkamai elemente susidarantys eksergijos nuostoliai randami iš priklausomybės:

$$\dot{L} = \dot{E}_w^+ - \dot{E}_w^-. \quad (34)$$

C\_P – šildymo sistemos siurblys. Atsižvelgiant į tai, kad pastato šildymo sistemos kontūre naudojamas kokybinis reguliavimas, šildymo sistemos siurblys veikia nuolatos, kada tik yra patalpų šildymo poreikis.

Elemento energinis balansas:

$$\dot{W}^+ = \dot{W}_v^- + \dot{Q}. \quad (35)$$

Elemento eksergijos balansas:

$$\dot{E}^+ = \dot{E}_w^- + \dot{E}_Q^- + \dot{L}; \quad (36)$$

čia

$\dot{E}_s^+$  – į elementą reikalingo tiekti galios-techninio darbo eksergijos srautas (elektros pavidalu), W;



$\dot{E}_w^-$  – šilumnešio srautui suteikta transformavimo eksnergija (kinetinės energijos pavidalu), W;

$\dot{E}_Q^-$  – šilumnešio srautui perduota galia-šiluma, W.

Reikalingam tiekti į siurblį eksnergijos srautui nustatyti naudojama priklausomybė:

$$E_S^+ = \frac{\dot{V}_V \cdot \Delta p_S}{\varepsilon_S} = \frac{\dot{M}_V \cdot \Delta p_S}{\rho_V \cdot \varepsilon_S}; \quad (37)$$

čia

$\dot{V}_V$  – tūrinis šilumnešio debitas per elementą C\_P, m<sup>3</sup>/s;

$\Delta p_S$  – slėgio nuostoliai šildymo sistemos kontūre, Pa. Skaiciavimuose priimama reikšmė 105 kPa. Šį kiekį sudaro slėgio nuostoliai atsirandantys sistemos kontūre, šilumokaityje, filtre, skaitiklyje, reguliavimo ir atbuliniame vožtuvuose [11, 47];

$\varepsilon_S$  – siurblio (cirkuliacinio) efektyvumas, %. Cirkuliacinio siurblio efektyvumas darbe priimamas lygus 40 % [18, 4];

$\rho_V$  – šilumnešio tankis, kg/m<sup>3</sup>.

Kaip matyti, elementui tiekimas energijos kiekis kiekybiškai atitinka eksnergijos srauto poreikį. Kaip jau buvo minėta, transformuojant elektros energiją iš energinio į eksgerginis vienetus naudojamas koeficientas lygus – 1, t. y. laikoma, kad visa elektra gali būti paversta techniniu darbu.

C\_RAD – plokščiu plieniniu radiatoriumi šilumos srautas perduodamas patalpai.

Šilumos nuostoliai nuo vamzdinių nevertinami, priimame, kad šilumos mainai vyksta tikrai per šildymo sistemos radiatoriaus elementą. PTD šiam elementui užrašomas taip:

$$\dot{W}_V^+ = \dot{Q}_O^- \quad (38)$$

Išskleidus lygtį gaunama:

$$M_V \cdot h_3 - M_V \cdot h_4 = U \cdot A_{rad} \cdot \Delta t_m; \quad (39)$$

čia

U – šilumos perdavimo koeficientas, W/(m<sup>2</sup>·K);

A<sub>rad</sub> – šilumos mainų paviršius, m<sup>2</sup>.

Ekserginis elemento C\_RAD balansas užrašomas taip:

$$\dot{E}_w^- = \dot{E}_Q^- + \dot{L}. \quad (40)$$

Eksergijos srautas  $E_w^-$ , į elementą C\_RAD patenkantis kartu su šildymo sistemos šilumnešio srautu, skaičiuojamas pagal lygtyse (31) ir (32) pateiktą priklausomybę.

Eksergijos srautas – galia-šiluma  $\dot{E}_Q^-$ , perduodama patalpos orui nuo šildymo prietaisų, skaičiuojama šilumos srautą  $\dot{Q}_O^-$  dauginant iš Karno koeficiento:

$$\dot{E}_Q^- = \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) \dot{Q}_O^-; \quad (41)$$

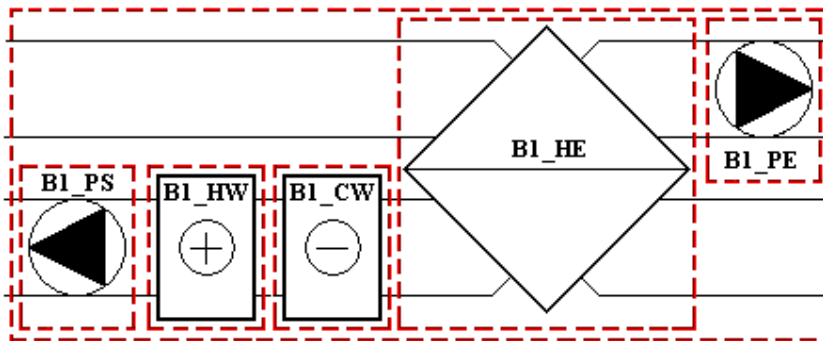
čia  $T$  – proceso (patalpos oro) temperatūra, K.

### 2.3.3. Vėdinimo sistema

Nagrinėjama vėdinimo sistema yra priverstinė (mechaninė) su tarpiniu šalinamo oro šilumos atgavimu. Oro transportavimui užtikrinti naudojami išcentriniai ventiliatoriai, kurie vėdinimo sistemos schemoje (14 pav.) pažymėti atitinkamai B1\_PS ir B1\_PE.

Energinis ventiliatoriaus elemento balansas yra analogiškas (34) lygčiai. Atitinkamai ekserginis balansas – (35) lygčiai.

Eksergijos srautas, tiekimas į ventiliatorius (elektros pavidalu) gali būti paskaičiuojamas pagal priklausomybę (22). Šiame darbe eksergijos poreikis ventiliatoriams yra paskaičiuojamas pasinaudojant užduotais savitosios ventiliatoriaus galios parametrais, t. y. ventiliatoriuose sunaudojamos elektros kiekis skaičiuojamas priimant, kad suminis energijos galios poreikis oro transportavimui pastate sudaro  $2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  [31].



14 pav. Vėdinimo sistema ir ją sudarantys elementai

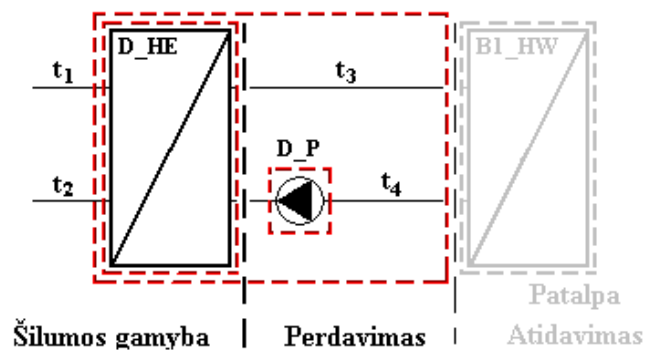
Šviežias oras į patalpas tiekiamas tik numatytu darbo laiku, likusį laiką sistema yra nenaudojama. Šilumos iš šalinamo oro atgavimas vykdomas plokštiniame sroviniame šilumokaityje (elementas B1\_HE) be fizinio srautų maišymosi. Esant poreikiui, tiekiamas oras iki galutinės temperatūros papildomai pašildomas vandeniniame sroviniame šilumokaityje (elementas B1\_HW), kuriam šilumnešis tiekiamas iš pastato šilumos punkto. Energinio ir ekserginio balansų sudarymas bei srautų skaičiavimo tvarka sutampa su šildymo sistemos elemento C\_HE vertinimu, išskyrus tai, kad eksergijos galia suteikiam oro srautui skaičiuojama pagal formulę, taikoma idealioms dujos:

$$\dot{E}_W^- = \dot{M} \cdot \Delta k = \dot{M} \cdot (\Delta h - T_a \Delta s) = \dot{M} \cdot c_p \cdot \left[ T_1 - T_2 - T_a \left( \ln \frac{P_1}{P_2} \right) \right]. \quad (42)$$

Nagrinėjamuose sistemose patiriami palyginti neženkliūs slėgio pokyčiai, todėl dėl vertinimo paprastumo skaičiavimuose slėgio pokyčio įtaka, taip pat kaip ir koncentracijų skirtumai, dėl jų nežymaus dydžio nėra vertinami. Tuomet:

$$\dot{E}_W^- = \dot{M} \cdot \Delta k = \dot{M} \cdot (\Delta h - T_a \Delta s) = \dot{M} \cdot c_p \cdot \left[ T_1 - T_2 - T_a \left( \ln \frac{T_1}{T_2} \right) \right]. \quad (43)$$

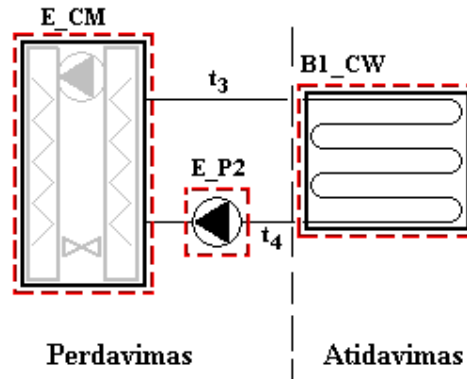
Šilumos punkte vėdinimo sistemai montuojamas atskiras šilumokaitis. Schemoje (15 pav.) šilumokaitis pažymėtas D\_HE elementu. Šilumnešio kontūras per vėdinimo kamerą, kaip ir šildymo sistemos kontūras, dirba kokybiniu režimu, t. y. kontūro siurblys (elementas D\_P) dirba nuolatininiu režimu. Kuomet vėdinimo sistema neveikia, atitinkamai išjungiamas ir siurblys. Energinis ir ekserginis sistemų elementų vertinimas yra analogiškas atitinkamiems šildymo sistemos elementų skaičiavimams.



15 pav. Šilumnešio tiekimo į vėdinimo agregatą sistema ir ją sudarantys elementai

### 2.3.4. Vėsinimo sistema

Vėsinimo sistemos principinė schema pateikta 16 paveiksle. Priimta, kad garo kompresijos šaldymo mašina yra labiausiai paplitęs vėsinimo sistemų tipas.



16 pav. Vėsinimo sistemos principinė schema

Vėsinimo sistemoje vykstantis šilumos perdavimo procesas turi priešinga kryptį nei šildymo sistemoje, t. y. šiuo atveju šiluma šalinama iš patalpos. Elementas B1\_CW yra vėsinimo šilumokaitis, įrengtas vėdinimo kameroje (14 pav.). Šiam elementui energinis srautų balansas užrašomas taip:

$$\dot{W}_O^+ = \dot{W}_V^- \quad (44)$$

Atitinkamai ekserginis srautų balansas atrodo taip:

$$\dot{M}_O(k_o - k_t) = \dot{M}_V(k_3 - k_4) + \dot{L}; \quad (45)$$

čia

$\dot{M}_O$  – tiekiamos oro srautas, kg/s;

$k_o, k_t$  – atitinkamai lauko oro ir tiekiamo atvėsinto oro koentalpijos, J/kg.

Elementų E\_P1 ir E\_P2 energiniai ir ekserginiai srautai įvetinami pagal (34) ir (36) formules.

Elementas E\_CM žymi garo kompresijos šaldymo mašiną. Energinis elemento balansas atrodo taip:

$$\dot{W}_V^+ + \dot{E}^+ = \dot{Q}_O^-; \quad (46)$$

čia

$\dot{W}_v^+$  – viršminės energijos srautas patenkantis į sistemą iš aušinamo vandens kontūro, W;

$\dot{E}^+$  – sistemai suteikiamas galia-darbas (komprodsorių darbui reikalingas elektros poreikis), W;

$\dot{Q}_o^-$  – galia šiluma išmetama į aplinką, W.

Ekserginis balansas atitinkamai užrašomas taip:

$$\dot{E}_{wv}^+ + \dot{E}^+ = \dot{E}_{Qo}^- + \dot{L}. \quad (47)$$

Garų kompresijos šaldymo mašinos veikimo efektyvumas, t. y. transformavimo koeficientas yra priimtas lygus 3,8. Šis parametras parenkamas pagal šiuo metų rinkoje siūlomų įrenginių techninėse specifikacijose teikiamus vidutinius duomenis. Kaip matyti 16 paveiksle, garų kompresijos mašinoje perteklinė šiluma išmetama į aplinkos orą, tam panaudojant skysčio-oro tipo aušintuves. Šiuo atveju, aušintuvė yra garų kompresijos šaldymo mašinos kontūre, todėl kaip atskiras elementas nėra išskiriamas.

### 2.3.5. Apšvietimo sistema

Patalpų apšvietimo sistema tiesiogiai dalyvauja formuojant patalpos mikroklimatą [20]. Darbe priimama, kad siektinas apšvietimo lygis patalpoje siekia 350 liuksų kvadratiniam metrui, kas, savo ruožtu, generuoja šilumos pritekėjimus nuo veikiančių apšvietimų įrenginių sudaro 3,75 W/m<sup>2</sup> [75]. Apšvietimo sistemos veikimo grafikas atitinka patalpų eksploataavimo režimą, t. y. darbo dienomis nuo 7.30 iki 18.00 val.

### 2.3.6. Patalpos mikroklimato modeliavimas

2.3 skyriuje pateiktas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis, kuris savo ruožtu leidžia analizuoti atskirų sistemos elementų darbą esant įvairiems režimams. Norint atlikti PIS analizę atitinkančią realias sistemų veikimo sąlygas tam tikru laikotarpiu, būtina turėti įvesties duomenis.

Atsižvelgiant, kad panašių duomenų rinkimas realaus pastato atveju yra ypatingai sudėtingas procesas, todėl teorinio modelio verifikavimui atlikti buvo pasirinkta panaudoti kompiuterinės programos generuojamus pastato mikroklimato duomenis [23].

Patalpos mikroklimato sąlygų kitimui metų bėgyje generuoti buvo pasirinkta kompiuterinė programa „DesignBuilder“.

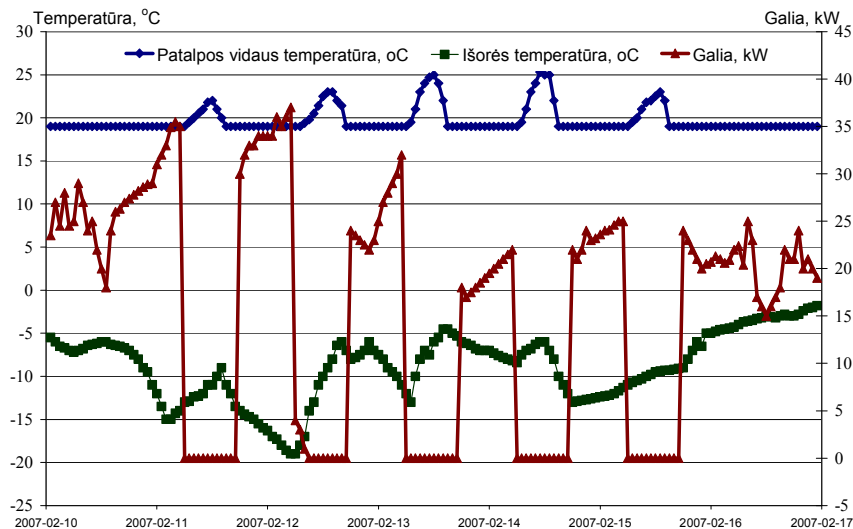
Šioje programoje yra integruoti kompiuterinio pastatų energinio modeliavimo paketo EnergyPlus algoritmai. Kurie savo ruožtu remiasi Blast ir DOE-2

savybėmis, leidžiančiomis modeliuoti pastato energijos srautus mažesniais nei valanda intervalais. Skirtingai nuo EnergyPlus paketo, „DesignBuilder“ programa turi patobulintą ir vartotojui pritaikytą sietuvą bei keletą papildomų naudingų savybių, tokių kaip objektų modeliavimas 3D aplinkoje, PIS rinkmenų bibliotekos ir pan.

Programos patikimumą indikuoja 2006 metais atlikti sėkmingi „DesignBuilder“ testai pagal tarptautinį ANSI/ASHRAE Standartą 140-2004, kurių metu programa buvo lyginama su kitų analogiškų programų rezultatais, nustatomi naudojamų algoritmų apribojimai.

Programos generuojami pastato mikroklimato duomenys nusako patalpos šiluminį balansą esant kintamai išorės temperatūrai bei kintant patalpų naudojimo režimams.

Pagrindiniai duomenys, kurie buvo tiesiogiai perkelti iš kompiuterinės programos į pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį, yra šilumos srauto šildymo poreikiams tenkinti kitimas bei vidaus ir išorės temperatūrų kitimo sekos. 17 paveiksle pateikiamas programos generuojamų duomenų fragmentas.



17 pav. Tiriamojo pastato mikroklimato modeliavimo fragmentas

Kaip matyti iš 17 paveiksle pateiktos diagramos, generuojami šiluminių srautų balansai apima tiek PMKS, tiek AMKS dedamąsias, t. y. skaičiavimuose vertinami šilumos pritekėjimai nuo saulės spinduliuotės, žmonių (atsižvelgiant į vykdomo darbo intensyvumą), org-technikos bei apšvietimo. Kaip jau buvo minėta 2.1.1 skyriuje, šilumos srauto poreikis iš AMKS atsiranda tik tuo atveju, kuomet šilumos pritekėjimai negali kompensuoti šilumos nuostolių per atitvaras

(turint omeny šildymo sezoną). Taip pat galima pastebėti, kad kai kuriais laikotarpiais (šildymo sezono metu) išoriniai ir vidiniai šilumos pritekėjimai viršija nuostolius ir patalpos oro temperatūra pakyla.

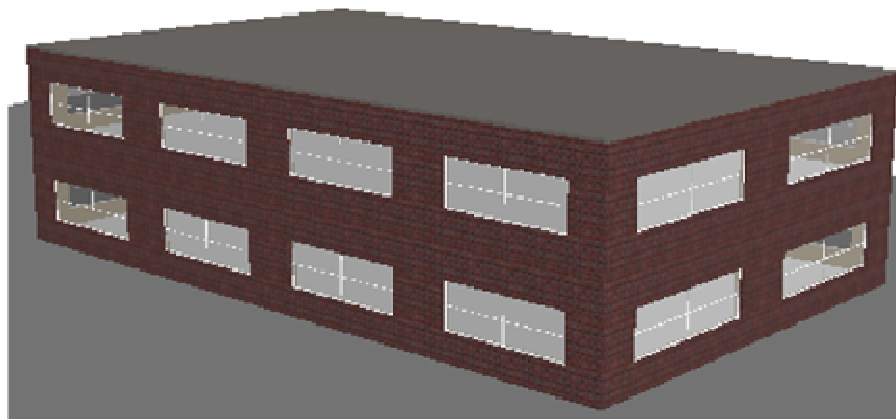
### 2.3.7. Teorinis pastato modelis

Pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelio taikymui būtini įvesties duomenys buvo gauti sukuriant teorinį pastato modelį kompiuterinės programos „DesignBuilder“ pagalba. Pagrindiniai pastato duomenys apie pateikti 3 lentelėje.

**3 lentelėje.** *Pagrindiniai pastato duomenys*

Parametro pavadinimas, matavimo vntienetai	Reikšmė
Pastato plotas, m <sup>2</sup>	750
Pastato matmenys, m	15×25
Aukštų skaičius	2
Išorės sienų šiluminė varža, (m <sup>2</sup> K)/W	3,0
Įstiklintų atitvarų dalis, %	30
Įstiklintų atitvarų šiluminė varža, (m <sup>2</sup> K)/W	1,6
Temperatūra patalpoje šiltuoju periodu, °C	+20
Temperatūra patalpoje šaltuoju periodu, °C	+24
Pastato tiekina šiluminė galia, kW	141

Sukurto teorinio pastato vaizdas pateikiamas 18 paveiksle.



**18 pav.** *Programa „DesignBuilder“ sumodeliuoto pastato vaizdas*

Patalpos, t. y. darbo zonos patalpoje, temperatūros ir tiekino šviežio oro kiekis yra parinktos pagal pateiktas leistinas ribas [31, 33] duoto tipo patalpoms.

Priimta, kad pastatas bus eksploatuojamas penkias dienas per savaitę, numatytas darbo laikas yra nuo 8.00 iki 17.00 valandos.

## 2.4. Antrojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje atlikta pastato techninės sistemos analizė. Nustatyti pagrindiniai ją sudarantys elementai bei nusakyti juos saistantys ryšiai.

Atlikus energijos srautų pastate analizę, nustatytos srautų susidarymo sąlygos. Buvo pateiktos šių srautų skaičiavimo priklausomybės.

Sukurta pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis leidžiantis, vykdyti sistemų veikimo ekserginę analizę ir identifikuoti eksergijos vartojimo efektyvumo didinimo potencialą sistemose ir jų elementuose. Termodinaminis modelis apima šildymo, vėdinimo, šilumnešio tiekimo į vėdinimo agregatą, vėsinimo sistemas.

Kiekviena sistema yra skaidoma į atskirus elementus. Kiekvienam iš sistemą sudarančių elementų užrašyta energijos ir eksergijos balanso lygtis.

Sukurto termodinaminio modelio įvesties duomenims sugeneruoti buvo pasitelkta kompiuterinė programa „DesignBuilder“. Programos sugeneruoti duomenys, kurie buvo perkeliama į termodinaminį modelį, yra šilumos srauto šildymo poreikiams tenkinti kitimo bei vidaus ir išorės temperatūrų kitimo sekos. Sistemų darbo režimų modeliavimui naudojamas šilumos srautas šildymo poreikiams yra apskaičiuotas įvertinant tiek vietinius, tiek išorinius šilumos pritekėjimus, t. y. jis atitinka faktinį šilumos poreikį, kurį turi kompensuoti atitinkamos pastato inžinerinės sistemos. Ši sąlyga yra būtina, norint įgyvendinti energijos efektyvumo didinimo priemones, t. y. pastato inžinerinės sistemos visų pirma turi gebėti sava-laikiai reaguoti į kintančias mikroklimato sąlygas patalpoje ir atitinkamai koreguoti į tą patalpą tiekiamą energijos srautą.

Sukurta pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis prisideda prie Direktyvos 2005/32/EB nuostatų įgyvendinimo. Skyriuje vertinami sistemų eksergijos poreikiai per jų gyvavimo laikotarpį.



# 3

---

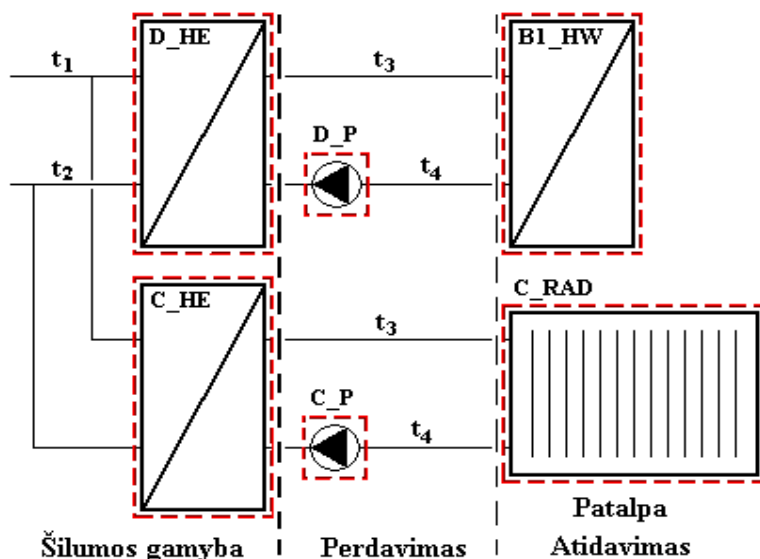
## Tyrimo rezultatai ir jų analizė

Šiame skyriuje pateikiami ir aptariami atliktų skaičiavimų rezultatai. Pristatomi rezultatai apima nagrinėjamų pastato inžinerinių sistemų darbą charakteringais sistemų veikimo periodais. Pateikiamos sistemų optimizavimo galimybės keičiant sistemų jungimo schemas bei keičiant atskirus jų elementus. Atliekama skaičiavimo rezultatų jautrumo analizė identifikuojanti parametrus darančius didžiausią įtaką skaičiavimo rezultatams. Pristatomi eksergijos poreikiai per sistemų gyvavimo laikotarpį. Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (1A, 2A).

### 3.1. Šildymo sezono metu veikiančių pastato inžinerinių sistemų tyrimo rezultatai

Pasitelkiant sukurta pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį, kuris aprašytas 2.3 skyriuje, bei programa „DesignBuilder“ sugeneravus įvesties duomenis, buvo atliktas sistemų veikimo tyrimas. Pasirinktas nagrinėjamas laikotarpis apima ištisą šildymo sezoną (nešildymo sezono metu nagrinėjamos sistemos neveikia). Tyrimo metu buvo stebimas ir fiksuojamas energijos srautų kitimas pastato inžinerinių sistemų elementuose. Energijos srautų transformacijos, atitinkamai tiekiamos, sunaudotos ir perduotos eksergijos kiekių kitimas yra

sąlygojamas svyruojančiu tiekiamos energijos poreikiu patalpoje bei besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis.



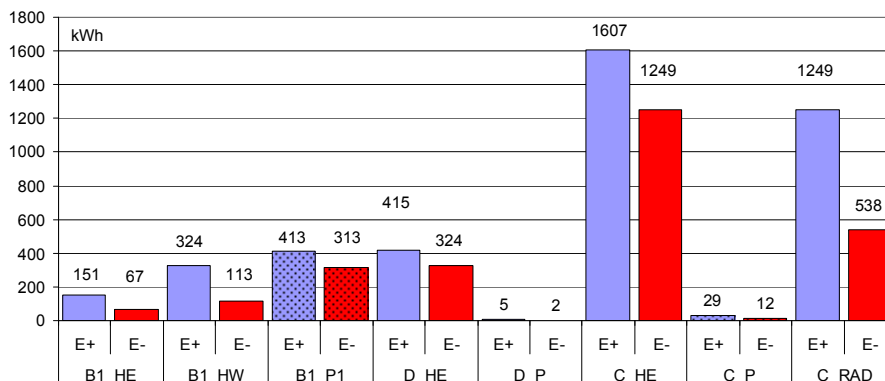
19 pav. Bazinis variantas atskiri šildymo ir vėdinimo sistemų šilumnešio kontūrai

Kaip parodyta 19 paveiksle, šildymo sistemos ir šilumnešio tiekimo į vėdinimo agregatą kontūrai yra atskiros nepriklausomos sistemos.

Kaip pristatyta šildymo ir vėdinimo sistemų apraše, sistemų kontūruose vykdomas kokybinis reguliavimas. Priimta, kad šilumnešio temperatūra  $t_4$  išlaikoma pastovi (+60 °C), o keičiama tiekimo šilumnešio temperatūra  $t_3$ , priklausomai nuo pareikalaujamos momentinės galios dydžio (šilumnešio debitas išlaikomas pastovus).

Siekiant įvertinti atskiruose elementuose vykstančius eksergijos transformavimo svyravimus bei tuo pačiu palyginti eksergijos galios ir poreikio skirtumus, pateikiami trys atskiri tyrimo atvejai.

Pirmasis atspindi pastato inžinerinių sistemų veikimą tipinės žiemos savaitės laikotarpiu. Šis vertinimas iš dalies atitinka iki šiol naudotą [56, 76] projektinės ekserginės galios pastatuose vertinimo principą. Kaip ir energetinio vertinimo atveju, pagal projektines sąlygas parenkamos įrenginių galios, projektuojamos sistemos. Modeliavimo rezultatai pateikti 20 paveiksle.



20 pav. Tipinės žiemos savaitės eksergijos balansas

Ordinačių ašyje yra pavaizduota eksergijos poreikių kirkimas (kilovatvalandėmis), tuo tarpu abscisių ašyje išdėstyti sistemų elementai bei juose vykstančių energijos transformacijų kokybinės išraiškos. Elementas B1\_HE atitinka vėdinimo sistemos šilumogražos įrenginį. B1\_HW nusako vėdinimo sistemos tiekiamo oro srauto antrinio pašildymo šilumokaitį. B1\_P1 nusako vėdinimo sistemos ventiliatoriaus elementą (toliau darbe toks žymėjimas naudojamas kaip suminis ventiliatorių elementas). D\_HE nusako į vėdinimo kamara tiekiamo šilumnešio kontūro šilumokaitį. D\_P atitinka kontūro cirkuliacinį siurblių. C\_HE yra šildymo sistemos kontūro šilumokaitis. C\_P atitinkamai šildymo sistemos cirkuliacinis siurblys, o elementas C\_RAD nusako šilumos srauto atidavimo patalpai įrenginius – radiatorius.

Iš gautų rezultatų (20 pav.) matyti, kad esant nepalankiausioms (arti projektinėms) išorės sąlygoms, didžiausi pareikalaujami eksergijos srautai susidaro šildymo sistemos elementuose: šilumos punkto šilumokaityje C\_HE ir šilumos atidavimo patalpos orui įrenginyje C\_RAD.

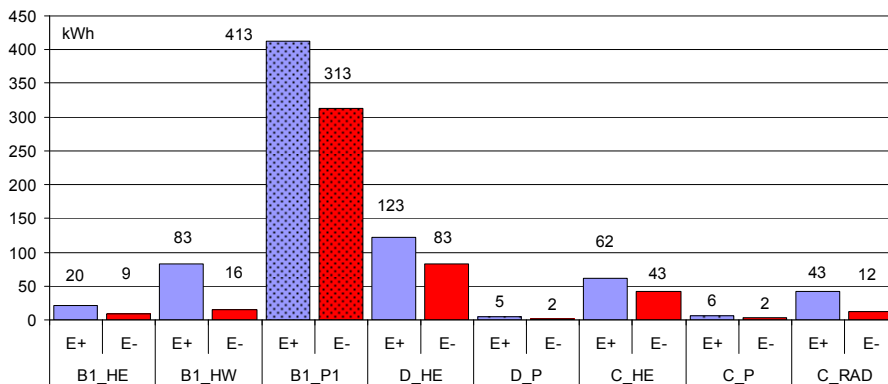
Pateiktame grafike (20 pav.) mėlynos spalvos stulpeliu yra žymimas eksergijos poreikis reikalingas tiekti į tam tikrą elementą, kai tuo tarpu raudonos spalvos stulpelis identifikuoja pagamintos eksergijos (išeigos) kiekį arba, kitais žodžiais, eksergiją, kuri bus tiekiamą į kitą nuosekliai sujungtą sistemos elementą. Skirtumas tarp į elementą tiekiamos ir elemente pagamintos eksergijos kiekių nusako ekserginius nuostolius patiriamus nagrinėjamame elemente. Matyti, kad didesni eksergijos nuostoliai patiriami tuose elementuose, kuriuose ženkliai skiriasi įeinančios ir išeinančios energijos kokybiniai parametrai, kaip pavyzdžiui radiatorius C\_RAD. Į elementą tiekiamos energijos srauto vidutinė temperatūra siekia +70 °C, kai tuo tarpu patalpos oro temperatūrai tereikalinga +20 °C šiluma. Iš skaičiavimo rezultatų matyti, kad vėdinimo sistemoje taikant šilumos atgavimą iš

šalinamo oro, eksergijos poreikis šiai sistemai ženkliai skiriasi eksergijos poreikio šildymo sistemai.

Eksergijos kiekiai grafike vaizduojami stulpeliais taškiniu fonu atitinka eksergijos poreikį elektros forma. Šiuo atveju matyti, kad elektros formos eksergijos poreikiu labiausiai išsiskiria elektros poreikiai ventiliatorių funkcionavimui, kai tuo tarpu energija cirkuliacinių siurblių C\_P ir D\_P veikimui sudaro sąlyginai nežymią dalį, t. y. apie 8 % nuo energijos poreikių ventiliatoriams.

Apibendrinus galima konstatuoti, kad eksergijos poreikis „prie pastato sienos“ esant arti projektinėms sąlygoms sudaro  $2,69 \text{ kWh/m}^2$ , kur  $2,10 \text{ kWh/m}^2$  (arba 77,9 %) tenka eksergijai tiekiamai šilumos pavidalu ir  $0,60 \text{ kWh/m}^2$  (arba 22,1 %) elektrai.

Apžvelgtas eksergijos poreikio pasiskirstymas skirtingų sistemų elementų atžvilgiu, leidžia preliminariai identifikuoti elementus, kuriuose patiriami didžiausi tiekiamos eksergijos nuostoliai arba patys eksergijos srautai. Tačiau, kaip jau buvo minėta apžvalgoje, sistemų analizė tik projektinėmis išorės sąlygomis nėra pakankama, todėl antruoju atveju vertinamas laikotarpis, kuomet nėra pasiekiamos projektinės sąlygos, t. y. sistemos dirba nepilnu pajėgumu. Toks pereinamasis laikotarpis leidžia identifikuoti pastato inžinerinių sistemų elementų eksergijos poreikio kitimą šildymo sezono pradžios ir pabaigos laikotarpiais. Pereinamojo laikotarpio savaitės eksergijos poreikiai pateikti žemiau esančiame paveiksle.



21 pav. Pereinamojo laikotarpio eksergijos balansas

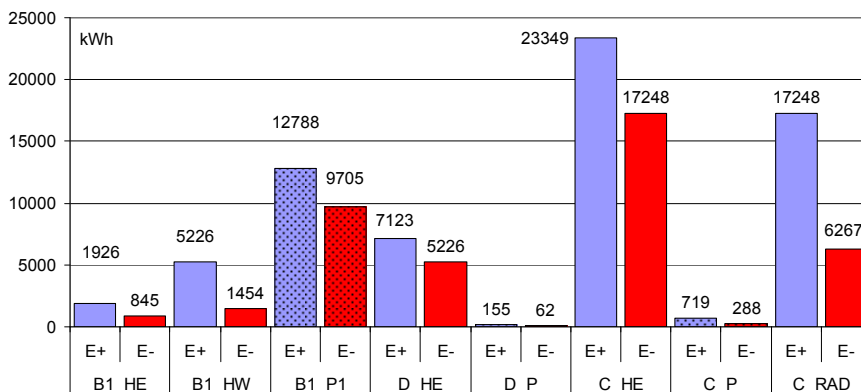
Iš pateikto grafiko matyti, kad eksergijos srautai pereinamuoju laikotarpiu smarkiai skiriasi nuo šalčiausios žiemos savaitės metu stebimų eksergijos poreikių struktūros. Eksergijos poreikis šilumos forma yra nukritęs, kai tuo tarpu eksergijos poreikis elektros pavidalu išlieka pastovus.

Stebima, kad ventiliatoriuose B1\_P1 sunaudojama eksergija, nors savo dydžiu ir nesiskiria nuo tipinės žiemos savaitės, identifikuoja didžiausią poreikį,

kuris sudaro 42,9 % nuo visos „iki pastato sienos“ tiekiamos eksergijos. Ventiliatorių darbas nepriklauso nuo išorės sąlygų kaitos, o tik nuo patalpų naudojimo režimų.

Įvertinus pereinamojo periodo savaitės modeliavimo rezultatus, galima teigti, kad pastatui tiekiamos eksergijos dydis sudaro  $0,73 \text{ kWh/m}^2$ , iš kurių  $0,17 \text{ kWh/m}^2$  (arba 22,9 %) tenka eksergijai tiekiamai šilumos pavidalu ir  $0,56 \text{ kWh/m}^2$  (arba 77,1 %) elektrai. Šie rezultatai puikiai iliustruoja termodinaminio vertinimo ribas, kuomet nagrinėjamos tik tai projektinės sąlygos [56] ir neatsižvelgiama į sistemų naudojimo režimus.

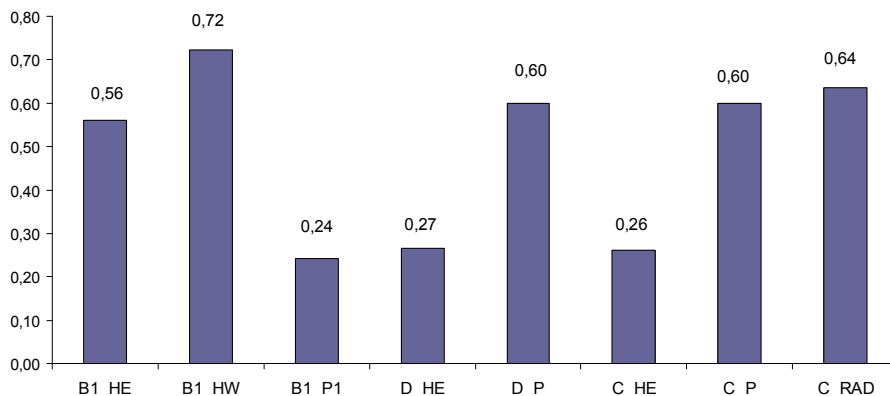
Trečiuoju atveju yra pateikiamas viso šildymo sezono įvertinimas. Šiame vertinime nustatytas suminis eksergijos kiekis tiekiamas pastatui nagrinėjamoju periodu. Gauti rezultatai pateikiami žemiau esančiame paveiksle.



22 pav. Šildymo sezono periodo eksergijos balansas

22 paveiksle parodyti sistemų elementuose per šildymo sezoną sunaudojami eksergijos kiekiai. Gauti rezultatai rodo, kad per šildymo sezoną išorinis tiekėjas turėtų pastatui patiekti  $48,18 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, kurios struktūrą sudaro  $29,97 \text{ kWh/m}^2$  (arba 62,2 %) eksergija šilumos pavidalu ir  $18,22 \text{ kWh/m}^2$  (arba 37,8 %) – elektra.

Pagal 19 paveiksle pateiktą pastato inžinerinių sistemų jungimo schemą, į šildymo ir vėdinimo sistemas nukreipiami panašūs eksergijos kiekiai: į vėdinimo sistemą tiekiamas  $24,23 \text{ kWh/m}^2$  (tai sudaro 50,3 % viso eksergijos srauto), kai likusi dalis –  $23,96 \text{ kWh/m}^2$  – tenka šildymo sistemai. Detalizuojant galima paminėti, kad iš vėdinimo sistemai skiriamos eksergijos kiekio 71,2 % sudaro eksergija elektros forma, atitinkamai šildymo sistemai elektros pavidalu tiekiamas eksergija tesiekia 4 %.



**23 pav.** *Sąlyginis eksergijos nuostolių pasiskirstymas sistemų elementuose*

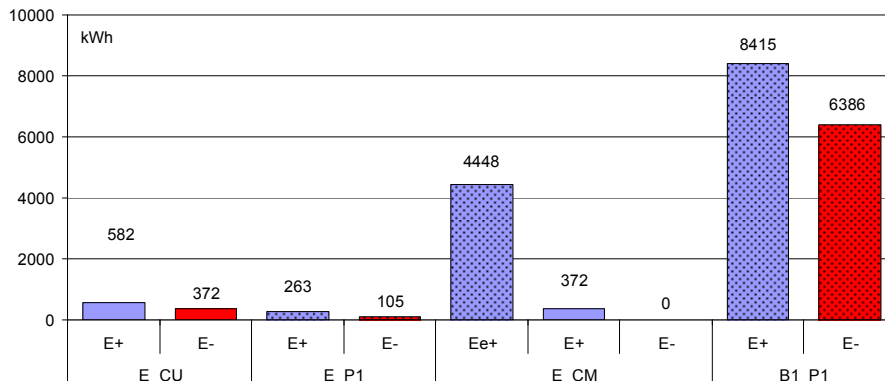
Antra vertus, absoliutūs tiekintos eksergijos kiekiai negali identifikuoti jos panaudojimo efektyvumo lygio, tuo tikslu 23 paveiksle pateikiamas proporcinis eksergijos nuostolių pasiskirstymas pagal atskirus sistemų elementus.

Diagramoje vaizduojamas atskirame elemente patiriamų nuostolių santykis su į tą elementą pateiktos eksergijos kiekiu, t. y. parodoma, kokia dalis pirminiai pateiktos energijos buvo sunaikinta (iššvaistyta) elemente.

Iš 23 paveiksle pateiktos diagramos matyti, kad didžiausi eksergijos nuostoliai patiriami šilumokaičiuose, kuriuose šiluma iš aukštesnį potencialą turinčios energijos konvertuojama į žemų temperatūrų lygmenį (artimo patalpos temperatūrai), t. y. vėdinimo kameros šilumokaityje B1\_HW, šildymo sistemos radiatoriuose C\_RAD. Taip pat galima pastebėti, kad gan dideli nuostoliai patiriami kontūrų cirkuliaciniuose siurbliuose, tačiau tai siejasi su pačių siurblių efektyvumo klausimu, o ne su jais transportuojamų srautų kokybiniais parametrais.

### 3.2. Šiltojo sezono metu veikiančių pastato inžinerinių sistemų tyrimo rezultatai

Šiltuoju metų periodu, priešingai nei šaltuoju, pasikeičia patalpos šiluminis balansas, nuostoliai per atitvaras virsta pritekėjimais. Vietoj šiluminio deficito patalpoje atsiranda jos perteklius. Siekiant išlaikyti nustatytas komfortines temperatūras patalpoje būtinas perteklinio šilumos srauto nuvedimas. Kaip jau buvo minėta, tai gali būti organizuojama pasitelkiant PMKS ir AMKS.



24 pav. Šiltojo metų laikotarpio eksergijos balansas

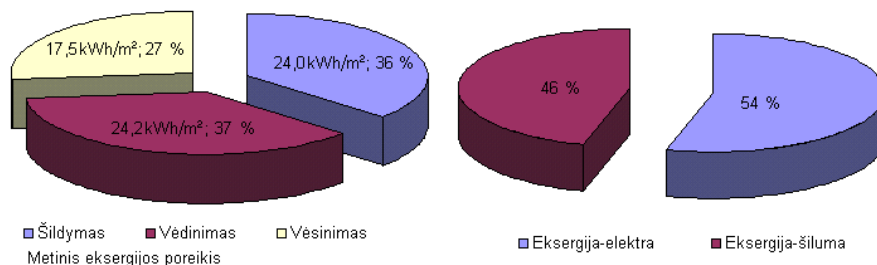
Šiame darbe analizuojamos aktyviųjų pastato mikroklimato kondicionavimo sistemų veiklą, todėl 24 paveiksle pateikiami šiltoju metų periodu veikiančių sistemų elementų suminiai eksergijos poreikiai. Paveiksle pateikti elementų žymėjimai atitinka 16 paveikslo schemoje pateiktą numeraciją.

Matyti, kad šiltoju metu periodu, kuomet veikia vėdinimo ir vėsinimo sistemos absoliučiai didžiausia dalis į pastatą tiekintos eksergijos srauto tenką sistemų slėgikliams, t. y. vėdinimo sistemos ventiliatoriams ir vėsinimo sistemos kompresoriams, naudojantiems elektrą. Lyginant iš patalpos nuvestos šiluminės eksergijos ir tam atlikti sunaudotos elektros santykis sudaro 4 % šilumos eksergijos pavidalu ir atitinkamai 96 % elektrą. Iš gautų rezultatų matyti, kad šiltoju metų periodu pastatui reikalinga tiekti vienos formos eksergijos srautas, t. y. elektrą, kurios poreikis sudaro 17,5 kWh/m<sup>2</sup>.

### 3.3. Metiniai eksergijos poreikiai „prie pastato sienos“

Apibendrinat šaltuoju ir šiltoju metų periodais nustatytus eksergijos srautų poreikius gaunami metiniai eksergijos srautai tiekiami „prie pastato sienos“. 25 paveiksle pateikiami eksergijos poreikiai suskirstyti pagal reikalingos tiekti eksergijos formą ir sistemas.

Svarbu paminėti, kad vėsinimo sistemai priskiriami eksergijos srautai taipogi savyje apjungia ir eksergijos poreikį reikalingą vėdinimo sistemos ventiliatorių funkcionavimui.



25 pav. Metinis eksergijos poreikis pagal sistemas ir formą

Gauti rezultatai tolimesniuose tyrimuose gali būti naudojami kaip atskaitos taškas lyginant skirtingas pastato inžinerinių sistemų schemas ar jų integracijos derinius.

### 3.4. Mikroklimato kondicionavimo sistemų optimizavimo galimybės

3.1 dalyje yra išanalizuotas pastato inžinerinių sistemų (dalies) veikimas bei nustatyti sistemų elementuose vykstančių procesų eksergijos poreikiai. Tačiau toks įvertinimas yra tik faktų konstatavimas apie esamą pastato eksergijos imlumą. Sekantis žingsnis šiame darbe yra atlikti sistemų integraciją ir analogiškai vykdytai bazinio varianto analizei nustatyti pakitusius eksergijos poreikius. Norėtusi dar karta pabrėžti, kad šiame darbe taikomas termodinaminis modelis yra skirtas diegiamų integracijos priemonių ekserginiam įvertinimui, tuo tarpu, kai pačios teikiamos vertinimui priemonės iš esmės yra jau žinomos sistemų projektavimo schemas. Pastatų inžinerinių sistemų efektyvumo didinamos gali būti siekiama dviem skirtingais būdais:

Sistemos nekeičiamos, o vykdomas pačių sistemų ar jų elementų galių parinkimo tobulinimas, valdymo optimizavimas ir pan.

modifikuojant pastato inžinerinių sistemų struktūrą, t. y. vykdant pastato inžinerinių sistemų integraciją, kuomet keičiamos sistemų organizavimo schemas arba pakeičiami, papildomi sistemas sudarantys elementai.

Pirmojo atvejo iliustracijai patogiau aptarti pavyzdį apie pastato apšvietimo ir org-technikos sistemas, kuriose bendrai sunaudojama didelė dalis elektros energijos bei tuo pačiu susidaro juntami šilumos pritekėjimai į patalpą, taip įtakojant pastato šiluminį balansą. Efektyvumo didinimo priemonių, pvz.: energetinės vadybos diegimas šiose sistemose skatintų mažesnę elektros vartojimą, t. y. būtų mažinamas tiektinos eksergijos poreikis, tuo pačiu mažinamas patalpų vėsinimo poreikis vasarą.

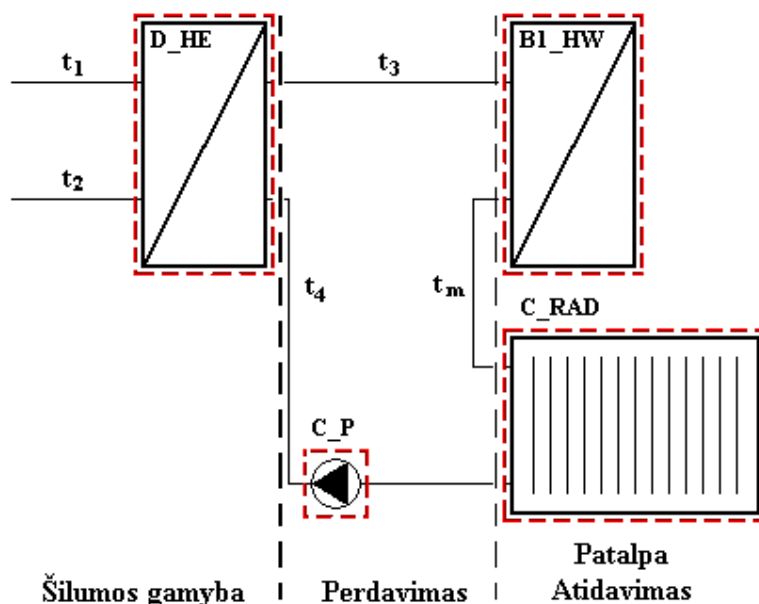


Eksergijos poreikio mažinimas slėgikliuose galimas tik betarpiškai didinant jų efektyvumą, tobulinant galios parinkimo metodus.

Antruoju atveju, energijos efektyvumo didinimas pastate yra įgyvendinamas atliekant pastato inžinerinių sistemų integraciją. Būtų logiška teigti, kad didžiausia nauda bus pasiekta tuo atveju, jeigu sistemų integracija bus pradėta vykdyti nuo tų sistemų ar jų elementų, kuriuose stebimi didžiausi eksergijos nuostoliai. Tokiais galima būtų įvardinti vėdinimo sistemos šilumokaitį B1\_HW ir šildymo sistemos radiatorius C\_RAD (23 pav.). Keli tokios integracijos atvejai yra aptariami kituose skyriuose.

### 3.4.1. Pastato inžinerinių sistemų integracijos 1 atvejis

Skirtingai nuo elektros energijos, šilumai, atskiruose sistemų elementuose, keliami skirtingi kokybiniai reikalavimai. Kaip vieną iš šiluminių procesų integracijos pavyzdžių galima išanalizuoti hibridinę vėdinimo ir šildymo sistemą.



26 pav. Nuoseklaus šildymo sistemos ir vėdinimo sistemos šilumnešio kontūrų jungimo schema

Kaip parodytą 23 paveiksle pateiktoje schemoje, šiuo atveju sistemą sudaro vienas kontūras nuosekliai apjungiantis šilumnešio tiekimą tiek į vėdinimo sistemos agregato šilumokaitį, tiek į šildymo sistemos šildymo prietaisus. Sistemos valdymo ir reguliavimo principai atitinka 19 paveiksle pateiktos schemos apra-

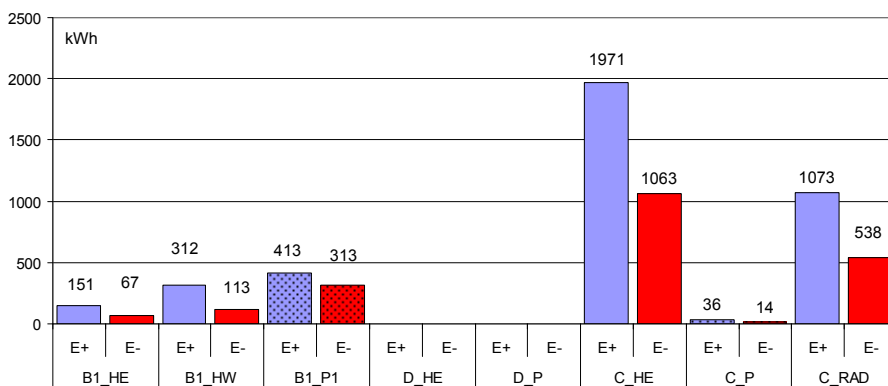
šymą, išskyrus temperatūrų pasiskirstymus. Priimama, kad temperatūra  $t_m$  yra palaikoma pastovi ir yra lygi  $+60\text{ }^\circ\text{C}$ . T. y. atitinka 19 paveikslo schemai užduotą grįžtamos temperatūros lygį  $t_4$ . Temperatūra  $t_3$  kinta priklausomai nuo vėdinimo agregato šilumokaičio B1\_HW šilumos poreikio svyravimo. Grįžtamo į šilumos punkto šilumokaitį D\_HE šilumnešio temperatūra  $t_4$  taipogi svyruoja priklausomai nuo šilumos poreikio šildymo sistemoje.

Vykdamas toki sistemų schemų apjungimą, reikia atkreipti dėmesį, kad sujungus du nepriklausomus kontūrus, gaunamas bendras šilumnešio srautas, turintis padengti suminius šildymo ir vėdinimo sistemų šilumos poreikius. Įrenginių dydžio kitimas dėl pakitusio šilumnešio srauto šiame darbe nėra vertinamas. Tai gali būti daroma atliekant detalesnius atskirų elementų ar jų mazgų tyrimus.

Kaip matyti iš 26 paveikslo, vėdinimo iš šildymo sistemos šilumnešio kontūre sujungtos nuosekliai, t. y. šilumos srautas pirmoje eilėje tiekiamas į vėdinimo agregato šilumokaitį B1\_HW, o vėliau nuvedamas į šildymo sistemos prietaisus C\_RAD. Akivaizdu, kad esant tokiai sistemų sujungimo schemai, šilumnešio, patenkančio į šildymo sistemą, temperatūra yra žemesnė nei 19 paveiksle pateiktoje schemeje. Tai savo ruožtu atsiliepia šilumos perdavimo efektyvumui nuo šildymo prietaisų patalpos sistemai, t. y. žemėjant temperatūrai, mažėja radiacinis šilumos perdavimas, o pagrindinis šilumos srautas perduodamas konvekcinio būdu.

Kaip ir baziniu sistemų vertinimo atveju, analizės rezultatai pateikiami trims skirtingiems periodams.

Tipinės žiemos savaitės eksergijos srautai pateikti 27 paveiksle.

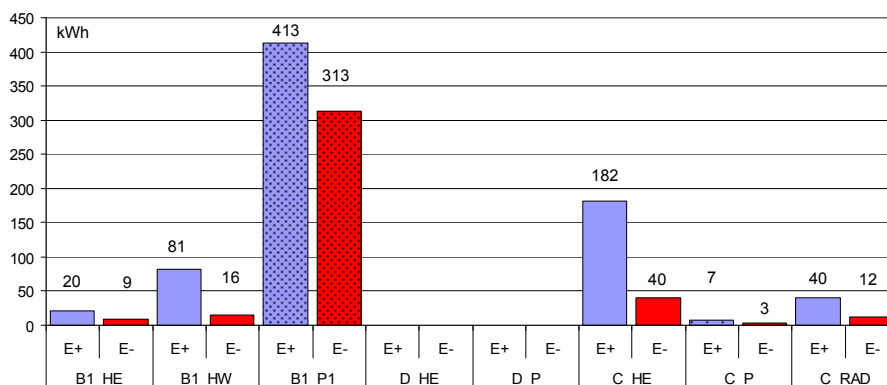


27 pav. Tipinės žiemos savaitės eksergijos balansas

Iš gautų modeliavimo rezultatu galima teigti, kad per tipinę žiemos savaitę pastatui turi būti patiekta  $2,44\text{ kWh/m}^2$  eksergijos, iš kurios  $1,85\text{ kWh/m}^2$  (arba 75,5 %) tenka eksergijai tiekiamai šilumos pavidalu ir  $0,60\text{ kWh/m}^2$  (arba 24,5 %) elektrai. Atsižvelgiant į atliktus sistemų schemas pakeitimus, eksergijos

poreikių skirstymas į šildymo ir vėdinimo sistemos dedamąsias yra negalimas. Lyginant su baziniu atveju, tiekintos eksergijos kiekis sumažėjo 9,3 % bei nežymiai pakito jos struktūra.

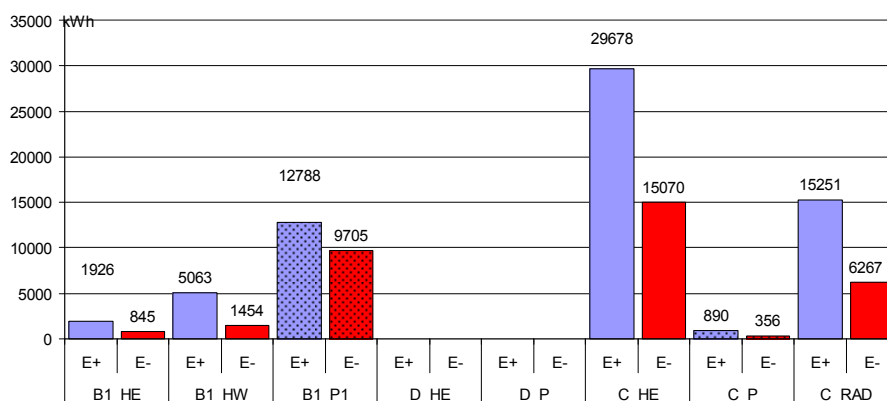
Pereinamojo laikotarpio savaitės srutai pateikti paveiksle žemiau.



28 pav. Pereinamojo laikotarpio eksergijos balansas

Kaip ir bazinio varianto atveju, eksergijos poreikiai ventiliatorių funkcionavimui perinamojo laikotarpio savaitę yra didžiausi. Prie pastato sienos tiekintos eksergijos kiekis sudaro  $0,72 \text{ kWh/m}^2$ , kur  $0,16 \text{ kWh/m}^2$  (arba 22,2 %) tenka eksergijai tiekiamai šilumos pavidalu ir  $0,56 \text{ kWh/m}^2$  (arba 77,8 %) elektrai.

Šildymo sezono eksergijos srutai pateikti 29 paveiksle.

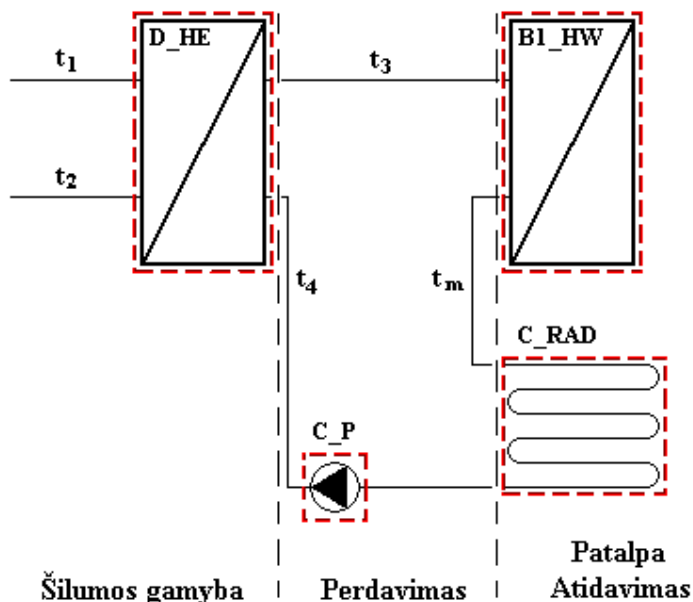


29 pav. Šildymo sezono periodo eksergijos balansas

Atlikus pastato inžinerinių sistemų šilumos srautų integraciją, gauta, kad per šildymo sezoną išorinis tiekėjas pastatui turėtų patiekti  $45,32 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, kurios struktūrą sudaro  $27,09 \text{ kWh/m}^2$  (arba 59,8 %) eksergija šilumos pavidalu ir  $18,24 \text{ kWh/m}^2$  (arba 40,2 %) – elektra. Stebima tendencija, kad mažinat šilumos pavidalo eksergijos poreikius, absoliučiu dydžiu auga eksergijos poreikiai elektros forma.

### 3.4.2. Pastato inžinerinių sistemų integracijos 2 atvejis

Kitas pastato inžinerinių sistemos integracijos atvejis, kuomet yra keičiamas vienas iš sistemos elementų, pateiktas žemiau esančiame paveiksle.

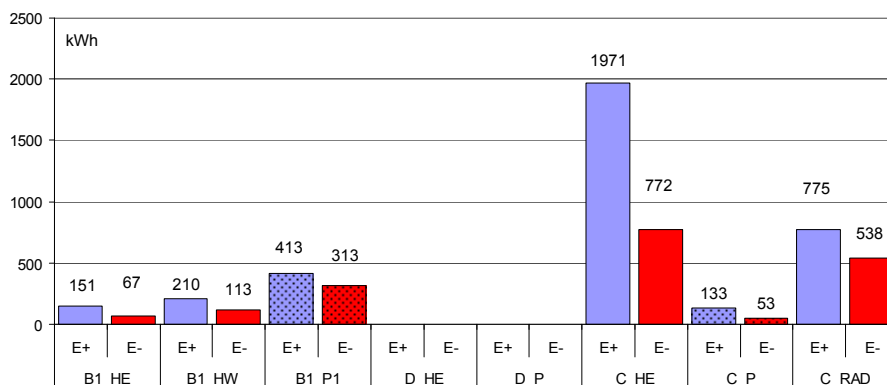


30 pav. Nuoseklus šildymo ir vėdinimo sistemų kontūrų jungimas pritaikant grindinį šildymą

Šiuo atveju vėdinimo sistemos šilumokaitis B1\_HW ir šildymo sistemos šilumos atidavimo įrenginys, kaip ir pirmame variante, yra jungiami nuosekliai, t. y. kontūru cirkuliuojantis šilumnešis turi užtikrinti abiejų šilumos atidavimo prietaisų šilumos poreikį. Priešingai nei pirmame variante, šildymo sistemos šilumos atidavimo elementas C\_RAD yra keičiamas į kito tipo – grindinį šildymą. Įvedus grindinį šildymą kaip šilumos atidavimo elementą, atsiranda temperatūros kritimo šiame elemente ribojimas iki  $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , t. y. šilumnešis negali ataušti

daugiau nei penkiais laipsniais. Ši sąlyga stipriai padidina kontūre reikalingo cirkuliuoti šilumnešio debitą, nuo 0,23 kg/s baziniame variante iki 1,92 kg/s. Medžiagų sąnaudų kitimas, dėl padidėjusio šilumnešio srauto, darbe nėra nagrinėtas.

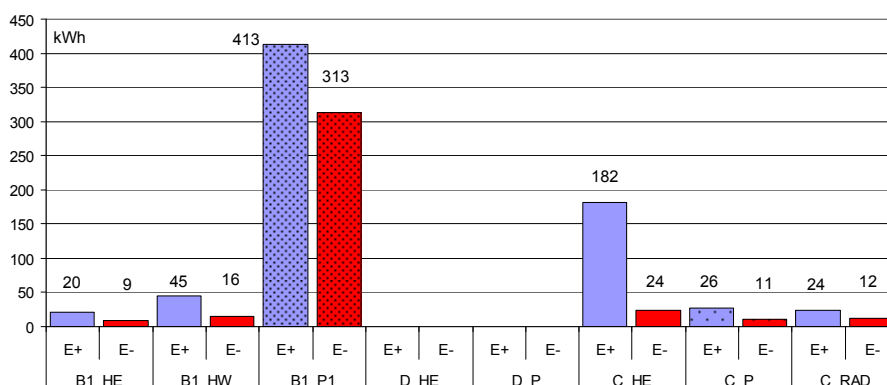
Tipinės žiemos savaitės eksergijos srautai pateikti 31 paveiksle.



31 pav. Tipinės žiemos savaitės eksergijos balansas

Iš gautų modeliavimo rezultatu galima teigti, kad per tipinę žiemos savaitę pastatui turi būti patiekta  $2,04 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, iš kurios  $1,31 \text{ kWh/m}^2$  (arba 64,3 %) tenka eksergijai tiekiamai šilumos pavidalu ir  $0,73 \text{ kWh/m}^2$  (arba 35,7 %) elektrai.

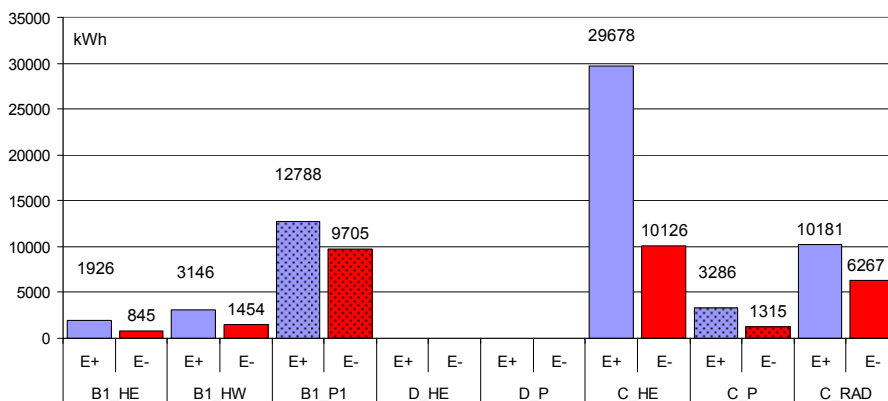
Pereinamojo laikotarpio savaitės srautai pateikti 32 paveiksle.



32 pav. Pereinamojo laikotarpio eksergijos balansas

Prie pastato sienos tiekimos eksergijos kiekis sudaro  $0,68 \text{ kWh/m}^2$ , kur  $0,09 \text{ kWh/m}^2$  (arba 13,5 %) tenka eksergijai tiekiamai šilumos pavidalu ir  $0,59 \text{ kWh/m}^2$  (arba 86,5 %) elektrai.

Šildymo sezono eksergijos srautai pateikti 33 paveiksle.



**33 pav.** Šildymo sezono periodo eksergijos srautų balansas

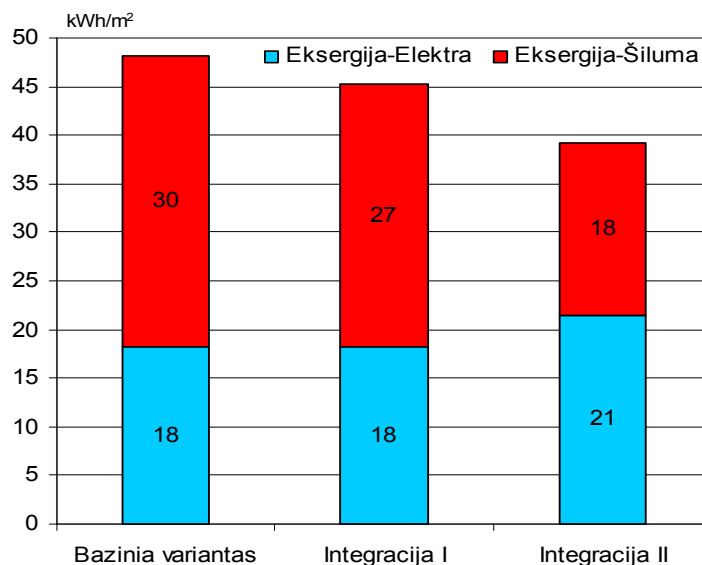
Atlikus pastato inžinerinių sistemų šilumos srautų integraciją, gauta, kad per šildymo sezoną išorinis tiekėjas pastatui turėtų pateikti  $39,20 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, kurios struktūrą sudaro  $17,77 \text{ kWh/m}^2$  (arba 45,3 %) eksergija šilumos pavidalu ir  $21,43 \text{ kWh/m}^2$  (arba 54,7 %) – elektrai.

### 3.4.3. Pastato inžinerinių sistemų integracijos rezultatų palyginimas

Pasinaudojant sukurtu pastato inžinerinių sistemų termodinaminiu modeliu, buvo nustatyti eksergijos srautai atskiruose sistemų elementuose. Baziniame variante buvo nustatyta „pastatui iki sienos“ reikalingas tiekti eksergijos kiekis.

Taipogi buvo nustatyta, kad įdiegiant skirtingas pastato inžinerinių sistemų integracijos priemones, galima įtakoti tiekiamą eksergijos kiekį bei struktūrą. Žemiau esančiame paveiksle pateikiamas bazinio varianto ir dviejų sistemų integracijos atvejų palyginimas.

Kaip matyti iš 34 paveikslo pateiktos diagramos, atliekant pastato inžinerinių sistemų integraciją yra pasiekiamas reikalingos pateikti eksergijos kiekio sumažėjimas. Suskaičiavus pirmosios integracijos alternatyvos eksergijos poreikį paaiškėjo, kad tiekimos eksergijos kiekis sumažėjo 6 %. Vykdant sistemų integraciją, kuomet sujungiamos vėdinimo ir grindinio šildymo sistemos, pasiekiamas 18 % sutaupymas lyginant su baziniu variantu.



**34 pav.** „Iki pastato sienos“ reikalingos patiekti eksergijos kiekių palyginimas

Tačiau žvelgiant į pastato eksergijos poreikių struktūrą, matyti, kad mažinant absoliutų eksergijos kiekį, yra keičiama poreikių sudarančios eksergijos formų sudėtis, t. y. kinta šilumos-eksergijos ir elektros-eksergijos santykis. Baziniame variante šiluma-eksergija ir elektra-eksergija sudarė atitinkamai 62 % ir 38 %. Atlikus pirmosios interakcijos atvejo skaičiavimus santykis pasikeitė į atitinkamai 60 % ir 40 %, o antruoju integracijos atvejus santykis tapo lygus 45 % ir 55 %.

Galima stebėti, kad integracijos eigoje pasiekiamas eksergijos poreikių sumažėjimas yra sąlygojamas visų pirma mažinant šilumos-eksergijos poreikį, kai tuo tarpu elektros-eksergijos poreikis išlieka panašus arba didėja.

Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad didžiausias pastato inžinerinių sistemų termodinaminio efektyvumo didinimo potencialas yra sukoncentruotas sistemų elementuose, kuriuose vyksta šiluminės energijos transformacijos. Elektros eksergijos kiekio mažinimas galimas tik didinant pastato inžinerinėse sistemose naudojamų slėgikių bendrąjį efektyvumą.

Darant išvadą, galima teigti, kad vykdant pato inžinerinių sistemų integraciją galima sumažinti reikalingos tiekti „iki pastato sienos“ eksergijos kiekį.

### 3.5. Tyrimo rezultatų jautrumo analizė

Kuriant pastato termodinaminį modelį bei vykdant modeliavimą buvo daromos prielaidos, apimančios pastato inžinerinių sistemų elementų techninius parametrus bei patalpų naudojimo strategijas. Todėl, siekiant nustatyti darbe gautų rezultatų patikimumą ir įvertinti galimus jų svyravimus, būtina atlikti svarbiausių parametru jautrumo analizę.

Atliekama parametru jautrumo analizė turi du tikslus. Pirmą yra nustatyti gautų tyrimo rezultatų patikimumą, antra – įvertinti priimtų prielaidų kitimo įtaką.

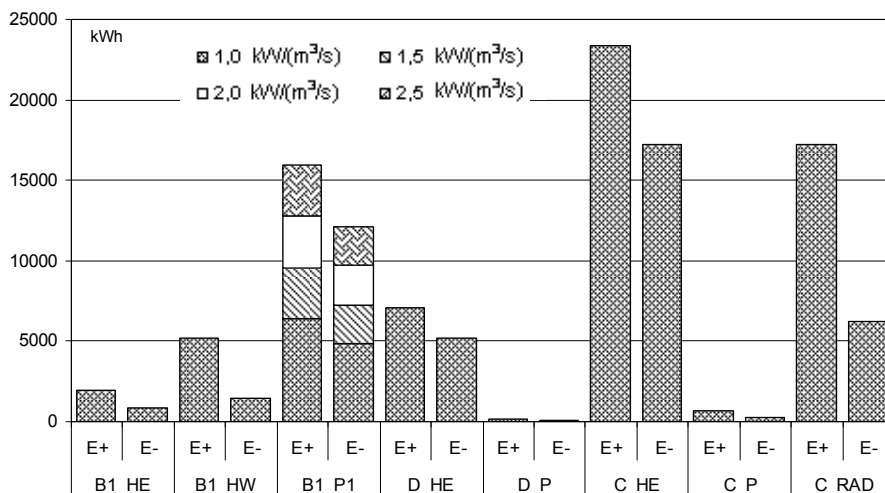
Parametrai arba prielaidos, kurioms yra atliekama jautrumo analizė, yra identifikuoti kaip turintys didžiausią įtaką skaičiavimo rezultatams. Ši atranka yra vykdoma tyrėjo nuožiūra. Jautrumo analizei buvo atrinktos prielaidos, nusakančios esamus sistemų elementų efektyvumus bei apibudinančios medžiagų bei energijos srautų parametrus.

Pastato inžinerinių sistemų elementų efektyvumą nusakančios nuostatos:

- Energijos poreikis ventiliatoriuose;
- Vėdinimo sistemos šilumos atgavimo šilumokaičio efektyvumas.

Medžiagų ir energijos srautų parametrus nusakančios prielaidos:

- Tiekiamo šviežio oro kiekis – vėdinimo kartotinumumas;
- Šilumnešio temperatūriniai režimai.



35 pav. Ventiliatoriaus savitosios galios įtaka skaičiavimo rezultatams

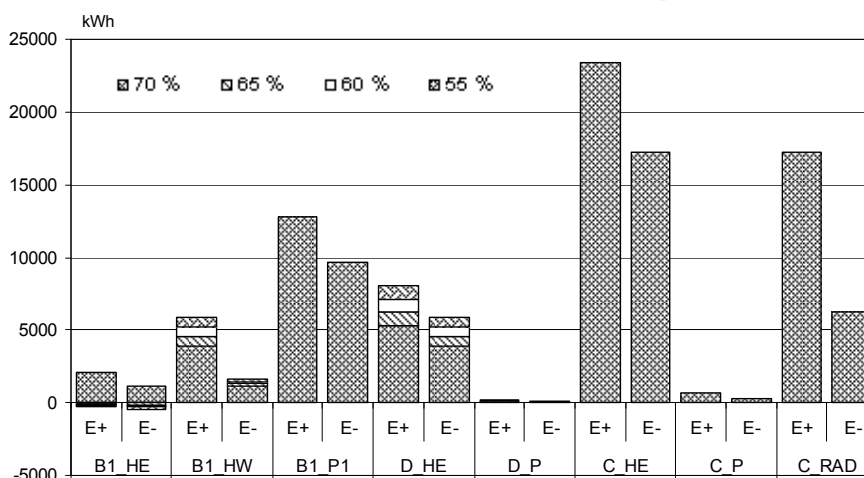
Pagal 22 paveiksle pateiktus šildymo sezono eksergijos poreikius pastato inžinerinių sistemų elementuose, ventiliatoriai yra vieni stambiausių eksergijos



naudotojų, todėl darbe naudojamos ventiliatoriaus savitosios galios prielaidos įtaka skaičiavimo rezultatams privalo būti patikrinta. Žemiau esančiame paveiksle pateikiami skaičiavimo rezultatai, jeigu savitoji ventiliatoriaus galia kistų nuo 1,0 iki 2,5 kW/(m<sup>3</sup>/s).

Elektros energijos poreikis ventiliatoriams darbe yra nustatomas pagal rekomenduojamą ventiliatorių savitąją galią, kuri nagrinėjamo tipo pastatams lygi 2 kW/(m<sup>3</sup>/s). Iš visų nagrinėjamų prielaidų, būtent ventiliatoriaus savitosios galios parametras daro didžiausią įtaką skaičiavimo rezultatams. Parametro pakeitimas 0,5 kW/(m<sup>3</sup>/s) generuoja 25 % pokytį elemento B1\_P1 skaičiavimo rezultatuose.

Kitas svarbus sistemos elementas, nuo kurio tiesiogiai priklauso eksergijos srautų pasiskirstymas, yra vėdinimo sistemos šilumos atgavimo šilumokaitis. Šio elemento efektyvumo kitimo įtaka skaičiavimo rezultatams pateikta žemiau.



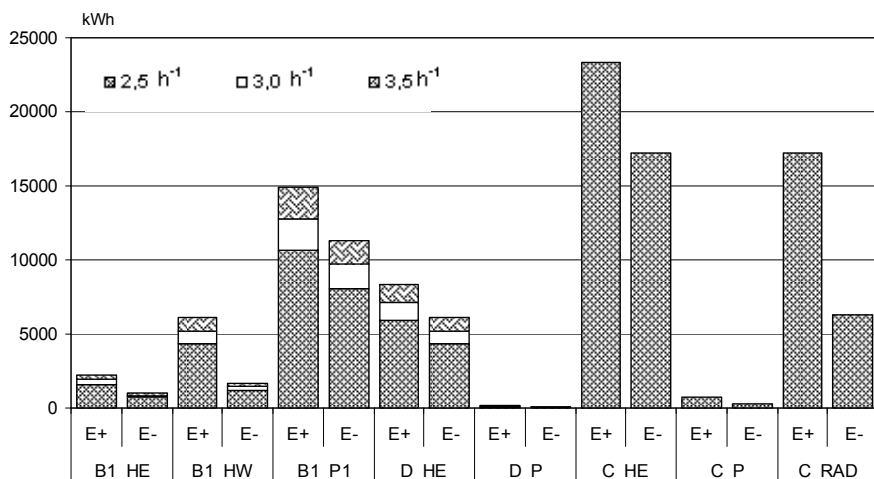
**36 pav.** Vėdinimo sistemos šilumogrąžos įrenginio efektyvumo įtaka skaičiavimo rezultatams

Akivaizdu, kad didėjant šilumos atgavimo efektyvumui mažėja reikalingos tiekti į patalpą eksergijos srautas.

Į patalpą reikalingas patiekti šviežio oro kiekis turi didelę įtaką skaičiavimo rezultatams, kurie yra pateikti žemiau.

Tiekiamo šviežio oro srautas į patalpą yra labai svarbus rodiklis stipriai įtakojantis eksergijos poreikius pastato inžinerinėse sistemose. Visų pirma tai sietina su oro srautų transportavimui sunaudojama eksergija-elektra ventiliatoriuose (elementas B1\_P1). Atitinkamai kiekybiškai skirtingiems srautams pašildyti prireikia skirtingų eksergijos-šilumos srautų elemente B1\_WH.

Tiekiamo oro kiekio svyravimo įtaka skaičiavimo rezultatams pateikta 37 paveiksle.



**37 pav.** Vėdinamo oro kartotinumų įtaka skaičiavimo rezultatams

Pastato inžinerinėse sistemose bei lauko tinkluose cirkuliuojančių šilumnešių temperatūriniai režimai, kaip parodė skaičiavimai, nedaro tokios didelės įtakos kaip aukščiau nagrinėtos prielaidos.

Svarbu paminėti, kad atliekant pastato inžinerinių sistemų veikimo modeliavimą buvo remtasi ir tokiomis prielaidomis, kurioms jautrumo analizės vykdymas yra negalimas arba ribotas. Išorės oro temperatūros kitimo seka yra vienas didžiausių įtaką tyrimo rezultatams turinčių veiksnių.

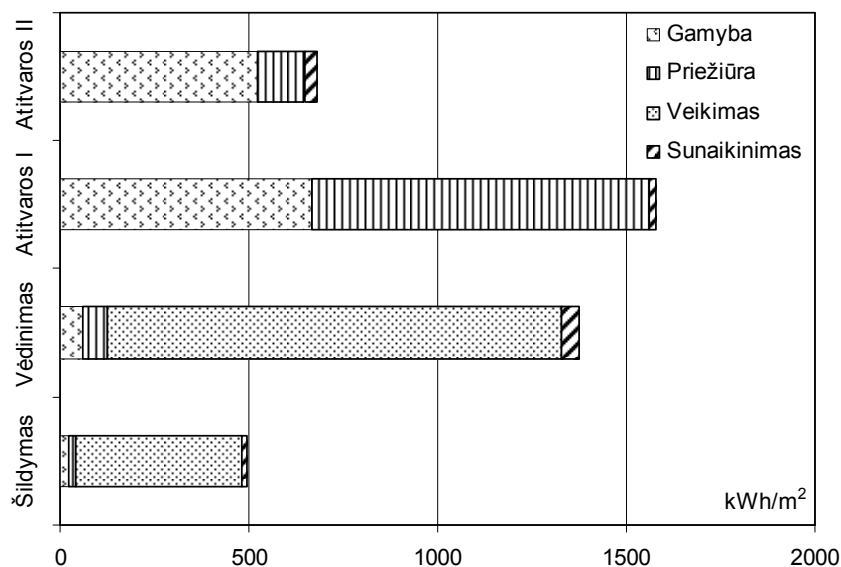
### 3.6. Eksergijos poreikis per sistemų gyvavimo laikotarpį

Kaip buvo minima 2.2.1 skyriuje, pastato inžinerinių sistemų vertinimas turi aprėpti ne tik sistemos elementų galios parinkimą bet ir jų generuojamą įtaką aplinkai vertinant iš gyvavimo ciklo pozicijos.

Šiame darbe yra nustatyti eksergijos kiekiai reikalingi tiekti pastatui per vienerius norminius metus. Šie poreikiai apima eksergijos srautus reikalingus komfortinių sąlygų palaikymui patalpoje ir papildomus srautus sunaudojamus pastato inžinerinėse sistemose. Kaip buvo įrodyta darbe, eksergijos poreikio mažinimas pastatui gali būti įgyvendinamas tikrai minimizuojant antrąjį eksergijos srautą.

Eksergijos poreikio įvertinimui per sistemos gyvavimo laikotarpį be sistemų funkcionavimui reikalingų eksergijos srautų būtina nustatyti eksergijos poreikį sistemų sukūrimui (gamybai), priežiūrai bei sunaikinimui (perdirbimui).

Pasinaudojant ankstesnių tyrimų ir kitų tyrėjų pateiktais duomenimis apie PE poreikius sistemų gamybai, priežiūrai bei sunaikinimui [5, 10, 13], 38 paveiksle pateikiamas pastato inžinerinių sistemų eksergijos poreikis per jų gyvavimo laikotarpį.



38 pav. Sistemų PE poreikis per jų gyvavimo laikotarpį

38 paveiksle pateikiama šildymo bei vėdinimo sistemų PE poreikiai per jų gyvavimo periodą. Kaip buvo priimta, sistemų tarnavimo laikas sudaro 25 metus. Paveiksle taip pat pristatyti ir pastato atitvarų poreikiai (atitvara I ir atitvara II), nors jų gyvavimo trukmė skiriasi nuo sistemų, t. y. sudaro 50–75 metus. Siekiant suvienodinti teikiamus duomenis, kaip parodyta 38 paveiksle, visi PE poreikiai perskaičiuojami prie 25 metų periodo.

Kaip matyti iš paveiksle pateikto dviejų atitvarų palyginimo PE poreikiai priežiūrai smarkiai skiriasi. Tai galima paaiškinti skirtingais informacijos rinkimo metodais. Atitvaras I atveju sumuojami ne tik pastato remonto darbams sunaudojamos energijos kiekiai bei ir vidaus interjero keitimo PE sąnaudos, kai tuo tarpu atitvaras II atveju, vertinami tik pagrindinių pastato konstrukcijų priežiūros energijos poreikiai.

Svarbu paminėti, kad atliktuose skaičiavimuose eksergijos srautai vėsinimo ir vėdinimo sistemose yra sumuojami ir 38 paveiksle vaizduojami kaip vėdinimo sistemos poreikiai.

Lyginant PE poreikius sistemų gyvavimo periodu matyti, kad energijai imlių pastato inžinerinių sistemų dedamoji yra didžiausia. PE vėdinimo sistemai sunaudojama: gamyba  $62 \text{ kWh/m}^2$ , priežiūra  $62 \text{ kWh/m}^2$ , veikimas  $1205 \text{ kWh/m}^2$ , sunaikinimas  $46 \text{ kWh/m}^2$ . Per gyvavimo laikotarpį –  $1375 \text{ kWh/m}^2$ . Atitinkamai šildymo sistemos gamybai reikalinga  $21 \text{ kWh/m}^2$ , priežiūrai  $21 \text{ kWh/m}^2$ , veikimui  $438 \text{ kWh/m}^2$ , sunaikinimui  $16 \text{ kWh/m}^2$ . Viso per gyvavimo laikotarpį sunaudojama  $495 \text{ kWh/m}^2$ .

### 3.7. Trečiojo skyriaus išvados

Trečiasis skyrius pristato tyrimo rezultatus, gautus panaudojus sukurtą pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį.

Sukurtas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis leidžia analizuoti charakteringus sistemų veikimo periodų režimus.

Atlikus tipinės žiemos savaitės sistemų veikimo modeliavimą gauti rezultatai parodė, kad „prie astato sienos“ turi būti patiekta  $2,69 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, iš kurios 78 % šilumos pavidalu ir 22 % – elektra. Didžiausi eksergijos poreikiai susidaro šilumokaičiuose.

Pereinamojo laikotarpio savaitės sistemų modeliavimo rezultatai parodė, kad prie sienos turi būti patiekta  $0,73 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos iš kurios 23 % tenka šilumai ir likusi eksergija turi būti patiekta elektra. Pagrindiniai eksergijos poreikiai šiuo laikotarpiu susidaro ventiliatoriuose, jie siekia iki 43 % viso tiekiamo eksergijos kiekio.

Atlikus sistemų modeliavimą viso šildymo sezono metu, gauti rezultatai parodė, kad tiekinas eksergijos kiekis sudaro  $48,18 \text{ kWh/m}^2$ , kur 62 % tenka šilumai ir 38 % – elektrai. Pagrindiniai eksergijos poreikiai susidaro šilumokaičiuose ir ventiliatoriuose.

Iš gautų rezultatų matyti, kad vienas didžiausių eksergijos vartotojų yra vėdinimo sistemos ventiliatoriai. Tačiau verta pastabėti, kad pastatų inžinerinių sistemų projektavimo stadijoje šiems elementams skiriamas mažas dėmesys.

Šiltojo sezono metu veikiančių sistemų modeliavimo rezultatai parodė, kad reikalingas tiekti eksergijos kiekis lygus  $17,5 \text{ kWh/m}^2$ , iš kurio 96 % sudaro elektra.

Eksergijos kiekis, kuris reikalingas vien komfortinių sąlygų patalpoje palaikymui sudaro  $29,5 \text{ kWh/m}^2$ , iš kurio 77 % tenka šildymo sistemai, 23 % tenka vėdinimo sistemai. Eksergijos kiekis reikalingas komfortinių sąlygų palaikymui, arba kitaip būtinasis eksergijos kiekis, nusako eksergijos kiekį pastate, kuris reikalingas energijos nuostolių (arba pritekėjimų) kompensavimui. Šiltuoju periodu

būtiną eksergijos kiekį sudaro  $0,8 \text{ kWh/m}^2$ . Pastato inžinerinėse sistemose papildomai sunaudojama  $35,7 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, iš kurios 3 % tenka šildymo sistemai, 48 % tenka vėdinimo sistemai ir 49 % vėsinimo sistemai.

Pasirinktos ir išnagrinėtos dvi sistemų integravimo schemas. Pirmuoju atveju vėdinimo sistemos šilumokaitis nuosekliai jungiamas su šildymo sistemos šilumos atidavimo prietaisu – radiatoriumi. Antrajame variante paliekamas nuoseklus jungimas, tačiau radiatoriaus elementas pakeičiamas grindiniu šildymu. Atlikus modeliavimą buvo gauti rezultatai, rodantys, kad į pastatą tiekintos eksergijos kiekis gali būti sumažintas atitinkamai 6 % ir 18 %.

Atlikus skaičiavimo rezultatų jautrumo analizę buvo nustatyta, kad didžiausią įtaką skaičiavimo rezultatams turi ventiliatorių efektyvumo svyravimas bei vėdinimui naudojamo oro kiekio kitimas.

Nustatyti eksergijos poreikiai per sistemų gyvavimo laikotarpį. Vėdinimo sistemai sunaudojamas PE kiekis jos gyvavimo laikotarpiu lygus  $1375 \text{ kWh/m}^2$ , atitinkamai šildymo sistemai –  $495 \text{ kWh/m}^2$ .



---

## Bendrosios išvados

Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą buvo nustatyta, kad termodinaminis metodas nėra plačiai taikomas nagrinėjant pastato inžinerines sistemas. Atlikti tyrimai apsiriboja sistemų eksergine analize esant norminėms sąlygoms, kai tuo tarpu sistemų vertinimas charakteringais jų veikimo periodais nėra vykdytas.

1. Sukurtas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis, leidžiantis vykdyti sistemų veikimo ekserginę analizę ir identifikuoti eksergijos vartojimo efektyvumo didinimo potencialą sistemose ir jų elementuose.

2. Darbe atliktas sistemų momentinių galių tyrimas pirmą kartą įvertino charakteringus sistemų veikimo periodų režimus. Tyrimas nustatė atskirų sistemų ir jų elementų ekserginius srautus, identifikavo eksergijos vartojimo efektyvumo didinimo vietas, leido parinkti galimas integracijos priemones.

3. Nustatyta, kad pastato inžinerinių sistemų ekserginio efektyvumo didinimas jų integravimo būdu galimas tuo atveju, kai sistemų momentinės galios reaguoja į patalpos energijos balanso pokyčius, t. y. sistemos geba panaudoti išorinius ir vidinius šilumos pritekėjimus, reaguoti į kintamus patalpos naudojimo režimus.

4. Sukurtas pastato inžinerinių sistemų termodinaminis modelis prisideda prie Direktyvos 2005/32/EB nuostatų įgyvendinimo, kurios nustato ekologinio projektavimo reikalavimų energiją vartojantiems gaminiams sistemą.

5. Naudojant sukurtą pastato inžinerinių sistemų termodinaminį modelį nustatyta, kad darbe nagrinėjamam administraciniam pastatui, esančiam Lietuvos klimatinėje zonoje, reikalingos tiekti eksergijos kiekis, kuris būtinas vien kom-

fortinių sąlygų patalpoje palaikymui, jį įvardijant kaip būtiną eksergijos kiekį, sudaro  $29,5 \text{ kWh/m}^2$ , iš kurio 77 % tenka šildymo sistemai, 23 % tenka vėdinimo sistemai. Šiltuoju periodu būtinas eksergijos kiekis sudaro  $0,8 \text{ kWh/m}^2$ . Pastato inžinerinėse sistemose papildomai sunaudojama  $35,7 \text{ kWh/m}^2$  eksergijos, iš kurios 3 % tenka šildymo sistemai, 48 % tenka vėdinimo sistemai ir 49 % – vėsinimo sistemai.

6. Nustatyta, kad pilnas eksergijos kiekis, kuris turi būti pristatytas iki pastato inžinerinių sistemų ribos šildymo sezono metu, sudaro  $47,7 \text{ kWh/m}^2$ , iš kurio 49 % tenka šildymo sistemai, 51 % tenka vėdinimo sistemai. Tiektnos eksergijos struktūrą sudaro dvi energijos formos: 38 % tenka elektrai, šiluma sudaro 62 %. Šiltuoju metų periodu pilnas tiektnas eksergijos kiekis elektros forma lygus  $17,5 \text{ kWh/m}^2$ , kuris sunaudojamas vėsinimo ir vėdinimo sistemose.

7. Darbe nustatyta, kad eksergijos suvartojimo pastate efektyvumo didinimas pasiekimas dviem būdais:

a) fiziškai nekeičiant esamų sistemų, t. y. sistemų elementų ir jų galios parinkimo tobulinimas bei sistemų valdymo optimizavimas – energijos vadybos įdiegimas;

b) modifikuojant pastato inžinerinių sistemų struktūrą, t. y. vykdant pastato inžinerinių sistemų integraciją, kuomet keičiamos sistemų organizavimo schemos arba pakeičiami, papildomi sistemas sudarantys elementai. Išnagrinėjus dvi pasirinktas sistemų integracijos schemas buvo nustatyta, kad į pastatą tiektnos eksergijos kiekis gali būti sumažintas atitinkamai 6 % ir 18 %.



---

## Literatūros sąrašas

1. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook 2003: HVAC Applications: I-P Edition.
2. Bakshi Bh. R. A Thermodynamic Framework for Ecologically Conscious Process Systems Engineering. Computers and chemical engineering. 2000, Vol 24, p. 1767–1773.
3. Barcol-Air BV. Service: maintenance and retrofitting. Internetė: <http://www.barcol-air.nl/UK/service.html> (žiūrėta 2004 02 13).
4. Biekša D., Martinaitis V. An estimation of life cycle exergy consumption of energy-intensive microclimate conditioning systems. Proceedings of 6th International Conference „Energy for buildings“, held in Vilnius on 7–8 October, 2004. Vilnius: Technika, 2004, ISBN 9986-05-771-x, p. 205–219.
5. Bjorn E., Brohus H. Overall evaluation of indoor climate and energy for alternative office design using the eco-factor. Proceedings of 6th International Conference “Energy for buildings”, held in Vilnius on 7–8 October, 2004. Vilnius: Technika, 2004, ISBN 9986-05-771-x, p. 415–427.
6. Boelman E. C. Exergy needs for winter ventilation in buildings. Proceedings of the Sustainable Building 2002 Conference. Oslo, Norway, 23–25 September, 2002, p. 1–6.
7. Borel L. Thermodynamique et energetique. Lausanne: Presses polytechniques romandes, 1991, 710 p.

8. Brohus H., Bjorn E. An interative assessment concept for building design based on the eco-factor. Proceedings of 6th International Conference “Energy for buildings”, held in Vilnius on 7–8 October, 2004. Vilnius: Technika, 2004, ISBN 9986-05-771-x, p. 220–229.
9. Buchanan A. H., Honey B. G. Energy and carbon dioxide implications of building construction. *Energy and Buildings*. 1994, Vol 20, No 3, ISSN 0378-7788, p. 205–217.
10. Čiuprinskas K., Martinaitis V. Pirminės energijos poreikių statybinėms medžiagoms nustatymo ypatumai. *Statyba*. 1997. Nr. 3(11), ISSN 1392-1525, p. 35–43.
11. Čiuprinskienė J., Čiuprinskas K. Pastato šildymo sistemos projektavimas: metodikos nurodymai. Vilnius: Technika, 2005, ISBN 9986-05-840-6, 99 p.
12. Cole R. J., Kernan P.C. Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment*. 1996, Vol 31, No 4, p. 307–317.
13. Cory W. T. W. The Role of the Fan Industry in the Field of Energy Efficiency in Motor Driven Systems. *Reviews*. 2005 July, No 77, p. 1–2.
14. Eijdem H. H. E. W., Boerstra A. C., Veld P. J. M. Op. Low temperature heating system. Impact on IAQ, thermal comfort and energy consumption. Internetė: <http://www.vtt.fi/rte/projects/annex37/POVpaper.pdf> (žiūrėta 2006 03 27).
15. European committee for standardization. prEN 15315: Heating systems in buildings – Energy performance of buildings – Overall energy use, primary energy and CO2 emissions. 2005. Ref. No. prEN 15315:2005:E
16. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2002/91/EB, dėl pastatų energinio naudingumo. Briuselis. 2002. Internetė: <http://www.buildingsplatform.eu/cms/index.php?id=13> (žiūrėta 2004 11 12).
17. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2005/32/EB, nustatanti ekologinio projektavimo reikalavimų energiją vartojantiems gaminiais nustatymo sistemą. Briuselis. 2005. Internetė: [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/lt/oj/2005/l\\_191/l\\_19120050722lt00290058.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/lt/oj/2005/l_191/l_19120050722lt00290058.pdf) (žiūrėta 2006 10 06).
18. Falhen P., Voll H., Naumov J. Efficiency of pump operation in hydronic heating and cooling systems. Proceedings of 6th International Conference “Energy for buildings”, held in Vilnius on 7–8 October, 2004. Vilnius: Technika, 2004, ISBN 9986-05-771-x, p. 250–258.
19. Financial policinies & producers. Texas Higher Education System Generic Building Componentization Guidelines. Internetė: [https://fmx.cpa.state.tx.us/fmx/spa/resource/bldg\\_compon\\_guide.php](https://fmx.cpa.state.tx.us/fmx/spa/resource/bldg_compon_guide.php) (žiūrėta 2006 09 23).

20. Franzetti Ch., Fraisse G., Achard G. Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings. *Energy and Buildings*. 2004, Vol 36, No 2, p. 117–127.
21. Galovic A., Zivic M., Andrassy M. Entropy Analysis of Parallel-Flow Heat Exchangers. *Strojniski vestnik*. 2003, Vol 49, p. 100–110.
22. Gedgudas M., Šležas A., Tuomas E. Šilumos tiekimas. Kaunas: Aušra, 1993, 327 p.
23. Ghiaus C. Free-running building temperature and HVAC climatic suitability. *Energy and Buildings*. 2003, Vol 35, No 4, p. 405–411.
24. Grosu L., Feidt M., Benelmir R. Study of the improvement in the performance coefficient of machines operating with three reservoirs. *Exergy*. 2004, Vol 1, No 1, p. 147–162.
25. Hau J. L., Bakshi Bh. R. Promise and Problems of Emergy Analysis. *Ecological Modeling*. 2004, Vol 178, No 1–2, p. 215–225.
26. Hauser G., J. de Boue, Maas A. Raumbelichtung und Energieeffizienz. *WKSB*. 2006, Vol 57, p. 17–25.
27. Hensen J. L. M. Towards an integral approach of building and HVAC system. *Energy and buildings*. 1993, Vol 19, No 4, p. 297–302.
28. Jungtinės tautos. Jungtinių tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos Kioto protokolas 1998. Internetė: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (žiūrėta 2004 03 16).
29. Juodis E. Vėdinimas. Vilnius: Technika, 1998, 351 p.
30. Kuemmel B., Krüger S., Sørensen B. Life-cycle analysis of energy systems. Copenhagen, 1997, ISBN 8778670314, 225 p.
31. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. STR 2.09.02:2005 Šildymas vėdinimas ir oro kondicionavimas. Valstybės žinios, Vilnius. 2005, 49 p.
32. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. STR 2.09.04:2002 Pastato šildymo sistemos galia. Energijos sąnaudos šildymui. Valstybės žinios, Vilnius, 2002, 34 p.
33. Lietuvos standartizacijos departamentas LST 1678:2001 „Pastatų vėdinimas. Patalpos vidaus aplinkos projektavimo reikalavimai“. 2001, ICS 91.140.30, 73 p.
34. Lietuvos standartizacijos departamentas. Informacija apie standartus. Internetė: <http://alpha.lsd.lt/lt/doc/2007-01%2016-31.doc> (žiūrėta 2007 01 04).
35. Lietuvos standartizacijos departamentas. Metinė ataskaita 2002. Internetė: [http://alpha.lsd.lt/lt/doc/metine\\_ataskaita\\_2002.pdf](http://alpha.lsd.lt/lt/doc/metine_ataskaita_2002.pdf) (žiūrėta 2007 01 04).
36. MacCracken M. M. Thermal Energy Storage Myths. *ASHRAE Journal*. 2003, No 11, p. 36–43.

37. Malheiro L. Optimized indoor air quality and energy saving strategies for quality buildings in mediterian climates: compatible objectives with comfort and environment issues? *Rehva journal*. 2003, Vol 4, p. 10–15.
38. Martinaitis V. Pastato gyvavimo ciklo termodinaminės analizės modelis. Vilnius: Technika, 2001, 173 p.
39. Martinaitis V. Šildymo katilo ekserginis įvertinimas. *Energetika*. 1999, Vol 1, p. 70–75.
40. Martinaitis V. Termodinaminis klimato įvertinimas nustatant pastatų energijos poreikius. *Energetika*. 1997, Nr. 1, p. 41–47.
41. Martinaitis V. Thermodynamical analysis model of building life cycle. Habilitation summary. Vilnius: Technika, 2000, 64 p.
42. Morbitzer Ch., Strachan P. and others. Integration of building simulation into the design process of an architecture practice. *Proceedings of 7th International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro. 2001, p. 69–704.
43. Morgan M. J., Shapiro H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. New York, 2000, ISBN: 0471317136, 918 p.
44. Nishikawa R., Shukuya M. Numerical analysis on the production of cool exergy by making use of heat capacity of buildings envelopes. *Proceedings of 6th International IBPSA Conference (BS'99)*. Kyoto. 1999, p. 129–135.
45. Norvaiša S., Sruogis V. Sistemų dinamikos pradmenys. Internetė. <http://www.culture.lt/science/SD> (žiūrėta 2006 12 15).
46. Oka T., Suzuki M. M., Konnya, T. The estimation of energy consumption and amount of pollutants due to the construction of buildings. *Energy and Buildings*. 1993, Vol 19, p. 303–311.
47. Pekus R. Slėginių vamzdžių hidrauliniai skaičiavimai. Vilnius: Technika, 2000, 64 p.
48. Per-Åke F., Åsblad A. *Process Integration Course in Baltic countries*. Riga, 2001, 90 p.
49. Petraš D., Matej P. The optimization of the heat pump operation in low temperature heating systems. *Proceedings of 6th International Conference on Energy for buildings*. “Energy for buildings” 2004, September 7–8 Vilnius, ISBN 9986-05-771-x, p. 346–351.
50. Pidwirny M. *Fundamentals of Physical Geography*. 2006. Internetė: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/4b.html> (žiūrėta 2006 11 14).
51. Quiquero F. Building system integration. *Canadian property management magazine*. 2000 January, p. 34–35.
52. Rogoža A. Centralizuoto šilumos tiekimo tinklų analizė gyvavimo ciklo požiūriu. Daktaro disertacija. Vilnius, 2003, 99 p.

53. Rogrs S. C. and others. Building as a Power Plant Proposed Control Architecture. Intelligent Control. IEEE International Symposium. 2003, p. 691–696.
54. Rosen M. A., Dincer I. Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. Exergy. 2001, Vol 1, No 1, p. 3–13
55. Scheuer C., Koelein G. A., Reppe P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. Energy and Buildings. 2003, Vol 35, No 10, p. 1049–1064.
56. Schmidt D. Design of Low Exergy Buildings – Methods and Pre-Design Tool. International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings. 2003, Vol 3, p. 1–47.
57. Shukuya M., Hammache A. Introduction to the Concept of Exergy – for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems. Espoo, 2002, 61 p.
58. Simpson M., Kay J. Availability, Exergy, the Second Law and all that. Internet: <http://www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs/exergy/> (žiūrėta 2006 12 03)
59. Siren K. Lanksti pastatų energetikos technologija – ateities iššūkis. VGTU 4-oji tarptautinė konferencija. Energija pastatams. 2000 rugsėjo 21–22 d. Vilnius, p. 337–343.
60. Šiupšinskas G. Centralizuoto aprūpinimo šiluma sistemos kompleksinio modernizavimo modelis. Daktaro disertacija. Vilnius, 2007, 131 p.
61. Smith P. R., Seth A. K., Wessel R. and others. Facilities Engineering and Management Handbook for Commercial and Industrial and Institutional buildings. Boston. 2000, 1450 p.
62. Staine F., Favrat D. Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors. Applied Thermal Engineering. 1996, Vol 16, No 6, p. 497–507.
63. Stritih U. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings. Energy and buildings. 2003, Vol 35, No 11, p. 1097–1104.
64. Szargut J. Antropogenic and natural exergy losses (exergy balance of the Earth's surface and atmosphere). Energy. 2003, Vol 28, p. 1047–1054.
65. Szargut J. Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes. Energy. 2007, Vol 27, p. 379–389.
66. Szargut J., Morris D. R., Steward F. R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Amsterdam: Hemisphere Publishing Corporation, 1988, ISBN 0-89116-574-6, 400 p.

67. Szargut J., Ziebig A., Stanek W. Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measurement of the ecological cost. *Energy conversion & Management*. 2002, Vol 43, p. 1149–1163.
68. The ISO14000 Environmental Management Group. ISO 14000 / ISO 14001. Internet: <http://www.iso14000-iso14001-environmental-management.com/index.htm> (žiūrėta 2006 10 24).
69. Thormark C. A low energy building in a life-cycle its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*. 2002, Vol 37, p. 429–435.
70. University of Missouri - St. Louis. Information system analysis. Internet: [www.umsl.edu/~sauter/analysis/intro/system.htm](http://www.umsl.edu/~sauter/analysis/intro/system.htm) (žiūrėta 2006 12 20).
71. Utlu Z., Hepbasli A. A study on the evaluation of energy utilization efficiency in the Turkish residential-commercial sector using energy and exergy analyses. *Energy and Buildings*. 2003, Vol 35, p. 1145–1153.
72. Virtanen M. Technical report. LowEx IEA. 2002. Internet: <http://virtual.vtt.fi/annex37/statusreport10.pdf> (žiūrėta 2005 03 17).
73. Wall G., Gong M. On exergy and sustainable development – Part 1: Conditions and concepts. *Exergy*. 2001, Vol 1, No 3, p. 128–145.
74. Weckowicz Th. E. Ludwig von Bertalanffy (1901–1972): A Pioneer of General Systems Theory. University of Alberta, Canada. 2000. Internet: <http://www.richardjung.cz/bert1.pdf> (žiūrėta 2006 11 13)
75. Weigand D. E., Benyja J., Heschong L. and others. *Advanced Lighting Guidelines*. Vancouver: New buildings institute. 2003, 445 p.
76. Xin Yu Wu, Zmeureanu R. Exergy analysis of HVAC systems for a house in Montreal. *Proceedings of Conference Esim 2004*. Vancouver, 2004, p. 1–8.
77. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. *Советское радио*, 1979, с. 14–18.
78. Верхивкер Г. П., Дубовской С. В., Бродянский Б.М. и др. Эксергетические расчеты технических систем. Киев, 1991, 360 с.
79. Громов Ю. Ю., Земской Н. А., Лагутин А.В. и др. Системный анализ в информационных технологиях: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004, ISBN 5-8265-0263-0, 176 с.
80. Руденев Н. И. Радиационный и тепловой баланс фитоценозов. Москва: Наука, 1984, 105 с.
81. Сибиряков В. Г., Семенова Л. Н. Из прошлого в будущее – технология прогнозирования развития систем с помощью ТРИЗ. Центр ОТСМ-ТРИЗ технологий. Gali būti rasta internete: [www.trizminsk.org/e/248023.htm](http://www.trizminsk.org/e/248023.htm) (žiūrėta 2005 09 13).
82. Сканава А. Н. Конструирование и расчет систем водяного и воздушного отопления зданий. Москва: Стройиздат, 1983, 304

## Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema

### Recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose:

- 1A. Biekša D., Martinaitis V. Pastato inžinerinių sistemų tyrimas taikant eksperimentinių sistemų vertinimo metodą. *Energetika*. 2007, T. 53, Nr. 4, ISSN 0235-7208, p. 84–89.
- 2A. Biekša D., Martinaitis V., Šakmanas A. An estimation of exergy consumption patterns of energy-intensive building service systems. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006, Vol XII, No 1, ISSN 1392-3730, p. 37–42.

### Kituose leidiniuose:

- 3A. Biekša D., Martinaitis V. An estimation of life cycle exergy consumption of energy-intensive microclimate conditioning systems. 6-th International Conference “Energy for buildings” proceedings, Vilnius: Technika, 2004, ISBN 9986-05-771-X, p. 205–219 (ISI Proceedings).
- 4A. Biekša D., Martinaitis V. Kokybinio ir kiekybinio šilumnešio parametrų reguliavimo termodinaminis įvertinimas. Mokslinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“ pranešimų rinkinys, KTU, Kaunas 2006, ISBN 9986-492-92-0, p. 259–262.
- 5A. Biekša D., Rogoža A. Thermo dynamical model for building service system calculation. International Congress “E-nova 2006: Intelligente Energiesysteme” proceedings, Pinkaffeld: Studienzentrum Burgenland. 2006. p. 157–162.
- 6A. Biekša D., Martinaitis V. Šilumai imlių mikroklimato kondicionavimo sistemų pirminės energijos poreikiai per jų gyvavimo ciklą. Respublikinės mokslinės konferencijos „Inžinerinės sistemos“ pranešimų rinkinys, VGTU, Vilnius: Technika 2004, ISBN 9986-05-605-5, p. 9–14.

Darius Biekša

**PASTATO INŽINERINIŲ SISTEMŲ PROCESŲ INTEGRAVIMO  
VERTINIMAS TAIKANT EKSERGIJOS KRITERIJŲ**

Daktaro disertacija  
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

2008 01 22. 6 sp. l. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius,  
<http://www.kopija.lt>