

# ANALIZA REGULACIJSKIH SISTEMOV BIVALNEGA OKOLJA V STAVBAH

## ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS FOR BUILDING PERFORMANCE

asist. dr. Mitja Košir, univ. dipl. inž. arh.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija  
e-mail: mitja.kosir@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK: 699.8:681.5:620.92

**Povzetek** | Avtomatska regulacija stavbnega ovoja ter v stavbe vgrajenih naprav in sistemov omogoča aktiven in dinamičen način prilagajanja kvalitete notranjega bivalno-delovnega okolja v stavbah, hkrati pa predstavlja še neizkoriščeno področje možnih prihrankov energije. Kljub velikim naporom na področju varčevanja z energijo v graditeljstvu ostaja potencial uporabe avtomatskih regulacijskih sistemov v stavbah v veliki meri neizkoriščen. Razlogi za takšno stanje so večplastni in vsaj delno izvirajo iz nepoznavanja značilnosti in načinov izvedbe regulacijskih sistemov pri načrtovalcih stavb. Predstavljena analiza petih izbranih sistemov regulacije notranjega okolja v stavbah oriše osnovne značilnosti delovanja in zasnove le-teh. Sistemi, vključeni v pregled, obsegajo nabor eksperimentalnih aplikacij, razvitih v zadnjih 15 letih, ki temeljijo tako na konvencionalnih in uveljavljenih pristopih v regulacijski tehniki kot na naprednih »inteligentnih« načinih vodenja. Rezultati izvedene analize so pokazali možnost zmanjšanja porabe energije za ogrevanje in hlajenje stavb v obsegu 30 % ter zmanjšanja porabe električne energije za osvetljevanje do 50 % v primeru uvedbe avtomatske regulacije notranjega okolja. Primerjava zasnove in delovanja posameznih sistemov je dokazala upravičenost uporabe avtomatske regulacije v stavbah ter hkrati orisala osnovne smernice za razvoj ali aplikacijo podobnih sistemov v stavbah.

**Summary** | The automatic control of building envelopes and installed systems represents a highly dynamic way of indoor environment quality control. At the same time, such systems represent a large still untapped resource for reducing energy consumption in buildings. Despite of large efforts in the last few decades in the field of energy conservation in the built environment, the potential savings resulting from application of automatic control were not realized. Although the reasons for this are multiple, the fault is largely in the lack of necessary knowledge for their implementation among civil engineers and architects. The analysis of five selected systems for the holistic control of internal environment in buildings will present the main characteristics of their design and functioning. The selected systems are a representation of experimental efforts in the field for the last 15 years. Some of these systems are based on the conventional and well established control practices, while others utilise advanced »intelligent« control techniques. The executed analysis has shown the potential for reducing energy consumption of buildings for heating and cooling by 30 %, and energy consumption for artificial lighting by 50 % only by using appropriately designed automatic control system. The study results have justified the application of automatic control systems in buildings as well as stated basic guidelines in future development of experimental or commercial applications.

## 1 • UVOD

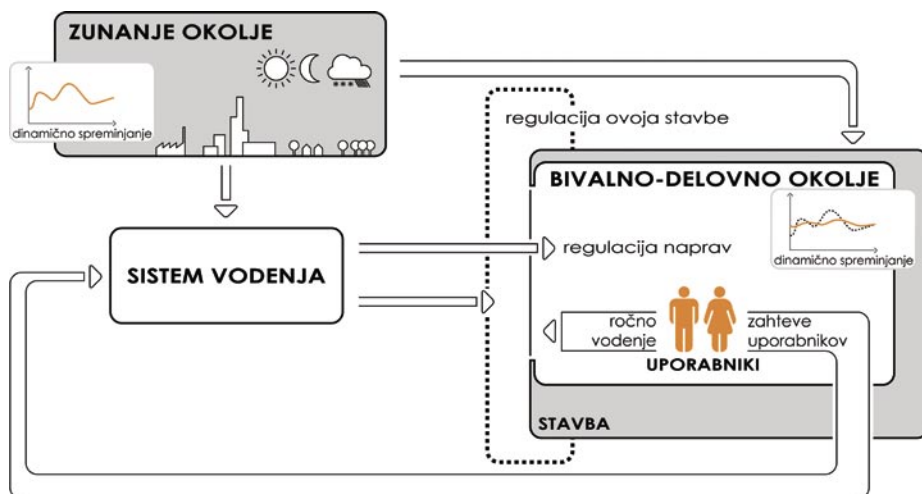
Avtomatska regulacija procesov je neločljivo povezana z razvojem človeške družbe in uporabljene tehnologije. Z višanjem zahtev ljudi (uporabnikov) po natančnosti, fleksibilnosti in hitrosti izvajanja tehnoloških procesov se neizbežno pojavlja vse večja potreba po avtomatskem vodenju le-teh. Prav tako uporaba avtomatizacije pogojuje večja kompleksnost tehnoloških sistemov in naprav, ki nas obkrožajo tako v industrijskih okoljih kot v vsakdanjem življenju (Zupančič, 2010). Pojavljanje potrebe po avtomatski regulaciji procesov v vsakodnevnem delovno-bivalnem okolju neposredno vpliva na način načrtovanja, izvedbe in vzdrževanja stavb. S pomočjo primerno uporabljene tehnologije vodenja je možno povečati stopnjo učinkovitosti, fleksibilnosti in odzivnosti stavbe kot celovitega sistema povezav med zunanjim in notranjim okoljem (Košir, 2008). Uporaba primerne avtomatske regulacije lahko izboljša kvaliteto notranjega okolja ter simultano omogoči večjo trajnost in boljšo energijsko učinkovitost stavbe. Kljub dokazanemu potencialu za prihranke pri energiji, porabljeni za delovanje stavbe ((Ruck, 2000), (Rubinstein, 1999)), in pozitivnih učinkih primerno reguliranega notranjega okolja na počutje in učinkovitost uporabnikov (Adner, 2003) stavb je uporaba avtomatske regulacije v stavbah relativno omejena. V večini primerov se uporablja le pri izoliranih sistemih ali elementih (npr. regulacija ogrevanja) brez celovite integracije s stavbo ali drugimi avtomatiziranimi sistemi. Tako prihaja do parcialnih aplikacij, kjer potencial holističnega obravnavanja prenosa energije, snovi in informacij med zunanjim in notranjim okoljem ni izkoriščen (Reinhart, 2003). Neusklajenost med posameznimi reguliranimi sistemi v stavbi, kot so recimo ogrevanje, avtomatsko senčenje in osvetljevanje, lahko pripelje do kontraproduktivnih medsebojnih interakcij, ki izničijo prednosti ali celo poslabšajo situacijo v primerjavi z nereguliranim delovanjem stavbe. Prav zaradi kompleksnosti in medsebojne povezave posameznih elementov delovanja stavbe je treba pristopiti k regulaciji le-te z gledišča (Kladnik, 1997), ki omogoča simultano obravnavanje ključnih elementov oblikovanja in regulacije notranjega okolja (Košir, 2008).

Povečana potreba po energijski učinkovitosti ter želja po izboljšanju delovnih in bivalnih razmer v stavbah sta v zadnjih 20 letih pri-

vedla do velikega števila raziskav na področju oblikovanja stavbnega ovoja in energijsko učinkovitih sistemov ogrevanja, prezračevanja, hlajenja in osvetljevanja. Posledično se je veliko rešitev že preneslo ali pa se prenaša v gradbeno prakso in zavest načrtovalcev in izvajalcev. Popolnoma drugače pa je s področjem celovitega obravnavanja nadzora stavbnega ovoja, vgrajenih sistemov in naprav, ki predstavlja slabo raziskano področje z velikim potencialom za izboljšanje delovanja stavb (Selkowitz, 2004). Že poskusi v ZDA v devetdesetih letih prejšnjega stoletja s preprostim sistemom uravnavanja umetne osvetlitve v odvisnosti od razpoložljive dnevne svetlobe v poslovni stavbi so pokazali potencialne prihranke 30–40 % pri porabi električne energije za svetila, najbližja oknom, in 16–22 % pri svetilih globlje v prostoru (Rubinstein, 1999). Potencialni pozitivni učinki pa se ne končajo pri dnevni osvetlitvi in posledičnem zmanjšanju porabe električne energije, ampak lahko s pravilnim integriranjem regulacije termičnih aspektov kratkovalovnega sončnega sevanja dosežemo tudi drastično zmanjšanje porabe energije za ogrevanje in hlajenje. Prav potreba po integriranem pristopu k regulaciji notranjega bivalnega okolja se je izkazala kot ključna v oblikovanju udobnejšega bivalno-delovnega okolja, ki hkrati omogoča znatne prihranke energije (Kraimer, 2008). Zato eksperimentalni in do neke mere tudi komercialni regulacijski sistemi ne pristopajo le k uravnavanju vizualnega ali toplotnega ugodja v notranjem okolju, ampak poskušajo

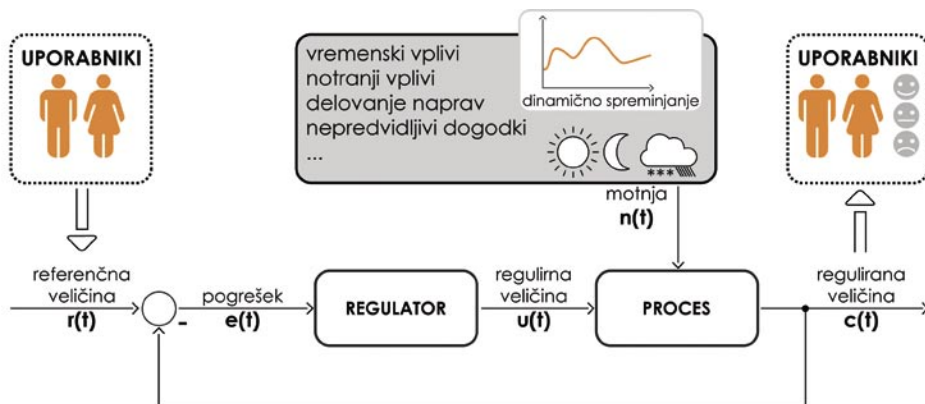
vzpostaviti sistem, ki zaobjame celoto kompleksnih interakcij vplivnih faktorjev. Slika 1 predstavlja koncept zasnove regulacijskega sistema notranjega okolja, ki glede na zahteve uporabnikov ter pod vplivom zunanjih danosti regulira delovanje stavbnega ovoja kot tudi vgrajenih naprav. S takšnim sistemom je omogočen dinamičen odziv notranjega okolja stavbe na spremembe v zunanjem okolju in/ali željah uporabnikov. Zaradi neprestanega spreminjanja pogojev delovanja sistema mora biti regulator zasnovan kot zaprtozančni regulacijski sistem (Slika 2), pri katerem povratna zanka omogoča korekcijo odstopanj, ki nastanejo kot posledica zunanjih vplivov.

Pregled osnovnih značilnosti izbranih eksperimentalnih regulacijskih sistemov notranjega okolja stavb, predstavljenih v pričujočem članku, je namenjen predstavitvi trenutnega stanja tehnike na obravnavanem področju, oceni upravičenosti takšnih sistemov ter postavitvi osnovnih izhodišč za nadaljnji razvoj. Pregledani sistemi vodenja notranjega okolja stavb pristopajo k obravnavanju problematike na različne načine ter predvsem z različno stopnjo kompleksnosti. Tako nekateri sistemi regulirajo le senčenje in s tem povezane termične procese (solarni pritoki) ali notranjo naravno in umetno osvetljenost, medtem ko drugi poizkušajo zaobjeti širši spekter regulacije notranjega okolja. Skupni imenovalac vseh predstavljenih sistemov je želja po celoviti obravnavi regulacije ter izboljšanju lastnosti notranjega okolja ob hkratnem zvišanju energijske učinkovitosti stavbe. Za analizirane sisteme je bila izvedena tudi kvalitativna primerjava na konceptualnem nivoju z namenom izpostaviti osnovne koncepte oziroma strategije posameznih sis-



Slika 1 • Konceptualna shema zasnove holističnega regulacijskega sistema notranjega okolja

temov ter tako ovrednotiti njihove prednosti in potencialne slabosti. Rezultati primerjave predstavljajo smernice in merila oziroma orientacijo za nadaljnji razvoj eksperimentalnih ali komercialnih aplikacij.



Slika 2 • Shematični prikaz zasnove tipičnega zaprtozančnega regulacijskega sistema

## 2 • PREGLED ZNAČILNOSTI IZBRANIH REGULACIJSKIH SISTEMOV

### 2.1 Izbor

Regulacijski sistemi, vključeni v pričujočo analizo, so bili izbrani na podlagi medsebojne primerljivosti, kar pomeni, da jih je možno primerjati vsaj na nivoju koncepta, če že ne glede na dosežene rezultate. Predstavljen pregled obsega sisteme izvedene v zadnjih 15 letih, začenši z enim prvih in zelo odmevnih sistemov avtomatske regulacije notranjega okolja, izvedenem v Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) leta 1997 (Lee, 1998). Skupna značilnost večine predstavljenih sistemov je uporaba naprednih »inteligentnih« regulacijskih pristopov, kot sta mehka logika in genski algoritmi (GA), v kombinaciji z uveljavljenimi regulacijskimi tehnikami (proporcionalno-integrirno-diferencirni – PID-regulatorji). Prednost uporabe naprednih regulacijskih tehnik je predvsem v lažji preglednosti in preprostosti opisa kompleksnega sistema regulacije notranjega okolja, oziroma če parafraziramo besede Dounisa (Dounis, 2000), gre pri regulaciji notranjega okolja za mehek problem, ki zahteva uporabo mehkih rešitev. V pregled vključeni sistemi so sledeči:

- **Primer 1:** Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) ((Lee, 1998), (Ruck, 2000), (Vine, 1998)),
- **Primer 2:** Laboratorij za elektroniko (LOE) tehniške univerze na Kreti (Kolokotsa, 2000, 2002, 2005),
- **Primer 3:** Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LESO-PB) ((Guillemin, 2003), (Guillemin, 2001, 2002)),
- **Primer 4:** KAMRA, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL

FGG) ((Kristl, 2007), (Trobec-Lah, 2005, 2006)),

- **Primer 5:** IRsNO, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG) ((Košir, 2008), (Košir, 2010)).

Poleg naštetih in v analizi obravnavanih sistemov je v literaturi možno zaslediti še več rešitev, ki pa regulirajo le posamezne parametre notranjega okolja, kot je uravnavanje osvetljenosti ((Park, 2011), (Onaygil, 2003), (Koo, 2010), (Reinhart, 2004)) oziroma ogrevanja in sistemov za klimatizacijo gretje in hlajenje (KGH) ((Singh, 1999), (Liang, 2007), (Dounis, 2000), (Calvino, 2004)).

### 2.2 Primer 1: Lawrence Berkeley National Laboratory

Osnovni cilj v LBNL razvitega sistema je bil preveriti vpliv avtomatske regulacije senčil, umetne osvetlitve in KGH-sistema na porabo električne energije za osvetljevanje in hlajenje pisarniških prostorov. Regulacijski sistem je bil preizkušen v dveh skoraj identičnih pisarnah florisnih dimenzij 3,71 m x 4,57 m s svetlo etažno višino 2,68 m (lokacija Oakland, Kalifornija). Pisarni sta imeli na krajši stranici vgrajeno jugovzhodno orientirano enojno zasteklitev v skupni površini 7,5 m<sup>2</sup>, na zunanji strani senčeno s fiksnimi žaluzijami z omogočeno rotacijo posameznih lamel. Notranost je bila opremljena z umetno razsvetljavo, aktivirano in regulirano glede na razpoložljivo količino dnevne svetlobe ter hlajena in ogrevana s KGH-sistemom. Spremljane količine notranjega okolja so bile temperatura zraka, horizontalna in vertikalna osvetljenost ter poraba energije.

Merjene količine zunanjega okolja so bile horizontalna osvetljenost, neposredno in difuzno sončno sevanje ter temperatura zraka.

Regulacija vseh sistemov v pisarni ni bila popolnoma integrirana, saj je bilo uravnavanje pozicije žaluzij in notranje umetne osvetlitve z možnostjo zatemnitve krmiljeno neodvisno od KGH-sistema, ta je bil reguliran z lastnim PID-regulatorjem. Naklon senčil je bil voden s pomočjo PID-regulatorja in osebnega računalnika, s katerim so bile povezane tudi luči, ki so se zvezno odzivale na količino razpoložljive dnevne svetlobe, za znane preko fotosenzorja na stropu. Kot rotacije lamel senčila je bil omejen na premike med 0° (horizontalna pozicija) ter 68°, ko je bilo senčilo zaprto, vendar je kljub temu prepuščalo difuzno svetlobo. Osnovno pravilo delovanja senčil v sončnem vremenu je bilo preprečevanje vdora neposrednega sončnega sevanja ter s tem pojava bleščanja in pregrevanja pisarne. V primeru oblačnega vremena so senčila v čim večji meri dovoljevala neposreden stik z zunanostjo. Učinkovitost delovanja sistema je bila preverjena na podlagi primerjave med pisarnama, pri čemer je bila v eni pisarni regulacija senčil aktivna, v drugi pa so ta bila fiksirana pod določenim kotom. V času testiranja sta v obeh pisarnah delovala samodejno vodena KGH-sistema in avtomatska zatemnilna osvetlitev. Ko je bila žaluzija v neregulirani pisarni v horizontalni ravnini (0°), so bili povprečni dnevni prihranki regulirane pisarne 21 % pri energiji za hlajenje ter 21 % pri električni energiji za razsvetljavo, pri čemer je bil nivo notranje osvetljenosti večino časa vzdrževan znotraj zaželenega razpona med 540 in 700 lx. V primeru 45° naklona ročno uravnavanih žaluzij so bili prihranki pisarne z avtomatsko reguliranim senčilom le 4 % za hlajenje ter 46 % za osvetljevanje.

Manjši prihranki pri ohlajevanju so posledica večjega naklona senčila, ki bolje senči notranjost pred direktnim sončnim sevanjem. Poudariti je treba, da so potencialni prihranki sistema pri energiji za razsvetljavo še večji, če se jih primerja s pisarno, ki nima razsvetljave z zvezno zatemnilno regulacijo, ampak le z dvopoložajnim stikalom (ON-OFF).

### 2.3 Primer 2: Laboratorij za elektroniko tehniške univerze na Kreti

Regulacijski sistem notranjega okolja, razvit v LOE tehniške univerze na Kreti, je bil zasnovan kot aplikacija za reguliranje toplotnega in vizualnega okolja ter kvalitete zraka v realnem pisarniškem okolju. Spremljane okoljske vrednosti so bile notranja in zunanja temperatura, povprečna sevalna temperatura, hitrost premikanja notranjega zraka, relativna vlažnost, koncentracija CO<sub>2</sub> in notranja osvetljenost v pisarni. Obravnavan regulacijski sistem je uporabljal vodenje z mehko logiko in adaptivno vodenje z genskimi algoritmi (GA). Delovanje sistema so primerjali z obstoječim regulacijskim sistemom zgradbe, z dvopoložajnim sistemom za ogrevanje in hlajenje in ročno regulacijo umetne razsvetljave. Osnovna arhitektura regulacijskega sistema je temeljila na uporabi sistema pametne kartice (smart card), programljivega logičnega krmilnika (PCL) in osebnega računalnika. Pametna kartica je delovala kot vmesnik med uporabniki in sistemom, saj je posredovala njihove preference glede karakteristik notranjega okolja v PCL, ta pa je izvršil potrebne spremembe stanja aktuatorjev. Osebni računalnik je spremljal delovanje sistema in izvajal adaptacijo mehkih pravil regulatorjev z GA.

Vhodne vrednosti regulatorja so bile PMV-indeks (predicted mean vote – indeks predvideva povprečen odziv velike skupine ljudi na toplotno okolje) (Fanger, 1972), zunanja temperatura, koncentracija in hitrost izmenjave CO<sub>2</sub> ter notranja osvetljenost. Tem vrednostim je regulator s pomočjo nabora mehkih pogojno posledičnih pravil predpisal ustrezne izhodne reakcije sistema. Sistem se je odzval z ogrevanjem ali hlajenjem, odpiranjem in senčenjem okna ter aktiviranjem umetne osvetlitve. Osnovne nastavitve mehkih regulatorjev so omogočale maksimalno izkoriščanje ukrepov pasivne solarne arhitekture (PSA), te pa so se prilagajale glede na želje uporabnikov. Takšen način optimizacije lahko pri nerazumnih zahtevah pripelje do izrazito energijsko neučinkovitega delovanja sistema. Strukturno je sistem bil deljen na toplotno in svetlobno regulacijsko

zanko. Pri toplotni zanki so bila regulacijska pravila oblikovana tako, da se za različne letne čase uporabljajo različni pristopi. Tako je bilo omogočeno odpiranje oken v času prehodnih letnih časov in s tem naravno hlajenje prostora. Poleti in pozimi pa so bila okna zaprta, kar zmanjšuje izgube pri ogrevanju in hlajenju. Toplotna regulacijska zanka je uporabljala tudi senčenje okna, s čimer se v poletnem času preprečujejo, v zimskem času pa omogočajo solarni pritoki. Svetlobna regulacijska zanka je v primeru zadostne količine naravne svetlobe preprečila aktivacijo umetne razsvetljave, nivo osvetljenosti pa uravnavala s senčenjem. Učinkovitost delovanja sistema je bila preverjena v odnosu do obstoječega regulacijskega sistema notranjega okolja stavbe. Testno obdobje je obsegalo čas od januarja do julija ter tako zaobjelo celoten spekter letnih časov. V primerjavi z obstoječim regulacijskim sistemom je bil dosežen 26,5 % prihranek energije za ogrevanje in 14 % prihranek energije za hlajenje, kar na letni ravni znaša 20,5 %. Največji prihranek je regulacijski sistem dosegel pri osvetljevanju, kjer se je poraba energije zmanjšala za 66 %. Visoki prihranki pri razsvetljavi so bili posledica uporabe ročne regulacije v referenčni pisarni.

### 2.4 Primer 3: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Sistem je bil razvit za reguliranje osvetljenosti, senčenja in ogrevanja individualne pisarne v stavbi LESO-PB. Za referenco je služila skoraj identična sosednja pisarna, opremljena z obstoječim regulacijskim sistemom ogrevanja. Pisarni sta bili florisnih dimenzij 4,75 m x 3,60 m in svetle etažne višine 2,80 m, zastekljeni na južni strani z oknom površine 5,75 m<sup>2</sup>, senčenim z zunanjim tekstilnim rolojem. Sistem je bil krmiljen preko osebnega računalnika, ki je komuniciral z aktuatorji in senzorji preko Lonworks™ bus s standardnim protokolom Dynamic Data Exchange. Regulatorji so bili osnovani na mehki logiki, za optimizacijo pripadnostnih funkcij pa so načrtovalci uporabili GA.

V odvisnosti od prisotnosti uporabnikov v pisarni je sistem prioriteto obravnaval regulacijo osvetljenosti (uporabniki prisotni) ali regulacijo ogrevanja (uporabniki odsotni). Pri reguliranju notranje osvetljenosti je sistem poleg sledenja referenčni vrednosti notranje zelene osvetljenosti prostora pri vodenju premikov senčila upošteval tudi zahteve zagotavljanja ugodnega vizualnega okolja z vidika bleščanja. Najprej je bila z namenom preprečevanja bleščanja določena maks-

imalna dovoljena odprtost senčila, nato pa je sistem uravnaval notranjo osvetljenost prostora znotraj te omejitve. Največja dovoljena odprtost senčila je bila določena s pomočjo upoštevanja položaja sonca glede na fasado stavbe, s čimer je bilo možno spremljanje nizkih vpadnih kotov sončnih žarkov, ki odločilno vplivajo na pojav bleščanja. V primeru le difuznega sončnega sevanja omejitve glede maksimalne odprtosti senčila ni bilo. Regulacija ogrevanja pisarne je temeljila na predpostavki, da skozi zasteklitev potekata dva mehanizma izmenjave toplote. Prvi je energijski dotok zaradi solarnih pritokov, drugi pa transmisijske toplotne izgube zaradi temperaturnih razlik med zunanostjo in notranostjo. Rezultat je bila določitev »zelenega energijskega razmerja okna«, ki v odvisnosti od letnega časa vpliva na regulacijo senčila. V principu je to pomenilo senčenje poleti in omogočanje solarnih pritokov pozimi. V prehodnih obdobjih je sistem uporabljal kombinacijo zimske in poletne regulacije. Podoben pristop je bil uporabljen tudi pri obeh sistemih, zasnovanih na UL FGG. Pri porabi energije za ogrevanje je v primerjavi z obstoječim regulatorjem ogrevanja stavbe sistem LESO-PB dosegel 25 % prihranek. Sledenje zelenemu nivoju notranje osvetljenosti je bilo doseženo v povprečju z 42 premiki senčila dnevno, s čimer so bila odstopanja omejena na sprejemljivo vrednost ± 230 lx. Poleg regulacije osvetljenosti je sistem preprečeval tudi pojavljanje bleščanja, kar se je odrazilo v skoraj popolnoma zaprtem senčilu pri nizkih vpadnih kotih sončnega sevanja.

### 2.5 Primer 4: KAMRA UL FGG

KAMRA je regulacijski sistem, ki je bil zasnovan na FGG za uravnavanje termičnih in vizualnih tokov skozi transparenten del testne celice z dimenzijami 1 m x 1 m x 1 m z južno orientiranim oknom površine 1 m<sup>2</sup>. Okno je imelo na zunanji strani vgrajeno avtomatizirano roletno, celica pa je bila opremljena z električnim grelnikom za ogrevanje ter ventilatorjem za omogočanje hlajenja. Majhen volumen in zelo veliko razmerje med prostornino celice in delom transparentnega ovoja sta omogočila hitro odzivnost sistema na zunanje razmere. Posledično se je celica v primerjavi z realno stavbo pod vplivi zunanjih vremenskih razmer zelo hitro ogrela in tudi ohladila. Regulacija je bila zasnovana kot kaskadni sistem s primarnimi mehkiimi in sekundarnimi konvencionalnimi PID-regulatorji. Upravljanje s PLC-jem je bilo izvedeno preko standardnega osebnega računalnika in



vmesnika, zasnovanega v SCADA Factory Link programskem okolju.

Regulator sistema KAMRA je bil deljen na svetlobno in temperaturno regulacijsko zanko. Strukturno gledano je bil sistem oblikovan hierarhično tako, da je bila regulacija osvetljenosti prioritarna, razen če je bilo drugače določeno. Razlog za takšno strukturo je v večji dinamiki sprememb nivoja osvetljenosti v primerjavi s spreminjanjem temperaturnih pogojev. Poleg individualnega delovanja toplotne ali svetlobne zanke je sistem omogočal tudi tako imenovani harmonizirani način delovanja, pri čemer sta sodelovali obe regulacijski zanki. Regulacijska zanka za osvetlitev je bila zasnovana tako, da je položaj rolete uravnavan s pomočjo primerjave med referenčno in dejansko osvetljenostjo celice. Podobno zasnovano je imela tudi temperaturna zanka, ki je glede na referenčno in izmerjeno temperaturo z upoštevanjem razpoložljivega zunanega sončnega sevanja določila položaj rolete. Regulacija notranjih termičnih pogojev celice je bila izvedena ločeno za zimski in poletni čas, v obdobju prehodnih mesecev pa je bil odziv sistema dosežen s kombinacijo obeh. Harmonizirano delovanje sistema je bilo izvedeno s pomočjo ločenega regulacijskega bloka, ki je omogočal preklap med termično in svetlobno regulacijo. Sistem je pri regulaciji notranje osvetljenosti sledil želeni vrednosti z odstopanji  $\pm 300$  lx, kar je bilo doseženo s povprečno desetimi premiki senčila na uro. Izvedeno je bilo tudi bolj natančno sledenje, kjer so bila odstopanja manjša od  $\pm 90$  lx, vendar z nesprijemljivo visokim številom premikov

senčila. Kljub pogostemu pregrevanju celice je bil sistem s pomočjo senčila v času prehodnih letnih časov sposoben vzdrževati notranje temperature za 1–4 K višje od zunanjih, kar je zaželen pojav v pomladno-jesenskem času.

## 2.6 Primer 5: IRsNO UL FGG

Integralen regulacijski sistem notranjega okolja oziroma IRsNO je bil razvit na osnovi izkušenj in spoznanj pridobljenih s sistemom KAMRA. Regulacijski sistem je bil zasnovan za uporabo v pisarni stavbe FGG, kjer je uravnaval osvetljenost, ogrevanje, hlajenje in prezračevanje, vezano na koncentracijo CO<sub>2</sub> v notranjem okolju. Pisarna je bila florisnih dimenzij 7,48 m x 4,93 m ter svetle etažne višine 3,88 m, na zahodni strani je bilo okno s skupno površino zasteklitve 11,40 m<sup>2</sup>. Okno je bilo z zunanje strani senčeno s šestimi avtomatiziranimi žaluzijami, prezračevanje zagotovljeno z motoriziranim odpiranjem okna, hlajenje in ogrevanje pa s stropnimi nizkotemperaturnimi radiacijskimi paneli. Sistem je spremljal in beležil lastnosti notranjega (osvetljenost, temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, koncentracija CO<sub>2</sub>, poraba energije za ogrevanje in hlajenje) in zunanjega okolja (globalno in odbito sončno sevanje, osvetljenost, temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, prisotnost padavin, smer in hitrost vetra) preko senzorske mreže, ki je posredovala potrebne podatke v PLC, ki je nato aktiviral aktuatorje. IRsNO je bil zasnovan kot dualni regulacijski sistem, kar pomeni, da lahko deluje kot konvencionalni PID ali kot kaskadni sistem z mehkim in PID-regulatorji.

IRsNO je bil razdeljen na štiri regulacijske zanke, in sicer na zanke za uravnavanje osvetljenosti, ogrevanja, ohlajevanja in prezračevanja. Vsaka od zank je glede na izmerjena trenutna stanja in zunanje pogoje aktivirala ustrezne aktuatorje. Zaradi kompleksnosti in velikega števila aktuatorjev je bilo na delovanje sistema možno vplivati z regulacijskimi pravili, časovno odvisnimi urniki delovanja in tudi z določanjem deviacijskih odstopanj od referenčnih vrednosti, znotraj katerih sistem miruje. Hierarhična urejenost je v primeru zasedenega prostora zagotavljala prednost regulaciji notranje osvetljenosti in fiziološkega prezračevanja, v nasprotnem primeru pa regulaciji ogrevanja ali ohlajevanja. S tem je bila zagotovljena prednost reguliranja količin, ki so z gledišča udobja uporabnikov bolj problematične. Pri doseganju zelenih vrednosti kontroliranih parametrov notranjega okolja je sistem prioritarno uporabljal PSA-ukrepe, torej je bila energijska učinkovitost regulacije vgrajena v samo osnovo sistema. Sistem se je izkazal kot zelo učinkovit pri regulaciji notranje osvetljenosti, saj je bil v večini vremenskih pogojev zmožen ohraniti dejansko vrednost osvetljenosti znotraj definiranih meja (+ 100 lx, - 50 lx) okoli referenčne vrednosti. Takšni rezultati so bili tipično doseženi z manj kot petimi premiki žaluzij na uro. Pri regulaciji notranjih temperaturnih pogojev je sistem vzdrževal notranjo temperaturo zraka v območju  $\pm 3$  K okoli želenih vrednosti, večja odstopanja so se pojavljala le v vročih poletnih dneh. Kot učinkovito se je v poletnem času pokazalo tudi nočno hlajenje s prezračevanjem, saj je sistem prostor shladil tudi za 4–5 K.

na takšna nihanja. Za zadovoljstvo uporabnikov je treba zagotoviti primerno sledenje referenčnim vrednostim (odstopanja  $\pm 200$  lx so zaradi adaptacijske sposobnosti očesa še sprejemljiva) in čim manjše število aktivacij aktuatorjev. Moteča, prepogosta aktivacija aktuatorjev je velikokrat vzrok za nezadovoljstvo uporabnikov z regulacijskim sistemom (Kolokotsa, 2000). V primeru analiziranih sistemov lahko na podlagi zgoraj navedenega kriterija ocenim vse sisteme kot primerne (Preglednica 1). Konceptualno gledano so regulacijska pravila 1, 2, 4 in 5 sistema primerljiva, saj je bilo vodenje aktuatorjev vezano na primerjavo zelene in dejanske vrednosti osvetljenosti, regulator pa je poskušal zmanjšati razliko med njima (Trobecc-Lah, 2006). Bolj kompleksen pristop je bil izveden v primeru 3 (LESO-PB), kjer je bila poleg notranje osvetljenosti spremljana tudi zunanja vertikalna

## 3 • ANALIZA

Med izbranimi primeri regulacije notranjega okolja je opaziti tako podobnosti kot kar nekaj razlik. Predvsem pri pristopih k testiranju delovanja sistemov ni mogoče izpeljati neposrednih vzporednic, saj so bili sistemi uporabljeni v zelo različnih stavbah in klimatskih pogojih, oba parametra pa izrazito vplivata na končne rezultate in učinkovitost. Zaradi takšne raznolikosti primerjanih regulacijskih sistemov je edini relevanten način primerjave sistemov obravnava konceptualnih osnov, ki tvorijo strategije k reguliranju notranjega bivalno-delovnega okolja. Prav preučitev konceptov, torej osnov lastnosti različnih pristopov, najbolj pripomore nadaljnjemu razvoju podobnih sistemov. Analiza sistemov v

nadaljevanju je bila izvedena ločeno za regulacijo osvetljenosti in regulacijo ogrevanja, hlajenja in prezračevanja.

### 3.1 Regulacija osvetljenosti

Regulacija osvetljenosti notranjih prostorov predstavlja zahtevno nalogo, saj mora biti sistem sposoben delovati v širokem razponu hitro spreminjajočih se vrednosti nivoja zunanje osvetljenosti. Na splošno spremembe zunanje osvetljenosti med 1000 in 5000 lx niso nenavadne (npr. trenutna pooblačitve), kar posledično pripelje do velikih nihanj v notranji osvetljenosti. Regulacijski sistem notranje osvetljenosti mora biti zasnovan tako, da se z aktivacijo aktuatorjev primerno odzove

osvetljenost v ravnini zasteklitve in pozicija sonca na nebu. S tem je zagotovljena zelo natančna slika o dejanskih zunanjih pogojih, ki omogoča zaznavanje difuzne osvetljenosti (oblačno vreme) ter hkrati direktnega vpliva pozicije sonca (jasno vreme). Sistem s takšno zasnovo je sposoben aktivno preprečevati bleščanje in s tem ustvariti še boljše notranje vizualne pogoje, kot jih je možno doseči le z regulacijo osvetljenosti.

Pri pregledu doseženih rezultatov posameznih sistemov se pokaže, da izrazitih odstopanj v učinkovitosti delovanja med posameznimi analiziranimi primeri ni (Preglednica 1). Najbolj izstopa sistem KAMRA (primer 4) tako s številom premikov rolete kot z maksimalnimi odstopanji od referenčne vrednosti notranje osvetljenosti. Razlog za večja odstopanja so v tem, da je bil sistem preizkušen v prostoru velikosti 1 m<sup>3</sup>, kjer ima na nivo notranje osvetljenosti zelo velik vpliv svetloba, odbita od notranjih površin.

Zmožnost vzdrževanja manjših odstopanj od referenčne vrednosti pri sistemu IRsNO pa gre pripisati dejstvu, da sistem upravlja 6 žaluzij, s čimer je omogočena izrazito zvezna regulacija notranje osvetljenosti. Kot smiselna se je pokazala tudi uporaba zvezno reguliranega zatemnjevanja luči pri sistemih LBNL, LOE in LESO-PB, saj omogoča manj skokovito spreminjanje notranje osvetljenosti v času, ko zunanji pogoji še ne omogočajo zadostne naravne osvetljenosti (npr. zgodaj dopoldne, pozno popoldne). Iz predstavljenih rezultatov je možno sklepati, da bolj kompleksen sistem regulacije, izveden v primeru LESO-PB, ne predstavlja posebne prednosti v primerjavi s preprostejšimi rešitvami pri uravnavanju nivoja notranje osvetljenosti. To pa seveda ne pomeni, da takšna zasnova regulacijskega sistema v določenih podnebnih razmerah ni upravičena, saj omogoča poleg regulacije notranje osvetljenosti tudi nadzor bleščanja.

Na podlagi konceptov in rezultatov delovanja analiziranih sistemov se je kot izredno uporaben pristop k regulaciji notranje osvetljenosti izkazala relativno preprosta zasnova regulatorja, kjer sistem zmanjšuje napako oziroma odstopanje med regulirano in referenčno veličino (Slika 2). To pomeni, da se s pomočjo upravljanja razpoložljivih aktuatorjev (senčila, umetna razsvetljava) poskuša dejansko izmerjeno osvetljenost približati željeni vrednosti. Glavna potencialna slabost takšnega pristopa je prepogosto in s tem moteče delovanje aktuatorjev, kar je razvidno iz delovanja sistema KAMRA, ki je bil sposoben zelo natančnega sledenja, vendar s prevelikim številom premikov senčila (Preglednica 1, opomba 7). Zelo učinkovita rešitev tega problema je določitev še sprejemljivih odstopanj od zelene vrednosti oziroma sprejemljivega pasu vrednosti notranje osvetljenosti, znotraj katerega sistem ne aktivira aktuatorjev. Skozi analizo delovanja izbranih sistemov se je pokazalo, da bolj kom-

OSVETLJENOST	Primer 1 LBNL	Primer 2 LOE	Primer 3 LESO-PB	Primer 4 KAMRA	Primer 5 IRsNO
REGULACIJA					
naravne osvetljenosti	DA	DA	DA	DA	DA
umetne osvetljenosti	DA	DA	DA	NE <sup>1</sup>	DA
bleščanja	NE <sup>2</sup>	NE	DA	NE	NE
AKTUATORJI					
za regulacijo naravne osvetljenosti	žaluzije <sup>3</sup>	žaluzije	tekstilni rolo	PVC roleta	žaluzije
število	1	/ <sup>4</sup>	1	1	6
za regulacijo umetne osvetljenosti	luči z zvezno zatemnitvijo	luči z zvezno zatemnitvijo	luči z zvezno zatemnitvijo	/	luči <sup>5</sup>
za regulacijo bleščanja	/	/	tekstilni rolo	/	/
DELOVANJE					
odstopanja od reference	± 200 lx <sup>6</sup>	± 200 lx	± 230 lx	± 300 lx <sup>7</sup>	+100 lx, -50 lx
premiki senčila v 60 min	< 6	/ <sup>4</sup>	≈ 4	≈ 10	< 5
prihranki el. energije	-14 – 52 % <sup>8</sup>	66 % <sup>9</sup>	/	/	/

## OPOMBE

<sup>1</sup> testna celica ni imela vgrajenih svetil

<sup>2</sup> bleščanje je bilo pasivno regulirano z uporabo fiksnih rotirajočih žaluzij

<sup>3</sup> fiksne žaluzije z možnostjo reguliranja naklona lamel

<sup>4</sup> podatki niso navedeni v pregledani literaturi

<sup>5</sup> uporabljena je bila dvopolažajna (ON/OFF) regulacija

<sup>6</sup> sprejemljiva osvetljenost definirana na območju 540 do 700 lx, za referenčno vrednost je bila privzeta vrednost 620 lx

<sup>7</sup> dosežena so bila tudi odstopanja manjša od ± 90 lx, vendar z večjim številom premikov rolete

<sup>8</sup> prihranki so odvisni od pozicije fiksne žaluzije v referenčni pisarni

<sup>9</sup> veliki prihranki so posledica uporabe ročne regulacije umetne razsvetljave v referenčni pisarni

Preglednica 1 • Pregled značilnosti primerjanih sistemov – regulacija osvetljenosti

pleksen sistem regulacije (sistem LESO-PB) ni upravičljiv v primeru, če bi bil namenjen samo uravnavanju notranje osvetljenosti. Je pa takšen sistem smiselni pri dodatnem nadzoru bleščanja.

### 3.2 Regulacija ogrevanja, hlajenja in prezračevanja

V primerjavi z dinamiko in nepredvidljivostjo sprememb pri regulaciji notranje osvetljenosti je za termične procese v zgradbah značilen bolj predvidljiv odziv, predvsem pa manj izrazita nihanja v vrednostih notranje temperature zraka (Szokolay, 2008). Relativno počasno in dokaj predvidljivo dnevno in sezonsko nihanje reguliranih vrednosti predstavlja z gledišča regulacijske tehnike manjšo težavo, kot je regulacija osvetljenosti. Na potek termičnih procesov in s tem na odziv stavbe, vgrajenih naprav in uporabnikov izrazito vplivajo mikro-, mezo- in makroklimatski pogoji lokacije, na kateri stoji stavba (Krainer, 2008). Pri zasnovi

regulacijskega sistema toplotnih procesov v stavbi je zato treba oblikovati pravila, ki predstavljajo odziv na dane klimatske razmere ter omogočajo izkoriščanje zunanjih danosti s pomočjo PSA-ukrepov. Vsi analizirani sistemi so bili načrtovani za lokacije z zmernim klimatskim podnebjem, za katerega so značilna izrazita sezonska ter majhna dnevna nihanja v zunanji temperaturi zraka. Primera 1 in 2 (LNBL in LOE) sta bila načrtovana za mediteransko klimo, ki predstavlja varianto zmerne klime s poudarjeno potrebo po hlajenju v poletnem času, ostali trije primeri pa imajo večjo potrebo po ogrevanju v zimskem in prehodnem obdobju. Z gledišča zasnove regulacijskega sistema so ravno prehodna obdobja med zimskim in poletnim časom tista, ki potencialno predstavljajo težavo, saj se v tem času lahko pojavlja kombinacija zelo različnih vremenskih razmer. V spomladanskem ali jesenskem času se lahko v 24 urah pojavi potreba po ogrevanju (noč, jutro, zvečer),

senčenju zaradi pregrevanja (visoki solarni pritoki v sredini dneva) ali celo aktivnem hlajenju, če senčenje ne zadostuje. Pri vseh opisanih sistemih, razen pri sistemu LBNL, je bila ta potencialna težava rešena na način, da se v času prehodnih obdobj uporablja kombinacija regulacijske zanke za ogrevanje in hlajenje. V primeru sistema KAMRA in IRsNO je bil prehod med zimskim in poletnim režimom definiran s pomočjo razlike med notranjo in zunanjo temperaturo zraka. Če je notranja referenčna temperatura višja od zunanje izmerjene temperature zraka, sistem uporablja le regulacijsko zanko z ogrevalnim režimom, v obratnem primeru pa v določenem razmerju vplivata na delovanje aktuatorjev tako zimsko kot poletna temperaturna regulacijska zanka. Podobno pravilo je bilo uporabljeno tudi pri LESO-PB sistemu, kjer je bil prehod med ogrevanjem in ohlajevanjem definiran s pomočjo spremljanja povprečnih zunanjih dnevni temperatur zraka.

OGREVANJE HLAJENJE PREZRAČEVANJE	Primer 1 LBNL	Primer 2 LOE	Primer 3 LESO-PB	Primer 4 KAMRA	Primer 5 IRsNO
REGULACIJA					
ogrevanja	DA	DA	DA	DA	DA
hlajenja	DA	DA	DA	DA <sup>1</sup>	DA
prezračevanja	DA <sup>2</sup>	DA	NE	NE	DA
AKTUATORJI					
za regulacijo ogrevanja	žaluzije, KGH-sistem	žaluzije, KGH-sistem	tekstilni rolo, el. konvektorji	PVC-roleta, el. grelci	žaluzije, rad. paneli
za regulacijo hlajenja	žaluzije <sup>3</sup> , KGH-sistem	žaluzije, KGH-sistem, okno <sup>4</sup>	tekstilni rolo <sup>5</sup>	el. ventilator <sup>6</sup>	žaluzije, rad. paneli, okno <sup>4</sup>
za regulacijo prezračevanja	KGH-sistem	okno <sup>7</sup>	/	/	okno <sup>7</sup>
DELOVANJE					
prihranki pri ogrevanju	/	26,5 % <sup>9</sup>	25 %	/ <sup>10</sup>	/ <sup>10</sup>
prihranki pri hlajenju	7 – 32 % <sup>8</sup>	14 % <sup>9</sup>	/	/ <sup>10</sup>	/ <sup>10</sup>
odstopanja od reference	/	/	/	± 3 K	± 3 K

#### OPOMBE

<sup>1</sup> hlajenje s prezračevanjem (vgrajen ventilator) ter omejitev solarnih pritokov, aktivni sistem hlajenja ni bil vgrajen

<sup>2</sup> uporabljen je bil KGH-sistem za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje z ločeno regulacijsko zanko

<sup>3</sup> fiksne žaluzije z možnostjo reguliranja naklona lamel

<sup>4</sup> hlajenje s prezračevanjem v primeru ugodnih zunanjih pogojev (npr. hlajenje v nočnem času)

<sup>5</sup> zgradba, v kateri je bil testiran regulacijski sistem, ni bila opremljena s sistemom aktivnega hlajenja

<sup>6</sup> hlajenje z ventilatorjem zaradi hitrega termičnega odziva testne celice v večini primerov ni bilo dovolj učinkovito

<sup>7</sup> fiziološko prezračevanje vezano na koncentracijo CO<sub>2</sub> v notranjem zraku

<sup>8</sup> prihranki so odvisni od pozicije fiksne žaluzije v referenčni pisarni

<sup>9</sup> poraba energije, merjena v obdobju od januarja do julija, letni prihranek energije za ogrevanje in hlajenje bi bil 20,5 %

<sup>10</sup> prihranki porabljene energije niso navedeni, saj sistem ni bil primerjan z referenčnim prostorom

Preglednica 2 • Pregled značilnosti primerjanih sistemov – regulacija ogrevanja, hlajenja in prezračevanja

Kot referenčno vrednost pri nadzoru ogrevanja in hlajenja so vsi sistemi razen LOE uporabljali notranjo temperaturo zraka. V primeru sistema LOE je bil kot regulirana vrednost uporabljen PMV-faktor, ki zajema širši spekter parametrov definiranja kvalitete notranjega okolja. Pri vseh sistemih, ki so primerjali porabo energije za ogrevanje in/ali hlajenje z referenčnim prostorom, je prišlo do zmanjšanja porabe energije (Preglednica 2), kar kaže na večjo energijsko učinkovitost holistično zasnovanih sistemov v primerjavi s konvencionalnimi sistemi. V primeru sistema KAMRA in IRsNO primerjava z referenčnim prostorom ni bila izvedena, pokazalo pa se je, da sta oba sistema sposobna zelo dobro slediti zelenim vrednostim notranje temperature zraka (Preglednica 2), kar izrazito vpliva na temperaturno ugodje uporabnikov. V primeru sistema 2 in 5 je bila regulacija hlajenja izvedena s pomočjo kombinacije senčenja, aktivnega hlajenja in hlajenja s prezračevanjem. Hlajenje z izmenjavo notranjega in zunanjega

zraka je uporabno predvsem v nočnem času, ko so zunanje temperature zraka nižje od zelenih notranjih vrednosti. V primeru sistema IRsNO je bilo na takšen način možno doseči znižanje notranje temperature zraka tudi za 5 K v času ene noči. V opisu sistema LOE ni navedeno, kako učinkovito je hlajenje s prezračevanjem, pričakovati pa je, da je manj učinkovito kot v primeru IRsNO, saj je regulirani prostor v milejši klimi, kjer so dnevna nihanja temperature zunanjega zraka manjša. Pri obeh sistemih, ki sta omogočala hlajenje s prezračevanjem, je bila izvedena tudi regulacija fiziološko pogojenega prezračevanja, ki je bilo vezano na mejno referenčno vrednost koncentracije CO<sub>2</sub> (Preglednica 2). Takšen način omogoča hitro, odzivno in učinkovito prezračevanje, ki zagotavlja konstanten nivo kvalitete zraka ter s tem močno vpliva na udobje uporabnikov.

Iz uporabljenih strategij regulacije termičnih procesov v obravnavanih primerih je možno zaključiti, da so le-te izrazito vezane na klimat-

ske danosti lokacije in značilnosti posamezne stavbe. S poznavanjem teh danosti je možno načrtovati polje aplikacij, ki so lahko uspešne pri neki stavbi. Glavni pristop, razviden iz analize opisanih primerov, je definicija dveh tipičnih sezonskih (v primeru zmerne klime) načinov delovanja stavbe in regulatorja. Definiranje zimskega (povečevanje solarnih dobitkov) in poletnega (preprečevanje pregrevanja) delovanja sistema predstavlja osnovno arhitekturo zasnove regulacijskih pravil. Takšna pravila ob upoštevanju časovne dinamike termičnih procesov v stavbi zagotavljajo primerno delovanje ob relativno monotoni zunanjih pogojih. Težave nastopijo pri prehodnih obdobjih, kjer lahko nastopijo v enem dnevu tako zahteve po ogrevanju kot hlajenju. Primerna rešitev opisane težave je način, izveden v primerih sistemov KAMRA in IRsNO, ki uporabljata evaluacijsko funkcijo za določitev stopnje vpliva zimske in poletne regulacije na delovanje aktuatorjev.

### 3 • SKLEP

Analizirani primeri regulacijskih sistemov notranjega okolja ponujajo vpogled v področje intervencij v grajenem okolju z velikim potencialom za izboljšanje kvalitete bivalno-delovnega okolja in prihranke energije za delovanje stavb. Kljub dokazanemu potencialu za prihranke pri porabljeni energiji je število apliciranih sistemov relativno majhno (Selkowitz, 2004). Razlogi za takšno stanje so verjetno kompleksne narave, vendar so vsaj delno posledica slabega poznavanja potencialnih rešitev primarnih načrtovalcev stavb (arhitekti, gradbeni inženirji), nezainteresiranosti investitorjev ter majhnega števila komercialno dostopnih rešitev. Dodatni faktor sta verjetno tudi strošek izvedbe in kompleksnost sistemov, ki neizbežno potrebujejo strokovno vzdrževanje. Izvedena analiza osnovnih značilnosti ter medsebojna primerjava sistemov notranjega okolja predstavlja osnovne smernice za naprej. Skozi opise je orisana potrebna infrastruktura, ki ob primernem znanju o delovanju stavb kot sistemu izmenjave energije, snovi in informacij omogoča izboljšanje kvalitete notranjega okolja kot tudi zmanjšanje porabe energije. Pri regulaciji osvetljenosti se je kot zelo učinkovit izkazal sistem, ki zmanjšuje razliko med referenčno in regulirano vrednostjo s simultanim omejevanjem prepogostega

aktiviranja aktuatorjev. Regulacija ogrevanja in hlajenja predstavlja nalogo, neločljivo povezano s klimatskimi danostmi lokacije stavbe, glede na katere je treba oblikovati primerna regulacijska pravila. Glavna težava termične regulacije so predvsem nepredvidljiva prehodna obdobja, ki zahtevajo primeren dizajn sistema. Pri analiziranih sistemih je bila ta težava odpravljena z izvajanjem kombiniranih ukrepov med ogrevalno in hladilno sezono. Vpliv avtomatske regulacije na izboljšanje kvalitete notranjega delovno-bivalnega okolja je razviden iz rezultatov, doseženih z vsemi petimi sistemi, saj so vsi omogočali kvalitetno regulacijo notranje osvetljenosti, toplotnega ugodja in kvalitete zraka (regulirana v primeru sistema LOE in IRsNO). Pri sistemih LBNL, LOE in LESO-PB je bila opravljena primerjava porabljene energije za delovanje stavbe med referenčnim (obstoječi prostor) in avtomatsko reguliranim prostorom. Rezultati so pokazali na izredno velike potencialne prihranke pri porabljeni energiji za ogrevanje, ohlajevanje in umetno razsvetljavo (Preglednici 1 in 2). Kljub očitnim prednostim uporabe avtomatskih regulacijskih sistemov notranjega okolja pa se je treba zavedati pomena uporabnikov, saj ti ključno vplivajo na to, ali bo neki sistem v stavbi deloval ali ne. Pri uporabi popolnoma avtoma-

tiziranih regulacijskih sistemov se je izkazalo, da se zaznana učinkovitost sistema s strani uporabnikov lahko zelo razlikuje od dejanske fizikalne učinkovitosti le-tega (Ruck, 2000), kar lahko privede do nezadovoljstva uporabnikov z delovanjem sistema. Slednji bodo zaradi motečega delovanja (hitri premiki senčila, pogosto izklapljanje luči, hrup ...) takšen sistem verjetno zavrnili ali pa ga poskušali onemogočiti. Dodatno se je pokazalo, da je omogočanje ročnega nadzora nad delovanjem sistema zelo pomembno pri pripravljenosti uporabnikov, da avtomatski sistem sprejmejo. Možnost posega uporabnika v nastavitve in delovanje regulacijskega sistema omogoča individualizacijo nastavitvev ter s tem v določenih okvirih tudi boljše delovanje celotnega sistema. Seveda sistem, ki upošteva želje uporabnikov, deluje bolje in energijsko varčnejše le pri smiselnih zahtevah in nastavitvah delovanja. Prav tako mora biti vmesnik med sistemom in uporabniki izveden na nivoju, ki ne presega znanja in sposobnosti povprečnega uporabnika, saj v nasprotnem primeru ta takšnega sistema ne bo želel uporabljati. Pri preveč komplicirani komunikaciji med uporabnikom in regulacijskim sistemom obstaja možnost, da bo sistem ostal izključen oziroma se bo uporabljal le v ročnem načinu upravljanja (Shaw, 1998). Iz vsega naštetega je možno zaključiti, da se tako kot pri stavbi kot celoti tudi pri avtomatskih sistemih regulacije notranjega okolja vse prične in konča pri zahtevah, potrebah in odzivih uporabnikov.



## 4 • LITERATURA

- Ander, D. G., *Daylighting, Performance and design*, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- Calvino, F., La Gennusa, M., Rizzo, G., Scaccianoce, G., The control of indoor thermal comfort conditions: introducing a fuzzy adaptive controller, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 36, št. 2, 97–102, 2004.
- Dounis, A. I., Manolakis, D. E., Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation, *Applied Energy*, Elsevier, l. 69, št. 2, 119–144, 2000.
- Fanger, P. O., *Thermal Comfort*, McGraw-Hill, New York, 1972.
- Guillemin, A., Morel, N., An Innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system, *Energy and Building*, Elsevier, l. 33, št. 5, 477–487, 2001.
- Guillemin, A., Morel, N., Experimental results of a self-adaptive integrated control system in buildings: a pilot study, *Solar Energy*, Elsevier, l. 72, št. 5, 397–403, 2002.
- Guillemin, A., Using genetic algorithms to take into account user wishes in an advanced building control system, doktorska disertacija, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.
- Kladnik, R., Krainer, A., Perdan, R., Light and thermal energy coordination in building, V: PLEA 1997 KUSHIRO: the 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 1997 Kushiro, Japan: proceedings. Vol. 1. Tokyo, PLEA, 59–64, 1997.
- Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. S., Santamouris, M., Implementation of an integrated indoor environment and energy management system, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 37, št. 1, 93–99, 2005.
- Kolokotsa, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., Agoris, D., Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks, *Artificial Intelligence*, Elsevier, l. 15, št. 5, 417–428, 2002.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., Antonidakis, E., Advanced fuzzy logic controllers designed and evaluated for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 33, št. 6, 531–543, 2000.
- Košir, M., Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2008.
- Košir, M., Krainer, A., Kristl, Ž., Solar gains regulation via holistically defined control system of the internal environment, *Proceedings Graz ISES*, Graz, 1–8, 2010.
- Krainer, A., Sustainable architecture, bioclimatic architecture, on line teaching package. SARA – Sustainable Architecture Applied to Replicable Public Access Buildings, [http://kske.fgg.uni-lj.si/Index\\_SI.htm](http://kske.fgg.uni-lj.si/Index_SI.htm), 2008.
- Kristl, Ž., Košir, M., Trobec-Lah, M., Krainer, A., Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building, *Renewable Energy*, Elsevier, l. 33, št. 4, 694–702, 2007.
- Lee, S. E., DiBartolomeo, L. D., Selkowitz, E. S., Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 29, št. 1, 47–63, 1998.
- Liang, J., Du, R., Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, l. 49, št. 4, 517–528, 2008.
- Onaygil, S., Güler, Ö., Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control system with an example from Istanbul, *Building and Environment*, Elsevier, l. 38, št. 7, 973–977, 2003.
- Park, B. C., Choi, A. S., Jeong, J. W., Lee, E. S., Performance of integrated system of automated roller shade systems and daylight responsive dimming systems, *Building and Environment*, Elsevier, l. 46, št. 3, 747–757, 2011.
- Reinhart, C. F., Voss, K., Monitoring manual control of electric lighting and blinds, *Lighting Research & Technology*, SAGE, l. 35, št. 3, 243–260, 2003.
- Reinhart, C. F., *Lightswitch*, 2002, a model for manual and automated control of electric lighting and blinds, *Solar Energy*, Elsevier, l. 77, št. 1, 15–28, 2004.
- Rubinstein, F., Jennings, J., Avery, D., Blanc, S., Preliminary results from an advanced lighting controls testbed, IESNA 1998 Annual Conference, SanAntonio, TX, 10.–12. avgust, 1998, *Journal of the IES*, 1999.
- Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J. L., Selkowitz, S., *Daylight in Buildings A source book on daylighting systems and components*, International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems, Pariz, 2000.
- Selkowitz, S., Lee, E., Integrating automated shading and smart glazings with daylighting controls, *International Symposium on Daylighting Buildings*, IEA SHC TASK 31, 2004.
- Singh, G., Zaheer-uddin, M., Patel, R. V., Adaptive control of multivariable thermal processes in HVAC systems, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, l. 41, št. 15, 1671–1685, 2000.
- Shaw, I. S., *Fuzzy Control of Industrial Systems, Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 1998.
- Szokolay, S. V., *Introduction to architectural science, The basis of sustainable design – 2nd ed.*, Architectural Press, Oxford, 2008.
- Trobec-Lah, M., Zupančič, B., Krainer, A., Fuzzy control of illumination and temperature comfort in a test chamber, *Building and Environment*, Elsevier, l. 40, št. 12, 1626–1637, 2005.
- Trobec-Lah, M., Zupančič, B., Peternelj, J., Krainer, A., Daylight illuminance control with fuzzy logic, *Solar Energy*, Elsevier, l. 80, št. 3, 307–321, 2006.
- Vine, E., Lee, E., Clear, R., DiBartolomeo, D., Selkowitz, S., Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study, *Energy and Buildings*, Elsevier, l. 28, št. 2, 205–218, 1998.
- Zupančič, B., *Zvezni regulacijski sistemi*, l. del, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2010.