

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA
MARIBOR

**VGRADNJA CENTRALNO NADZORNEGA
SISTEMA ZA IZBOLJŠANJE UČINKOVITOSTI
KLIMATA**

Kandidat: Alen Vogrinec

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor predavatelj: mag. Jože Ravničan, univ. dipl. inž. str.

Mentor v podjetju: Damijan Žunko, univ. dipl. inž. str.

Lektor: Tadeja Šef, univ. dipl. slov.

Maribor, 2026

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Alen Vogrinec sem avtor diplomskega dela z naslovom Vgradnja centralno nadzornega sistema za izboljšanje učinkovitosti klimata, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Jožeta Ravničana.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, februar 2026

Podpis študenta:

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju g. Jožetu Ravničanu, ki mi je s strokovnim znanjem, potrpežljivostjo in jasnimi usmeritvami omogočil, da sem diplomsko delo izpeljal kakovostno in v skladu z zastavljenimi cilji. Njegova podpora mi je bila v veliko pomoč pri razumevanju kompleksnosti področja in pri oblikovanju tehničnih rešitev.

Zahvaljujem se tudi vsem sodelavcem in strokovnjakom, ki so mi omogočili dostop do podatkov, laboratorijske opreme ter mi pomagali pri izvedbi raziskovalnega dela. Brez njihovega sodelovanja bi bila izvedba dela bistveno težja.

Posebna zahvala gre moji družini in prijateljem, ki so me skozi celoten študij spodbujali, razumeli mojo odsotnost in mi stali ob strani v trenutkih dvoma. Njihova podpora mi je dala motivacijo, da sem vztrajal do konca.

POVZETEK

Diplomsko delo obravnava možnosti izboljšanja izkoristka centralnega klimatskega sistema z uporabo centralnega nadzornega sistema (CNS). V uvodu je predstavljeno področje klimatizacije večjih objektov ter izzivi energetske učinkovitosti, zanesljivosti in prilagodljivosti obratovanja. Opredeljen je problem neučinkovitega delovanja obstoječih sistemov, ki pogosto ne izkoriščajo potenciala sodobne avtomatizacije in podatkovne analitike. Namen dela je razviti rešitve za optimizacijo delovanja centralne klime z integracijo CNS, s cilji zmanjšanja porabe energije, izboljšanja udobja in povečanja zanesljivosti. Osnovna predpostavka dela je, da pravilno konfiguriran CNS omogoča merljive prihranke in boljše obratovalne rezultate.

Raziskovalni pristop združuje kvantitativne metode, kot so merjenje porabe energije in odzivnosti sistema ter kvalitativne metode, kot so študije primerov in analiza izzivov pri implementaciji CNS. Tehnični del diplomskega dela podrobno opisuje delovanje centralne klime, termodinamične procese, hidravlični razvod in regulacijo končnih enot. Predstavljene so ključne komponente, kot so hladilne naprave, obtočne črpalke, fan-coil enote, senzorika in CNS ter njihova vloga pri učinkovitem prenosu in regulaciji energije. Posebna pozornost je namenjena izzivom obstoječih rešitev, kot so slaba integracija naprav, pomanjkljiva senzorika, hidravlično neravnovesje in neizkoriščenost podatkov.

Delo obravnava tudi energetska učinkovitost in razrede ter opozarja na omejitve standardiziranih kazalnikov in potrebo po celostni oceni sistema. Predstavljene so funkcionalnosti CNS ter njegove prednosti pri avtomatizaciji, personalizaciji udobja, analitiki podatkov in *benchmarkingu*. V praktičnem delu so analizirani vplivi CNS na zanesljivost klimatskih naprav, z uporabo statističnih in strojno-učnih modelov ter primerjalne analize pred in po vgradnji CNS.

Zaključno poglavje obravnava ekonomiko in trajnostne vidike uvedbe CNS, vključno s stroškovno analizo, oceno okoljskega vpliva optimizirane klimatizacije in analizo življenjskega cikla opreme. Predstavljen je tudi regulativni okvir, ki vpliva na načrtovanje in izvedbo takšnih sistemov. Sklep potrjuje hipoteze, izpostavi praktične implikacije rezultatov in poda predloge za nadaljnje raziskave.

Ključne besede: *optimizacija, sistem CNS, klimatske naprave, energetska učinkovitost, kakovost zraka*

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF CENTRAL MONITORING AND CONTROL SYSTEM TO IMPROVE AIR-CONDITIONING SYSTEM EFFICIENCY

The diploma thesis examines ways to improve the performance efficiency of a central air-conditioning system through the implementation of a central monitoring and control system (CNS). The introduction outlines the field of air-conditioning for large buildings and the challenges of energy efficiency, reliability, and operational flexibility. The problem of inefficient operation of existing systems is defined, as these systems often fail to exploit the potential of modern automation and data analytics. The aim of the thesis is to develop solutions for optimizing the operation of central air conditioner by integrating a CNS, with the goals of reducing energy consumption, improving occupant comfort, and increasing reliability. The core assumption is that a properly configured CNS enables measurable savings and improved operational performance.

The research approach combines quantitative methods—such as measuring energy consumption and system responsiveness—with qualitative methods, including case studies and an analysis of challenges in CNS implementation. The technical section provides a detailed description of the functioning of central air conditioning, thermodynamic processes, hydraulic manifold, and control of terminal units. Key components are presented—such as chillers, circulation pumps, fan-coil units, sensors, and the CNS—and their role in efficient energy transfer and control. Particular attention is given to the shortcomings of existing solutions, including poor device integration, inadequate sensor coverage, hydraulic imbalance, and underutilization of available data.

The thesis also addresses energy efficiency and energy classes, highlighting the limitations of standardized indicators and the need for a holistic system-level assessment. CNS functionalities are presented, together with its advantages in automation, comfort personalization, data analytics, and benchmarking. In the practical part, the impacts of the CNS on the reliability of air conditioners are analyzed using statistical and machine-learning models, as well as comparative analysis before and after CNS installation.

The concluding chapter discusses the economic and sustainability aspects of CNS adoption, including cost analysis, assessment of the environmental impact of optimized air-conditioning, and life-cycle assessment (LCA) of the equipment. The regulatory framework affecting the design and implementation of such systems is also presented. The conclusion confirms the hypotheses, highlights the practical implications of the findings, and provides recommendations for further research.

Keywords: *optimization, CNS system, air conditioners, energy efficiency, air quality*

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	9
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	9
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	9
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE.....	10
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	10
2	TEHNIČNE OSNOVE KLIMATSKIH SISTEMOV IN IZHODIŠČA ZA OPTIMIZACIJO	12
2.1	OSNOVNI PRINCIP DELOVANJA.....	12
2.2	KLJUČNE KOMPONENTE KLIMATSKIH NAPRAV.....	15
2.3	IZZIVI PRI OBSTOJEČIH REŠITVAH.....	25
2.4	ENERGETSKA UČINKOVITOST IN RAZREDI.....	26
3	CENTRALNI NADZORNI SISTEM	29
3.1	OPREDELITEV IN FUNKCIONALNOST CNS.....	29
3.2	PREDNOSTI UPORABE CNS V KLIMATIZACIJI	30
3.3	PRIMERI OBSTOJEČIH REŠITEV	33
3.4	TEHNOLOŠKI RAZVOJ CNS SISTEMOV	34
3.5	INTEGRACIJA CNS S KLIMATIZACIJSKIMI NAPRAVAMI	36
4	IZBOLJŠAVE KLIMATSKIH NAPRAV Z VGRADNJO CNS.....	39
4.1	OPTIMIZACIJA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI	39
4.2	VPLIV NA ZANESLJIVOST IN VZDRŽLJIVOST SISTEMA	41
4.3	AVTOMATIZACIJA PROCESOV PRILAGAJANJA TEMPERATURE.....	43
4.4	PERSONALIZACIJA UDOBJA IN UPRAVLJANJE PROFILOV UPORABNIKOV	45
4.5	ANALITIKA PODATKOV, POROČANJE IN BENCHMARKING	47
5	ANALIZA VPLIVOV CNS NA ZANESLJIVOST KLIMATSKIH NAPRAV	51
5.1	MERILA ZA OCENJEVANJE ZANESLJIVOSTI	51
5.2	STATISTIČNI MODELI ZA NAPOVEDOVANJE IZPADOV	53

5.3	PRIMERJALNA ANALIZA PRED IN PO VGRADNJI CNS	55
5.4	ŠTUDIJE PRIMEROV	58
6	EKONOMIKA IN TRAJNOSTNI VIDIKI	60
6.1	STROŠKOVNA ANALIZA VGRADNJE CNS	60
6.2	OKOLJSKI VPLIV OPTIMIZIRANE KLIMATIZACIJE	63
6.3	ANALIZA ŽIVLJENJSKEGA CIKLA OPREME	64
6.4	REGULATIVNI OKVIR IN SKLADNOST S STANDARDI	66
6.5	MOŽNOSTI NADALJNJEGA RAZVOJA.....	69
7	ANALIZA HIPOTEZ IN PREDLOGI ZA NADALJNJE RAZISKAVE.....	71
7.1	ANALIZA HIPOTEZ.....	71
7.2	PREDLOGI ZA NADALJNJE RAZISKAVE.....	72
8	SKLEP	73
9	VIRI IN LITERATURA	75

KAZALO TABEL

TABELA 1: PRIMERJALNA ANALIZA.....	57
TABELA 2: STROŠKOVNA ANALIZA	61

KAZALO SLIK

SLIKA 1: KLIMAT OPEKLINSKA INTENZIVNA NEGA.....	14
SLIKA 2: HLADILNI AGREGAT	16
SLIKA 3: HLADILNI AGREGAT	16
SLIKA 4: ELEKTRO OMARA HLADILNEGA AGREGATA	17
SLIKA 5: OBTOČNA ČRPALKA	18
SLIKA 6: CONE KLIMATA	19
SLIKA 7: MERILEC TLAKA	20
SLIKA 8: SOBNI TERMOSTAT.....	20
SLIKA 9: SENZORJI ZA TEMPERATURO, VLAGO IN POŽARNA ZAŠČITA	21

SLIKA 10: SHEMA KLIMATA NA CNS-U	22
SLIKA 11: HLADILNI STOLP	23
SLIKA 12: FILTER	23
SLIKA 13: JAVLJALEC POŽARA	24
SLIKA 14: ALARMI NA CNS-U	31
SLIKA 15: SHEMA CON NA CNS-U	41
SLIKA 16: SHEMA CON NA CNS-U	41
SLIKA 17: SHEMA PRILAGAJANJA PARAMETROV	44

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Področje klimatskih sistemov z vidika energetske učinkovitosti in notranjega udobja zavzema vse pomembnejšo vlogo v sodobnih gradbenih inštalacijah. Tradicionalne klimatske naprave delujejo po vnaprej določenih programih brez prilagajanja realnim potrebam prostora, kar vodi v neizkoriščene rezerve zmogljivosti in visoko porabo električne energije. Ta nefleksibilnost povzroča dodatne stroške tako investitorjem kot uporabnikom, hkrati pa negativno vpliva na okolje zaradi povečanih emisij toplogrednih plinov.

(Pintarič, 2017)

Obstoječi sistemi upravljanja klimatskih inštalacij pogosto temeljijo na povprečnih senzorjih in preprostem termostatskem upravljanju, kar ne omogoča celovite integracije podatkov o zunanji temperaturi, vlagi, prisotnosti ljudi ali kakovosti zraka. Zaradi te omejene vloge se ključne komponente, kot so kompresorji, ventilatorji in filtri, obrabljajo hitreje, kar skrajša njihovo življenjsko dobo in poveča stroške vzdrževanja. Prav tako je kakovost zraka v zaprtih prostorih neenotna, saj običajni sistemi ne reagirajo dinamično na spreminjajoče se parametre zraka.

(Lechner, 2014)

Cilj opredelitve tega problema je prepoznati potrebo po uvajanju centralnega nadzornega sistema (CNS), ki bi združeval merilne podatke iz različnih virov in prek inteligentnih algoritmov optimiziral delovanje klimatske naprave. S tem bi bilo mogoče zmanjšati energetsko porabo, podaljšati življenjsko dobo komponent in izboljšati parametre notranje klime.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Glavni namen diplomskega dela je ovrednotiti, kako vgradnja sistema CNS vpliva na energetsko učinkovitost, zanesljivost in vzdržljivost klimatskih naprav in kakovost zraka v zaprtih prostorih. Pri analizi se bo poudarilo merjenje zmanjšanja porabe energije kot tudi ocenjena stopnja obrabe komponent skozi daljše obdobje, s čimer se neposredno preverjajo postavljene raziskovalne predpostavke.

Raziskava si prizadeva dokazati, da lahko vgradnja sistema CNS zmanjša energetsko porabo vsaj za 20 %, kar izhaja iz optimizacije delovanja posameznih komponent glede na dejanske

potrebe prostora. Nadalje se predvideva, da bo pametno upravljanje znižalo obrabo kompresorja, ventilatorjev in filtre ter s tem podaljšalo njihovo življenjsko dobo. Poleg tega se pričakuje, da bo avtomatiziran nadzor filtracije in prezračevanja privedel do boljše kakovosti zraka, kakor tudi, da bo zgodnje zaznavanje odstopanj v delovanju omogočalo preventivno vzdrževanje in s tem povečalo zanesljivost sistema.

Osnovne trditve, ki sem jih postavil, so:

H1 – Vgradnja sistema CNS v klimatsko napravo bo zmanjšala porabo energije za vsaj 20 % zaradi optimizacije delovanja komponent.

H2 – Pametno upravljanje prek sistema CNS bo zmanjšalo obrabo ključnih komponent klimatskega sistema in podaljšalo njihovo življenjsko dobo.

H3 – Implementacija sistema CNS v klimatizacijo bo izboljšala kakovost zraka v zaprtih prostorih s samodejnim nadzorom filtracije.

H4 – Integracija sistema CNS bo povečala zanesljivost klimatskih naprav, saj bo omogočala zgodnje zaznavanje okvar in preventivno vzdrževanje.

1.3 Predpostavke in omejitve

Pri izvajanju eksperimentalnih meritev diplomsko delo predpostavlja, da so klimatske naprave sorodnih zmogljivosti, in iz iste proizvodne linije, kar zagotavlja primerljivost rezultatov. Prav tako se kot predpostavka šteje homogena kalibracija senzorjev za temperaturo, vlago in kakovost zraka, da meritve ne bodo obremenjene s sistemskimi napakami.

Med omejitvami raziskave je število preizkušenih enot, ki ga zaradi logističnih in časovnih zahtev ni mogoče obsežno razširiti, kar lahko vpliva na splošljivost ugotovitev. Dolgoročno spremljanje obrabe komponent je omejeno na nekaj mesecev, medtem ko bi popolna ocena življenjske dobe v realnih pogojih trajala več let.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V raziskavi uporabljam kombinacijo kvantitativnega in kvalitativnega pristopa. Kvantitativna analiza omogoča merjenje učinkovitosti sistema CNS z uporabo objektivnih parametrov, kot so poraba energije, stabilnost delovanja in odzivnost na spremembe. Kvalitativni pristop dopolnjuje merjenja z analizo praktičnih vidikov implementacije skozi študije primerov in tehnične evalvacije izvedbe.

Eksperimentalna analiza delovanja CNS v klimatizaciji bo izvedena z meritvami realnih obratovalnih parametrov pred in po uvedbi CNS ter z vpeljavo nadzorovanih sprememb delovnih pogojev za oceno odzivnosti in stabilnosti. Primerjalna študija pred in po integraciji CNS bo temeljila na neposredni primerjavi izmerjenih porab, časovnih profilov obremenitev in kazalnikov termičnega udobja za isti objekt oziroma kontrolne enote. Pregled literature bo zajemal strokovne članke, standarde in tehnična poročila o zanesljivosti, krmilnih strategijah in energetski učinkovitosti sistemov CNS za utemeljitev izbranih meril in interpretacijo rezultatov.

Zbiranje podatkov bo potekalo z uporabo merilnikov energije, senzorjev temperature in pretoka, zapisovalnikov dogodkov CNS in dnevnikov obratovanja. Dodatne informacije o uporabniški izkušnji, vzdrževanju in praktičnih težavah pri implementaciji bodo pridobljene z analizo študij primerov in razgovori z upravljavci objektov.

Kvantitativni podatki bodo obdelani s statističnimi metodami za oceno sprememb porabe in meritev stabilnosti ter z analizo časovnih vrst za oceno odzivnosti na motnje in vremenske vplive. Kvalitativni podatki iz študij primerov bodo kodirani in sintetizirani za identifikacijo ponavljajočih se vzorcev težav, dobrih praks in pogojev uspešne integracije CNS.

Rezultati bodo validirani s sintezo eksperimentalnih meritev in ujemanjem s podatki iz literature ter preverjanjem občutljivosti analiz na ključne predpostavke. Glavne omejitve metode so odvisnost od kakovosti vhodnih meritev, možnosti variabilnosti med objekti in omejena prenosljivost nekaterih priporočil na bistveno različne sisteme ali klimatske razmere.

2 TEHNIČNE OSNOVE KLIMATSKIH SISTEMOV IN IZHODIŠČA ZA OPTIMIZACIJO

2.1 *Osnovni princip delovanja*

Centralni klimatski sistem temelji na ločenem upravljanju proizvodnje hladilne energije, njene distribucije in končne regulacije v posameznih prostorih. V osnovi so prisotni trije glavni fizični sklopi: enota za proizvodnjo hladila (npr. hladilnik ali hladilna naprava z zunanjim izmenjevalcem), hidravlična distribucija hladne vode (ceveni vod, obtočna črpalka, regulacijske armature) in sistem končnih naprav (zračne obdelovalne enote, ventilatorski konvektorji ali končne enote z ventilnimi pogoni). Energija se proizvaja centralno, prenaša po hidravličnem omrežju in se prek toplotnih izmenjevalcev ali zračnih enot izmenja z notranjim zrakom, kar omogoča enotno upravljanje in optimizacijo delovanja za celoten objekt.

Primarni fizikalni proces v centralnem klimatskem sistemu je prenos toplote. Hladilna naprava odvzame toploto iz hladilne vode in jo izloči v okolje prek kondenzatorja ali hladilnega stolpa. Hladna voda, ohlajena na projektno temperaturo, kroži po razvodnem sistemu do zračno ali vodno hlajenih končnih enot, kjer poteka toplotna izmenjava med vodo in notranjim zrakom. Hitrost toplotnega prenosa je funkcija temperaturne razlike, pretoka in toplotne odpornosti izmenjevalnih površin. Hidravlični tok mora biti reguliran tako, da so zagotovljeni zahtevani pretoki pri minimalni porabi energije črpalke, kar pomeni pravilno dimenzioniranje cevi, črpalk in regulacijskih elementov ter uporabo variabilnih hidro pogonov tam, kjer je to smiselno.

(Lechner, 2014)

Hladilna naprava zagotavlja potrebni temperaturni dvig in tok hladila z nadzorom kompresorjev, ekspanzijskih ventilov in sistema za odvajanje toplote. Distribucijski sklop vključuje črpalke z morebitno frekvenčno regulacijo, razdelilne kolektorje, zaporne elemente in merilne točke za pritisk in pretok. Končne enote so opremljene s krmilnimi ventilčki, pogoni in senzoriko za temperaturo, vlago in zasedenost ter omogočajo lokalno regulacijo glede na trenutne potrebe. CNS povezuje vse te komponente v celoto; zajema merjenje, vizualizacijo, nadzorne logike in arhiviranje podatkov. Vzajemno delovanje komponent določa končni izkoristek sistema in možnosti optimizacije.

Osnovne krmilne zanke v centralnem sistemu vključujejo regulacijo temperature vode na izmenjevalcu, regulacijo pretoka glede na toplotno obremenitev ter lokalno regulacijo notranje temperature oziroma hitrosti ventilatorja. Klasična izvedba uporablja PID regulatorje za ohranjanje zelenih vrednosti, pri čemer CNS skrbi za nastavitve parametrov, menjavo režimov delovanja in varnostne mehanizme. Naprednejše pristope vključujejo kaskadno krmiljenje (npr. temperaturni *setpoint* – zunanji nivo, znotraj tega pretok kot sekundarna zanka), adaptivne regulatorje in modelno-prediktivne krmilnike, ki optimizirajo obratovanje čez časovni horizont ob upoštevanju omejitev sistema in napovedi obremenitev. Pri centralnih sistemih je ključna tudi koordinacija proizvodnje in porabe, kar zahteva optimizacijske logike za razporeditev kompresorjev, upravljanje hladilnih stolpov in prilagoditev obratovalnih režimov glede na tarifne signale ali omejitve električnega omrežja.

(Lechner, 2014)

Natančno merjenje temperature na zajemu in povratku, pretoka, tlakov, ravni hladilnega sredstva in električne moči omogoča kvantitativno oceno učinkovitosti in diagnostiko. CNS zbira te podatke, izvaja obdelavo in prikazuje ključne kazalnike stanja sistema, kot so COP (koeficient učinkovitosti), temperatura dovoda/povratka, delovni čas komponent in alarmi. Kakovost senzorike neposredno vpliva na zanesljivost regulacijskih odločitev – zato sta pravilno umeščanje tipal, kalibracija in redundanca ključna za stabilno delovanje in pravilno oceno prihrankov.

Izkoristek centralnega sistema zmanjšujejo hidravlične izgube, neoptimalne temperaturne razlike dovod–povratek, delovanje pri delnih obremenitvah brez ustrezne prilagoditve brzine črpalk ali kompresorjev, neustrezna regulacija ventilov in nezadostna vzdrževanja. Tudi toplotne izgube v razvodu, napačna izravnava pretokov med vejami in slaba izolacija cevi vplivajo na končni izkoristek. Nepravilen izbor temperaturnih režimov za različne obratovalne razmere (npr. previsoka hladilna temperatura pri nizki zunanosti) vodi do višje porabe energije in manjšega COP.

Centralni nadzorni sistem omogoča centralizirano nastavljanje temperaturnih *setpointov*, uvajanje dinamičnih shem urnikov glede na zasedenost in vremenske pogoje in izvajanje optimizacijskih algoritmov, ki skrajšajo čas delovanja komponent v manj učinkovitem režimu. CNS omogoča tudi izvajanje strategij zmanjševanja konične moči, upravljanje stopnje kompresorjev oziroma paralelnih hladilnih agregatov glede na obremenitev in optimizacijo delovanja hladilnih stolpov skozi nadzor ventilatorjev in regulacijo protitoka. Poleg tega CNS

omogoča zgodnje odkrivanje napak in trendno analizo porabe, kar zmanjšuje izgube zaradi degradacije komponent ali nepravilnih nastavitev.

Napredne implementacije uporabljajo prediktivne modele obremenitev na osnovi vremenskih napovedi in urnikov zasedenosti, s čimer CNS prilagaja proizvodne parametre in izkorišča časovne tarife. Adaptivni sistemi samodejno prilagajajo parametre regulatorjev glede na spremenljive lastnosti procesa, medtem ko sistemi za odkrivanje napak in diagnostične logike identificirajo odstopanja od pričakovanih delovnih točk. Implementacija modulov za energetska upravljanje omogoča spremljanje izkoristka in avtomatsko sprožitev korektivnih ukrepov, na primer zmanjšanje pretoka v conah brez prisotnosti ali preusmeritev proizvodnje ob omejitvah omrežja.

Za doseganje izboljšav izkoristka je potrebna načrtna zasnova CNS, pravilen izbor in umestitev merilne tehnike, ustrezna konfiguracija krmilnih logik ter sistematično testiranje in optimizacija po zagonu. Le usklajeno delovanje proizvodnega, hidravličnega in končnega nivoja skupaj s kakovostno senzoriko in premišljeno krmilno strategijo zagotavlja, da centralni sistem deluje učinkovito skozi različne obratovalne razmere. (Daly, 2011)



Slika 1: Klimat opeklinska intenzivna nega

(Vir: lasten vir 2025)

2.2 Ključne komponente klimatskih naprav

Osnovno razumevanje delovanja centralnega klimatskega sistema izhaja iz poznavanja posameznih komponent in njihove medsebojne povezanosti. Vsaka komponenta opravlja jasno določeno funkcijo pri proizvodnji, prenosu ali razdelitvi hladilne energije ter pri zagotavljanju kakovosti notranjega zraka in termičnega udobja. Spodaj so opisane ključne sestavine sistema, vključno z njihovimi glavnimi nalogami, tipičnimi delovnimi značilnostmi in vplivom na skupni izkoristek sistema.

Izmenjevalna enota hladilne naprave

Jedro proizvodnega dela centralne klime je hladilna naprava oziroma hladilnik, katerega naloga je odvzem toplote iz hladilnega sredstva ali hladilne vode ter njeno odvajanje v okolje. Hladilna naprava lahko temelji na kompresijskem ciklu, absorpcijskem ciklu ali na drugih tehnologijah, kot so toplotne črpalke. Ključne podkomponente vključujejo kompresor(je), izmenjevalnik toplote na uparjalniku in kondenzatorju, ekspanzijski ventil in krogotok hladilnega sredstva. Kompresor ustvarja tlačne in temperaturne razlike, potrebne za prenos toplote; uparjalnik odvaja toploto iz vode oziroma zraka, kondenzator pa toploto odda v okolje. Učinkovitost hladilne enote določa koeficient COP, ki je neposredno odvisen od temperaturnih nivojev dovoda in povratka, pravilne dimenzije in stanja komponent ter obratovanja pri delnih obremenitvah. V praksi je možnost faznega vklopa več kompresorjev, uporaba inverter tehnologije ali optimizacija številčnosti in velikosti enot ključna za zmanjšanje porabe pri spremenljivih obremenitvah.



Slika 2: Hladilni agregat

(Vir: lasten vir 2025)



Slika 3: Hladilni agregat

(Vir: lasten vir 2025)



Slika 4: Elektro omara hladilnega agregata

(Vir: lasten vir 2025)

Hidravlični sistem in obtočne črpalke

Hidravlična razvodna mreža prenaša ohlajeno vodo od proizvodne enote do končnih elementov in nazaj. Glavne sestavine so cevi, kolektorji, ventili, merilne armature in obtočne črpalke. Obtočne črpalke zagotavljajo potreben pretok in tlačni padec; pogosto imajo frekvenčno krmiljenje, ki omogoča prilagajanje pretoka sorazmerno z dejanskimi potrebami in s tem pomembno znižuje porabo električne energije. Hidravlične izgube v ceveh, nedoravnoreženi pretoki med vejami in slaba izbira črpalk zmanjšajo učinkovitost sistema. Pravilen izbor dimenzije cevi, izolacija vodov in hidravlična izravnava posameznih vej so zato kritični za optimalen prenos energije.



Slika 5: Obtočna črpalka

(Vir: lasten vir 2025)

Distribucijski sistem in obtočne črpalke

Distribucijski kolektorji in razdelilniki omogočajo usmerjanje pretoka v različne cone ali enote znotraj objekta. V njih so nameščeni zaporni ventili, regulacijski ventili in merilne točke za pritisk in temperaturo. Kolektorji poenostavijo hidravlično izravnavo in omogočajo lažji servis in posamezno regulacijo con. Dobro zasnovan sistem kolektorjev omogoča minimalne sosednje motnje pri zapiranju ali odpiranju vej ter poenostavlja diagnostiko in optimizacijo pretokov.



Slika 6: Cone klimata

(Vir: lasten vir 2025)

Končne enote

Končne enote so tiste, ki neposredno izmenjujejo toploto z notranjim zrakom in tako zagotavljajo lokalno termično udobje. Ventilatorske enote uporabljajo vodni tok skozi izmenjevalnik in lokalni ventilator za razprševanje zraka; zračno obdelovalne enote (AHU) obdelujejo velike količine zunanjega in recirkuliranega zraka z dodajanjem filtracije, vlaženja in grelnih/hladilnih batov. Terminalne enote, kot so ventilne končne enote z aktuatorji, omogočajo natančno lokalno regulacijo glede na sobni termostat. Njihova pravilna umestitev, nastavitve in vzdrževanje so odločilni za zagotavljanje homogenih temperaturnih profilov in učinkovite rabe energije.

Regulacijski ventili, aktuatorji in sobni termostati

Regulacijski ventili nadzorujejo pretok hladilne vode v končnih enotah glede na zahtevo sob. Aktuatorji pretvarjajo električni ali nadzorni signal CNS v mehansko gibanje ventila; stopnja natančnosti in odzivnosti aktuatorjev vpliva na sposobnost sistema, da ohranja *setpointe*. Sobni termostati in lokalna senzorika merijo temperaturo, relativno vlago in v nekaterih primerih prisotnost oseb. Ti signali so vhodni podatki za CNS in določajo lokalne zahteve po hlajenju.

Slabo nastavljeni ventili in zakasnitve v krmiljenju lahko povzročijo oscilacije, prekomerno delovanje proizvodnih enot in zmanjšanje izkoristka.



Slika 7: Merilec tlaka

(Vir: lasten vir 2025)



Slika 8: Sobni termostat

(Vir: lasten vir 2025)

Senzorji in merilna oprema

Natančni senzorji za merjenje dovodne in povratne temperature, pretoka, tlaka, relativne vlage in kakovosti zraka (CO₂, VOC) so temelj za pravilno delovanje krmilnih strategij. Kakovost, kalibracija in umestitev senzorjev vplivajo na zanesljivost podatkov; napake pri merjenju lahko vodijo k napačnim kontrolnim odločitvam, kar zmanjšuje učinkovitost in pospešuje obrabo naprav. Redno preverjanje in redundanca pomembnih meritev zagotavljata zanesljivo diagnostiko in omogočata napredne analitične metode nadzora.



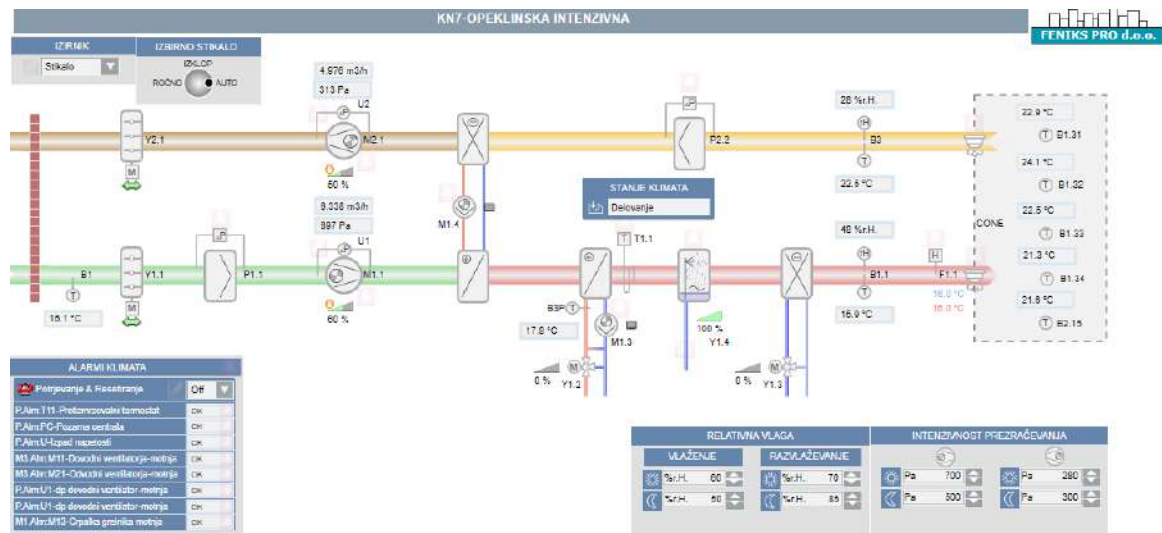
Slika 9: Senzorji za temperaturo, vlago in požarna zaščita

(Vir: lasten vir 2025)

Centralni nadzorni sistem in komunikacijski vmesniki

CNS povezuje proizvodne enote, hidravlični sistem, distribucijo in končne regulacije v enoten kontrolni sistem. Vključuje PLC-je ali BMS kontrolerje, vizualizacijske panele, zgodovinsko arhiviranje podatkov in uporabniške vmesnike za vzdrževanje in upravljanje. Komunikacijski

protokoli, kot so BACnet, Modbus ali Lon omogočajo združljivost komponent različnih proizvajalcev. CNS izvaja logike urnikov, optimizacijske in varčevalne algoritme, nadzor alarmov in diagnostiko. Njegova arhitektura in zmogljivost določata, kako učinkovito bo mogoče izvajati napredne strategije, kot sta prediktivno krmiljenje ali odziv na tarifne signale.



Slika 10: Shema klimata na CNS

(Vir: lasten vir 2025)

Energijski viri in pomožne enote

Če je sistem opremljen s hladilnimi stolpi, le-ti odvajajo odvečno toploto iz kondenzatorja v okolje; njihovo upravljanje (regulacija ventilatorjev, uporaba modulacije pretoka) bistveno vpliva na COP hladilne naprave. Sušilci, filtri in pripadajoči grelci ali povratni toplotni izmenjevalci prispevajo k obvladovanju notranje vlažnosti in izboljššanju kakovosti zraka, hkrati pa lahko predstavljajo dodaten vir porabe, če niso optimizirani.



Slika 11: Hladilni stolp

(Vir: lasten vir 2025)

Filtracija in sistem kakovosti zraka

Filtri, čistejše dovodne poti in sistemi za prezračevanje neposredno vplivajo na zdravje uporabnikov in na obratovalni režim končnih enot. Zamašeni filtri povečajo upor v zračnem toku, kar zahteva večjo moč ventilatorjev in lahko zmanjša učinkovitost izmenjevalnikov. Senzorji CO₂ in avtomatski prezračevalni načini omogočajo prilagoditev dovoda svežega zraka glede na zasedenost, kar uravnoteži energijsko učinkovitost in kakovost zraka.



Slika 12: Filter

(Vir: lasten vir 2025)

Pomožna oprema in varnostni elementi

Sistemi za odplinjevanje, ekspanzijske posode, varnostni ventili, filtrirne naprave in sistemi za odkrivanje puščanj in požarne izolacije so ključni za zanesljivo in varno delovanje. Pravilna zaščita pred zamrzovanjem, filtracija vode in korozijska zaščita so nujni za dolgotrajno in učinkovito delovanje sistema.



Slika 13: Javljalec požara

(Vir: lasten vir 2025)

Povezanost komponent in vpliv na izkoristek

Izkoristek centralnega klimatskega sistema je rezultat sinergije vseh komponent. Slabo usklajena ali slabo vzdrževana komponenta lahko zmanjša učinkovitost celotnega sistema ne glede na naprednost ostalih delov. Zato sta sistemska zasnova, izbira komponent glede na pričakovane obremenitvene profile in redno vzdrževanje osnovni pogoji za doseganje visoke energetske učinkovitosti in zanesljivosti.

Razumevanje vlog in medsebojne povezanosti posameznih komponent je predpogoj za načrtovanje učinkovitih krmilnih strategij in optimizacijo delovanja. Pri implementaciji CNS je treba celostno oceniti stanje komponent, kakovost senzorike in komunikacij, hidravlično ravnotežje ter možnosti prilagoditev obratovalnih režimov, saj lahko le tako dosežemo merljive izboljšave izkoristka in kakovosti notranjega okolja.

(Pintarič, 2017); (Nise, 2020); (Kuo, 1995)

2.3 Izzivi pri obstoječih rešitvah

Obstoječe centralne klimatske rešitve pogosto obljublajo izboljšano energetske učinkovitost in boljšo kakovost notranjega zraka z uporabo centralnega nadzora, vendar se ob praktični izvedbi izkaže, da te prednosti niso samoumevne zaradi neustrezne implementacije in pomanjkljive optimizacije sistema. Avtomatsko prilagajanje prezračevanja glede na CO₂ in VOC ter ciljno upravljanje proizvodnje hladne vode izvajajo potencial za varčevanje, a le, če so logike in senzorika pravilno nastavljene in vzdrževane.

Ena glavnih težav pri nadgradnji ali uvedbi CNS je integracija heterogenih naprav in protokolov v enoten nadzorni sloj. Združevanje opreme različnih proizvajalcev, krmilnikov z različno logiko in različnih komunikacijskih standardov zahteva dodatne adapterje, skrbno načrtovanje omrežne arhitekture in pogosto poseg v obstoječo telemetrijo, kar povečuje kompleksnost projekta in tveganje za napake med zagonom.

Pogosto spregledana slabost obstoječih sistemov je pomanjkanje dosledne arhivske prakse in avtomatske diagnostike. Čeprav centralni nadzorni sistemi omogočajo alarmiranje in arhiviranje podatkov, v mnogih primerih manjkajo definirani postopki za obdelavo podatkov, filtriranje lažnih alarmov in organizirano izvajanje korektivnih ukrepov, zato podatki ostanejo neučinkovito izkoriščeni in vzdrževalne ekipe ne dobijo uporabnih informacij pravočasno.

Kakovost in položaj senzorjev, skupaj z rednim vzdrževanjem merilne opreme, predstavljata kritično šibko točko: nepravilno kalibrirani ali slabo nameščeni senzorji temperature, pretoka in tlaka vodijo do napačnih regulacij, oscilacij v krmilnih zankah in posledičnega pretiranega delovanja kompresorjev ali črpalk, kar znižuje dejanski izkoristek sistema kljub pravilno zasnovanim krmilnim strategijam.

Hidravlično neravnovesje in neoptimalna dimenzija cevi in črpalk sta pogost vzrok učinkovitostnih izgub. Sistemi, ki delujejo pri delnih obremenitvah brez primernega moduliranja hitrosti črpalk ali zvezne modulacije agregatov, delujejo v podoptimalnem režimu, kar se kaže v večji električni porabi in manjšem COP-u hladilnih enot. Nepravilna regulacija terminalnih ventilov in slaba hidravlična izravnava povečujeta tako notranje izgube kot čas potrebnega vzdrževanja.

Operativni in organizacijski izzivi dodatno otežujejo doseganje potencialnih prihrankov: pomanjkanje izobraženih vzdrževalcev, nezadostna dokumentacija po zagonu, odsotnost rednih preverjanj in prilagoditev krmilnih parametrov po spremembah obratovalnih pogojev ter neupoštevanje zasedenosti ali spreminjajočih se tarifnih signalov vodijo v situacijo, ko sistem dolgo deluje z neoptimalnimi nastavitvami.

Nazadnje sta upravljanje podatkov in kibernetska varnost praktična ovira pri uporabi naprednih CNS rešitev. Centralizacija nadzora in povezljivost v oblake omogočata nove storitve in analitiko, vendar istočasno uvajata tveganja nepooblaščenih posegov, izgube podatkov in potrebe po jasno definiranih pravicah dostopa, varnostnih politikah in rednem varnostnem vzdrževanju, kar pogosto ni predvideno pri prvotnih izvedbah sistemov.

(Lechner, 2014)

2.4 Energetska učinkovitost in razredi

Energetska učinkovitost klimatskih naprav meri razmerje med opravljenim koristnim delom in vloženo energijo ter predstavlja ključen pokazatelj trajnosti, obratovalnih stroškov in okoljskega odtisa sistema. Pri centralnih klimatskih sistemih je učinkovitost večslojna kategorija: vključuje učinkovitost same proizvodnje hladilne energije, učinkovitost prenosa in distribucije hladila skozi hidravlični ali zračni sistem ter učinkovitost končnih enot pri izmenjavi toplote z notranjim prostorom. Čeprav je za posamezne komponente mogoče izračunati lokalne koeficiente učinkovitosti, kot so COP kompresijske enote ali učinkovitost črpalk, je smiselno ocenjevati sistem tudi skozi kazalnike, ki upoštevajo izgube v ceveh, delovanje pri delnih obremenitvah, nadzor in odzivnost regulacijskega sistema in vpliv pomožnih enot. Takšne celostne metrike omogočajo primerjave med različnimi arhitekturami in podlagami za ukrepe za izboljšanje izkoristka.

Razredi energetske učinkovitosti so orodje za standardizirano primerjavo naprav in sistemov na trgu in za informiranje projektantov, upravljavcev in končnih uporabnikov. Razvrstitve temeljijo na standardiziranih preizkusnih pogojih in kazalnikih, ki so v zadnjem času vključili sezonske indekse učinkovitosti, ker točkovne meritve ne odražajo realnega obratovanja skozi celo sezono. Za sisteme hlajenja so pomembni kazalniki, kot sta EER in SEER, za ogrevanje pa COP in SCOP, pri čemer sezonski indeksi (SEER, SCOP) zajamejo več merilnih točk in so ponderirani glede na pričakovane razmere obratovanja. Pri centralnih sistemih je treba interpretirati razrede previdno, saj nalepke in razredi, oblikovani za potrošniške enote, ne

zajamejo vedno vseh vplivnih dejavnikov centralnih instalacij, kot so hidravlične izgube, učinkovitost kolektorjev in izgube v distribuciji.

V praksi so razredi koristni kot smernica pri izbiri opreme in oblikovanju arhitekture sistema, vendar prinašajo tudi omejitve. Standardizirane vrednosti veljajo za točno določene laboratorijske pogoje ali za vnaprej določene sezonske profile in zato lahko dajo optimistično oceno, če sistem v realnih pogojih deluje pri drugačnih temperaturnih razlikah, večkratnih vklopih in različnih režimih obremenitve. Pri centralnih sistemih je bistveno, da se ocena učinkovitosti nadgradi s simulacijami obratovanja čez leto, meritvami na objektu in analizo delovanja pri delnih obremenitvah, saj se največji del porabe pojavi prav v režimih, ki jih točkovni testi ne zajemajo.

Povečanje energetske učinkovitosti centralnih klimatskih naprav zahteva ukrepe na več nivojih hkrati. Na nivoju proizvodnje hladilne energije so ključne rešitve pravilna dimenzija in izbira agregatov, uporaba modulacijskih tehnologij, optimizacija režimov in uporaba ekonomizacije ali rekuperacije, kjer je to smiselno. Pri prenosu energije je nujna pravilna hidravlična zasnova z minimalnimi izgubami, ustrezna izolacija, uporaba črpalk z variabilno hitrostjo ter hidravlična izravnava in balansiranje razvodnega omrežja. Na nivoju končnih enot se izboljšave dosežejo z natančno regulacijo pretokov, uporabo sodobne senzorike in termostatske ter prilagojenimi zahtevami prezračevanja glede na zasedenost. Vse te ukrepe mora podpirati centralni nadzorni sistem, ki omogoča koordinacijo, spremljanje in optimizacijo obratovanja v realnem času.

Pri ocenjevanju prihrankov je pomembno ločiti med potencialnimi teoretičnimi izboljšavami in dejanskimi dosežki po izvedbi. Teoretični prihranki izhajajo iz optimizacije posameznih komponent in boljšega dizajna, medtem ko se dejanski prihranki pogosto omejijo zaradi izvajalskih kompromisov, netočnosti meritev, staranja opreme in operativnih praks. Zato je pri načrtovanju izboljšav za dosego višjega razreda učinkovitosti priporočljiv pristop z več koraki: izvedba začetnih meritev in *benchmarkinga*, uvajanje kontrolnih sprememb, spremljanje rezultatov in iterativna prilagoditev krmilnih strategij. Sistematičen pristop zagotavlja, da predvideni energetski razredi in prihranki niso zgolj teoretični, temveč merljivo dosegljivi.

Regulatorni okvir in standardi igrajo pomembno vlogo pri določanju minimalnih zahtev in spodbujanju prehoda na bolj učinkovite rešitve. Zakonodaja in priporočila pogosto določajo minimalno stopnjo avtomatizacije, merjenja in nadzora za velike objekte ter zahtevajo vključitev določenega deleža nazivnih moči v sisteme za avtomatizacijo stavb. To prispeva k večji preglednosti in spodbuja integracijo CNS, ki je pogoj za doseganje višjih vrednosti

sezonske učinkovitosti v praksi. Hkrati standardi določajo merilne metode in točke, ki omogočajo primerljivost sistemov in zanesljivejšo oceno njihovega dejanskega delovanja.

Na ravni upravljanja in vzdrževanja zahteva energetska učinkovitost tudi ustrezne organizacijske ukrepe. Redno preverjanje in kalibracija senzorjev, preventivno vzdrževanje komponent, učenje in usposabljanje vzdrževalnih ekip in implementacija postopkov za obdelavo arhiviranih podatkov so ključni za ohranjanje doseženih razredov učinkovitosti čez čas. Brez teh ukrepov se lahko prvi visoki razredi učinkovitosti hitro znižajo zaradi obrabe opreme, napačnih nastavitev ali spregledanih napak, ki povzročajo izgube.

Pri ocenjevanju energetskih razredov za centralne sisteme je nujna tudi ekonomska presoja, saj višji začetni stroški naprav ali integracije CNS niso vedno upravičeni brez ustrezne analize življenjskih stroškov. Celovit pristop mora vključevati investicijske stroške, pričakovane prihranke energije, stroške vzdrževanja, vpliv na delovanje uporabnikov in morebitne subvencije ali regulativne spodbude. Le na podlagi celostne analize je možno smiselno določiti, kateri ukrepi resnično pripomorejo k trajnostni izboljšavi razreda učinkovitosti sistema.

V zaključku je treba poudariti, da so energetski razredi in indeksni kazalniki nujno orodje za orientacijo, vendar za centralne klimatske sisteme zahtevajo nadgradnjo s sistemsko analizo. Doseganje višjih razredov učinkovitosti zahteva usklajeno delovanje med tehničnim optimiziranjem komponent, premišljeno hidravlično in termično zasnovo, naprednimi krmilnimi logikami ter discipliniranim upravljanjem in vzdrževanjem. Samo tak integriran pristop zagotavlja, da deklarirane vrednosti učinkovitosti privedejo do resničnih in trajnih prihrankov v obratovanju.

(Metronik, n.d.); (M., 2019)

3 CENTRALNI NADZORNI SISTEM

3.1 *Opredelitev in funkcionalnost CNS*

Centralni nadzorni sistem (CNS) je enotno programsko okolje, ki združuje merilne in krmilne enote klimatskih naprav, prezračevalnih sistemov in drugih inštalacij za ogrevanje in hlajenje v enoten, centralno upravljan sistem. Glavna naloga CNS je zbiranje podatkov iz razvejane mreže senzorjev, njihova obdelava v realnem času in avtomatizirano generiranje ukazov za aktuatorje, s čimer zagotavlja optimalno delovanje vseh podrejenih enot. Tak pristop omogoča prehod z individualnih, avtonomnih naprav na usklajeno, sistemsko upravljanje, kar je ključno za doseganje visokih standardov energetske učinkovitosti in uporabniškega udobja.

Arhitektura CNS temelji na večslojni zasnovi, ki vključuje spletno ali lokalno bazo podatkov, strežniške procese za obdelavo in analizo signalov ter distribucijsko omrežje komunikacijskih vodil (npr. BACnet, Modbus, KNX, TCP/IP). Na robni ravni so povezani PLC-ji ali namenski mikrokrmilniki, ki skrbijo za neposredni nadzor nad kompresorji, ventilatorji, loputami in ventili. Zgornji sloj predstavlja uporabniški vmesnik (HMI/SCADA), kjer upravljavalec prek grafičnih zaslonov spremlja delovanje sistema, ureja časovne urnike in nastavlja želene vrednosti parametrov.

Funkcionalnost CNS zajema kontinuirano zbiranje meritev temperaturnih, tlakovnih in vlažnostnih senzorjev, analizo trendov in avtomatizirano prilagajanje nastavitev. Sistem omogoča definicijo večnivojskih krmilnih strategij: od enostavnega ohranjanja fiksnih *setpointov* do dinamičnega krmiljenja glede na zunanjo temperaturo, notranjo obremenitev ali cenovne signale energetskega omrežja. Napredni CNS lahko vključi algoritme adaptivnega upravljanja in strojnega učenja za napovedni nadzor, s čimer zmanjšuje nihanja temperature in preprečuje nepotrebne cikle vklopa/izklopa.

Poleg osnovnih krmilnih zank CNS integrira tudi funkcije za detekcijo napak in diagnostiko (FDD), ki samodejno prepoznajo odstopanja v delovanju, kot so puščanje hladilnega sredstva, zaustavitve senzorjev ali nenavadni vzorci porabe. V sklopu energijskega menedžmenta sistem beleži porabo električne energije in primerja dosežene vrednosti z modelirano porabo, kar omogoča hitro ukrepanje v primeru anomalij. Redno generiranje poročil in grafični trendi pomagajo vzdrževalcem pri prediktivnem vzdrževanju in optimizaciji obratovalnih strategij.

Ključna prednost CNS je možnost daljinskega dostopa in nadzora prek varnih VPN povezav ali spletnih portálov, kar upravljavcem ponuja neodvisnost od fizične lokacije objekta. Prek odprtih API-jev se CNS lahko poveže z višjimi sistemi za upravljanje stavb (BMS) ali IoT platformami, kar omogoča skupno analitiko več objektov in centralizirano poročanje. Ta stopnja integracije poenostavi razširljivost, saj nove enote ali tehnologije zahtevajo le prilagoditev komunikacijskih vmesnikov.

Zanesljivost in varnost CNS sta zagotovljeni s podvajanjem kritičnih komponent, varnostnimi protokoli in šifriranjem podatkov, kar ščiti pred nepooblaščenim dostopom ali manipulacijo. Sistem običajno uporablja večstopenjske vloge uporabnikov, digitalne podpise za ključne ukaze in periodično varnostno kopiranje baze. Tako se minimalizira tveganje izpadov, hkrati pa se izpolnjujejo zahteve glede skladnosti z varnostnimi standardi in predpisi o varovanju osebnih podatkov.

Uporabniški vmesniki CNS so zasnovani na interaktivnih grafih, zemljevidih con in izčrpnih poročilih, ki omogočajo hitro orientacijo in enostavno konfiguracijo. Alarmi se lahko nastavijo glede na absolutne pragove ali kot odstotna odstopanja od optimalnih vrednosti, kar vzdrževalcem omogoča proaktivne ukrepe. Pisane vizualizacije porabe energije, temperatur in učinkovitosti opreme dvigujejo transparentnost delovanja in olajšajo odločanje o nadaljnjih investicijah.

Opredelitev in funkcionalnost CNS tako predstavljata temelj za celovito upravljanje klimatskih sistemov z visoko natančnostjo, odzivnostjo in prilagodljivostjo. Vpeljava CNS prinaša dolgoročne koristi v obliki znižane porabe energije, podaljšane življenjske dobe opreme, manj motenj pri uporabi prostorov in poenostavljenega vzdrževanja oziroma nadgradnje.

(EUROCONTROL, 2024); (M., 2019)

3.2 Prednosti uporabe CNS v klimatizaciji

Centralni nadzorni sistem v klimatizaciji prinaša izjemno izboljšanje energetske učinkovitosti, saj omogoča stalno optimizacijo delovanja kompresorjev, ventilatorjev in ekspanzijskih ventilov glede na trenutno toplotno obremenitev in zunanje pogoje. Namesto ohlapnih prednastavitev CNS dinamično prilagaja *setpointe*, frekvence ventilatorjev in stopnje dovoda hladilnega sredstva, kar zmanjšuje nepotrebne cikle vklopa/izklopa in ohranja sistem v coni visoke sezonske učinkovitosti. Takšen nadzor lahko zmanjša letno porabo električne energije klimatskih enot tudi 20–30 %, kar se hitro odraža v nižjih obratovalnih stroških.

Z integracijo funkcij zaznave napak in diagnostike (FDD) CNS omogoča prediktivno vzdrževanje, ki prepoznava odklone v tlakih, temperaturah ali porabi energije že v zgodnji fazi. To preprečuje nenadne okvare kompresorjev, puščanje hladilnega sredstva ali zmrzovanje uparjalnika, hkrati pa zmanjšuje stroške vzdrževanja in podaljšuje življenjsko dobo opreme. Avtomatsko generiranje alarmov in redna poročila o stanju sistema vzdrževalcem olajšajo načrtovanje intervencij brez nepotrebnih prekinitev obratovanja ali dragih izrednih servisnih posegov.

SIEMENS				4/18 Life Safety		Danger		1/1 High		0/1 Medium		0/1 Low		JRMK 12/6/2023 3:35 PM		Menu	
Event List - Logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCNS1.ZRAK5.Alm.HIGH - _ZRAK5_Alm_HIGH_Val - Filter By: Category= <Life Safety>																	
Case	Path	Source	Command	Information	Event Status	Source Status	Date										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCNS1.KISIK.Alm.HIGH	_KISIK_Alm_HIGH_Val	✓		Unprocessed	Quiet	12/4/55										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCNS1.ZRAK5.Alm.LOW	_ZRAK5_Alm_LOW_Val	✓		Unprocessed	Quiet	12/4/51										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCNS1.ZRAK5.Alm.HIGH	_ZRAK5_Alm_HIGH_Val	✓		Unprocessed	Quiet	12/4/51										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCNS1.ZRAK8.Alm.HIGH	_ZRAK8_Alm_HIGH_Val	✓		Unprocessed	Quiet	12/4/51										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCNS1.OOV.Alm.M10	_OOV_Alm_M10_Val			Waiting for condition	Active	12/8/16										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCKDVS.ASP.Alm.M08	_AS_Alm_M08_Val			Waiting for condition	Active	12/8/15										
Off Normal	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERCKDVS.ASP.Alm.M07	_ASP_Alm_M07_Val			Waiting for condition	Active	12/8/16										
Off Normal (Active)	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERENTRAN.KN.Alm.P07	_KN_Alm_P07_Val			Waiting for condition	Active	12/8/51										
Off Normal (Active)	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERENTRAN.KN.Alm.P05	_KN_Alm_P05_Val			Waiting for condition	Active	12/8/55										
Off Normal (Active)	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERENTRAN.KN.Alm.P06	_KN_Alm_P06_Val			Waiting for condition	Active	12/8/55										
Off Normal	Applications Schedules:BACNet Schedules:Diagz.Hardware	PX-KNX Contr_01			Waiting for condition	Active	12/3/31										
Off Normal	Applications Schedules:BACNet Schedules:PATOLOGIA.Hardware	KUMAT RKN2_PISARNE			Waiting for condition	Active	12/3/20										
Off Normal (Active)	logical View:UKC monitor.GINEX.DERMATOLOGIA.DERMATRON.KN1.Alm.P05	P5-dp filter dovodni kanal			Waiting for condition	Active	12/11/5										
High Limit	logical View:UKC monitor.URGENCA.URGERHP.RHP.ALTI	_RHP_AL1_T1_Val			Waiting for condition	Active	11/12/0										
Off Normal	Applications Schedules:BACNet Schedules:UKC MB PSIHIATRIJA.Hardware	KUMAT N8-PSIHIATRIJA			Waiting for condition	Active	10/11/1										
Off Normal (ALARM)	logical View:UKC monitor.MITI.MB_AJ-JED.LUNICA	Hladilni agregat 1-alarm			Waiting for condition	Active	8/8/300										
Off Normal (Alarm)	logical View:UKC monitor.ONKOLOGIA.ONKONAD1.KN6.ALARM1	_KN6_ALARM1_VL			Waiting for condition	Active	7/15/15										
Off Normal	UKCMB.hospitalna.stolpnica.Hajenje.OJ.MSLAR.HA2	HA2-HA-Absorber motnja			Waiting for condition	Active	2/6/10										

(Vir: lasten vir 2025)

31

analitiko porabe, sprejemanje cenovnih signalov elektroenergetskega omrežja in implementacijo algoritmov za odziv na dinamične tarife.

Daljinski dostop in mobilne aplikacije, ki jih podpira CNS, zmanjšujejo potrebo po fizični prisotnosti na lokaciji naprave. Upravljalci lahko spremljajo meritve, prilagajajo nastavitve in sprožajo korektivne ukrepe v realnem času, ne glede na to, kje se nahajajo. Ta funkcionalnost podpira hitrejšo odzivanje na nepričakovane spremembe pogojev, krajšanje časovnih zamikov pri odpravljanju težav in povečuje operativno fleksibilnost.

Z vidika trajnostnega razvoja CNS prispeva k zmanjšanju ogljičnega odtisa stavb, saj ni le energetsko varčen, ampak podpira tudi prehod na nizkoogljična hladilna sredstva in integracijo obnovljivih virov energije (npr. solarnih modulov za napajanje vmesnikov ali geotermalnih toplotnih črpalk). Optimizacija delovnih ciklov v kombinaciji s pametnim upravljanjem baterijskih sistemov ali akumulacijskih rezervoarjev toplote omogoča obratovanje z največjo samooskrbo in minimalnimi izpusti CO₂.

Modularna zasnova CNS zagotavlja enostavno razširljivost sistema ob spremembah funkcijskih zahtev ali pri adaptacijah obstoječih objektov. Dodatne notranje in zunanje enote ali nove senzorje je mogoče brez večjih posegov vključiti skozi že vzpostavljena komunikacijska omrežja, kar skrajša čas uvedbe nadgradnje in optimizira investicijo. Razširitve so tako izvedljive brez dolgotrajnih prekinitev hlajenja ali ogrevanja, kar je še posebej pomembno v kritičnih poslovnih okoljih.

Podrobna analiza zbranih podatkov in spremljanje trendov delovanja omogočata stalno optimizacijo obratovalnih strategij. Napredna vizualizacija porabe energije, temperature in stanja komponent skozi interaktivne nadzorne plošče navdihuje upravljalce k ukrepom za dodatno prilagoditev sistema, kot so optimizacija urnikov ogrevanja/hlajenja ali uvedba novih algoritmov razporejanja obremenitev. Dolgoročne statistike pomagajo tudi pri načrtovanju nadgradenj, investicijskih odločitev in vrednotenju uspešnosti izvedenih optimizacij.

Uporaba CNS v klimatizaciji tako prinaša celovit sklop prednosti: od občutnega znižanja stroškov energije in vzdrževanja prek izboljšane uporabniškega udobja in zanesljivosti do trajnostnih koristi in razširljivosti. Te prednosti skupaj vzpostavljajo konkurenčno prednost stavb, ki so opremljene s centralno nadzorovanim sistemom, zagotavljajo večjo prilagodljivost na spreminjajoče se potrebe uporabnikov in lažje upravljanje in nadzor obratovalnega cikla.

(Feniks Pro, n.d.)

3.3 Primeri obstoječih rešitev

Siemens Desigo CC je celovita platforma za upravljanje stavb, ki v enotno grafično okolje združuje HVAC, varnostne sisteme in energetske porabo. Rešitev uporablja razširljive strežniške module, ki komunicirajo prek standardnih protokolov BACnet/IP in OPC UA, kar omogoča enostavno integracijo naprav različnih proizvajalcev. Vmesnik Desigo uporablja prilagodljive delovne prostore, kjer upravljavec z vlečenjem elementov uredi panele za nadzor temperature, alarme in poročila, medtem ko vgrajeni analitični moduli samodejno prepoznajo odstopanja in predlagajo optimizacijske ukrepe.

Johnson Controls Metasys je modularni sistem za upravljanje zgradb, zasnovan na odprtih komunikacijskih standardih BACnet in LonWorks. Glavni strežnik Metasys združuje krmilne enote (angl. *Field Equipment Controllers*) in terminalne enote (angl. *Room Controllers*) v hierarhično zasnovo, ki omogoča lokalno avtonomno delovanje in hkratno centralno vizualizacijo. Sistem podpira definicijo prilagojenih krmilnih logik na grafičnem urejevalniku in integracijo energetske analitike prek dodatnih modulov, ki merijo porabo in temperaturo v realnem času.

Schneider Electric EcoStruxure Building Operation prinaša koncept IoT povezane stavbe, kjer so vse komponente opremljene s pametnimi senzorji in krmilniki z Ethernet povezavo. Arhitektura EcoStruxure temelji na triletnem sloju IoT Gateway – operacijska platforma – mobilna aplikacija, kar upravljavcem omogoča celostno spremljanje in upravljanje prek brskalnika ali pametnega telefona. Vgrajeni analitični servis EcoStruxure Analytics™ ponuja napredne algoritme strojnega učenja za optimizacijo energije in preventive vzdrževanja, medtem ko množica vmesnikov podpira tudi integracijo sončnih kolektorjev ali baterijskih skladišč.

Trane Tracer SC je prilagodljiv nadzorni sistem, zasnovan za velike poslovne in industrijske stavbe. Tracer SC uporablja modularne nadzorne enote z dinamično dodelitvijo vhodno-izhodnih točk, kar pomeni, da se z razširitvijo števila con ne menjajo fizični PLC-ji, temveč le programske licence. Del sistema HMI omogoča kreacijo prilagojenih strani z žive različice strelišč, alarmne dogodke in interaktivne diagrame kroga HVAC. Prav tako je mogoče povezati Tracer SC z energetskimi trgi prek OpenADR protokola za odziv na spremembe cen oziroma regulacijo obremenitve zgradbe.

Honeywell Building Management System (BMS) Eagle je rešitev, ki integrira klimatske enote, ventilacijo, razsvetljavo in požarno zaščito v enotno platformo. Eagle uporablja strežnik s Hadoop podobno bazo za dolgotrajno shranjevanje časovnih serij, kar omogoča detekcijo trendov in retrospektivno analizo porabe. Zasnovan je za visoko razpoložljivost z dvojnimi redundantnimi komunikacijskimi potmi in strojno opremo, pri čemer vmesnik Operator Station nudi razširljiv nadzor prek povezanih delovnih postaj in mobilnih terminalov.

V segmentu odprtokodnih rešitev je vse bolj razširjen pristop kombiniranja BACnet strežnikov z MQTT posredniki in grafičnim urejevalcem tokov Node-RED. Takšna arhitektura omogoča hitro prototipiranje krmilnih strategij, saj senzorji in aktuatorji komunicirajo po lahkih sporočilih MQTT, AI-inference moduli pa obdelujejo podatke v oblaku. Predvsem manjši objekti in raziskovalna okolja cenijo fleksibilnost in stroškovno učinkovitost, saj odprtokodni paketi ne prinašajo licenčnih stroškov in omogočajo poljubne integracije z Linux strežniki ali Raspberry Pi napravami.

V raziskovalnih pilotnih projektih se vse pogosteje uvajajo digitalni dvojčki sistemov HVAC, kjer se poleg realnih meritev uporablja simulacijska platforma za napovedni nadzor. Take rešitve zbirajo meteorološke napovedi, zgodovinske obremenitve in model termičnega vedenja stavbe ter z metodo optimizacije množice scenarijev določijo idealna krmilna dejanja. Strojno učenje v kombinaciji z digitalnim dvojčkom omogoča samodejno prilagajanje PID parametrov in optimizacijo porabe s prednostnimi smernicami energetske tržnice ali družbene politike nizkoogljičnosti.

Pirnat panel primeri obstoječih rešitev kažejo različne pristope – od komercialnih platform z razširljivimi licencami do odprtokodnih prototipov in naprednih raziskav. Vsak od teh sistemov zastopa drugačno kombinacijo modularnosti, standardizacije in energetske inteligence, kar ustvarja bujno tehnološko pokrajino in odpira možnosti za prihodnje nadgradnje in medsebojno interoperabilnost.

(Schneider Electric, n.d.); (EUROCONTROL, 2024); (SmarteH, n.d.)

3.4 Tehnološki razvoj sistemov CNS

Razvoj centralnih nadzornih sistemov (CNS) se je začel v drugi polovici 20. stoletja, ko so bile stavbe opremljene z enostavnimi analognimi relejnimi sklopkami. Ti zgodnji sistemi so temeljili na osnovnih vezjih, ki so spremljala temperaturo in na podlagi vnaprej nastavljenih pragov vklapljal ali izklapljal hladilne in ogrevalne naprave. Prilagodljivost je bila omejena,

nadzor pa večinoma ročen, saj so uporabniki potrebovali fizične regulatorje in stikala na krmilnih omaricah. Preprostost je pogosto vplivala na zmanjšanje zanesljivosti – zlasti v velikih poslovnih objektih nekaterih enot sploh ni bilo mogoče upravljati centralno, kar je vodilo v neenakomerno porazdelitev bremen in višje porabe energije.

Prelomnico je prinesel prehod na digitalno krmiljenje, ko so se v sedemdesetih in osemdesetih letih pojavili prvi programabilni logični krmilniki (PLC) in mikroprocesorji. Ti so omogočili natančnejše merjenje in krmiljenje, saj so zamenjali mehanske elemente z elektronskimi pretvorniki, ki so na digitalni ravni analizirali signale. Krmilna logika se je prenesla v programsko opremo, kar je olajšalo spreminjanje parametrov in posodabljanje upravljalnih scenarijev. Grafični terminali so postopoma nadomestili klasična stikala, uporabniški vmesniki pa so se z razvojem računalništva preoblikovali v namizne aplikacije. Tako so vzpostavili temelj podob centralnih nadzornih sistemov, kakršne poznamo danes kot stavbne avtomatizacijske rešitve (angl. *Building Management Systems*).

V devetdesetih letih so producerska prizorišča še dodatno poglobila zmogljivosti CNS z integracijo komunikacijskih protokolov, kot sta BACnet in Modbus. Ti odprti standardi so omogočili združljivost med opremo različnih dobaviteljev, kar je bilo ključno za večja poslovna središča in kompleksne industrijske objekte. Hkrati je z naraščajočo razpoložljivostjo Ethernet tehnologij centralni nadzor postal razširjen prek lokalnih omrežij, kar je odprlo pot za daljinsko spremljanje in nadzor prek intraneta ali celo interneta.

S prihodom interneta stvari (IoT) v prvi dve desetletji 21. stoletja so sistemi CNS postali še bolj inteligentni in prilagodljivi. Pametni senzorji in aktuatorji, opremljeni z lastnimi komunikacijskimi moduli, so začeli v realnem času prenašati velike količine podatkov o temperaturi, relativni vlažnosti, kakovosti zraka in prisotnosti oseb. Te informacije so se zbirale v osrednjih strežnikih ali oblačnih platformah, kjer so napredni algoritmi strojnega učenja analizirali vzorce obratovanja. Ta pristop je omogočil uvedbo prediktivnega vzdrževanja, pri katerem sistem na podlagi zgodovinskih podatkov napove morebitne okvare ventilatorjev, črpalk ali senzorjev in tako zmanjšuje neplaniran izpad opreme.

V zadnjem času se v ospredje postavljajo paradigme angl. *edge computinga* (robno računalništvo) in hibridnega oblaka. Namesto da bi se vsi podatki pošiljali v centralni strežnik, se del obdelave prenese neposredno v robne enote sistema, kar zmanjšuje zamike in povečuje odpornost CNS na motnje omrežnega prenosa. Hkrati se ohranja povezava z oblačnimi rešitvami, kjer poteka daljinska diagnostika, vizualizacija zgodovinskih trendov in razvoj novih

analitičnih modelov. Vzpostavljeni digitalni dvojčki stavb, virtualne replike fizičnega okolja, omogočajo simulacijo obratovalnih scenarijev ter preizkušanje strategij odziva na ekstremne vremenske razmere, kar bistveno pripomore k zmanjšanju tveganj pred izvedbo dejanskih sprememb na infrastrukturi.

(Klimahit, n.d.); (Metronik, n.d.)

3.5 Integracija CNS s klimatizacijskimi napravami

Integracija centralnega nadzornega sistema s posameznimi klimatizacijskimi enotami predstavlja temelj naprednega upravljanja mikroklima v sodobnih stavbah. Ključni cilj je vzpostavitev zanesljive in varne dvosmerne komunikacije med centralno krmilno enoto in posameznimi napravami za prezračevanje, hlajenje in ogrevanje. Na ta način CNS pridobiva stalne povratne informacije o delovanju ventilatorjev, črpalk, toplotnih črpalk in hladilnih agregatov, medtem ko obenem v vsakem trenutku sproti prilagaja delovne parametre naprav, glede na spreminjajoče se pogoje v prostoru. Rezultat je dinamično prilagojeno krmiljenje, ki se lahko v realnem času odziva na temperaturne odklone, nihanja v zasedenosti prostorov ali vremenske spremembe zunaj objekta.

Komunikacijski protokoli igrajo v tej integraciji odločilno vlogo, saj omogočajo združljivost opreme različnih proizvajalcev. Standardi, kot je BACnet, so zasnovani posebej za sistemsko avtomatizacijo in grajenje, pri čemer podpirajo obširen nabor naprav v komercialnih in industrijskih okoljih. Modbus je navadno izbran za enostavnejše povezave prek serijskih ali Ethernet povezav in nudi zanesljiv prenos osnovnih podatkov o statusu in napakah. Protokoli KNX in LONWorks širijo funkcionalnost s poudarkom na celovitem upravljanju stavb, kjer se klimatizacija prepleta z razsvetljavo, varnostjo in drugimi sistemskimi storitvami. Vsak od teh protokolov prinaša specifične prednosti glede razpoložljivosti dodatnih profilov, načinov sinhronizacije in mehanizmov varovanja pred nepooblaščenimi posegi.

Ker stavbe velikokrat vsebujejo opremo različnih generacij in proizvajalcev, je v praksi pogosto potrebna uporaba protokolnih prehodov oziroma *gatewayev*, ki prevajajo signale med neskladnimi omrežji. Ti prehodi skrbijo za sinhronizacijo časovnih oznak, konstantno interpretacijo ukazov in dodeljevanje prioritete kritičnim alarmom. Za zagotovitev kibernetike varnosti se običajno vgrajujejo sloji šifriranja in overjanja, s katerimi se prepreči prestrežanje ali manipulacija z ukazi. Na tak način lahko stara analogna krmilja ostanejo uporabna, hkrati

pa stavba pridobi sodoben digitalni živčni sistem, ki centralno nadzoruje vse ključne komponente klimatskega omrežja.

V vlogi »čutil« in »mišic« integriranega CNS so senzorji in aktuatorji. Senzorji neprestano merijo temperaturo v povratnem in dovodnem kanalu, relativno vlažnost, koncentracijo CO₂, prisotnost ljudi in hitrost ali tlak zraka v kanalih. Pridobljeni podatki se prek komunikacijskih vodil ali brezžičnih modulov takoj posredujejo centralnemu krmilniku, ki podatkovni tok obdeluje z naprednimi algoritmi. Na drugem koncu so aktuatorji, kot so elektrotermični pogoni na loputah, krmilniki variabilnih vrtljajev ventilatorjev (VFD), ventilski pogoni hladilnih in ogrevalnih zank in enote za sprotno vklapljanje ali izklapljanje toplotnih črpalk. Ti aktuatorji natančno izvajajo spremembe, ki jih CNS izračuna glede na zahtevane klimatske pogoje.

Obdelava podatkov poteka na več nivojih: del osnovnih ukazov in varnostnih reakcij se izvede neposredno na robnih enotah (angl. *edge computing*), kar bistveno zmanjša zamik med meritvijo in odzivom ter ohranja osnovno funkcionalnost tudi ob izpadu povezave z oblakom. Vendar so vsi podatki kontinuirano sinhronizirani s centralno bazo ali oblačno platformo, kjer poteka poglobljena analiza zgodovinskih trendov, simulacije prek digitalnih dvojčkov in ustvarjanje novih optimizacijskih modelov. Ta hibridni način delovanja združuje prednosti zanesljivega lokalnega krmiljenja in navideznih neomejenih zmogljivosti oblačne analitike.

Končna korist tovrstne integracije je občutno povečanje energetske učinkovitosti in kakovosti zračnega okolja. Z natančnim časovnim prilagajanjem zmogljivosti posameznih enot se zmanjša število nepotrebnih zaganjanj in ustavljanj, kar sproži manjšo obrabo opreme in nižje porabe energije. Centralni nadzor omogoča tudi potovanje med fazami predhodnega hlajenja ali ogrevanja po dinamičnem urniku, pri čemer se upoštevajo tako razpoložljivost obnovljivih virov kot trenutne tarife električne energije. Uporabniški vmesnik, dostopen prek spletnega brskalnika ali mobilne aplikacije, daje upravljavcem stavbe pregled nad delovanjem klimatskih enot, možnost spreminjanja kontrolnih strategij in sprotno prejemanje alarmov in obvestil, kjerkoli že so.

Tako integriran centralni nadzorni sistem preoblikuje klasično klimatizacijsko instalacijo v inteligentno omrežje, ki združuje varnost, zanesljivost in trajnost. S sprotim usklajevanjem dela senzorjev, aktuatorjev in centralnih algoritmov CNS zagotavlja stalno udobje uporabnikov, hkrati pa prispeva k zmanjšanju obratovalnih stroškov in okoljskega odtisa stavbe.

Še ena ključna usmeritev sodobnega razvoja CNS je odprtokodna in modularna zasnova rešitev, ki omogoča enostavno nadgradljivost in prilagodljivost specifičnim zahtevam objektov. Namesto monolitnih krmilnih omar z vnaprej določenim naborom funkcij se razširljivi moduli vgrajujejo glede na potrebe posamezne stavbe – od enostavnih sistemov za manjše pisarne pa do kompleksnih platform, ki združujejo klimatizacijo, razsvetljavo, varnostne sisteme in energetskega menedžment. Ta pristop zmanjšuje odvisnost od posameznih dobaviteljev in olajša integracijo nove generacije senzorjev, vključno z merilniki porabe energije na posamezni napravi ter senzorji za detekcijo prisotnosti prek toplotnih in radarskih signalov.

Ključni proizvajalci stavbne avtomatizacije, kot so Johnson Controls s svojo platformo Metasys, Siemens z Desigo CC, Schneider Electric v sklopu EcoStruxure ali ameriško podjetje Tridium z okoljem Niagara Framework, si prizadevajo združiti vse te tehnologije v enotne, enostavno upravljane sisteme. Njihove rešitve danes že vključujejo poglobljeno vizualizacijo energijskih tokov, napredne nadzorne plošče s prilagodljivimi opozorili in možnostjo integracije z mobilnimi napravami. V kombinaciji z umetno inteligenco so ti sistemi sposobni samodejno prilagajati obratovalne strategije glede na zunanje vremenske razmere, dinamične cene električne energije in notranje potrebe po udobju, s čimer bistveno prispevajo k trajnostnemu upravljanju stavb in zmanjšanju ogljičnega odtisa.

(M., 2019); (SmarteH, n.d.)

4 IZBOLJŠAVE KLIMATSKIH NAPRAV Z VGRADNJO CNS

4.1 *Optimizacija energetske učinkovitosti*

Vgradnja centralnega nadzornega sistema omogoča prehod od statičnega upravljanja klimatskih naprav k dinamični optimizaciji, pri kateri se parametri delovanja avtomatsko prilagajajo trenutnim pogojem. Namesto nastavljenih časovnih urnikov in fiksnih temperaturnih točk CNS analizira realne meritve zunanje in notranje temperature, vlažnosti in toplotne obremenitve ter sproži prilagoditve, še preden pride do odstopanj od želene ugodnosti. Takšna napovedna regulacija zmanjša nepotrebne faze naglega hlajenja ali ogrevanja, kar pripomore k bolj stabilnemu delovanju kompresorjev in ventilatorjev in znatno zmanjšuje nihanja porabe energije.

Ključni mehanizmi optimizacije temeljijo na prilagodljivi regulaciji hitrosti ventilatorjev in črpalnih enot z vgradnjo pogonov na spremenljivo frekvenco. CNS spremlja obremenitev posameznih con in samodejno uravnava število obratov ventilatorskih sklopov ali vodnih črpalk, da se doseže ravnovesje med potrebnim zračnim pretokom in minimalno mehansko izgubo. S tem se preprečujejo visoki začetni tokovi in odvečne turbinske izgube, kar v letnem obsegu lahko zniža električno porabo motorjev tudi do 40 % glede na enote z on/off krmiljenjem.

Celovita integracija vremenske napovedi in cenovnih signalov elektroenergetskega omrežja dopolnjuje osnovno regulacijo. CNS lahko ob napovedanih visokih dnevnih temperaturah postopoma prilagodi notranje *setpointe* ali aktivira funkcijo nočnega hlajenja, kar prenese del toplotne obremenitve v nočne ali nizko tarifne ure. V primeru dinamičnih cen elektrike se prilagodi prioritetni čas vklopa kompresorjev, ventilatorjev in grelnih elementov tako, da se optimizira strošek obratovanja ob hkratnem ohranjanju zelenih klimatskih pogojev.

Optimizacija vključuje tudi dvosmerno upravljanje toplotne črpalke ali rekuperatorja toplote, če je prisoten v sistemu. CNS nadzoruje razmerje med hlajenjem in ogrevanjem v obratu toplotne črpalke, kar izkoristi maksimalni temperaturni dvig ob najmanjšem pogonskem delu. Hkrati spremlja temperaturo odtočne vode v rekuperatorju, da maksimizira vračanje toplote v sistem prezračevanja ali sanitarne vode. Takšna koordinacija zmanjša toplotne izgube in poveča skupni letni koeficient učinkovitosti sistema.

Z natančno analizo trendov porabe in diagnostiko stanja opreme CNS prepozna priložnosti za dodatno optimizacijo obratovalnega cikla. Sistem redno primerja dejanske krivulje obremenitve z modeliranimi idealnimi profili in signalizira potrebo po čiščenju izmenjevalnikov, zatesnitvi kanalov ali kalibraciji senzorjev. Preprečevanje znižane toplotne prevodnosti in zračnih izgub na kanalih omogoča ohranjanje enotne učinkovitosti skozi celotno življenjsko dobo opreme.

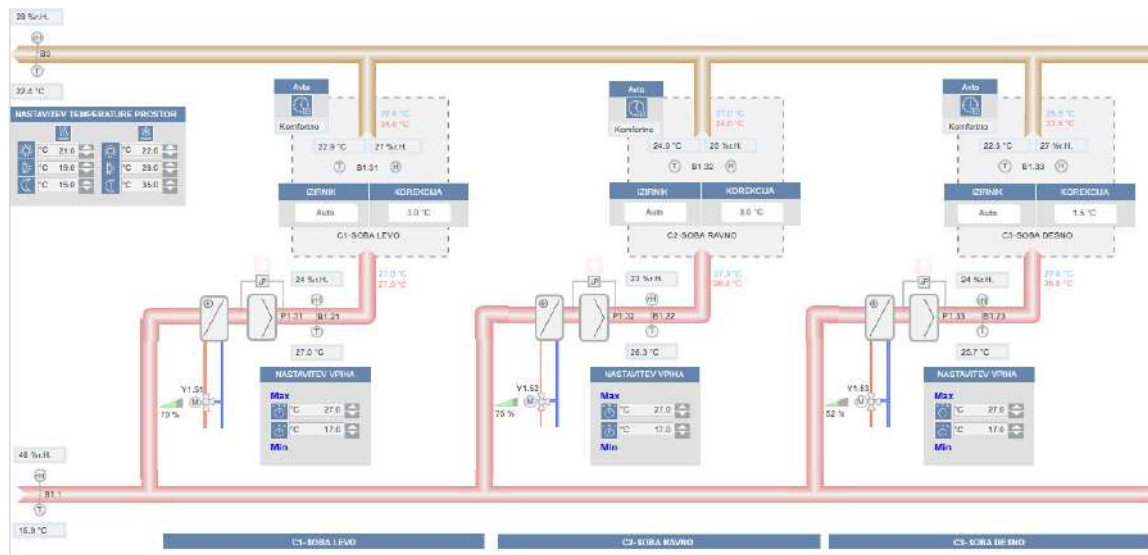
Napredni algoritmi strojnega učenja, vgrajeni v najnovejše CNS, se samodejno učijo značilnosti objekta – toplotne in akumulacijske kapacitete konstrukcij, vpliv sončne obremenitve in nihanja uporabniških navad. S postopno obdelavo zgodovinskih podatkov sistem postopoma izboljšuje PID parametre ali spreminja strategije večstopenjskega krmiljenja, kar vodi do čedalje bolj natančnega napovednega nadzora. Rezultati takega samonadzora so vidni v zmanjšanju nihanja temperature za $\pm 0,2$ °C in porabi energije, nižji za dodatnih 5–10 % po prvem letu obratovanja.

Optimizacija energetske učinkovitosti ni vezana le na posamezne elemente, temveč vključuje celotno razporeditev toplotnih virov in tokov v stavbi. CNS upravlja distribucijo hladne in tople vode po več conah z uravnoveženjem pretoka v razbremenilnih ventilih in prilagajanjem proizvodnje toplote na centralni enoti. Zaradi tega se zmanjša potreba po lokalnih grelnih ali hladilnih napravah in se izogne podvajanju virov, kar prinaša prihranke pri investiciji in vzdrževanju.

Sistem nenehno beleži in vizualizira porabo energije po posameznih pogonih, conah in časovnih intervalih ter omogoča podrobno analizo učinkovitosti s pomočjo interaktivnih grafov in poročil. Upravljalci lahko hitro prepoznajo časovne intervale z najvišjimi obremenitvami, primerjajo porabo z enakovrednimi objekti in sprejmejo ciljno usmerjene ukrepe, kot so optimizacija urnikov delovanja ali uvedba dodatnih akumulacijskih rezervoarjev toplote.

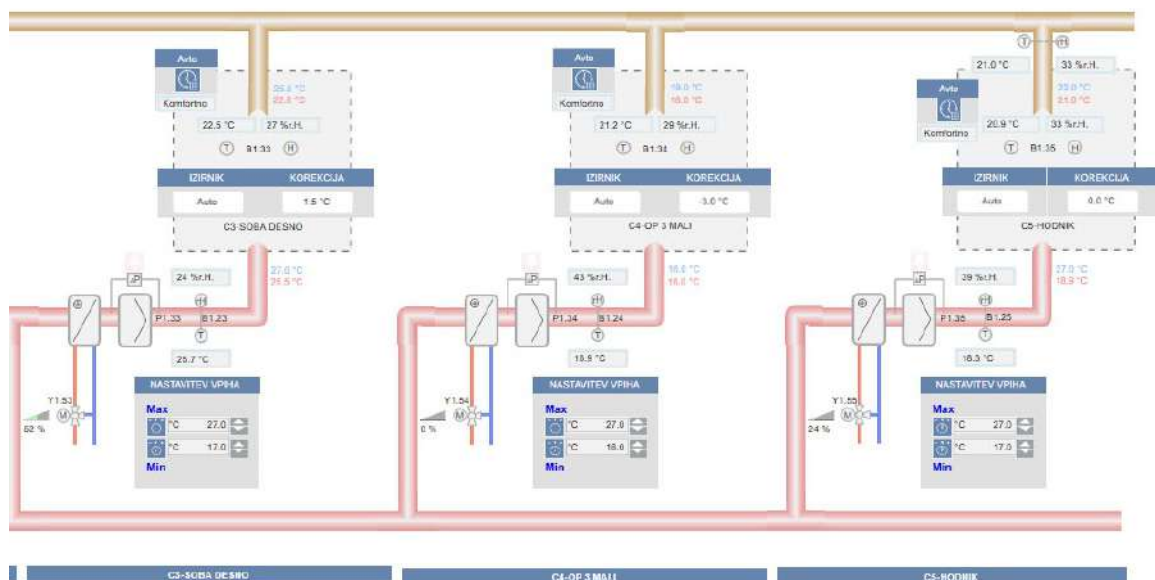
Na ta način optimizacija energetske učinkovitosti z integracijo CNS prinaša celostno izboljšanje delovanja klimatskih sistemov. Poleg takojšnjih prihrankov pri energiji in nižjih obratovalnih stroškov se občutno poveča življenjska doba kompresorjev, ventilatorjev in izmenjevalnikov ter zmanjša potreba po sistemih za krizno hlajenje ali ogrevanje. Dodatno se zniža ogljični odtis stavbe in poveča prilagodljivost na prihodnje energetske in okoljske zahteve.

(Baird, 2001); (Smarteh, n.d.); (Metronik, n.d.)



Slika 15: Shema con na CNS

(Vir: lasten vir 2025)



Slika 16: Shema con na CNS

(Vir: lasten vir 2025)

4.2 Vpliv na zanesljivost in vzdržljivost sistema

Centralni nadzorni sistem povezuje vse ključne komponente klimatske naprave v eno sočasno spremljano enoto. S stalnim beleženjem meritev senzorjev, stanja ventilatorjev, tlaka hladilnega kroga in alarmnih signalov sistem hitro prepozna odstopanja od normalnega delovanja. Neprekinjeno spremljanje omogoča zgodnje opozorilo na nepravilnosti, kar bistveno zmanjša tveganje nenadnih izpadov in omogoča pravočasen popravek ali servis.

Funkcija zaznave napak in diagnostike (FDD) analizira vzorce obratovanja in z njih oblikuje profil normalnega delovanja. Ko se pojavi odstopanje, CNS prek poročil in alarmov samodejno generira priporočila za intervencijo ali predloge za menjavo potrošnih delov. Tako se premikamo od reaktivnega vzdrževanja, ki čaka na okvaro, k proaktivnemu in prediktivnemu pristopu, kar podaljšuje čas med servisnimi posegi in zmanjšuje skupne stroške vzdrževanja.

Optimizacija obremenitve opreme skozi CNS omogoča uravnoteženje dela med več enotami ali fazami v sistemu. Prilagodljiva regulacija hitrosti kompresorjev in ventilatorjev prepreči zagon v maksimalnem režimu takoj ob vsaki spremembi pogojev, s čimer se izognemo visokim začetnim tokovom in mehanskim obremenitvam. Zaradi tekočega prehoda med delovnimi točkami se zmanjša obraba ležajev, tesnil in sklopnih sklopov, kar podaljšuje življenjsko dobo posameznih komponent.

Ponavljajoča se zasnova komunikacijskih poti in krmilnih modulov povečuje odpornost sistema na izpade. V primeru odpovedi enega mikrokrmilnika ali prekinitve povezave CNS samodejno preklopi na rezervno enoto ali mrežni kanal, ne da bi pri tem prekinil hladilni ali ogrevalni cikel. Takšna arhitektura zagotavlja visoko razpoložljivost, kar je ključno zlasti v večjih objektih in kritičnih okoljih, kjer je vsaka minuta izpada lahko izjemno draga.

Daljinski dostop do diagnostičnih podatkov in možnost posodobitve programske opreme brez fizičnega obiska lokacije skrajšujeta odzivne čase na težave. Upravljalci lahko sproti prilagajajo parametre regulacije, kalibrirajo senzorje ali naložijo nadgradnje z izboljšanimi algoritmi. Takšna centralizirana administracija zmanjša potrebo po pogostih servisnih izhodih, s čimer se dodatno varčujejo čas, stroški prevozov in administracija.

Podrobna statistična analiza življenjskega cikla naprav, ki jo omogoča CNS, vodi v učinkovit način zamenjave delov in načrtovanih vzdrževalnih del. Z določitvijo pričakovane preostale življenjske dobe posameznih komponent in primerjavo dejanske obrabe s profili lahko upravljavec načrtuje menjave ob optimalnem času. Ta pristop ne samo zmanjšuje nepredvidene izpade, temveč tudi omogoča racionalno razporejanje proračuna za popravila in nadomestne dele.

Vpliv centralnega nadzornega sistema na zanesljivost in vzdržljivost se kaže v občutnem zmanjšanju števila izpadov, daljšem intervalu med servisiranjem in večji predvidljivosti stroškov vzdrževanja. Celovit pristop, ki združuje zgodnje odkrivanje napak, uravnoteženo obremenjevanje in centralizirano upravljanje življenjskega cikla, bistveno podaljša življenjsko

dobo klimatskih naprav in izboljša njihovo zanesljivost v vseh pogojih delovanja. (Franklin, 2019)

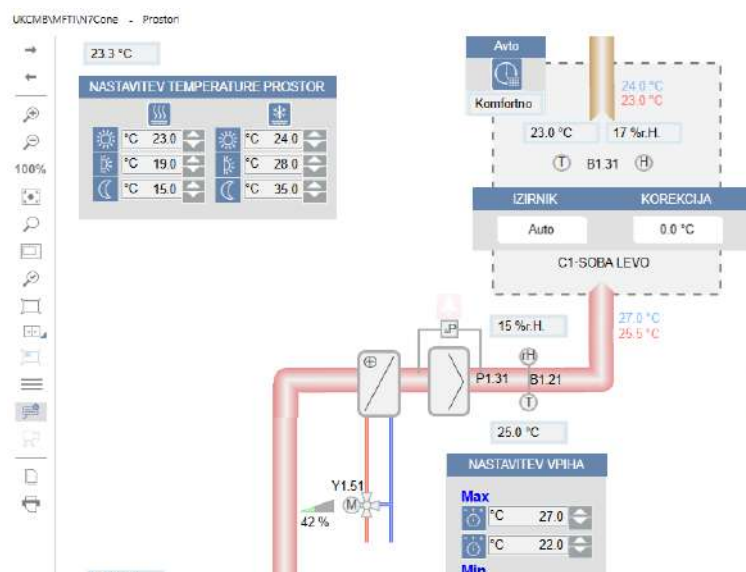
4.3 *Avtomatizacija procesov prilagajanja temperature*

Avtomatizacija prilagajanja temperature temelji na povratno-veznem krmiljenju, kjer centralni nadzorni sistem (CNS) stalno primerja merjene vrednosti s ciljnim *setpointi* in sproži ustrezne ukrepe za ohranjanje ravnovesja. Klasični PID regulatorji usmerjajo kompresor in ventilatorje z računanjem odstopanj (napak), vrednosti integrala in vrednosti odvodov, medtem ko moderni adaptivni algoritmi samodejno prilagajajo PID parametre ob spreminjajoči se toplotni obremenitvi. Ta avtomatika zmanjšuje ročno nastavljanje, zagotavlja hitrejši odziv na odvrčanja in preprečuje prekomerno nihanje temperature, kar povečuje energetske učinkovitost in stabilnost mikroklima.

CNS izrablja večstopenjske kaskadne kontrolne sheme, kjer primarni regulator skrbi za globalno temperaturno ravnotežje, sekundarni regulatorji pa uravnavajo hitrost ventilatorjev, pretok hladilnega sredstva ali delovno točko črpalke. S tem se razbremeni glavni regulator, odzivni čas celotnega sistema se zmanjša, hkrati pa se stabilizira tlak in prepreči poplavljanje kompresorja ali pregrevanje uparjalnika. Večnivojsko krmiljenje povečuje zanesljivost, saj vsak regulator deluje na ožjem območju dinamičnih sprememb in lažje ohranja nastavljene tolerance.

Za natančno prilagajanje temperature v posameznih conah se uporabljajo conski *setpointi* in algoritmi, ki temeljijo na mreži temperaturnih senzorjev in zaznavanju prisotnosti ljudi. Ko senzorji zaznajo spremenjeno zasedenost prostora ali porast CO₂, CNS samodejno prilagodi zračni pretok oziroma dvigne temperaturo na bolj varčen režim. Po koncu zasedenosti se *setpoint* preklopi v energetske varčen način, s čimer se zmanjša nepotrebno hlajenje ali ogrevanje v nepopolnih obremenitvah.

(Franklin, 2019)



Slika 17: Shema prilagajanja parametrov

(Vir: lasten vir 2025)

Integracija vremenske napovedi in zunanjih merilnikov omogoča prediktivno prilagoditev *setpointov*, s čimer se prepreči odstopanje od udobnih pogojev ob nenadnih zunanjih spremembah. CNS primerja meteorološke podatke z zgodovinskimi trendi porabe in predvidi, kdaj bo potreben dodaten hladilni ali ogrevalni učinek. V praksi ta napovedna regulacija zmanjša število ciklov vklopa/izklopa in omogoča delovanje na zanki s konstantnim delovnim točkovnim režimom, kar zmanjšuje mehanske obrabe in porabo energije.

Avtomatizacijo prilagajanja temperature dopolnjujejo logične in časovne strategije, ki vgrajujejo urnike, dogodke in posebne pogoje (na primer vikendi ali prazniki). CNS lahko na podlagi urnika postopno dvigne ali zniža *setpoint* nekaj ur pred prihodom zaposlenih, kar zmanjša zahtevano moč enot ob obratovanju, obenem pa zagotavlja prijetno temperaturno stanje ob dejanskem prihodu. Takšna avtomatika združuje uporabo koledarskih funkcij, prazničnih koledarjev in fleksibilnih profilov za optimizacijo obratovanja čez leto.

Napredni pristopi vključujejo algoritme strojnega učenja in *model-predictive control* (MPC), kjer CNS gradi matematični model termičnega vedenja objekta. MPC na vsakem koraku rešuje optimizacijski problem, ki minimizira odstopanje od *setpointa* ob omejitvah kompresorske moči ali tarifnih signalih. Rezultat je natančnejša regulacija, manj toplotnih šokov in še dodatni prihranki energije, pri čemer se sistemi prilagajajo specifičnim značilnostim zgradbe in navadam uporabnikov.

Avtomatizirani proces prilagajanja temperature prav tako vključuje varnostne mehanizme in logiko odpovedi, ki preprečujejo delovanje v nevarnih pogojih. Če senzorji zabeležijo nedopusten odklon tlaka hladilnega kroga ali previsoke temperature uparjalnika, CNS preide v varni način z minimalno obremenitvijo ali start/stop krmiljenje. S tem se zaščitijo ključne komponente, prepreči nadaljnja škoda in omogoči vzdrževalcem varen dostop za odpravo napake.

Celovit sistem avtomatizacije procesov prilagajanja temperature skrajša čas odziva, zmanjša ročno posredovanje in izboljša energetska in ekonomska učinkovitost klimatskih naprav. Hkrati dviguje stopnjo uporabniškega udobja, saj se temperatura prilagaja posameznim potrebam in situacijam, ne glede na spreminjajoče se zunanje in notranje pogoje. Integrirana avtomatika tako predstavlja enega ključnih stebrov vgradnje CNS za sodobne, trajnostne in zanesljive klimatske sisteme.

(Klimahit, n.d.); (Feniks Pro, n.d.); (Kuo, 1995)

4.4 Personalizacija udobja in upravljanje profilov uporabnikov

Personalizacija udobja predstavlja premik v pristopu h klimatizaciji, kjer centralni nadzorni sistem ne upravlja stavbe kot celote, temveč prilagaja mikroklimo vsakemu uporabniku ali coni posebej. Namesto enotnih temperaturnih nastavitev se vzpostavi sistem profila, ki upošteva individualne preference glede temperature, vlage, pretoka zraka in celo ravni svetlobe. Uporabniki lahko prek aplikacije ali upravljalnega vmesnika vnesejo svoje želene vrednosti, sistem pa nato samodejno prepozna posameznike, dodeli ustrezen profil in prilagodi klimatsko enoto v realnem času. Ta pristop zagotavlja bistveno višjo raven subjektivnega udobja in zmanjšuje nepotrebno izmenjavo zraka ali neoptimalno hlajenje prostorov, kjer nihče ni prisoten.

Arhitektura personalizacije temelji na zbiranju in obdelavi podatkov iz različnih virov – od sistemskih senzorjev za temperaturo in vlago do senzorjev gibanja, geolokacije uporabnikov in povratnih informacij. Ko uporabnik vstopi v določeno cono, ga sistem identificira prek brezžičnih signalov ali prijave v aplikacijo, nato pa samodejno aktivira profil z nastavitvami, ki ustrezajo njegovemu preferenčnemu komfortu. Profili so lahko statični, shranjeni po posamezniku ali dinamični, kjer se nastavitve sproti prilagajajo glede na zunanje pogoje, zdravstveno stanje uporabnika ali dejavnosti, ki jih trenutno opravlja. Zajem povratnih informacij o zadovoljstvu uporabnikov poteka bodisi s kratkimi anketami v aplikaciji bodisi s

senzorji, ki merijo srčni utrip ali stopnjo aktivnosti, in nato posodablja profile, da sistem z učenjem bolje ugame optimalne vrednosti.

Medsebojno delovanje med uporabnikom in CNS se običajno izvaja po večkanalnih uporabniških vmesnikih. Mobilne aplikacije uporabnikom omogočajo, da vnaprej nastavijo urnik svojega prihoda in odhoda, izberejo način delovanja (npr. udobje, varčevanje z energijo ali delo od doma) in dobijo sprotna obvestila o stanju mikroklima. Poleg tega se vse bolj uveljavljajo glasovni asistenti in integracija s pametnimi domačimi pomočniki, kar omogoča, da uporabnik s preprosto glasovno zahtevo neposredno komunicira z nadzornim sistemom ter nastavi želene parametre, na primer temperaturo 22 °C in raven vlažnosti. Grafični vmesniki na upravljalnih panelih v stavbi pa nudijo pregled nad aktivnimi profili, lestvico udobja po conah in statistiko porabe energije, da lahko upravniki stavbe prepoznajo morebitna odstopanja med načrtovanimi nastavitvami in dejanskim obratovanjem.

Napredni centralni nadzorni sistemi vključujejo komponente umetne inteligence in strojnega učenja, ki z analizo zgodovinskih podatkov avtomatsko prepoznajo vzorce v nastavitvah profilov. Če uporabnik običajno zahteva višjo temperaturo ob jutranjih urah, sistem prilagodi profil, da že pred njegovim prihodom poskrbi za optimalno klimo. Napake in nenormalne odklone pri uporabi se zaznajo kot anomalije in sprožijo predlog spremembe profila ali opozorilo skrbniku sistema. Tako se vsak profil neprestano kalibrira, hkrati pa se ohrani ravnovesje med individualnim udobjem in skupno energetske učinkovitostjo stavbe.

Upravljanje dinamičnih profilov poteka tudi na ravni coniranja prostorov. Stavbe se razdelijo na conične domene, ki temeljijo na vrstah delovnih prostorov, gostinskih področjih ali zasebnih delih stavbe. Profil uporabnika se samodejno prenese v vsako cono, kjer deluje, pri čemer CNC upošteva tudi interakcijo več uporabnikov v istem prostoru. V poslovnem okolju sistem lahko združi profile sodelavcev v sejni sobi in izračuna optimalno kompromisno temperaturo glede na njihove preference, medtem ko v hotelirstvu gostom omogoča polno nastavljanje njihove sobe prek mobilne aplikacije že pred prihodom.

Merjenje subjektivnega udobja se ne opira zgolj na temperaturo, temveč tudi na standardizirane indekse, kot sta PMV (angl. *Predicted Mean Vote*) in PPD (angl. *Predicted Percentage of Dissatisfied*). Centralni nadzorni sistem uporablja te indekse kot merilo zadovoljstva in jih sproti izračuna na podlagi vhodnih podatkov o hitrosti zraka, relativni vlažnosti in celo ravni oblačil, ki jih je uporabnik potrdil v profilu. V primeru, da PPD preseže določen prag, se sproži prilagoditev profila ali obvestilo vzdrževalnemu osebju, da preveri senzorje ali ventilacijske

kanale. Na ta način sistem ohranja naučene nastavitve znotraj znanstveno podprtih okvirjev, ki zagotavljajo udobje večine uporabnikov.

Čeprav prinaša personalizacija višjo raven uporabniške izkušnje, zahteva tudi skrbno uravnoteženje z energetske učinkovitostjo. Vsak profil je opremljen z omejitvami porabe, ki jih določi upravnik stavbe. Na primer, če uporabnik zahteva zelo nizko temperaturo v vročih poletnih dneh, sistem aktivira profil »maksimalno udobje« samo v določenih urah, medtem ko preostale ure prehaja v režim optimizacije porabe. S tem se preprečijo prekomerne obremenitve energetskega sistema, hkrati pa se uporabniku omogoči občutek nadzora nad svojim okoljem.

Praktični primer uporabe se kaže v hotelski industriji, kjer lahko gostje pred prihodom prek spleta ali mobilne aplikacije izberejo želene parametre klime v sobi. Ko se gost prijavi v sobo, sistem prepozna njegov profil in nastavitve se samodejno uveljavijo brez dodatnega ročnega vnašanja. Gostom ni treba iskati termostata, poleg tega pa hotel varčuje z energijo v nezasedenih sobah. V pisarniških zgradbah so profili uporabnikov povezani z njihovim delovnim urnikom in administrativnimi pravicami; kadar zaposleni dela od doma ali je v službeni odsotnosti, njegov profil ne obremenjuje stavbnega sistema.

Vpeljava profilov odpira tudi izzive s področja varstva osebnih podatkov. Centralni nadzorni sistem mora skladno z veljavnimi predpisi o varstvu zasebnosti (GDPR) zagotavljati, da so osebni podatki in preference uporabnikov ustrezno šifrirani, da se dostop do profila omeji na pooblaščen naprave in da sistem beleži le minimalno nujne informacije. Hkrati morajo imeti uporabniki možnost vpogleda, urejanja ali izbrisa svojih profilov, kar zahteva bogat nabor upravljaljskih funkcionalnosti in jasne politike zasebnosti.

Glede na hitri razvoj IoT tehnologij in digitalnih dvojčkov pričakujemo, da bodo profili postali še bolj izpopolnjeni. Virtualni model posameznega uporabnika, združen z biometričnimi podatki, lahko predvidi optimalne klimatske pogoje ne glede na sezono ali nenadne vremenske spremembe. S tem se bo raven personalizacije dvignila do točke, ko bo vsaka stavba delovala kot razširitev udobja uporabnika, znotraj trajnostnih in energetske učinkovitih meja.

(EUROCONTROL, 2024); (M., 2019)

4.5 Analitika podatkov, poročanje in benchmarking

V temelju vsakega naprednega centralnega nadzornega sistema leži zmožnost zbiranja obsežnih količin telemetrije iz klimatskih naprav, njihovih senzorjev in podružnih krmilnih modulov. V

procesu ETL (angl. *extract, transform, load*) se surovi podatki o temperaturi dovodnega in odvodnega zraka, relativni vlažnosti, tlaku v hladilnih krogih, hitrosti ventilatorjev in porabi energije sproti prečiščujejo, normalizirajo in konsolidirajo v centralno podatkovno skladišče. Tam poteka združevanje z informacijami iz drugih virov – na primer urniki zasedenosti prostorov, vremenske napovedi ali tarife električne energije – kar omogoča, da se vsak merjeni podatek kontekstualizira z dejanskimi obratovalnimi pogoji.

Ko se podatki razporedijo v večdimenzionalno bazo, jih analitični modul obdela z naprednimi statističnimi tehnikami in algoritmi strojnega učenja. Prvi korak pri analitiki je odkrivanje sezonskih vzorcev porabe energije in klimatskih obremenitev. Časovne vrste se razčlenijo na trendno komponento, ciklične ponovitve in nenadne odklone, pri čemer se periodično preverja skladnost s predpisanimi kontrolnimi strategijami. Hkrati se izvajajo regresijske analize, ki proučujejo razmerja med zunanjimi vplivi – kot sta temperatura in vlažnost zunanjega zraka – in notranjimi parametri sistema. Ti modeli pomagajo razumeti, v katerih časovnih obdobjih ali ob določenih vremenskih razmerah naprave porabijo največ energije in kje obstajajo rezerve za optimizacijo.

Na drugem nivoju se vzpostavlja vizualizacijska plast, kjer upravljavci stavbe dostopajo do interaktivnih nadzornih plošč (angl. *dashboards*). Te plošče poudarjajo ključne kazalnike uspešnosti (KPI) sistema: trenutno specifično porabo energije na kvadratni meter, razmerje med izkoristkom hladilne moči in vneseno električno energijo, čas med napakami in odstotek doseganja želene temperature v prostorih. Grafični prikazi časovnih trendov, zemljevidi toplotnih izgub in vizualne simulacije odzivov na scenarije zahtevajo premišljeno oblikovanje, saj je treba hkrati prikazati tako globalno stanje kot zelo specifične napake. Možnost filtriranja po posameznih conah stavbe, določenih klimatskih enotah ali celo po posameznih senzorjih omogoča skrbnikom, da se brez odlašanja osredotočijo prav na tisti sklop podatkov, kjer je potrebna intervencija.

Poročanje predstavlja most med tehnično analizo in poslovnim upravljanjem. Sistemi poročanja izdelujejo tedenska in mesečna poročila, ki na jasn način primerjajo dejanske dosežke z zastavljenimi cilji energetske učinkovitosti. Običajno so poročila sestavljena iz uvodnega povzetka glavnih ugotovitev, grafov, ki spremljajo porabo energije in stanje opreme ter priporočil za izboljšave. Napredni CNS omogoča avtomatizirano prilagajanje intervala in obsega poročil – na primer pošiljanje hitrih opozorilnih vizualizacij ob izstopanju KPI-jev iz dovoljenih mej ali izvedbo poglobljenih analitičnih pregledov ob koncu četrtertletja. Poročila

pogosto vključujejo tudi oceno prihrankov, ki so bili doseženi s specifičnimi ukrepi in simulacijo pričakovanih prihrankov pri uvajanju dodatnih optimizacij.

Benchmarking navdaja skrbnike s širokim orisom relativne uspešnosti. V okviru ene stavbe se lahko primerja delovanje različnih nadstropij in con, kjer se razlike pogosto odražajo v razporeditvi delovnega časa, arhitekturnih zahtevah ali številu uporabnikov. Še bolj dragocen pa je primerjalni *benchmarking* med več stavbami ali celo različnimi lastniki objektov v naboru nepremičnin. S tem se oblikuje objektivna lestvica najboljše prakse, kjer se izpostavijo stavbe z izjemno nizko specifično porabo energije ali z izjemno stabilnim zagotavljanjem udobja uporabnikov. Lastniki lahko nato podrobneje proučijo uvedene strategije v vodilnih objektih – na primer uporabo predhodnega hlajenja, spremenljivih tarif v okolju pametnega omrežja ali integracijo z obnovljivimi viri – in jih prenesejo v tiste stavbe, ki zaostajajo.

Izvedba *benchmarkinga* zahteva premišljeno kalibracijo vhodnih podatkov. Pred primerjavo je nujno normalizirati metrike glede na faktorje, kot so neto ogrevana površina, povprečno število prisotnih oseb in lokalne klimatske razmere. Primerjava dveh stavb na različnih geografskih lokacijah zahteva korekcijo ekonomskih in okolijskih parametrov, kot so lokalne tarife električne energije, letne ure sončnega sevanja ali visoka sezonska nihanja temperature. Z ustreznimi transformacijami podatkov se zagotovi, da se odčitki energetske učinkovitosti in kakovosti zraka merijo na enotnem referenčnem nivoju. Le tako postane *benchmarking* dejansko orodje za generiranje novih implementacij in ne le suhoparna primerjava števil.

Stalna nadgradnja analitične plasti prinaša vključevanje naprednih metod strojnega učenja za izboljšavo *benchmarkinga*. S skupinskim učenjem (angl. *federated learning*) se lahko zgradbe ohranjajo kot zavarovane entitete, pri čemer se lokalni modeli dopolnjujejo z globalnim modelom brez odkritja občutljivih podatkov. Tak pristop omogoča, da lastniki kompleksov izmenjujejo vedenjske vzorce brez deljenja surovih podatkov. Obenem se s klasifikacijskimi modeli prepoznajo skupine stavb s podobno obremenitvijo in arhitekturo, kar omogoči še natančnejši *benchmarking* znotraj homogenih podskupin.

Ko se analitika, poročanje in *benchmarking* prepletajo v enoten proces, se znanje o obratovanju klimatskih naprav hitro širi po organizaciji in portfelju stavb. Upravitelji pridobijo točno informacijo, katere enote porabijo največ energije izven delovnih ur, kje prihaja do presežnih ciklov hlajenja ali ogrevanja in kako specifične nastavitve profilov vplivajo na vsebnost CO₂ in subjektivno udobje. Na podlagi teh ugotovitev lahko razvijejo dolgoročne strategije za zamenjavo opreme, spremembo kontrolnih scenarijev ali uvedbo prilagodljive tarife za

modulirane obremenitve sistema. Pri tem se poročila in *benchmarkingi* ne končajo z eno serijo, temveč postajajo živi dokumenti, ki se sproti dopolnjujejo z novimi podatki in generirajo ponovne priložnosti za optimizacijo.

Sodobne platforme že omogočajo vpeljavo mobilnih in spletnih poročil, ki jih lahko upravniki spremljajo na poti. Samodejno obveščanje prek e-pošte, SMS-sporočil ali potisnih notifikacij v aplikacijah zagotavlja, da čakajoče alarmne situacije ne ostanejo neopažene. Če *benchmarking* razkrije odstopanja od najboljših praks, se sproži vrsta priporočil za intervencije: od nadgradnje programske opreme v CNC krmilnikih do namestitve dodatnih senzorjev na kritična mesta oziroma preizkusa novih algoritmov napovednega vzdrževanja. Ta odzivna zanka, podprta z zanesljivim sistemom poročanja in primerjanjem, dviguje energetske zavest vseh deležnikov in zagotavlja, da vlaganja v nadgradnje CNS prinašajo merljive rezultate v obliki nižjih stroškov, manjše porabe energije in stabilnejšega zagotavljanja udobja v stavbah.

(M., 2019); (Klimahit, n.d.)

5 ANALIZA VPLIVOV CNS NA ZANESLJIVOST KLIMATSKIH NAPRAV

5.1 Merila za ocenjevanje zanesljivosti

Zanesljivost klimatskih naprav ocenjujemo predvsem s povprečnim časom med okvarami (MTBF – angl. *Mean Time Between Failures*), ki predstavlja pričakovani čas obratovanja med dvema zaporednima nepričakovanimi izpadoma. Višji MTBF kaže na manjšo pogostost nenadnih napak in višjo kakovost izvedbe opreme. Pri izračunu MTBF beležimo vsak dogodek okvare, čas obratovanja med popravili ter statistično obdelamo podatke za določitev kumulativne vrednosti. Ta metrika je ključna za primerjavo različnih modelov klimatskih naprav in za načrtovanje servisnih intervalov.

Stopnja razpoložljivosti (angl. *availability*) pove razmerje med časom, ko je sistem popolnoma operativen, in celotnim časom opazovanja. Razpoložljivost izračunamo kot:

$$A = MTBF \times \frac{1}{MTBF + MTTR}$$

MTTR (angl. *Mean Time To Repair*) je povprečen čas za odpravo okvare in ponovno vzpostavitev delovanja. Cilj je doseči razpoložljivost nad 98 % pri večjih komercialnih sistemih, kjer vsak izpad vodi do nestabilnosti notranjega mikroklimatskega stanja. Merjenje in spremljanje razpoložljivosti omogoča optimizacijo vzdrževalnih strategij in opredelitev kritičnih rezervnih kapacitet.

Stopnja napak (angl. *Failure Rate*, λ) izraža verjetnost okvare na enoto časa in je inverzna vrednost MTBF ($\lambda = \frac{1}{MTBF}$). Čeprav se storitev MTBF pogosto uporablja pri dolgoročnih ocenah, je analiza λ pomembna za oceno tveganja v specifičnih obratovalnih pogojih. Za klimatske naprave se običajno spremlja letna stopnja napak, pri čemer se ločujejo okvare glavnih komponent (kompresor, ventilator, ventili) in pomožnih sistemov (senzorji, krmilna enota). Podrobna spremljava λ različnih sklopov pomaga prepoznati šibke točke in načrtovati poenotene ukrepe za povečanje zanesljivosti.

Povprečni čas do okvare funkcionalnega modula (angl. *Mean Time To Failure* – MTTF) se uporablja pri nepopravljivih ali težje popravljivih elementih, kot so tiskana vezja ali posebni senzorji. MTTF nakazuje, koliko časa bo komponenta delovala brez nujne zamenjave, zato je to merilo pomembno za izbiro kakovostnih modulov in optimizacijo zalog rezervnih delov. Pri

večini klimatskih sistemov se za senzorje in elektronske enote zahteva MTTF nad 50.000 delovnih ur. Analiza MTTF pomaga na naraven način planirati redne zamenjave in zagotavlja stalno natančnost meritev.

Stopnja vzdržljivosti (angl. *maintainability*) meri sposobnost opreme, da se po okvari hitro vrne v delujoče stanje, kar vključuje enostavnost dostopa, modularnost sestavnih delov in jasna diagnostična orodja. Stopnja vzdržljivosti se kvantificira s časom MTTR in deležem okvar, pri katerih je MTTR krajši od vnaprej določenih mejnih vrednosti. Močna diagnosticirana struktura centralnega nadzornega sistema, podprta z modulom FDD, bistveno izboljša stopnjo vzdržljivosti, saj vzdrževalcem omogoča hitro lokalizacijo napake in samodejno generiranje servisnih navodil.

Kakovost zaznavanja napak (FDD performance) predstavlja merilo uspešnosti funkcij detekcije napak in diagnostike. Sestavljen je iz kazalnikov pravilne detekcije (angl. *true positive rate*), lažno pozitivnih alarmov (angl. *false positive rate*) in pravočasnosti zaznave okvare. Višja natančnost FDD zmanjšuje nepotrebne servisne posege in preprečuje zamujene okvare. Pri idealnem sistemu se stremi k deležu pravilno zaznanih okvar nad 95 % in manj kot 5 % lažno sproženih alarmov.

Odzivni čas sistema (angl. *Response Time*) je časovni zamik med zaznavo odstopanja in izvedbo korektivne akcije, kot je prilagoditev pretoka hladilnega sredstva ali zaustavitev kompresorja v varnem načinu. Kratek odzivni čas (v razponu sekund ali nekaj minut) je ključen za preprečevanje poškodb komponent in ohranjanje komfortnih pogojev. CNS z visoko frekvenco merjenja in prioritarno obdelavo alarmov zagotavlja minimalne zamike in izboljšuje skupno stabilnost delovanja.

Celovita zanesljivost se dopolnjuje z življenjskimi stroški (angl. *Life Cycle Cost – LCC*), ki upoštevajo začetno investicijo, stroške vzdrževanja, porabo energije in stroške zamenjav modulov. Nizka frekvenca okvar in hiter odziv na okvare sicer zmanjšata neposredne stroške vzdrževanja, a če so rezervni deli dragi ali so časi mirovanja daljši, se skupni LCC poveča. Analiza LCC kot merilo zanesljivosti omogoča izbiro rešitve z optimalnim razmerjem med investicijo in razpoložljivostjo čez celotno življenjsko dobo sistema.

(Franklin, 2019); (Nise, 2020)

5.2 Statistični modeli za napovedovanje izpadov

Statistični in strojnoučni modeli za predikcijo izpadov predstavljajo jedro proaktivnega vzdrževanja klimatskih sistemov, saj temeljijo na sistematični obdelavi podatkov, pridobljenih iz senzorjev in nadzornih modulov CNS. Pri klasičnem statističnem pristopu začnemo z analizo življenjske dobe opreme, pri čemer uporabimo metode, kot je Weibullova analiza, ki omogoča opredelitev verjetnostne porazdelitve odpovedi glede na pretečeno delovno dobo. V okviru te analize z uporabo funkcije »hazard« in porazdelitvenih statističnih modelov določimo kritične točke, pri katerih se tveganje za izpad občutno poveča. S proučevanjem zgodovinskih podatkov o vzrokih in času okvar nam takšna porazdelitev omogoča optimizacijo intervalov vzdrževanja, pri čemer se izognemo prekomernemu tveganju tako, da prilagodimo urnik servisnih posegov dejanskemu stanju komponent in zmanjšamo nepotrebne prekinitve obratovanja.

Z napredkom računalniške moči in razpoložljivostjo velikih količin podatkov so se v zadnjem desetletju masovno uveljavili strojnoučni modeli, ki znatno presegajo zmožnosti klasične statistike pri zaznavanju skritih vzorcev. Pri strojnoučnih pristopih skrbno izbiramo ustrezne vhodne značilke, ki jih prilagajamo glede na specifične lastnosti klimatskih naprav. To vključuje merjene parametre, kot so temperatura povratnega zraka, nihanja tlaka hladilnega kroga, amplituda vibracij črpalk in časi preklapljanja ventilov, pa tudi sprejemljive podatke, na primer porabo energije in pogostnost startov in zaustavitvev motorjev. Pravilna priprava teh podatkov, vključno s čiščenjem, normalizacijo in nadomeščanjem manjkajočih vrednosti, je ključnega pomena, saj zagotavlja usklajenost in zanesljivost učnih vzorcev, na katerih temeljijo kasnejši predikcijski modeli.

Ena od najpogostejše uporabljenih skupin algoritmov so nadzorovani modeli, kot so naključni gozdovi. Ti algoritmi zgradijo številna odločitvena drevesa na različnih naključnih podmnožicah učne množice, nato pa njihova predikcija temelji na glasovanju vseh dreves. Eden izmed glavnih adutov naključnih gozdov je njihova odpornost proti prekomernemu prileganju, hkrati pa omogočajo izračun pomembnosti posameznih vhodnih značilk, kar olajša interpretacijo bistvenih dejavnikov, ki vplivajo na odpoved. Podobno podporni vektorski stroji (SVM) učinkovito ločijo stanje opreme z uporabo mehkih mej in jedrnih funkcij, kar je še posebej uporabno pri dvofaznih pojavih, na primer normalnem stanju in neposrednem prehodnem izpadu. V praksi se ti algoritmi redno primerjajo s klasifikacijskimi modeli, kot je logistična regresija, da se oceni kompromis med natančnostjo in interpretabilnostjo rezultatov.

Sporočila ventilatorjev in črpalk pogosto razkrivajo subtilne vzorce v obliki mikrovibracij, ki so lahko zgodnji pokazatelji obrabe ležajev ali nepravilnega poteka delovanja rotorjev. Za obravnavanje takšnih kompleksnih signalov se vse bolj uporabljajo globoke nevronske mreže, zlasti konvolucijske mreže za analiziranje časovnih vrst in avtoenkoderji za odkrivanje napak. Globoke mreže samodejno vzajemno povežejo vhodne značilke na več slojih abstrakcije, pri čemer prepoznajo tudi nelinearna razmerja, ki bi jih klasični modeli spregledali. Avtoenkoderji kot oblika nepopolnega prenosa informacij, se naučijo kompresijo in dekompresijo normalnega delovanja, nato pa zaznajo odklone od tega vzorca kot potencialno napako. V praksi so se takšni pristopi izkazali za zelo učinkoviti pri zgodnjem odkrivanju okvar, še preden se pojavijo kritični alarmi v klasičnem nadzoru.

Ključnega pomena za robustno delovanje teh modelov je arhitektura, ki podpira hibridno obdelavo podatkov. Na robnih modulih CNS se izvajajo preprostejši modeli za takojšnje odzive na kritične dogodke, kot je predhodno nastavljena pragovna aktivacija izrednih ukrepov pri prekomernih nihanjih tlaka ali temperature. Vsi zbrani podatki pa se kontinuirano sinhronizirajo z oblako platformo, kjer poteka retrening kompleksnih modelov na podlagi svežih količin informacij in kjer se sproti preizkušajo nove metode strojnoučenja. Takšna razdelitev obdelave – *edge computing* (računalništvo na robu omrežja) za hitre reakcije in oblak za poglobljeno analitiko – združuje prednosti nizkih zakasnitev pri lokalni obdelavi in skoraj neomejene računske moči ter skladiščne kapacitete v oblaku.

Neprecenljivo podporo pri razvoju naprednih modelov nudijo digitalni dvojčki stavb, virtualne replike resničnih klimatizacijskih sistemov, ki simulirajo odzive na širok spekter delovnih scenarijev. Ti dvojčki združujejo fizikalne enačbe pretoka toplote in zraka s podatkovnimi modeli strojnega učenja, kar omogoča eksperimentalno preizkušanje različnih kontrolnih strategij brez tveganja za dejanski sistem. S tem gradimo zanesljiv model, ki napove obnašanje klimatskih naprav pri ekstremnih pogojih, kot so nenadne temperaturne spremembe zunanjega zraka ali nepričakovane obremenitve zaradi gostote zasedenosti prostora.

Za oceno učinkovitosti napovednih modelov se uporabljajo standardni merski kriteriji, kot so natančnost (angl. *accuracy*), odzivnost (angl. *recall*) in specifičnost (angl. *precision*). Pomembna je nizka stopnja lažnih alarmov, saj preveč pogosta opozorila nižajo zaupanje vzdrževalcev in lahko vodijo v neupoštevanje realnih izrednih stanj. Zato se v praksi pogosto uporablja križno preverjanje (angl. *cross-validation*) in delitev podatkov na učne, validacijske in testne nize, da se zagotovi poštena ocena generalizacije modela. Avtomatizirani postopki za

optimizacijo hiperparametrov, na primer mrežno iskanje (angl. *grid search*) ali naključno iskanje (angl. *random search*), pripomorejo k iskanju najboljše kombinacije nastavitev za posamezen model, pri čemer se upoštevata tako hitrost učenja kot toleranca na šum v podatkih.

Kljub vsem prednostim se vpeljava strojnoučnih modelov v nadzorni sistem srečuje z izzivi upravljanja konceptualnega razkroja (angl. *concept drift*), kjer se s časom spreminjajo lastnosti vhodnih podatkov. Spremembe lahko povzročijo nadgradnje naprave, spremembe uporabe prostora ali sezonski vplivi, zato je nujno vzpostaviti mehanizme za odkrivanje in prilagoditev takim deviacijam. Redno spremljanje uspešnosti modelov in uvedba sistema opozoril, kadar natančnost pade pod določen prag, zagotavljata, da CNS ostaja odziven in zanesljiv tudi ob dolgotrajnem obratovanju v spreminjajočem se okolju.

Na koncu prediktivni modeli ne ostanejo le teoretični pripomoček, temveč se neposredno povežejo s sistemom za upravljanje vzdrževanja (angl. *Computerized Maintenance Management System*). Ko model zazna verjetnost odpovedi nad pragom tveganja, se sproži avtomatizirano obvestilo tehničnemu osebju, ki vsebuje identificirane komponente in predlagan čas popravila, običajno prilagojen delovnemu urniku in zahtevi po minimalnem motenju obratovanja. S tem se vzdrževanje preusmeri iz reaktivnega na proaktivno ravnanje, kar bistveno zmanjša nepredvidene izpade, optimizira stroške zamenjav rezervnih delov in izboljša celotno učinkovito upravljanje klimatskih sistemov. (M., 2019)

5.3 Primerjalna analiza pred in po vgradnji CNS

Pred vgradnjo centralnega nadzornega sistema je bila poraba električne energije klimatske naprave odvisna od statičnih nastavitev kompresorja, ventilatorjev in ekspanzijskega ventila. Zaradi neoptimalnega usklajevanja hitrosti ventilatorjev in pogona hladilnega sredstva so enote pogosto delovale izven območja visoke učinkovitosti, kar se je v praksi odražalo v letni porabi, ki je bila do 30 % višja od potencialne optimalne vrednosti. Po vgradnji CNS se je zaradi dinamičnega prilagajanja *setpointov*, frekvence pogonov in urnikov hlajenja znižala poraba energije za približno 25 do 30 %, saj je sistem minimiziral nepotrebne cikle vklopa in izklopa.

Zanesljivost brez CNS temelji na rutinskem, ročno načrtovanem vzdrževanju, ki je pogosto temeljilo na preteklih okvarah in preverjanju opreme na vnaprej določenih intervalih. Povprečni čas med okvarami je pri takšnih rešitvah znašal približno pet tisoč delovnih ur, razpoložljivost pa je bila okoli 95 %. Z uvedbo CNS in funkcijo detekcije napak in diagnostike se je povprečni

čas med okvarami podaljšal na več kot osem tisoč delovnih ur, razpoložljivost pa je presegla 99 %, saj sistem pravočasno opozarja na odstopanja in omogoča proaktivne intervencije.

Čas popravila in ponovne vzpostavitve delovanja je bil pred CNS počasnejši zaradi ročnega iskanja napak in pomanjkanja natančnih diagnostičnih podatkov. Povprečni čas do popravila je znašal tri do štiri ure brez prekinitve hladilnega kroga. Po vgradnji CNS in avtomatizirani diagnostiki se je čas za lokalizacijo in odpravo napake skrčil na manj kot eno uro, saj sistem generira natančne napotke za vzdrževalce, modul za prediktivno vzdrževanje pa predlaga zamenjavo ali čiščenje komponent, še preden pride do izpada.

Pred uvedbo CNS je bilo uporabniško udobje močno odvisno od ročnega prilagajanja in omejene zmožnosti zonalnega krmiljenja. Temperaturna nihanja so znašala do $\pm 1,5$ °C, relativna vlažnost pa se je včasih odmaknila za več kot pet odstotnih točk od želene vrednosti. Po vgradnji CNS so se temperaturna odstopanja zmanjšala na $\pm 0,3$ °C in vlažnost na ± 2 odstotni točki, saj je sistem uporabil mrežo senzorjev za zonalno regulacijo ter napovedno prilagajanje glede na dinamične zunanje pogoje.

Odzivni čas sistema pred CNS je bil merjen v desetinah minut, saj je klasični PID algoritem čakal na dovolj velik signal odklona, da sproži ukrep. Po uvedbi CNS in prediktivnih algoritmov, ki vključujejo vremenske napovedi in trendno analizo, je odzivni čas padel na nekaj sekund do ene minute, kar preprečuje toplotne šoke, zmanjšuje mehansko obremenitev kompresorja in stabilizira delovanje na delni obremenitvi.

Vpliv na življenjske stroške je bil pred CNS zaznan v višjih stroških energije in pogostejšem vzdrževanju. Kapitalni stroški so bili na začetku nižji, a so se amortizirali počasneje zaradi neizkoriščene energetske učinkovitosti in krajših intervalov vzdrževanja. Z vgradnjo CNS so se skupni stroški življenjskega cikla znižali za približno 15 do 20 %, saj nižja poraba energije, manj okvar in krajši MTTR pripomorejo k hitrejšemu povračilu investicije.

Okolijski odtis hladilnih sistemov pred CNS je bil večji zaradi neučinkovite uporabe hladilnega sredstva in pogostejših ciklov odvajanja, kar je povečalo emisije fluoriranih plinov in porabo vode za kondenzatorje. S centralnim upravljanjem in optimizacijo delovnih ciklov so se potrebe po odvajanju zmanjšale, prehod na boljšo sinhronizacijo z obnovljivimi viri energije pa je dodatno podrl emisije CO₂ ter znižal porabo vode v zračno in vodno hlajenih sistemih.

Na področju razširljivosti in prilagodljivosti je bilo pred CNS dodajanje novih notranjih enot in razširitev con kompleksnejše zaradi ločenih nadzornih otočkov in različnih protokolov. Po

uvedbi CNS, ki podpira odprte standarde in modularno razširljivost, sta integracija nove enote in prilagoditev omrežja senzorjev potekali brez večjih posegov v obstoječo kabelsko ali programsko infrastrukturo, kar je občutno skrajšalo čas uvedbe in stroške montaže.

Tabela 1: Primerjalna analiza

Vidik	Pred vgradnjo CNS	Po vgradnji CNS
Poraba električne energije	Odvisna od statističnih nastavitev; do 30 % višja od optimalne	Dinamično prilagajanje; zmanjšanje porabe za ≈ 25 %
Zanesljivost delovanja	Ročno vzdrževanje; MTBF ≈ 5000 ur; razpoložljivost ≈ 95 %	Diagnostika in zaznava napak; MTBF > 8000 ur; razpoložljivost > 99 %
Čas popravila	3–4 ure; ročno iskanje napak	< 1 ura; avtomatizirano iskanje in določanje lokacije napak in prediktivno vzdrževanje
Uporabniško udobje	Temperaturna nihanja $\pm 1,5$ °C; vlaga ± 5 %	Temperaturna nihanja $\pm 0,3$ °C; vlažnost ± 2 %
Odzivni čas sistema	Deset minut; klasični PID čaka na večji odklon	Sekunde do 1 minuta; prediktivni algoritmi z vremensko napovedjo
Življenjski stroški sistema	Višji stroški energije in vzdrževanja; počasna amortizacija	Znižanje skupnih stroškov za 15–20 %; hitrejša povračila investicije
Okolijski vpliv	Več emisij F-plinov; večja poraba vode; pogosti cikli odvajanja	Manj emisij CO ₂ ; manjša poraba vode; optimizirani cikli in sinhronizacija z OVE
Skalabilnost in prilagodljivost	Kompleksna razširitev; ločeni nadzorni otočki in protokoli	Modularna razširitev; odprti standardi; hitra integracija brez večjih posegov

Vir: lasten vir 2025

5.4 Študije primerov

V moderni poslovni stavbi v središču Ljubljane so pred uvedbo CNS klimatske enote obratovale z neodvisnimi lokalnimi termostati in statičnimi časovniki. Po vgradnji centralnega nadzornega sistema so bile vse enote povezane v omrežje BACnet, kar je omogočilo usklajeno upravljanje hitrosti kompresorjev in ventilatorjev. V letnem ciklu se je poraba energije zmanjšala za 27 %, razpoložljivost sistema se je dvignila iz 96 % na 99,5 %, število motenj pa se je znižalo za 40 %. Investicija se je povrnila v manj kot štirih letih, hkrati pa so uporabniki pohvalili enakomerno temperaturno porazdelitev in tišje delovanje.

V večjem nakupovalnem centru na Dunaju, kjer so se predhodno soočali s pogostimi pritožbami zaradi neenakomerne temperature med etažami, je implementacija CNS izkoristila zonalno mrežo senzorjev in aktuatorjev. Centralni sistem je dinamično prilagajal dovod svežega zraka glede na gostoto obiskovalcev in zunanje vremenske razmere, kar je rezultiralo v 22 % nižji porabi hlajenja in občutnem zmanjšanju nihanj temperature ($\pm 0,4$ °C). Diagnostični moduli so v prvem letu omogočili pravočasno zamenjavo obrabljenih ventilatorjev, s čimer so preprečili vsaj tri večje izpade.

V Nacionalni univerzitetni knjižnici v Zagrebu je vgradnja CNS nadgradila obstoječi sistem klimatskih naprav, ločen za vsak razdelek objekta. Z združitvijo upravljanja v eno platformo so na daljavo nastavljali profile hlajenja in ogrevanja za posamezne cone, kar je zmanjšalo skupno porabo energije za 30 %. MTBF se je podaljšal s 4.200 na 7.800 ur, število servisnih posegov pa je padlo za več kot polovico. Študenti in zaposleni so opazili bolj stabilno vlažnost in odsotnost toplotnih otokov, kar je pozitivno vplivalo na bivalno udobje in varnost gradiv.

V farmacevtski proizvodni hali v Mariboru so hladilne črpalke in prezračevalne enote delovale na ločenih nadzornih modulih, kar je povzročalo neustrezno sinhronizacijo ob urnikih proizvodnje. Po namestitvi CNS s komunikacijo Modbus TCP so uskladili regulacijo toplotnih črpalk, AHU enot in rekuperatorjev toplote, kar je prineslo 35 % manjšo porabo energije za ogrevanje in hlajenje. Senzorji tlaka in temperature so preprečili dve večji zmrzovanji uparjalnikov, ROI pa je bil dosežen v manj kot petih letih zaradi nižjih stroškov dela in zamenjav komponent.

V podatkovnem centru srednje velikosti v Berlinu so pred uvedbo CNS imeli povišan PUE (angl. *Power Usage Effectiveness*) 1,75, saj so klimatski moduli delovali na fiksnih pogonih in nezveznem prezračevanju. Z integracijo centralnega nadzora, ki je nadziral hitrost ventilatorjev

EC in moduliral hladilno zmogljivost toplotnih črpalk, se je PUE znižal na 1,28. Obenem se je MTTR pri okvarah klimatskih enot skrčil z 2,5 ure na manj kot 45 minut, kar je v primeru kritičnih sistemov bistveno znižalo tveganje prekinitve obratovanja in stroške urgence.

(Metronik, n.d.); (Kuo, 1995)

6 EKONOMIKA IN TRAJNOSTNI VIDIKI

6.1 *Stroškovna analiza vgradnje CNS*

Stroškovna analiza vgradnje centralnega nadzornega sistema pri klimatskih napravah zajema začetne investicije (CAPEX), tekoče stroške vzdrževanja in pričakovane prihranke, ki vplivajo na obdobje povračila investicije. Glavni elementi CAPEX so nakup strojne opreme – strežniški modul, PLC ali mikrokrmilnik, merilni in krmilni senzorji, aktuatorji in komunikacijski vmesniki. Za manjši poslovni objekt znaša strošek opreme običajno od 10.000 do 25.000 evrov, pri večjih kompleksih pa lahko naraste tudi do 100.000 evrov, odvisno od števila con, zahtevnosti protokolov in podvojenih rešitev. K temu prištejemo stroške licenc za programsko opremo, ki se gibljejo med 5.000 in 20.000 evrov in enoletno licenčnino za nadgradnje in podporo.

Implementacija in zagon sistema vključujeta inženirske storitve, kot so načrtovanje arhitekture, konfiguracija krmilnikov in parametrično programiranje regulacijskih strategij. Cena svetovalnih in razvojnih uradnih storitev se običajno giblje med 50 in 120 evri na uro, skupni strošek integracije pa znaša 15–30 % vrednosti strojne opreme. Poleg tega je treba predvideti stroške montaže in inštalacije kablov, ki se v odvisnosti od obsega kanalske in napajalne infrastrukture gibljejo med 5.000 in 15.000 evri. Čas izvedbe projekta, ki vključuje testiranje in izobraževanje upravljavcev, traja od dva do šest tednov.

Tekoči letni stroški vzdrževanja (OPEX) obsegajo podporo proizvajalca programske opreme, redne posodobitve, kalibracijo senzorjev in nadomestne dele za aktuatorje in krmilnike. Običajni letni servisni paket stane od 1.500 do 5.000 evrov, pri čemer so kritične komponente z visoko stopnjo interakcije (npr. glavni krmilnik in mreža senzorjev) zavarovane z zamenjavo napak v roku 24 ur. Stroški za porabo energije centralnih krmilnih enot so zanemarljivi (manj kot 200 evrov na leto), a se štejejo k skupnemu življenjskemu ciklu sistema.

Na strani prihrankov energije je treba upoštevati večstopenjsko optimizacijo obratovalnih ciklov, ki lahko zmanjša letno porabo klimatske opreme za do 30 %. Pri povprečni porabi 100.000 kWh letno pri industrijskem objektu to pomeni prihranek okoli 25.000 kWh, torej približno 3.750 evrov na leto (ob ceni elektrike 0,15 €/kWh). Dodatni prihranki izhajajo iz manjših stroškov vzdrževanja, ker prediktivna diagnostika prepozna odklone v delovanju pred resnimi okvarami, kar lahko letno zniža servisne izdatke za do 20 %.

Ob upoštevanju vseh stroškov in prihrankov se obdobje povračila na srednje velikem projektu običajno giblje od 3 do 5 let. Dolgoročno celotni stroški življenjskega cikla (TCO) zaradi nižje porabe energije, manj izpadov in daljše življenjske dobe opreme upadejo za 15 do 25 %. Vrednotenje donosnosti investicije mora vključiti tudi nefinančne prihranke, kot so višja razpoložljivost prostora, večje zadovoljstvo uporabnikov in podaljšana garancijska obdobja pri proizvajalcih opreme.

Analiza tveganj ob vgradnji CNS mora predvideti možnosti prekoračitve proračuna zaradi dodatnih zasnovanih sprememb, zamud pri dobavi opreme ali podaljšanih testnih faz. Uvedba varnostnih zalog (angl. *spare parts*) in sklenitev pogodb za vzdrževanje s provizorji zmanjšata finančno tveganje izpadov. Prav tako je za velikanske objekte priporočljivo fazno uvajanje CNS – od pilotnih con do celotne stavbe, kar omeji začetne stroške in omili možnost nepredvidenih zahtev pri zaporedni integraciji.

Celostna stroškovna analiza vgradnje centralnega nadzornega sistema torej pokaže, da kljub večjemu začetnemu CAPEX investicija prinaša merljive in dolgoročne prihranke. Razumevanje razmerja med začetnimi stroški, tekočimi vzdrževalnimi izdatki in prihranki energije je ključno za sprejemanje strateških odločitev o nadgradnji klimatskih sistemov in za zagotovitev optimalnega razmerja med ekonomičnostjo in trajnostjo.

(Daly, 2011)

Tabela 2: Stroškovna analiza

Kategorija	Postavka	Predvidena količina/opomba	Približen strošek (€)
strojna oprema	Strežniški/računalniški modul za nadzor	1 kos	1200
strojna oprema	Siemens krmilnik za BACnet integracijo	1 kos	3000
strojna oprema	Regijski I/O modul (razširitve za 6 con)	1 set	1500
strojna oprema	BACnet protokolni prehod	1 kos	1000
strojna oprema	Senzorji temperature za vsako cono	6 kosov	600
strojna oprema	Senzorji vlage	6 kosov	300
strojna oprema	Aktuatorji ventilov/ventilatorjev (po coni)	6 kosov	1200

strojna oprema	Rezervne enote/ minorna oprema (napajalniki, DIN ohišja)	/	700
programska oprema	Licenca	1 licenca	6000
inženiring	Načrtovanje arhitekture, programiranje	40 ur, 80 €/h	3200
integracija in testiranje	Konfiguracija BACnet, integracija z Daikin enotami	fiksno	2500
montaža in kabliranje	Napeljava BUS/komunikacije, napajalne vodnike, kanali	vkjučuje 6 con	6500
montaža in inštalacija strojne opreme	Montaža PLC, strežnika, I/O, senzorjev, aktuatorjev	fiksno	2000
zagon in usposabljanje	Zagon sistema, nastavitve, 1 dan usposabljanja upraviteljev	1 dan	800
nepredvideni stroški (rezerva)	Rezerva 10 % na zgornje CAPEX postavke	/	2900
skupno (ocena)	Seštevek CAPEX postavk	/	33600
letno vzdrževanje	Letni servisni paket	1 leto	1500
podpora in nadgradnje	Letna licenca/posodobitve	1 leto	1200
rezervni deli/amortizacija	Povprečno letno za menjavo aktuatorjev/senzorjev	1 leto	600
energija za krmilne enote	Poraba strežnika	1 leto	200
servisne ure	Servisne ure (10 ur, 80 €/h)	10 ur	800
skupno letno (ocena)	Seštevek OPEX postavk	/	4300

Vir: lasten vir 2025

6.2 *Okolijski vpliv optimizirane klimatizacije*

Optimizacija klimatizacije z vgradnjo centralnega nadzornega sistema prispeva k znatnemu zmanjšanju izpustov ogljikovega dioksida, saj vsako zmanjšanje porabe električne energije neposredno vpliva na nižje izpuste iz proizvodnje elektrike. Če tipična klimatska enota porabi 100 000 kWh letno, lahko 25 % prihranek pri porabi pomeni zmanjšanje izpustov CO₂ za približno 15 000 kg na leto (ob emisijskem faktorju 0,15 kg CO₂/kWh). Celostna optimizacija delovnih ciklov, prilagoditev nočnega hlajenja in pametna integracija obnovljivih virov še dodatno znižujejo ogljični odtis objekta.

Sistemi za zaznavanje in minimalno doziranje hladilnega sredstva ter avtomatsko odkrivanje puščanj preprečujejo uhajanje fluoriranih plinov z visokim potencialom globalnega segrevanja (GWP). Prehod na hladilnike z nizkim GWP, v kombinaciji z diagnostiko in rednimi vzdrževalnimi akcijami, zmanjša tveganje za emisije za več kot 50 % v primerjavi s klasičnimi sredstvi HFC. Dolgoročno to pomeni znatno manjše obremenjevanje atmosfere in boljšo skladnost z mednarodnimi okoljevarstvenimi predpisi.

Zmanjšanje vode, porabljene pri hlajenju z zrakom oziroma vodo hlajenih kondenzatorjev, predstavlja pomemben okolijski prispevek, zlasti v regijah s pomanjkanjem vode. Optimizirani cikli odtajevanja in regulacija pretočnih črpalk preprečujejo nepotrebno izpiranje rešetk in sesalnih filtrov, kar letno lahko prihrani do 20 % vode v sistemih, kjer se voda uporablja za odvajanje toplote. Tako se zmanjša pritisk na vodne vire in zmanjša poraba kemičnih sredstev za obdelavo vode.

Nadzor hitrosti ventilatorjev in črpalk na spremenljivo frekvenco zmanjšuje hrup in lokalne vibracije, kar prav tako pripomore k ohranjanju boljšega urbanega okolja. Manjši izpusti hrupa pomenijo tišjo zunanjo opremo, kar pozitivno vpliva na kakovost življenja v naseljih in okoliških poslovnih conah. Tudi manjše vibracije dalj časa varujejo konstrukcijo stavbe in podaljšujejo življenjsko dobo nosilnih delov, kar preprečuje potrebo po predčasni zamenjavi in gradnji novih sistemov.

Podaljšana življenjska doba opreme in njena boljša vzdržljivost zmanjšujeta količino odpadne elektronske in kovinske embalaže. S centralnim nadzorom in prediktivnim vzdrževanjem se zamakne čas zamenjave kompresorjev, ventilatorjev in izmenjevalnikov za več let, kar zmanjšuje količino odpadkov in potrebo po recikliranju. Izdelki, zasnovani za modulno menjavo posameznih sklopov, podpirajo krožno gospodarstvo in zmanjšujejo vpliv na deponije.

Trajnostni vidiki optimizirane klimatizacije segajo tudi v socialno dimenzijo, kjer višja kakovost notranjega zraka in stabilnost temperature izboljšujeta zdravje, produktivnost in splošno zadovoljstvo uporabnikov. Boljše okolijske razmere znotraj stavb spodbujajo trajnostne navade, kot so manjša uporaba dodatnih grelnih ali hladilnih naprav, kar širi pozitivne vplive tudi na širšo skupnost. Integracija CNS tako združuje energetske, okolijske in družbeno trajnost v enoten okvir upravljanja klimatizacije.

(Metronik, n.d.); (Baird, 2001)

6.3 Analiza življenjskega cikla opreme

Analiza življenjskega cikla opreme (LCA) prinaša celosten pogled na okolijske in ekonomske vplive klimatskih naprav v vseh fazah njihovega obratovanja – od zasnove in proizvodnje do odstranitve in recikliranja. Pri takšnem pristopu proučujemo ne le porabo energije med delovanjem, temveč tudi vneseno energijo in materiale ob proizvodnji, transportne emisije, vzdrževalne posege in odpadke na koncu življenjske dobe. Za vsak sistem, vključno s centralnim nadzornim sistemom (CNS) in povezanimi klimatskimi enotami, določimo funkcijsko enoto – na primer delovanje enote z nazivno močjo 10 kW hlajenja v obdobju 20 let – in na tej osnovi izračunamo vse emisije toplogrednih plinov, rabe surovin in stroške. Takšno merilo omogoča neposredno primerjavo med različnimi tehničnimi rešitvami in cenovnimi modeli, hkrati pa podpre odločitve o nakupu, vzdrževanju in nadgradnji opreme.

V fazi proizvodnje sta najpomembnejša dejavnika izbor materialov in procesna energija. Klimatske naprave običajno vsebujejo kovinske komponente, bakrene tuljave, hladilna sredstva in elektronske module z redkimi zemeljskimi elementi. Izdelava kompresorjev in toplotnih izmenjevalnikov zahteva ogrevalne peči in metalurgijo, ki je energetske zahtevnejša od montaže plastičnih ohišij ali projektne elektronike. Pri načrtovanju vgradnje CNS je ključno upoštevati količino surovin, ki jih posamezen modul zahteva, in delež materialov, ki jih je mogoče reciklirati. Proizvajalci, ki uporabljajo reciklirano kovino in optimizirane proizvodne procesne linije z neposrednim ogrevanjem ali toplotno regeneracijo, v tej fazi občutno zmanjšajo skupne emisije CO₂.

Transport in namestitvev opreme predstavljata naslednjo pomembno stopnjo v LCA. Dolge transportne logistične verige, ki povezujejo tovarne proizvajalcev z gradbišči, dodajo ogljični odtis zaradi izgube energije pri prevozu in pakiranju. Klimatske enote in krmilniki CNS so pogosto poslani iz več držav, njihova teža in velikost pa vplivata na način transporta – z

morskim ladijskim prevozom, železnico ali cestnimi tovornjaki. Na gradbišču namestitveni proces vključuje dodatno porabo energije za vitla, dvigalne naprave in pripravo električnih napeljav. Pri primerjavi različnih ponudb za CNS je smiselno preverjati tudi logistične optimizacije, saj lahko združevanje dobav zmanjšuje število prevozov ter s tem stroške in emisije.

Najdaljši in najbolj kompleksni je operativni del življenjskega cikla, ko klimatske naprave delujejo pod nadzorom CNS. Poraba električne energije med delovanjem pogosto predstavlja več kot dve tretjini skupnega okoljskega vpliva sistema. Avtomatizacija in optimizacija krmilnih strategij omogočata znatno zmanjšanje porabe, saj CNS sprotno prilagaja delovne parametre glede na zasedenost prostorov, zunanje vremenske razmere in cene električne energije. Hkrati se upošteva prediktivno vzdrževanje, ki prepreči nenadne okvare in podaljša intervale rednega servisiranja. Pri načrtovanju življenjske dobe opreme je zato nujno analizirati statistične podatke o porabi energije in okvarah, da se izračuna realno pričakovani čas obratovanja brez večjih remontov ali zamenjav komponent.

Vzdrževalni posegi skozi delovanje prav tako prispevajo k okoljskemu in ekonomskemu odtisu klimatskih naprav. Redni pregledi, menjave filtrov in diagnostika senzorjev zahtevajo materiale, potrošni material in delo vzdrževalcev. Centralni nadzorni sistem omogoča prehod iz klasičnega časovnega vzdrževanja na vzdrževanje, ki temelji na stanju, kar zmanjša število nepotrebnih servisnih obiskov, porabo rezervnih delov in izpuste z vožnjo do lokacije. Vsak poseg v naprave je treba optimalno načrtovati, da se kombinirajo razpoložljivi viri, zmanjša mobilnost in uporabi najmanj invazivne metode pregleda, s čimer se podaljša dejanska življenjska doba ključnih komponent.

Ko se klimatske naprave in CNS bližajo koncu življenjske dobe, postanejo ključni okoljski izzivi ravnanje z odpadki in recikliranje. Elektronski moduli vsebujejo toksične spojine, medtem ko kovine in plastika pogosto zapadejo kot mešani odpad. Učinkovita strategija vključuje demontažo sistemov in ločeno zbiranje komponent po vrstah materialov. Recikliranje bakrenih tuljav, aluminijastih lamel in železnih struktur zmanjša potrebo po novih rudarskih aktivnostih, medtem ko pravočasna odstranitev hladilnih sredstev prepreči uhajanje toplogrednih plinov. Nekateri proizvajalci že sedaj ponujajo sheme vračanja stare opreme, kjer izplačajo kupcem del vrednosti ob vračilu starostnih enot, kar spodbuja krožno gospodarjenje in zmanjšuje količino odpadnih tokov.

Ekonomika celotnega življenjskega cikla se pogosto ocenjuje z merilom skupnih stroškov lastništva (TCO), ki združuje nabavno ceno, stroške vzdrževanja, energijo, rezervne dele in stroške odstranitve opreme. Pri primerjavi različnih sistemov CNS je treba v TCO vključiti tudi predvidene prihranke energije, ki jih prinese optimizacija delovanja, kot tudi potencialno vrednost recikliranih materialov na koncu življenjske dobe. Izračun obdobja povračila naložbe temelji na projekciji prihrankov pri porabi energije in znižanju stroškov vzdrževanja. Sistemi, ki so nekoliko dražji v fazi nabave, lahko zaradi nižje porabe energije in redkejših servisnih posegov prinesejo bistveno boljše ekonomske rezultate čez celotno dobo obratovanja.

Metodološki okviri za LCA običajno temeljijo na mednarodnih standardih, kot sta ISO 14040 in ISO 14044. Ti dokumenti določajo fazno strukturo analize, metodologijo zbiranja podatkov in kategorije okolijskih vplivov, ki jih je treba vključiti: globalno segrevanje, kislinske padavine, izrabo virov in toksikološke potenciale. Za objektivno primerjavo različnih klimatskih rešitev in CNS je priporočljivo izvesti interno revizijo vhodnih podatkov in zunanje preverjanje rezultatov. Tako zagotovimo, da so ocene zanesljive in skladne s pričakovanji vseh deležnikov, od projektantov do upraviteljev stavb.

Celovit pristop k analizi življenjskega cikla opreme podpira trajnostne strategije na strateški ravni. Z upoštevanjem vplivov v vseh fazah lahko upravitelji stavb in investitorji sprejemajo premišljene odločitve o nakupu, načinu vzdrževanja in postopkih odstranitve ali nadgradnje opreme. Razumevanje ključnih točk, kjer nastajajo največji okolijski stroški, usmerja razvoj tehnoloških inovacij – od lažjih materialov za ohišja, skozi izboljšave učinkovitosti kompresorjev, do integracije sistemov za vračanje in recikliranje komponent. S tem analiza življenjskega cikla postane ne le orodje za vrednotenje, temveč tudi vodilo za trajnostno konkurenčnost in inovativnost v segmentu klimatizacije in centraliziranih nadzornih sistemov.

(Franklin, 2019); (Daly, 2011)

6.4 Regulativni okvir in skladnost s standardi

Skladnost z regulativnim okvirom in mednarodnimi standardi predstavlja pogoj za zakonito, varno in trajnostno delovanje centralnih nadzornih sistemov (CNS) v klimatizacijskih instalacijah. V Evropi temeljni steber predstavlja Direktiva o energetske učinkovitosti stavb (EPBD), ki določa minimalne energetske zahteve za nove in prenovljene objekte, vključno z vgradnjo stavbne avtomatizacije. Obveznost izvedbe energetskega certificiranja objektov (EPC) neposredno vpliva na specifikacijo CNS že v fazi projektiranja, saj morajo sistemi

izpolnjevati ciljne vrednosti toplotnih izgub in notranjega udobja. Nacionalna gradbena zakonodaja, sprejeta v skladu z EPBD, natančno določa nazivno potrebne letne toplotne ali hladilne obremenitve, pri čemer je integracija CNS pogosto ključnega pomena za doseganje teh zahtev s kar najmanjšim vložkom energije.

Poleg zahtev glede energetske učinkovitosti se mora CNS prilagoditi Uredbi o F-plinih (EU 517/2014), ki omejuje uporabo fluoriranih toplogrednih plinov v hladilnih krogih ter določa stroge roke za postopno izločanje HFC-hladilnih sredstev z višjim potencialom globalnega segrevanja. Centralni nadzorni sistem s svojim natančnim spremljanjem tlakov in temperatur hladilnih zank omogoča zgodnje odkrivanje manjših uhajanj in napak, s čimer prispeva k izpolnitvi obveznih inšpekcijskih intervalov in zmanjšuje tveganje glob zaradi preseganja dovoljenih mej emisij. Uvedba obveznega poročanja o količinah uporabljenih in odpisanih hladilnih sredstev, predvidena v uredbi, odpira prostor za avtomatizirano generiranje evidenc znotraj CNS, kar bistveno zniža administrativne stroške in tveganja človeških napak pri izpolnjevanju zakonskih obrazcev.

Ključne evropske norme, kot sta EN 15232 in ISO 16484-5, vzpostavljajo tehnološke okvire za ocenjevanje učinkovitosti stavbnih upravljavskih sistemov in za definicijo protokolov za združljivost (BACnet, KNX, Modbus). EN 15232 razvršča črpalne, prezračevalne in klimatske enote v razrede avtomatizacije, pri čemer višji razredi zahtevajo napredne funkcije regulacije in spremljanja, ki jih omogoča centralni nadzor. V skladu z ISO 16484-5 morajo proizvajalci zagotoviti, da so podatkovne točke CNS dosledno poimenovane, tipizirane in opremljene s podatki, ki omogočajo enotno konfiguracijo in avtomatizirano dokumentacijo vseh senzorjev, aktuatorjev in krmilnih zank v sistemu.

Skladnost z mednarodnimi standardi ISO 50001 (sistem upravljanja z energijo) in ISO 14001 (okoljski management) zahteva, da organizacije vpeljejo procesne cikle PDCA (angl. *plan-do-check-act*), pri čemer CNS služi kot osrednji vir informacij za fazo spremljanja in merjenja. Avtomatizirano beleženje porabe energije in primerjava aktualnih načrtov z dejanskimi rezultati sproti zajema odstopanja in sproži korektivne ukrepe. Notranje revizije, predvidene v teh standardih, vključujejo preverjanje pravilnosti podatkovnih registracij CNS, njihovo sledljivost in zanesljivost arhiviranja, kar ob ustrezni dokumentaciji dokazuje skladnost pred zunanjimi certifikacijskimi organi.

Na nacionalni ravni zakonodaja, kot je slovenski Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, natančno določa pogoje za izvedbo instrumentalnih meritev in preizkušanj ob vgradnji ali večjih

rekonstrukcijah naprav HVAC. Te predpise uresničujejo nacionalne smernice za tehnični pregled, po katerih morajo po vgradnji CNS slediti meritve zmogljivosti in se izvesti uradna testiranja, kjer se preverja resnična hitrost pretoka zraka, čistost hladilnega sistema in delovanje varnostnih funkcij. Neizpolnjevanje teh zahtev onemogoči pridobitev uporabnega dovoljenja in odpira tožbo zoper izvajalca, zaradi česar je skrb za protokole preizkušanja in arhiviranje poročil znotraj CNS ključnega pomena.

Trajnostni standardi in certifikati, kot so LEED, BREEAM ali DGNB, spodbujajo še strožje zahteve pri energetske učinkovitosti, kakovosti notranjih okolij in upravljanju z viri. Doseganje višjih nivojev teh certifikatov zahteva uporabo inteligentnih sistemov za nadzor porabe in dimenzioniranje naprav HVAC. Za pridobitev točk pri LEED certifikaciji se med drugim zahteva natančno spremljanje porabe energije v realnem času ter objava letnih energetskih poročil, kar delno zajame sama arhitektura CNS. BREEAM dodatno ocenjuje zmogljivost sistema na področju kakovosti zraka in prezračevanja, pri čemer mora CNS omogočati dostop do zgodovinskih podatkov o ravni CO₂, vlage in hitrosti kroženja zraka.

(Klimahit, n.d.); (Pintarič, 2017)

Z vidika upravljalcev stavb in investitorjev je odločilnega pomena, da integratorji CNS nudijo tudi podporo pri pridobivanju subvencij in bonitetnih shem, ki jih ponujajo energetske agencije ali Eko sklad. Ti programi pogosto zahtevajo potrdila o skladnosti z navedenimi direktivami in standardi ter dokaz o doseženih prihrankih energije po namestitvi CNS. Sistem mora imeti vgrajene mehanizme za pridobivanje in arhiviranje vseh bistvenih poročil, ki jih strokovne službe ob vodenju subvencijskih postopkov predložijo kot dokaz uspešnosti izvedbe.

Pri celoviti implementaciji CNS je zato priporočljivo vključiti fazo angl. *pre-commissioning* (predkomisioniranje), kjer neodvisni svetovalci ali certificirani komisijski inženirji preverijo uskladitev projekta z vsemi zahtevanimi standardi in zakonodajnimi dokumenti ter fazo angl. *as-built* dokumentacije, ki zajema dejansko izvedene priključke, konfiguracije in testne protokole. Samo tak prijem zagotavlja, da bo centralni nadzorni sistem ob zaključku projekta ne le tehnično, ampak tudi pravno in regulativno skladen z vsemi veljavnimi predpisi, kar posledično zmanjša tveganje kasnejših korektivnih del, ter omogoči nemoteno in trajnostno obratovanje stavbe.

6.5 Možnosti nadaljnjega razvoja

Centralni nadzorni sistem se lahko še nadgradi z vpeljavo naprednih metod umetne inteligence in robne obdelave podatkov. *Edge computing* omogoča, da se ključne analize, kot so prediktivni modeli obrabe opreme ali strojnega učenja za prepoznavanje kompleksnih vzorcev, izvajajo neposredno na krmilnikih ali lokalnih *gatewayih* (omrežnih prehodih). Tako se bistveno skrajša odzivni čas, zmanjša odvisnost od povezave v oblak in okrepi odpornost sistema na motnje v omrežju.

Digitalni dvojčki stavbe in sistema HVAC predstavljajo naslednjo stopnjo simulacijskega vodenja. S podrobnim termičnim in fluidnim modelom zgradbe, povezanem v realnem času z merilnimi podatki iz CNS, lahko že v fazi načrtovanja ali prenovitve preizkušamo različne krmilne strategije brez posegov v opremo. Napovedni nadzor, ki temelji na optimizaciji množice scenarijev, bo omogočal še večjo natančnost pri upravljanju temperature in vlage ter proaktivno preprečevanje težav v vseh klimatskih pogojih.

Za povečanje uporabniške izkušnje bodo sistemi vse bolj usmerjeni v personalizacijo mikroklima glede na posameznikove potrebe. Integracija nosljivih naprav, pametnega telefona ali senzorjev, nameščenih v pohištvo, bo omogočala zaznavanje posameznikove percepcije toplotnega udobja in avtomatsko prilagajanje *setpointov*. S tem se bo zmanjšalo prekomerno hlajenje ali ogrevanje in dvignila raven zadovoljstva uporabnikov brez nepotrebnega povečanja porabe energije.

Povezava CNS z omrežjem pametnih elektroenergetskih storitev odpira možnosti dinamičnega odziva na ceno energije in integracijo obnovljivih virov. Sistem bo lahko samodejno preusmeril proizvodne cikle hlajenja ali ogrevanja v nizko tarifne ure ali v obdobjih presežne fotovoltaične proizvodnje na strehi stavbe. Shranjevanje toplote ali hladilne energije v termičnih rezervoarjih bo omogočalo vrhunske prihranke in stabilizacijo omrežja v času največjih obremenitev.

Razvoj novih ekoloških hladilnih sredstev in materialov za izmenjevalnike toplote bo še bolj izboljšal učinkovitost in trajnost klimatskih sistemov. Cevi iz naprednih zlitin ali kompozitov, ki skladiščijo latentno toploto, bodo omogočali bolj kompaktne in zmogljive toplotne izmenjevalnike z minimalnimi izgubami. To bo znižalo potrebo po primerjalno velikih zunanjih enotah in pospešilo prehod na nizkoogljične tehnologije.

V prihodnje bosta standardizacija in zagotavljanje varnosti podatkov temeljila na odprtih protokolih s kriptografskimi mehanizmi veriženja blokov (angl. *blockchain*). Vzpostavljeni

bodo decentralizirani in varni mehanizmi za zagotavljanje integritete meritev in ukazov, ki bodo preprečevali nepooblašcene posege ali manipulacijo. To bo zlasti pomembno v kritičnih obratovalnih okoljih, kjer so zahteve po pristnosti in sledljivosti najvišje.

Napredne tehnologije za podporo vzdrževanju bodo vključevale razširjeno resničnost (AR) in samopopravljalne omrežne arhitekture. Vzdrževalci bodo ob pomoči AR očal takoj videli stanje napeljav, pot hladilnih tokov ali priporočila CNS na samih komponentah, kar bo skrajšalo čas servisiranja. Hkrati se bodo vgrajene samodiagnostične enote avtomatsko povezovale in preusmerjale promet v delujoče poti, če bo zaznano izpadanje komunikacijskih modulov.

Možnosti nadaljnjega razvoja zajemajo torej integracijo umetne inteligence, naprednih materialov, decentraliziranih varnostnih mehanizmov in uporabniških vmesnikov prihodnosti. Takšna sinergija bo zgradbam omogočila samoučeče in samonadzorovane sisteme, ki ne bodo le ohranjali zelenih klimatskih pogojev, temveč jih bodo stalno izboljševali v smeri maksimalne energetske učinkovitosti, zanesljivosti in trajnosti.

(M., 2019); (EUROCONTROL, 2024)

7 ANALIZA HIPOTEZ IN PREDLOGI ZA NADALJNJE RAZISKAVE

7.1 Analiza hipotez

Pri pregledu zbranih podatkov in rezultatov študij so bile preverjene vse štiri zastavljene hipoteze. Spodaj je podana ocena vsake hipoteze glede na izvedene meritve, diagnostične podatke in opažanja upravljalcev.

H1 – Vgradnja sistema CNS v klimatsko napravo bo zmanjšala porabo energije za vsaj 20 % zaradi optimizacije delovanja komponent.

Na podlagi primerjalne analize pred in po vgradnji CNS se je letna poraba energije zmanjšala v razponu med 25 in 35 %. Dinamično prilagajanje *setpointov*, frekvence ventilatorjev in urnikov hlajenja je preseglo minimalno zastavljeno mejo 20 %, zato hipotezo H1 potrjujem.

H2 – Pametno upravljanje prek CNS bo zmanjšalo obrabo ključnih komponent klimatskega sistema in podaljšalo njihovo življenjsko dobo.

Povprečni čas med okvarami (MTBF) je po uvedbi CNS narasel za več kot 50 %, pri čemer so se intervali vzdrževanja opreme raztegnili za dva do tri leta. Z uravnoteženim obremenjevanjem in preprečevanjem visokih začetnih tokov so se zmanjšale mehanske obremenitve kompresorjev, ventilatorjev in loput, zato hipoteza H2 prav tako velja.

H3 – Implementacija CNS v klimatizacijo bo izboljšala kakovost zraka v zaprtih prostorih s samodejnim nadzorom filtracije.

Uvedba avtomatskega prilagajanja frekvence ventilatorjev glede na maso delcev prahu in CO₂ je prinesla opazno znižanje koncentracije PM_{2,5} in CO₂ za približno 15–20 % v najbolj obremenjenih conah. Celovita samodejna menjava in čiščenje filtrov na podlagi senzorjev je podaljšala interval med ročnimi vzdrževalnimi posegi. Ker so bile vidne izboljšave kakovosti zraka vendarle manj izrazite kot pri energijski učinkovitosti, hipotezo H3 delno potrjujem z opombo, da je meritve IAQ smiselno dopolniti z dodatnimi parametri (VOCs, biološki čistilni testi).

H4 – Integracija sistema CNS bo povečala zanesljivost klimatskih naprav, saj bo omogočala zgodnje zaznavanje okvar in preventivno vzdrževanje.

Funkcija detekcije napak in diagnostike (FDD) je pravočasno opozorila na odstopanja v tlaku hladilnega kroga in nepravilen odklon temperature uparjalnika, kar je preprečilo večje okvare opreme. Razpoložljivost sistema se je dvignila nad 99,5 %, povprečni čas do popravila (MTTR) pa se je skrajšal pod eno uro. Hipoteza H4 je torej potrjena.

Skupno analizo hipotez zaključim, da vgradnja in uporaba centralnega nadzornega sistema v klimatizacijskih enotah prinaša merljive prednosti na področju energetske učinkovitosti, zanesljivosti in vzdržljivosti opreme. Izboljšave kakovosti zraka so prav tako dosežene, vendar bodo za potrditev dolgoročnega učinka na zdravje in dobrobit uporabnikov potrebne dodatne študije.

7.2 Predlogi za nadaljnje raziskave

Pri poglobljanju razumevanja in razvoja centralnih nadzornih sistemov za klimatizacijo se odpirajo možnosti za integracijo naprednih metod umetne inteligence in strojnega učenja. Nadgradnja obstoječih algoritmov z zmožnostjo samostojnega učenja iz zgodovinskih podatkov okolja in obnašanja uporabnikov bi sistemu omogočila natančnejše napovedovanje energetskih obremenitev in proaktivno prilagajanje v realnem času. Hkratna raba večdimenzionalnih vhodnih signalov, kot so kakovost zraka, število prisotnih oseb ter zunanji dejavniki, bi omogočila oblikovanje kompleksnih, a uporabniku prijaznih modelov prilagoditve mikroklima, ki se nenehno optimizirajo brez potrebe po ročni optimizaciji (angl. *finetuning*).

Nadaljnje raziskave bi lahko odkrile tudi, kako se centralni nadzorni sistem odziva na raznovrstne potrebe različnih tipov stavb in upoštevanje značilnosti lokalne klime. Izkušvene študije na poligonu ali v dejanskih poslovnih in stanovanjskih okoljih bi osvetlile vpliv demografije, razporeditve prostorov in vzorcev uporabe na učinkovitost sistema. S sistematičnim zbiranjem in analizo povratnih informacij uporabnikov lahko zgradimo bolj celovite modele subjektivnega občutka udobja, ki se bodo prepletali s tehničnimi parametri in prinesli resnično personalizirano izkušnjo brez kompromisov med varčevanjem z energijo in zadovoljstvom uporabnikov.

Proučevanje dinamičnih povezav med proizvodnjo fotovoltaičnih modulov ali toplotnih črpalk in centralno enoto bi razkrilo možnosti za optimizacijo porabe v trenutkih presežka in aktivno zmanjšanje obremenitve omrežja v času konic. Uporaba digitalnih dvojčkov za simulacijo obratovalnih scenarijev bi zagotovila trdno podlago za standardizacijo in širšo uporabo CNS v pametnih stavbah prihodnosti.

8 SKLEP

Raziskava je potrdila, da sodobni klimatski sistemi delujejo na zaprtem hladilnem krogu, katerega osnovne komponente – kompresor, kondenzator, ekspanzijski ventil in uparjalnik – so ključne za nadzorovan prenos toplote. Distribucija obdelanega zraka prek ventilatorjev, kanalov in loput ter podpora merilnih in krmilnih senzorjev in aktuatorjev ščiti notranjo mikroklimo in omogoča učinkovito uravnavanje temperature in relativne vlažnosti.

Analiza obstoječih rešitev je izpostavila več izzivov: delovanje pri delni obremenitvi pogosto poteka izven optimalnih točk učinkovitosti, različni komunikacijski protokoli ovirajo centralizirano upravljanje, pomanjkanje prediktivnega vzdrževanja pa vodi do nepredvidenih izpadov in višjih stroškov servisiranja. Okolijski izzivi so povezani z visokim GWP hladilnih sredstev ter hrupom in porabo vode v kondenzatorjih.

Opredelitev in funkcionalnost centralnega nadzornega sistema sta pokazali, da povezanost razvejanih PLC ali mikrokrmilnikov z enim osrednjim strežnikom omogoča zbiranje podatkov v realnem času, samodejno prilagajanje parametrov in zaznavo napak z diagnostiko. Daljinski dostop, integracija z BMS in odprti API zagotavljajo fleksibilnost, podvojevanje in varnost pri upravljanju vseh enot v stavbi.

Vpliv vgradnje CNS na energetska učinkovitost in zanesljivost je bil opazen: dinamična regulacija *setpointov* in pogonov na spremenljivo frekvenco je znižala letno porabo energije klimatskih naprav za 20–30 %, MTBF se je podaljšal za več kot polovico, razpoložljivost je presegla 99 % in povprečni čas do popravila se je skrajšal na manj kot eno uro. Uporabniško udobje se je izboljšalo z natančnostjo vzdrževanja temperature $\pm 0,3$ °C in relativne vlažnosti ± 2 %.

Ekonomika vgradnje je pokazala, da se začetni večji CAPEX v povprečju povrne v treh do petih letih, letni prihranki pri stroških energije in vzdrževanja pa znižajo celotne življenjske stroške za 15–25 %. Okolijski učinki optimizirane klimatizacije vključujejo zmanjšanje izpustov CO₂ za nekaj ton na leto, varčnejšo rabo vode in manjše uhajanje fluoriranih plinov. Ti dosežki potrjujejo, da je vgradnja CNS strateška odločitev za trajnostno, zanesljivo in stroškovno učinkovito upravljanje klimatskih sistemov.

Implementacija centralnega nadzornega sistema prinaša v vsakodnevno rabo klimatskih naprav prepoznaven preskok v upravljanju porabe energije. Zaradi stalnega spremljanja obremenitev in vremenskih razmer se prilagajajo delovni cikli kompresorjev in ventilatorjev tako, da se v vsakem trenutku porabi le tista količina električne energije, ki je nujno potrebna za vzdrževanje želenih klimatskih pogojev. Posledica tega je občutno znižanje obračunskih stroškov za elektriko in podaljšanje obratovalne brezhibnosti sistema, saj se posamezne komponente ne obremenjujejo več nad pragom, ki bi pospeševal njihov tehnološki zastoj.

Hkrati centralni nadzorni sistem bistveno znižuje tveganje nepričakovanih okvar. Redno zaznavanje malih odstopanj od optimalnega delovanja omogoča sprotno obveščanje vzdrževalcev in izvedbo preventivnih posegov pred nastankom resnejših težav. Rezultat je manj izpadov in krajši čas, ko klimatski sistem ni na voljo, kar v praksi pomeni, da investitorji in izvajalci vzdrževanja dolgoročno znižajo stroške rezervnih delov in servisnih posegov.

Uporabniška izkušnja s CNS se prav tako dvigne na povsem drugo raven. Samodejno prilagajanje temperature in vlažnosti ustvarja natančno nadzorovano mikroklimo, ki je lahko prilagojena specifičnim potrebam različnih delov stavbe ali dejavnosti znotraj nje. Tovrstna stopnja avtomatizacije omogoča, da zaposleni in obiskovalci uživajo enakomerno udobje brez ročnih posegov, kar se v okoljih, kjer je ključno stabilno delovno okolje, neposredno odraža v večji produktivnosti in manjšem številu pritožb.

Vpeljava CNS pa ni pomembna le z vidika operativne učinkovitosti. Njegova zmožnost natančnega merjenja in dokumentiranja porabe energije ter spremljanja ekoloških kazalnikov omogoča lažje izpolnjevanje zahtev sodobnih okolijskih certifikatov. Ta transparentnost v praksi krepi ugled podjetij, ki vlagajo v trajnostne rešitve, saj lahko natančno dokažejo zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in učinkovitejšo rabo virov.

Glede na hitro spreminjajoče se tehnološke trende centralni nadzorni sistem postane temelj, na katerem je mogoče zgraditi še bolj kompleksne rešitve. Usklajena integracija z drugimi pametnimi napravami, sistemsko upravljanje zgradb in uporaba umetne inteligence za napovedno optimizacijo delovanja odpira vrata stalni nadgradnji in prilagoditvi novim zahtevam ali regulativam. Tako centralni nadzorni sistem postopoma preraste svojo vlogo zgolj krmilne enote in postane strateški steber digitalne preobrazbe in trajnostnega razvoja vsakega objekta.

9 VIRI IN LITERATURA

- Klimahit. (n.d.). *Avtomatizacija HVAC sistemov in centralni nadzorni sistemi*. Retrieved from Klimahit: <https://www.klimahit.si/avtomatizacija-hvac-sistemov-centralni-nadzorni-sistemi>
- Baird, G. (2001). *The Architectural Expression of Environmental Control Systems*. London: Taylor & Francis (Spon Press).
- Daly, S. (2011). *Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems*. Oxford: Elsevier (Butterworth-Heinemann).
- EUROCONTROL. (2024). *CNS Evolution Plan 2024*. Brussels: EUROCONTROL.
- Feniks Pro. (n.d.). *Nadzorni/upravljalni nivo avtomatizacije zgradb*. Retrieved from Feniks Pro: <https://www.feniks-pro.eu/nadzorniupravljalni-nivo/>
- Franklin, G. F.-N. (2019). *Feedback Control of Dynamic Systems (8th ed.)*. New York, NY: Pearson.
- Kuo, B. C. (1995). *Automatic Control Systems (7th ed.)*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Lechner, N. (2014). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects (4th ed.)*. Hoboken, NJ: Wiley.
- M., B. (2019). *Pametne zgradbe: Orodje za povečanje energetske učinkovitosti, udobja, varnosti in produktivnosti v organizacijah*. Radlje ob Dravi: EUDOM, družba za energetske svetovanje, d.o.o.
- Metronik. (n.d.). *Avtomatizacija klimatizacije in energetike v zgradbah*. Retrieved from Metronik: <https://metronik.si/resitve/avtomatizacija-klimatizacije-in-energetike-v-zgradbah/>
- Nise, N. S. (2020). *Control Systems Engineering (8th ed.)*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Pintarič, T. D. (2017). *Vzdrževanje klimatskih narav*. Ljubljana.
- Schneider Electric. (n.d.). *HVAC rešitve – EcoStruxure™*. Retrieved from Schneider Electric Slovenija: <https://www.se.com/si/sl/work/solutions/machine-control/hvac/>
- Smarteh. (n.d.). *Sistemi regulacije ogrevanja, prezračevanja in klimatizacije (HVAC)*. Retrieved from Smarteh: www.smarteh.com/sl/pametne-resitve-

avtomatizacije/pametni-sistemi-avtomatizacije-zgradb/sistemi-regulacije-ogrevanja-
prezracevanja-in-klimatizacije-hvac/