

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

MIKROKLIMATO SISTEMŲ ĮRANGOS GEDIMŲ IR JŲ NUSTATYMO BEI DIAGNOZAVIMO PRIEMONIŲ ANALIZĖ

Violeta MISEVIČIŪTĖ *

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2020 m. liepos 1 d.; priimta 2020 m. rugpjūčio 18 d.

Santrauka. Mikroklimato sistemų (MKS), pastate sukuriančių mikroklimatą ir užtikrinančių gerą oro kokybę, gedimai turi įtakos pastate suvartojamam energijos kiekiui, nors sistemas eksploatuojant tam skiriama nepakankamai dėmesio. Užtikrinant tinkamą MKS veikimą, siekiant išvengti įrangos gedimų, galima sumažinti jose suvartojamos energijos kiekį. Apžvelgus mokslines publikacijas, straipsnyje pateikiami charakteringi biurų ir prekybos pastatų, kaip imliausių energijai šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemų įrangos gedimai. Taip pat įvardijamos įrangos gedimų nustatymo ir diagnostavimo priemonės. Apibendrinta tiriamos srities apžvalga rodo, kad MKS būdingi gedimai susiję su įrangos valdymu, jutikliais, įrangos eksploatacinių savybių blogėjimu. Dažniausiai gedimams nustatyti ir diagnozuoti taikomi automatizuoti gedimų aptikimo ir diagnostavimo metodai (AGAD). Pateikiami galimi sprendimai gedimams ŠVOK sistemose šalinti.

Reikšminiai žodžiai: automatizuotas gedimų aptikimas ir diagnostavimas, inžinerinės sistemos, įrangos gedimai, jutikliai, mikroklimato sistemos.

Įvadas

Pastatai Europoje yra pagrindiniai energijos vartotojai, suvartojantys apie 40 % visos energijos, o beveik pusę jos – šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemoms veikti (Pérez-Lombard et al., 2008). ŠVOK sistemos yra vienos pagrindinių pastato inžinerinių sistemų, sukuriančių (palaikančių) žmonių sveikatai ir veiklai tinkamą šiluminį komfortą ir suvartojančių tam kuo mažiau energijos. Mikroklimato sistemų veikimas yra reikšmingas potencialas sumažinti energijos suvartojimą pastatuose, didinant energijos vartojimo efektyvumą, oro kokybę ir komforto lygmenis (Zhang ir Hong, 2017). ŠVOK veikimui įtakos turi ne tik jų valdymas, bet ir gedimai, dėl kurių gali būti prarandama apie 15–30 % pastato mikroklimato sistemoms (MKS) veikti bei eksploatuoti reikiamos energijos (Piette et al., 2001; Katipamula ir Brambley, 2005), be to, turi įtakos šiluminio komforto blogėjimui.

Shahnazari et al. (2019) teigia, kad modernių ŠVOK sistemų veikimas, siekiant užtikrinti šiluminį komfortą ir atitikti nacionalinius norminių dokumentų reikalavimus, ypač priklauso nuo jiems valdyti taikomos automatikos. Dėl netinkamos ŠVOK įrangos veikimo gali būti suvartojama daugiau energijos, nes dėl padidėjusio nusidėvėjimo

kyla eksploatacinių išlaidos ir sumažėja pastate esančių žmonių šiluminis komforto pojūtis. Esant gedimų vėdinimo sistemose, dėl padidėjusio patalpų teršalų poveikio gali kilti pavojus žmonių sveikatai. Moksliniai tyrimai rodo, kad ŠVOK sistemų gedimai gali turėti didelę įtaką sistemos efektyvumui, energijos suvartojimui (Roth et al., 2004) ir komfortui (Turner et al., 2017; Zhang ir Hong, 2017).

Šio tyrimo tikslas – remiantis literatūros apžvalga, nustatyti dažniausiai pasitaikančius pastato MKS įrangos gedimus, pateikti priemones, skirtas jiems nustatyti ir diagnozuoti, nustatyti, kokią įtaką ŠVOK sistemų gedimai turi sistemos energijos vartojimui.

1. Tyrimo objektas

Tyrimo objektu pasirinkti viešosios paskirties pastatų ŠVOK sistemų įrangos gedimai. Tokie pastatai pasirinkti atsižvelgiant į tai, kad šie pastatai, palyginti su gyvenamaisiais, pasižymi MKS įvairove. Kuo įvairesnė veikla ir procesai vyksta pastate pagal jo paskirtį, tuo sudėtingesnės struktūros požiūriu ir įvairesnės inžinerinės sistemos projektuojamos, įrengiamos ir naudojamos. Energijos suvartojimo požiūriu imliausi yra negyvenamieji, o ypač

*Autorius susirašinėti. El. paštas violeta.miseviciute@vgtu.lt

biurų ir prekybos paskirties pastatai, suvartojantys 50 % energijos.

Tiriant įvairiose klimato zonose JAV prekybos pastatų ŠVOK sistemas (Papadopoulos et al., 2019), nustatyta, kad būtent jos yra atsakingos už didžiąją energijos, suvartojamos pastate, dalį bei CO₂ išmetalų kiekį prekybos sektoriuje (Yoshida, 2006). ŠVOK sistemoms tenka apie 50 %, o apšvietimui – 15 % energijos, suvartojamos pastate (Pérez-Lombard et al., 2008). Rinkdamasis, kokią pastato MKS projektuoti pastatui, projektuotojas labai retai atsižvelgia, kad ji vartotų mažai energijos (Tian et al., 2019). Projektuojant ŠVOK sistemas dažniausiai atsižvelgiama į šiuos veiksnius: projektines šildymo (vėsinimo) galias, pagrindines pastate atliekamas veiklas, klimato zoną, be to, vienodai svarbūs reikalavimai mikroklimatui užtikrinti ir pradinės investicijos, mažiausiai svarbios – metinės išlaidos už energiją ir metinis suvartojamos energijos kiekis.

Orą kaip šilumnešį dažniausiai naudojančios sistemos gali būti pritaikytos atlikti pastato šildymo (vėsinimo), vėdinimo ir oro kondicionavimo funkcijas, todėl tokios sistemos pasirinktos nagrinėti jose esančios įrangos gedimus bei gedimų nustatymo ir diagnostavimo priemones. Dažniausiai prekybos pastato MKS sudaro tinkamiems (pvz., reikiamos temperatūros) parametrų ruošti skirtas oro ruoštuvas (OR), orui iki patalpų transportuoti – ortakiai ir patalpose orui paskirstyti – sklaidytuvai, o surinkti – rinktuvai (1 pav.).

Pagrindiniai kintamojo oro tūrio (KOT) vėdinimo sistemos jutikliai kontroliuoja oro, vandens temperatūras, srautus bei slėgį, pateikiami 1 paveiksle. Jutikliai atlieka svarbų vaidmenį valdant ŠVOK sistemas ir turi įtakos efektyviam energijos vartojimui jose. Oro ir vandens temperatūros kontroliuojamos pagal temperatūros jutiklių duomenis, pagal užimtumo jutiklį, reaguojantį į žmonių skaičių, keičiamas tiekiamojo oro kiekis.

2. Tyrimo metodika

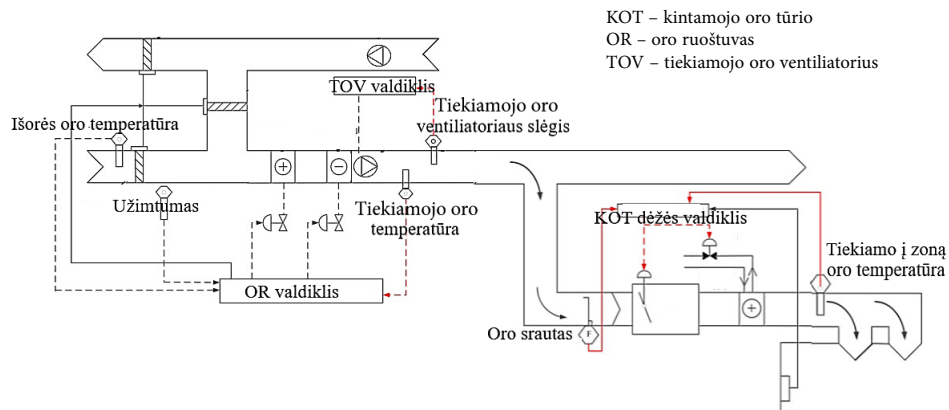
Siekiant išsiaiškinti, kokie būdingi pastatų MKS gedimai ir kokiais būdais jie nustatomi bei diagnozuojami, atliekama gedimų ir jų nustatymą nagrinėjančių tyrimų apžvalga.

Apžvelgiami tyrimai, susiję su gedimais komercinės paskirties ŠVOK sistemose.

2.1. Būdingieji pastato mikroklimato sistemų įrangos gedimai

Atliekant tyrimų apžvalgą, siekiama nustatyti būdinguosius pastatų MKS gedimus, apžvelgti negyvenamųjų – prekybos ir biurų, kaip imliausių energijai – MKS gedimus nagrinėjančius tyrimus. Anot Cotts et al. (2009) atlikto tyrimo, per pastaruosius dešimtmečius eksponentiškai išaugęs pastatų energinių sistemų techninės priežiūros skaičius rodo, kad padaugėjo pastatų eksploataavimo klaidų. Tipiškos eksploataavimo klaidos kyla dėl netinkamo įrengimo, įrangos susidėvėjimo, jutiklio poslinkio ar gedimų bei valdymo logikos problemų. Gedimai suskirstyti į keletą kategorijų: valdymo gedimas, jutiklio poslinkis, įrangos veikimo pablogėjimas, užsiteršimo klaida.

Įprastos OR ir KOT dėžių gedimų priežastys KOT vėdinimo sistemoje – netinkamas valdymo komponentų (pavarų ir jutiklių) veikimas. Nukrypimai ir pradiniai gedimai gali atsirasti OR ir KOT dėžės jutikliuose (1 pav.): tiekiamojo oro temperatūros ir ventiliatoriaus slėgio, šalinamojo oro temperatūros jutiklis ir kt. Shahnazari et al. (2019) atliktame tyrime nagrinėjami OR jutiklio ir KOT dėžės pavaros gedimai. Nors tuo pačiu metu veikiančio tiek OR jutiklio, tiek KOT dėžės pavaros gedimus galima aptikti, bet jų neįmanoma atskirti be jutiklių. Galimas šios problemos sprendimas – papildomas jutiklių išdėstymas, kuriais atliekamas nereikalingų tų pačių kintamųjų, kaip temperatūra, matavimas arba išmatuojami papildomi, turintys įtakos oro kokybei pastate kintamieji (santyrinė oro drėgmė arba CO₂ lygiai). Didėjant automatikos lygiui, norint sumažinti diskomfortą ir energijos sąnaudas ŠVOK sistemose, vis svarbiau diagnozuoti ir taisyti valdymo komponentų (pavarų, jutiklių) gedimus. Jutiklio naudojimo trukmė turi įtakos normaliam ŠVOK sistemų veikimui ir būtinam valdymui. Pateiktas būdas gedimams identifikuoti grindžiamas gedimų diagnostika ir gedimams atsparios kontrolės sistemomis ir jų taikymu ŠVOK sistemoms (Shahnazari et al., 2019).



1 paveikslas. Kintamojo oro tūrio (KOT) vėdinimo sistema su valdymo jutikliais
Figure 1. Variable air volume (VAV) ventilation system with sensors for it control

Atsižvelgę į daugelyje pastatų esančius įvairius trūkumus, dėl kurių padidėja energijos sąnaudos, Roth et al. (2004) pateikė pirmuosius energinio poveikio vertinimus dėl konkrečių pastatų sistemos ir įrangos gedimų JAV komerciniuose pastatuose. Remdamiesi išsamia litera-

tūros apžvalga Roth et al. (2004) išanalizavo ir nustatė 12 pagrindinių sistemų įrangos gedimų, kurie turi poveikį suvartojamam energijos kiekiui (1 lentelė). 1 lentelėje taip pat siūlomi sprendimai, kaip šalinti gedimus arba jų išvengti.

1 lentelė. Gedimai, jų aprašymas, priežastys (Roth et al., 2004) bei siūlomi sprendimai
Table 1. Faults, their description, causes (Roth et al., 2004) and solutions proposed

ŠVOK sistema ar jos elementas	Būdingo gedimo aprašymas	Priežastys, sukėlusios gedimą	Siūlomas sprendimas
Apšvietimo ir ŠVOK sistemos	Veikimo nesuderinimas	Apšvietimas ir ŠVOK sistemos paliekamos veikti, kai patalpos tuščios	Siūloma įrengti automatizuotą pastato valdymo sistemą (PAVS), galinčią fiksuoti įvairius sistemos veikimą reguliuojančius parametrus ir reguliuoti sistemų veikimą (Visier et al., 1997)
Oro paskirstymas	Nesuderintas oro srautas	Blogai suprojektuota sistema, netinkamas sistemos bandymas ir derinimas, sunkiai įgyvendinami projekto keitimai dėl sistemos sudėtingumo, sistemos modifikavimo po jos bandymo ir derinimo, patalpų apkrovos pokyčiai, neperžiūrint oro srauto ir sistemos galingumo	Vykdėti prevencinę priežiūrą
Ortakiai	Oro nuotėkis	Įtrūkę, netinkamai sujungti ortakiai, netinkamai sumontuota ortakio mastika, nusidėvėję ortakio tarpikliai, ortakio jungtys	
Sklandės	Netinkamai veikia	Korozija ir nusidėvėjimas, dėl kurios sklendės ar jų pavaros užstringa, nutrūkusios jungtys, valdymo sistemos gedimai, jutiklių, nustatančių sklendės padėtį, gedimas	
Oro kondicionieriaus garintuvas	Nepakankamas garintuvo oro srautas	Pažeistas, nešvarus, užsikimšęs šilumokaitis ir filtrai, netinkama ortakio konstrukcija, mažas ventiliatoriaus sukimosi greitis ir nešvarus darbo ratas	
Valdikliai	Programinės įrangos programavimo klaidos	Netinkami kontrolės parametrai, neteisinga valdymo logika, netinkamas įrangos veikimas, netinkamas valdomo įrenginio (pvz., KOT sklendės) veikimas	
	Netinkamas aparatinės įrangos diegimo valdymas	Nesusijungę ekonomizeriai (arba neturintys temperatūros jutiklio) neleidžia taupyti, KOT sistemos be įjungto kintamojo greičio veikia kaip pastovaus oro tūrio (POT), bloga termostato padėtis gali padidinti energijos sąnaudas	
	Netinkamas valdymo įrengimas / paleidimas	Netinkami sistemos veikimo kontroliniai taškai (tiekiamojo oro ar atvėsinto vandens temperatūra ir kt.), netinkami įrenginių veikimo temperatūros diapazonai, netinkami valdymo kontūrų valdymo parametrų koeficientai (pvz., PID, angl. <i>proportional-integral-derivative</i>), neteisingi atkūrimo grafikai (KOT sistemos ortakio slėgio valdymas, atvėsinto ar šildomo vandens temperatūra ir kt.)	Pateikiama interaktyvi modelių pagrįsta gedimų aptikimo ir diagnozavimo (FDD) strategija, padedanti diagnozuoti staigaus KOT sistemų OR gedimus. Siūlomoje strategijoje taikomas hibridinis metodas, integruojantis modelių ir taisyklėmis pagrįstą FDD metodą (Wang et al., 2012)
	Valdymo komponento gedimas ar nusidėvėjimas	Dažnas temperatūros jutiklio išsiklibravimas, jutiklio ar valdiklio gedimas	Vykdėti prevencinę priežiūrą
Šildymo sistema	Vandens kontūre tinkamai neuždaromi vožtuvai	Valdymo vožtuvas, uždarymo vožtuvas, nuotėkis dėl vožtuvo susidėvėjimo	
Vėsinimo sistema	Šaltnešio (šaldymo agento) kontūre oru aušinamo kondensatoriaus užteršimas	Gamtinės nuosėdos kondensatoriaus paviršiuje, gamtinės dulkės, sezoninės žiedadulkės	
	Netinkamas šaltnešio kiekis	Dėl blogai suvirintų jungčių, netinkamai užsandarintų srieginių jungčių, vamzdinių komponentų nuovargio per didelis arba per mažas šaltnešio kiekis	

Pastatų ŠVOK sistemų gedimai gali turėti didelę įtaką sistemos efektyvumui, energijos suvartojimui ir komfortui. Dėl gedimų sistemose prarandama 3–11 % visos komercinės paskirties pastatuose suvartojamos energijos (Roth et al., 2004). Pasak Roth et al. (2004), didžioji įrangos gedimų dalis susijusi su oro skirstomaisiais elementais ŠVOK sistemose ir sistemų bei jų elementų parametrų valdikliais. Nustatyti dažniausiai pasitaikantys gedimai leidžia ieškoti būdų, kaip nustatyti ir diagnozuoti juo, išvengti jų ne tik eksploatuojant sistemas, bet ir paleidžiant veikti. Toliau apžvelgiamos priemonės, taikomos gedimams MKS nustatyti ir diagnozuoti.

2.2. Būdai, taikomi pastato mikroklimato sistemų gedimams nustatyti ir diagnozuoti

Gedimų nustatymo metodai skirstomi į tris kategorijas: istorija grįstų duomenų, kokybinio ir kiekybinio modelio metodai. Kim ir Katipamula (2018) pateikia automatizuotų komercinių pastatų sektoriaus gedimų aptikimo ir diagnostikos (AGAD) tyrimų, paskelbtų nuo 2004 m., apžvalgą, kuri gali būti gairėmis tiek tyrėjams, tiek pramonės įmonėms renkantis tinkamą AGAD metodą.

Kim ir Katipamula (2018), apžvelgę apie 200 tyrimų, vykdytų pastatų sistemose nustatė, kad daugiausia (42 %) buvo nagrinėjama KOT sistemos OR, aušintuvai ir aušinimo bokštai (17 %), oro kondicionieriai bei šilumos siurbliai (16 %), visas pastatas (12 %), vandens šildytuvai (4 %), komerciniai šaldytuvai ir apšvietimas (po 3 %), kitos ŠVOK ir ventiliatoriniai konvektoriai (po 2 %), o didžioji dauguma (87 %) vykdomų tyrimų yra koncentruoti į AGAD metodų, skirtų kelioms pastatų sistemoms (KOT sistemos OR, aušintuvai ir aušinimo bokštai, oro kondicionieriai bei šilumos siurbliai ir bendras pastatas), kūrimą. Visoms šioms sistemoms gedimams nustatyti ir diagnozuoti dažniausiai taikomi istorija grįstų duomenų modeliais AGAD metodai, nes jie yra tinkamiausi taikyti ten, kur teoriniai sistemos elgsenos modeliai yra nepakankami sistemos elgsenai paaiškinti arba juos sunku sukurti. Dažniausiai dėl savo paprastumo taikoma istorija grįsta juodosios dėžės (angl. *black box*) technika, kita pagal dažnumą – grįsta taisyklėmis (AGAD kokybinis metodas). Gedimo ir jo priežasties nustatymas yra du svarbūs AGAD proceso žingsniai. Visgi dauguma tyrimų buvo susiję su gedimų nustatymu ir diagnozavimu, bet ne sistemų veikimo problemų ar galimybių valdymui išplėsti. Taip pat akcentuojama, kad pastatai suvartoja per daug energijos, nes nėra numatyta pažangių valdymo priemonių ir nesivadovaujama gerąja pastatų eksploatavimo praktika.

Prekybos pastatų mikroklimatui ir oro kokybei užtikrinti naudojamos vėdinimo sistemos (1 pav.). Sugedus KOT oro sklendei, siūlomas Zhao et al. (2019) aktyvus gedimų aptikimo ir diagnozavimo (FDD) metodas prastos diagnostinės informacijos problemai išspręsti. Dinaminiai KOT sklendės atsakai, galimi pastebėti iš matavimų ir valdymo signalų, yra naudingi norint pašalinti gedimus, kurie kelia sunkumų įprastiems pasyviems FDD metodams.

Siūlomą metodą, vertinamą atliekant modeliavimą, galima įgyvendinti tiek pastatų valdymo sistemose, tiek KOT sklendžių valdikliuose.

S. Wang ir J. Wang (1999) ištyrė įvairias jutiklių gedimų aptikimo ir diagnozavimo (JGAD) metodikas, sukūrė du tipinius jutiklio gedimų diagnozavimo metodus: vienas pagrįstas modeliu, o kitas – duomenimis. Shiqiang et al. (2019) pagal savarankiškai organizuojančią ir plokščią jutiklių tinklo struktūrą pasiūlė naują decentralizuotą jutiklių gedimų nustatymo ir savaiminio taisymo metodą. Taikant siūlomą metodą galima išspręsti aktualias pastatų inžinerines problemas, kiekvienas išmanusis jutiklis traktuojamas kaip individualus, turintis savo naudingumą, vietinį sujungimą tarp gretimų mazgų.

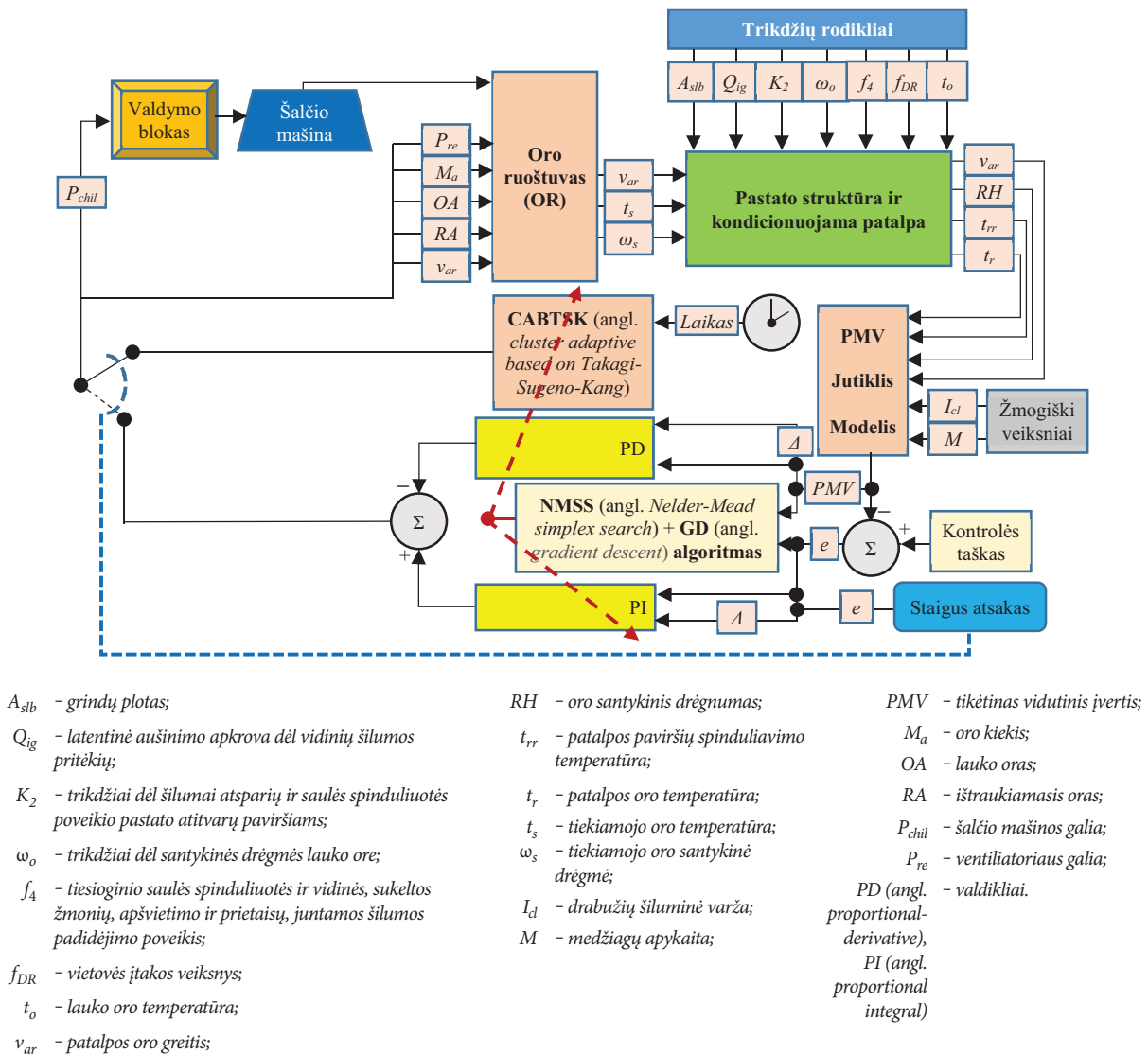
Automatizuotos energinio naudingumo diagnozavimo sistemos yra retai naudojamos praktikoje, dėl to suvartojama daug energijos ir neužtikrinamas tinkamas šiluminis komfortas patalpose (Taal et al., 2018). Turner et al. (2017) tyrime pristato duomenimis pagrįstą pastato ŠVOK sistemų automatinio gedimų aptikimo metodą ir rekursyvų mažiausiųjų kvadratų modelio metodą.

Chakraborty ir Elzarka (2019) pateikė modelį, pagrįstą „XGBoost“ algoritmu su dinaminio slenksčiu, skirtą automatiniam gedimų aptikimui realiuoju laiku. „XGBoost“ naudojamas numatomiems energijos suvartojimo modeliams generuoti, naudojant duomenų rinkinius be klaidų. Vėliau, norint aptikti gedimus, „XGBoost“ modelio sugeneruotoms prognozėms taikomas naujas dinaminio slenksčio metodas, naudojamas duomenų rinkinys, kurį sudaro ir gedimai, ir be klaidų esantys duomenys.

Modeliavimui taikydami VE-IES (angl. *virtual environment integrated environmental solutions software*) programą Al-Waked et al. (2017) atliko jautrumo analizę, apimančią daugybės ŠVOK sistemos gedimų ir nukrypimų nuo standartinių pastato eksploatavimo sąlygų. Analizė atskleidė, kas galėtų sutrukdyti pasiekti pastatui norimą energinio efektyvumo klasę.

Verbert et al. (2017) siūlo kelių modelių požiūrį į sistemos lygio gedimų diagnostiką ŠVOK sistemose, atsižvelgiant į skirtingų ŠVOK komponentų tarpusavio priklausomybes, bei gali lengvai prisitaikyti prie kintančių eksploatavimo sąlygų ir skirtingų pastatų konfigūracijų. Tyrime taikomas modeliavimas parodė siūlomo metodo efektyvumą: gedimai yra laiku ir teisingai diagnozuojami, jei jie lemia pastebimą sistemų elgesį.

Dar vienas būdas, tinkamas gedimams aptikti sistemų įrangoje, yra gedimo pobūdžio ir poveikio analizė atliekant pastatų techninę priežiūrą (Yang et al., 2018). Homod et al. (2020) siūlomas metodas energijos taupymo potencialui vertinti – integruota valdymo sistema (2 pav.). Tikėtino vidutinio įverčio (angl. *predicted mean vote, PMV*) rodiklis labiau atspindi komforto lygį nei temperatūra, nes atsižvelgia į šešis kintamuosius, susijusius su šiluminiu komfortu. Pasiūlytos integruoto valdymo struktūros rezultatai rodo, kad ji pagerina bendrą išvesties tikslumą ir gerokai sutrumpina reakcijos laiką. 2 paveiksle pateikiama siūlomų ŠVOK sistemų integruoto valdymo struktūra.



2 paveikslas. ŠVOK sistemų integruoto valdymo struktūra (Homod et al., 2020)
 Figure 2. The structure of integrated control of HVAC systems (Homod et al., 2020)

2 paveiksle pasiūlyto valdiklio pasiekta didesnis našumas realizuojamas, kai ŠVOK sistema yra numatyta užtikrinti rekomenduojamą šiluminį komfortą patalpoje, taigi vykdoma valdant įvesties duomenis OR. Nuolatinė ŠVOK sistemų stebėseną, ypač paleidžiant, klaidų, gedimų pašalinimas, siekiant pagerinti valdymo efektyvumą, yra svarbi ŠVOK sistemų problema. Homod et al. (2020) įvertino, kad jų siūlomas valdiklis sumažino CO₂ išmetimų kiekį, sutaupant daugiau nei 37 % energijos, nei taikant sistemoms valdyti įjungimo/išjungimo būdą.

Išvados

Atlikta komercinių, kaip vienu iš imliausių energijai pastatų, MKS būdingųjų gedimų apžvalga galėtų būti naudinga koncentruojantis į būdinguosius gedimus, numatant juos iš anksto, kuriant naujas ir modernizuojant esamas įran-

gos gedimo nustatymo ir diagnozavimo sistemas. ŠVOK sistemų projektavimo etape žinomi būdingieji gedimai gali būti sistemų projektavimo, įrengimo, eksploataavimo ir priežiūros gairėmis.

Atlikta apžvalga atskleidė, kad dažniausiai aptinkami KOT sistemų OR, aušintuvų ir aušinimo bokštų, oro kondicionierių bei šilumos siurblių gedimai. Dauguma gedimų yra susiję su neautomatizuotu ŠVOK sistemų valdymu ir veikimu nepriklausomai nuo pastatų užimtumo bei MKS oro paskirstymo posistemyje. Nustatant gedimus didelę įtaką turi jutiklių naudojimas inžineriniams procesams, jų parametrus MKS reguliuoti.

Sistemų gedimams nustatyti ir diagnozuoti dažniausiai taikomi istorija grįstų duomenų modeliais AGAD metodai dėl jų paprastumo bei galimybės kurti nebrangius algoritmus, leidžiančius sumažinti jutiklių skaičių, būtiną gedimams aptikti arba sistemos veikimo pablogėjimą.

Be AGAD siūlomų metodų, MKS gedimams nustatyti siūloma vykdyti gedimo pobūdžio ir poveikio analizę, atliekant pastatų techninę priežiūrą. Valdant ŠVOK sistemas taip pat siūloma taikyti integruoto valdymo struktūrą, kuri sistemą valdo atsižvelgiant į šiluminį komfortą lemiančius kintamuosius, o ne vien į temperatūrą.

Gedimų ŠVOK sistemose aptikimas ir jų nustatymo bei diagnozavimo būdai gali 3–11 % sumažinti dėl gedimų prarandamos energijos komercinės paskirties pastatuose. Nuolatinė šių sistemų stebėseną, ypač paleidimo metu, klaidų ir gedimų pašalinimas integruotu valdymo būdu, siūlomu apžvalgoje, gali padėti sutaupyti iki 40 % elektros.

Literatūra

- Al-Waked, R., Shakir Nasif, M., Groenhout, N., & Partridge, L. (2017). Energy performance and CO₂ emissions of HVAC Systems in commercial buildings. *Buildings*, 7(4), 84. <https://doi.org/10.3390/buildings7040084>
- Basarkar, M., Pang, X., Wang, L., Haves, P., & Hong, T. (2011, November 14–16). *Modeling and simulation of HVAC results in EnergyPlus*. Paper presented at the 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney.
- Chakraborty, D., & Elzarka, H. (2019). Early detection of faults in HVAC systems using an XGBoost model with a dynamic threshold. *Energy & Buildings*, 185, 326–344. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.032>
- Cheung, H., Braun, J. E., Technical, N., Stephen, M., Cheung, H., & Braun, J. E. (2015). *Development of fault models for hybrid fault detection and diagnostics algorithm: October 1, 2014 -- May 5, 2015* (Technical report). United States. <https://doi.org/10.2172/1235409>
- Cotts, D. G., Roper, K. O., & Payant, R. P. (2009). *The facility management handbook* (3rd ed.). AMACOM.
- Homod, R. Z., Gaeid, K. S., Dawood, S. M., Hatami, A., & Sahari, K. S. (2020). Evaluation of energy-saving potential for optimal time response of HVAC control system in smart buildings. *Applied Energy*, 271, 115255. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115255>
- Katipamula, S., & Brambley, M. R. (2005). Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems—a review, Part I. *HVAC&R RESEARCH*, 11(1), 3–25. <https://doi.org/10.1080/10789669.2005.10391123>
- Kim, W., & Katipamula, S. (2018). A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(1), 3–21. <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1318008>
- Papadopoulos, S., Kontokosta, C. E., Vlachokostas, A., & Azar, E. (2019). Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates. *Building and Environment*, 155, 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.062>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Building*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Piette, M. A., Kinney, S. K., & Haves, P. (2001). Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations. *Energy and Buildings*, 33(8), 783–791. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00068-8)
- Roth, K. W., Llana, P., & Feng, M. (2004). *The energy impact of faults in U.S. commercial buildings*. Paper presented at the International Refrigeration and Air Conditioning Conference.
- Shahnazari, H., Mhaskar, P., House, J. M., & Salsbury, T. I. (2019). Modeling and fault diagnosis design for HVAC systems using recurrent neural networks. *Computers & Chemical Engineering*, 126, 189–203. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.04.011>
- Taal, A., Itard, L., & Zeiler, W. (2018). A reference architecture for the integration of automated energy performance fault diagnosis into HVAC systems. *Energy & Buildings*, 179, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.031>
- Tian, Z., Si, B., Shi, X., & Fang, Z. (2019). An application of Bayesian Network approach for selecting energy efficient HVAC systems. *Journal of Building Engineering*, 25, 100796. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100796>
- Turner, W. J. N., Staino, A., & Basu, B. (2017). Residential HVAC fault detection using a system identification approach. *Energy & Buildings*, 151, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.008>
- Verbert, K., Babu, R., & De Schutter, B. (2017). Combining knowledge and historical data for system-level fault diagnosis of HVAC systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 59, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.12.021>
- Visier, J. C., Li, X., Coralles, P., Irigoin, M., Le Vannier, I., Lovetri, J., Le Men, M., & Picard, P. (1997). Fault detection and diagnosis tool for schools heating systems (pp. 1–15). In *Clima 2000*. Brussels, Belgium.
- Wang, H., Chen, Y., Chan, C. W. H., Qin, J., & Wang, J. (2012). Online model-based fault detection and diagnosis strategy for VAV air handling units. *Energy & Buildings*, 55, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.016>
- Wang, S., & Wang, J. (1999). Law-based sensor fault diagnosis and validation for building air-conditioning systems. *HVAC&R Research*, 5(4), 353–380. <https://doi.org/10.1080/10789669.1999.10391243>
- Yang, C., Shen, W., Chen, Q., & Gunay, B. (2018). A practical solution for HVAC prognostics: Failure mode and effects analysis in building maintenance. *Journal of Building Engineering*, 15, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.10.013>
- Yoshida, Y. (2006). Development of air conditioning technologies to reduce CO₂ emissions in the commercial sector. *Carbon Balance and Management*, 1–12. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-1-12>
- Zhang, R., & Hong, T. (2017). Modeling of HVAC operational faults in building performance simulation. *Applied Energy*, 202, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.153>
- Zhao, Y., Li, T., Fan, C., Lu, J., Zhang, X., Zhang, C., & Chen, S. (2019). A proactive fault detection and diagnosis method for variable-air-volume terminals in building air conditioning systems. *Energy & Buildings*, 183, 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.021>

ANALYSIS OF EQUIPMENT FAULTS IN INDOOR CLIMATE SYSTEMS AND THEIR DETECTION AND DIAGNOSIS MEASURES

V. Misevičiūtė

Abstract

Indoor climate systems required to provide indoor climate and ensure indoor air quality, failures affect the amount of energy consumed in a building, although insufficient attention is paid to their operation. The energy consumption can be reduced due to ensured proper operation of indoor climate systems avoiding equipment faults. The article reviews scientific articles, those represent typical heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems equipment faults of the most energy intensive office and commercial buildings. Measures of detecting and diagnosis equipment failures as well are identified. A generalized overview of the study area shows the typical faults of the indoor climate system are related to the control of the devices, sensors, deterioration of equipment performance. The most commonly used methods for detecting and diagnosing faults are automated fault detection and diagnosis (AFDD) methods. Possible solutions for troubleshooting HVAC systems are presented.

Keywords: automated fault detection and diagnosis, engineering systems, equipment faults, sensors, indoor climate systems.