

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo
in geodezijo*



MITJA KOŠIR

**INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM
NOTRANJEGA OKOLJA NA OSNOVI UPORABE
MEHKE LOGIKE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2008

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER*

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

MITJA KOŠIR, univ. dipl. inž. arh.

**INTEGRATED REGULATING SYSTEM OF INTERNAL
ENVIRONMENT ON THE BASIS
OF FUZZY LOGIC USE**

Doctoral thesis No.: 181

**INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM NOTRANJEGA
OKOLJA NA OSNOVI UPORABE MEHKE LOGIKE**

Doktorska disertacija šte.: 181

Temo doktorske disertacije je odobril
Senat Univerze v Ljubljani na 16. seji dne 4. julija 2007
in imenoval mentorico doc.dr. Živo Kristl in somentorja prof.dr. Aleša Krainerja.

Ljubljana, 9. junij 2008

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi

doc.dr. Živa Kristl
prof.dr. Aleš Krainer
prof.dr. Jože Peternejl
prof.dr. Borut Zupančič, UL EF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 6. redni seji dne
28. marca 2007.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi

doc.dr. Živa Kristl
prof.dr. Aleš Krainer
prof.dr. Jože Peternejl
prof.dr. Borut Zupančič, UL EF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 17. redni seji dne
23. aprila 2008.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi

prof. dr. Bojan Majes, dekan, predsednik
doc.dr. Živa Kristl
prof.dr. Aleš Krainer
prof.dr. Jože Peternejl
prof.dr. Borut Zupančič, UL EF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 18. redni seji dne
28. maja 2008.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MITJA KOŠIR, univ. dipl. inž. arh.**, izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom: »**INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM NOTRANJEGA OKOLJA NA OSNOVI UPORABE MEHKE LOGIKE**«.

Ljubljana, 02. junij 2008

.....
(podpis)

ERRATA

Strani z napako:

1 do (292)

Vrstica z napako:

sprotni naslov

Namesto:

Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi mehke logike.

Naj bo:

Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike.

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček

UDK	510.6:699.8:721(043.3)
Avtor:	Mitja Košir
Mentor:	doc. dr. Živa Kristl
Somentor:	prof. dr. Aleš Krainer
Naslov:	Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike
Obseg in oprema:	291 str., 50 pregl., 120 sl., 22 ena., 4 pril.
Ključne besede:	notranje okolje, stavbni ovoji, vizualno udobje, toplotno ugodje, kvaliteta zraka, regulacija notranjega okolja, mehka logika, mehki regulatorji, avtomatski sistem vodenja

Izvleček

Človeška civilizacija vse bolj obremenjuje svoje okolje, kar se odraža v krčenju življenjskega prostora, obremenjevanju okolja ter pomanjkanju energije. Stavbe neposredno vplivajo na vse tri manifestacije človeškega obremenjevanja naravnega okolja ter zato predstavljajo ključen element pri zmanjševanju negativnega vpliva. Poleg izboljševanja karakteristik ovoja stavbe ter smiselne uporabe in načrtovanja urbanega okolja lahko na boljše delovanje stavb znatno vpliva tudi način oblikovanja oziroma uporabe njihovega notranjega okolja, ki se lahko bistveno izboljša z uporabo avtomatskih sistemov vodenja. Pri tem je zelo pomembno, da skrb za večjo energetsko učinkovitost stavb ne pomeni zmanjševanja oziroma poslabšanja bivalnih razmer uporabnikov. Prav nasprotno pri iskanju energetsko učinkovitejših rešitev notranjega okolja stavb mora biti kakovost bivanja in počutja uporabnikov primarnega pomena in se ne sme poslabšati, temveč kvečjemu izboljšati.

V pričujoči nalogi smo obdelali vpliv transparentnega stavbnega ovoja kot najbolj interaktivnega člana stavbe na oblikovanje in uravnavanje notranjega okolja. Na podlagi poznavanja delovanja notranjega okolja, stavbnega ovoja ter predhodnih izkušenj na področju reguliranja toplotnih in optičnih tokov v stavbah je bila oblikovana in predstavljena zasnova integralnega regulacijskega sistema notranjega okolja (IRsNO). Zaradi kompleksnosti interakcij med notranjim in zunanjim okoljem ter uporabniki je pri snovanju IRsNO predvidena uporaba regulatorjev na osnovi mehke logike, ki omogoča intuitivnejše opisovanje in reguliranje fizikalno kompleksnih pojavov. Predstavljena zasnova regulacijskega sistema uravnava toplotno in vizualno okolje ter kvaliteto zraka v bivalnih in delovnih prostorih, pri tem pa upošteva kvalitativno-kvantitativne kriterije uporabnikov za določevanje ugodnega in energetsko učinkovitega notranjega okolja.

Bibliographic-Documentalistic Information

UDC 510.6:699.8:721(043.3)
Author: Mitja Košir
Supervisor: Assoc. Prof. dr. Živa Kristl
Co-Supervisor: Prof. dr. Aleš Krainer
Title: Integrated regulating system of internal environment on the basis of fuzzy logic use
Notes: 291 pa., 50 tab., 120 fig., 22 eq., 4 ann.
Key words: internal environment, building envelope, visual comfort, thermal comfort, air quality, regulation of internal environment, fuzzy logic, fuzzy controllers, automated control system

Abstract

Human civilization is ever more pressuring its environment, which is manifested in the reduction of living space, environment pollution and depletion of energy resources. Buildings directly influence all of the above mentioned aspects and are thus a key element in its reduction. Optimization of building envelope and rational use and planning of urban space can improve the functioning of built environment. Additional positive effects can be attained with proper design and use of internal environment where automatic control can improve its quality as well as its energy consumption. However, in the search for better energy efficiency of buildings attention has to be paid to the quality of living as it must not be reduced for the sake of energy conservation.

In the present thesis the impact of transparent parts of buildings envelope – its most interactive part – on the internal environment was studied. Knowledge about the functioning of internal environment and building envelope as well as previous experiences in the field of regulation of optical and thermal flows in buildings were the starting points in the formation of integrated regulation system of internal environment (IRsNO). Because of complex nature of interactions between users, internal and external environment use of fuzzy logic was adapted in the formation of IRsNO. Fuzzy logic makes the description of complex systems more intuitive than the classical methods. The presented automated system regulates internal thermal and visual comfort as well as air quality in correlation to the qualitative and quantitative preferences of users.

ZAHVALE

Hvala za vodenje in pomoč pri mojem podiplomskem študiju kot tudi pri izdelavi doktorske naloge mentorici doc. dr. Živi Kristl in somentorju prof. dr. Alešu Krainerju.

Hvala staršem, družini, Ini, prijateljem, znancem in sodelavcem za podporo, vzpodbudo in razumevanje v trenutkih slabe volje.

Ab imo pectore

VIII Košir, M. 2008. Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike.
Dok. dis. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

VSEBINA

1	UVOD	1
1.1	Bioklimatsko načrtovanje in integralno reguliranje notranjega okolja	1
1.2	Notranje bivalno-delovno okolje	3
1.2.1	Vizualno udobje	5
1.2.1	Toplotno ugodje	6
1.2.3	Kvaliteta zraka	8
1.3	Regulacija bivalno-delovnih razmer	9
1.3.1	Mehka logika	13
1.4	Namen naloge	14
1.5	Metodologija	16
2	STAVBNI OVOJ IN INTERAKCIJA Z NOTRANJIM OKOLJEM	21
2.1	Interaktivnost stavbnega ovoja	21
2.2	Transparentni del stavbnega ovoja	25
2.2.1	Zasteklitev	25
2.2.1.1	Optične in termične lastnosti zasteklitev – problem izbora	27
2.2.1.2	Vpliv U faktorja zasteklitve	31
2.2.2	Senčila	39
2.2.2.1	Tipi premičnih senčil	41
2.2.2.2	Senčilo kot solarni kolektor	43
2.3	Analiza sistemov reguliranja notranjega okolja	47
2.4	Testni regulacijski sistem KAMRA	49
2.4.1	Značilnosti testne celice KAMRA	50
2.4.1.1	Geometrija testne celice	50
2.4.1.2	Elementi testne celice	51
2.4.2	Opis regulatorja sistema KAMRA	54
2.4.3	Eksploimentalni rezultati	59
2.5	Pregled drugih sistemov	61
2.5.1	Laboratorij za elektroniko Tehnične univerze na Kreti	61
2.5.1.1	Opis regulatorja	62
2.5.1.2	Eksploimentalni rezultati	63
2.5.2	LESO-PB (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)	64
2.5.2.1	Opis regulatorja	65
2.5.2.2	Eksploimentalni rezultati	67
2.6	Primerjava opisanih sistemov	68
2.6.1	Reguliranje osvetlitve	69
2.6.2	Reguliranje toplote	71
2.6.3	Uravnavanje med aspekti toplotne in svetlobne regulacije	75
2.7	Pomen odziva uporabnikov	76
2.8	Izkušnje	77
3	ZNAČILNOSTI TESTNEGA PROSTORA	79
3.1	Geometrijske in funkcionalne značilnosti testnega prostora IRsNO	79
3.1.1	Kabinet III/1	79
3.1.2	Gradbeno fizikalne karakteristike konstrukcijskih sklopov	83

3.1.3	Uporaba prostora	85
3.1.3.1	Simulacija razpoložljive dnevne osvetlitve	86
3.1.3.2	Operativna temperatura prostora	93
3.2	Namen IRsNO	94
3.3	Struktura IRsNO	96
3.4	Merilno-regulacijska oprema IRsNO	98
3.4.1	Merilna oprema	100
3.4.1.1	Notranji pogoji	100
3.4.1.2	Zunanji pogoji	101
3.4.2	Oprema vodenja	102
3.4.3	Izvršni členi	105
3.4.3.1	Senčila	106
3.4.3.2	Umetna osvetlitev	108
3.4.3.3	Ogrevalni in hladilni elementi	108
3.4.3.4	Prezračevanje	110
4	INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM NOTRANJEGA OKOLJA	113
4.1	Avtomatsko vodenje razmer bivalno-delovnega okolja	113
4.1.1	Sistemi vodenja	114
4.1.2	Klasični regulatorji	115
4.1.2.1	Proporcionalni regulator	116
4.1.2.2	Integrirni in proporcionalno-integrirni regulator	116
4.1.2.3	Diferencirni in proporcionalno-integrirno-diferencirni regulator	117
4.1.3	Mehka logika	118
4.1.3.1	Mehke množice	119
4.1.3.2	Mehki operatorji	120
4.1.3.3	Mehki regulatorji	124
4.1.3.4	Postopek snovanja mehkih regulatorjev	127
4.2	Osnove za nastavitve regulacijskega sistema IRsNO	131
4.2.1	Eksperimenti s toplotno regulacijsko zanko	135
4.2.1.1	Mehki regulator fuzzy_rol_W	135
4.2.1.2	Mehki regulator fuzzy_rol_S	138
4.2.1.3	Mehki regulator fuzzPD_temp	141
4.2.1.4	Eksperimenti	142
4.2.1.5	Ocena uspešnosti regulacije temperaturnih pogojev	152
4.2.2	Eksperimenti s svetlobno regulacijsko zanko	154
4.2.2.1	Mehki regulator fuzzy_L1_E	155
4.2.2.2	Mehki regulator fuzzy_LP1	158
4.2.2.3	Eksperimenti	160
4.2.2.4	Ocena uspešnosti regulacije notranje osvetlitve	176
4.2.3	Eksperimenti s harmoniziranim delovanjem	178
4.2.3.1	Eksperimenti	179
4.2.3.2	Ocena harmonizirane regulacije	189
4.2.4	Zakovitosti toplotno-optičnega procesa v stavbah	191
4.3	Parametri oblikovanja sistema IRsNO	196
4.4	Nadzorna aplikacija IRsNO	201
4.5	Zagon sistema IRsNO	212

4.5.1	Osvetljenost prostora	214
4.5.2	Temperaturni odziv prostora	217
4.5.3	Kvaliteta zraka	219
4.6	Nastavitve mehkih regulatorjev IRsNO	221
4.6.1	Mehki regulator osvetljenosti	223
4.6.2	Mehki regulator temperature – režim ogrevanja	226
4.6.3	Mehki regulator temperature – režim hlajenja	228
4.7	Komentarji k sistemu IRsNO	230
5	ZAKLJUČEK	233
5.1	Sklep	233
5.1.1	Stavbni ovoj	236
5.1.2	Regulacija toplotno-optičnih procesov	238
5.1.3	Sistem IRsNO	239
5.2	Nadalnje delo	242
	LITERATURA	245
	PRILOGE	(251)
	Priloga A: Primerjalna analiza vpliva U faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetska bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta	(251)
	Priloga B: Analiza vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje 27-tih naključno izbranih objektov	(259)
	Priloga C: Analizirani eksperimenti sistema KAMRA	(269)
	Priloga D: IDR shema zasnove vodenja sistema IRsNO	(286)

KAZALO SLIK

1	UVOD	1
Slika 1.1	Sistem formiranja notranjega bivalno-delovnega okolja.	4
Slika 1.2	Dejavniki oblikovanja regulacijskega sistema bivalno-delovnega okolja.	10
Slika 1.3	Shema zasnove sistema vodenja notranjega bivalno-delovnega okolja.	11
Slika 1.4	Diagram metodologije uporabljene pri razvoju integralnega sistema notranjega delovno-bivalnega okolja.	17
2	STAVBNI OVOJ IN INTERAKCIJA Z NOTRANJIM OKOLJEM	21
Slika 2.1	Shema konceptualne delitve stavbnega ovoja v kontekstu zunanega in notranjega okolja.	23
Slika 2.2	Osnovne karakteristike treh konfiguracij uporabljenih v analizi vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetske bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta.	33
Slika 2.3	Sprememba normirane letne porabe ogrevalne energije ($\Delta Q_n / A_u$), solarnih pritokov (ΔQ_s) in transmisijskih izgub (ΔQ_t) ob zamenjavi tipa zasteklitve.	35
Slika 2.4	Primerjava spremenjene normirane letne porabe ogrevalne energije ($\Delta Q_n / A_u$) in povprečne osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo na ekvinokcij (ΔE_{av-eq}).	35
Slika 2.5	Primerjava spremembe porabe energije za ogrevanje in nivoja notranje dnevne osvetlitve pri vzorcu 27-tih naključno izbranih objektih ob zamenjavi tipa zasteklitve. Objekti so klasificirani glede na nivo izmenjave zraka ($n [1/h]$), razmerja stranic (a:b) ter glede na to s koliko strani (1, 2, 3 strani) je obravnavan prostor osvetljen.	37
Slika 2.6	Način delovanja senčila-solarnega kolektorja v dnevnem in nočnem režimu.	46
Slika 2.7	Aksonometrični prerez skozi testno celico KAMRA in prikaz njenih osnovnih geometrijskih in konstrukcijskih značilnosti.	51
Slika 2.8	Shema sistema KAMRA s prikazanimi aktuatorji, regulacijsko in merilno opremo ter osnovnimi povezavami.	53
Slika 2.9	Poenostavljena bločna shema svetlobne in toplotno regulacijske zanke sistema KAMRA.	57
Slika 2.10	Bločna shema regulacijske veje sistema KAMRA za aktivacijo grelcev in ventilatorja.	58
3	ZNAČILNOSTI TESTNEGA PROSTORA	79
Slika 3.1	Pozicija sobe 1 kabineta KSKE III/1 označena na fasadi stavbe FGG, pogledane iz smeri Jamove ceste (jugozahod) in Lepega pota (zahod).	80
Slika 3.2	Tloris in prerez sobe 1 kabineta KSKE III/1, v katerem je nameščen IRsNO.	82
Slika 3.3	Prostorski prikaz osnovnih geometrijskih značilnosti testnega prostora IRsNO.	83

Slika 3.4	Dispozicija notranje opreme v kabinetu KSKE III/1 z označenima pozicijama obeh delovnih mest.	85
Slika 3.5	Simulacija osvetljenosti prostora v štirih kritičnih dneh v letu. Za izračun dnevne osvetljenosti je bil uporabljen program SPOT™ v3.1, ki je izračune izvršil ob uporabi CIE-standardnega oblačnega neba.	87
Slika 3.6	Simulacija osvetljenosti prostora v štirih kritičnih dneh v letu. Za izračun dnevne osvetljenosti je bil uporabljen program SPOT™ v3.1, ki je izračune izvršil ob uporabi CIE-standardnega jasnega neba.	91
Slika 3.7	Shema strukture IRsNO s prikazanimi interakcijskimi povezavami vplivov med zunanjim okoljem, uporabnikom, notranjim okoljem ter regulacijskim sistemom.	96
Slika 3.8	Senzorska mreža sistema vodenja IRsNO.	99
Slika 3.9	Vgrajeni moduli PLC-ja; 1. napajalnik, 2. procesna enota, 3. komunikacijski modul, 4. digitalni vhodi, 5. digitalni izhodi, 6. analogni vhodi.	103
Slika 3.10	Pogled na operaterski pult MAC/MTA E200.	104
Slika 3.11	Dispozicija aktuatorjev sistema IRsNO v kabinetu KSKE III/1. Vsi grelni-hladilni paneli (G/H panel) so na spodnji strani obloženi z 1.25 cm debelo mavčno kartonsko ploščo, razen G/H panel 2, ki je obložen z masivno kamnito ploščo debeline 2 cm ter G/H panel 3, ki je obložen z 1.5 cm ALU-kamnito kompozitno ploščo (3 mm kamna + 12 mm aluminijasto satovje).	105
Slika 3.12	Detajl lamel in bočnega vodila venecianskih žaluzij tipa »KRPAN«.	107
Slika 3.13	Tloris in prerez grelni-hladilnega nizkotemperaturnega radiacijskega panela, ki so nameščeni v kabinetu KSKE III/1. V tlorisnem pogledu so prikazani utori za razvod cevi.	109
4	INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM NOTRANJEGA OKOLJA	113
Slika 4.1	Osnovna shema sistema vodenja. (Zupančič, 1996, str.: 2)	114
Slika 4.2	Bločni diagram zaprtozančnega regulacijskega sistema. (Zupančič, 1996, str.: 6)	114
Slika 4.3	Predstavitev lingvistične spremenljivke temperatura v mehkem prostoru.	120
Slika 4.4	Inferenčni postopek mehkega odločanja pri dveh vhodnih signalih v_0 in u_0 . Uporabljen je MAX – MIN operator, za določitev končne izhodne vrednosti pa je bila uporabljena težiščna metoda.	125
Slika 4.5	Shema osnovnega delnega postopka mehkega regulatorja s pripadajočimi podpostopki. (Đonlaić, 1995, str.:53)	128
Slika 4.6	Shema postopka Mamdanijevega in Larsenovega operatorja.	130
Slika 4.7	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke rad. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/102)	136
Slika 4.8	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke E_{tem} . Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/102)	136

Slika 4.9	Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju temperature za zimski čas. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih rad (y os) in E_tem (x os) in izhodni veličini rolet (z os). Primer pravila: IF E_tem = LN pro (izbran logični operater) rad = VS THEN rolet = 100. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/103)	137
Slika 4.10	Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami E_tem, rad in rolet pri mehkem regulatorju temperature za zimski čas. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)	137
Slika 4.11	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke rad. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)	138
Slika 4.12	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke E_tem. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)	138
Slika 4.13	Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju temperature za poletni režim. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih rad (y os) in E_tem (x os) in izhodni veličini rolet (z os). (Trobec-Lah, 2003, str.: II/105)	139
Slika 4.14	Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami E_tem, rad in rolet pri mehkem regulatorju temperature za poletni čas. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/106)	139
Slika 4.15	Mehki vhodni prostor jezikovne spremenljivke E regulatorja fuzzyPD_temp. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s enakostraničnimi trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/108)	140
Slika 4.16	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke dE. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s enakostraničnimi trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/108)	140
Slika 4.17	Logična matrika odločanja pri mehkem fuzzPD_temp. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih E (x os) in dE (y os). (Trobec-Lah, 2003, str.: II/109)	142
Slika 4.18	Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami E, dE in U pri mehkem fuzzyPD_temp. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/109)	142
Slika 4.19	Eksperiment z odprto roletno in izključenimi notranjimi viri prikazuje temperaturni odziv notranjosti testne celice.	144
Slika 4.20	Regulacija notranje temperature z pozicioniranjem rolete brez vključenih dodatnih virov.	146
Slika 4.21	Regulacija notranje temperature z notranjimi viri (grelci) ob konstantno odprti roletni.	148
Slika 4.22	Diagrama prikazujeta delovanje regulacijskega sistema KAMRA v času eksperimenta v poznem pomladnem času ob regulaciji notranje temperature zraka s pozicijo rolete kot tudi aktivacijo ventilatorja in grelca.	150

Slika 4.23	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke SP. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)	155
Slika 4.24	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke ERR. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)	155
Slika 4.25	Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju osvetljenosti testne celice. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEK pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih ERR (y os) in SP (x os) in izhodni veličini Err. Primer pravila: IF SP = SS pro (izbran logični operater) ERR = MN THEN Err = 80. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/41)	157
Slika 4.26	Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami SP, ERR in Err pri mehkem regulatorju osvetljenosti L1_E. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)	157
Slika 4.27	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke SP. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)	158
Slika 4.28	Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke ERR. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)	158
Slika 4.29	Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju osvetljenosti. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEK pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih ERR (y os) in SP (x os) in izhodni veličini Err. Primer pravila: IF SP = SS sum (izbran logični operater) ERR = MN THEN Err = 75. Logični operaterji pro (produkt) so na robovih zamenjani z operaterjem sum (vsota). (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)	159
Slika 4.30	Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami SP, ERR in Err pri mehkem regulatorju osvetljenosti testne celice. Sprememba nekaterih mehkih operaterjev pro v obliko sum se odraža v bolj razgibani površini lupine. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/52)	159
Slika 4.31	Eksperiment z odprto roletno brez vključene regulacije osvetljenosti nazorno kaže na trenutno odražanje sprememb v zunanjem vremenu na notranjih nivojih osvetljenosti.	162
Slika 4.32	Poletni eksperiment z regulatorjem osvetlitve tipa fuzzy_L1_B. Regulator v času trajanja eksperimenta ni zadovoljivo sledil referenčnim vrednostim.	164
Slika 4.33	Diagram eksperimenta izvedenega v zgodnjem avgustu kaže na primerno odzivnost regulatorja osvetljenosti, ki je zmožen slediti zelenim notranjim nivojem osvetljenosti v zastavljenem tolerančnem območju.	166

Slika 4.34	Podobno kot pri predhodnem eksperimentu (EX-SVET-136) je tudi na zgornjem diagramu vidna učinkovitost mehkega regulatorja fuzzy_L1_E. Med 12:00 in 15:00 je lepo viden izrazit padec direktnega sončnega sevanja, ki se je zgodil zaradi nastopa poletne nevihte.	168
Slika 4.35	Zožano definicijsko območje vhodne mehke spremenljivke ERR pri regulatorju fuzzy_L2_A povzroči bolj natančno sledenje referenčnim vrednostim notranje osvetljenosti.	170
Slika 4.36	Graf prikazuje delovanje regulatorja fuzzy_LP1 z zoženim definicijskim območjem ter spremenjenimi logičnimi operaterji. Razvidno je bolj tesno sledenje referenčnemu profilu ter hkrati bolj skokovito premikanje rolete.	172
Slika 4.37	Prikaz delovanja mehkega regulatorja za osvetljenost (tip fuzzy_LP1) v času jesenskega dneva med 3.30 in 16.00. Razvidno je zelo učinkovito in tesno sledenje referenčnim vrednostim – večja odstopanja se pojavljajo le ob skokovitih spremembah direktnega sončnega sevanja.	174
Slika 4.38	Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja osvetljenost med 9.30 in 18.30. Iz diagrama je razvidno hitro in oscilirajoče gibanje rolete, kar se odraža tudi na nivoju notranje osvetljenosti.	180
Slika 4.39	Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja temperatura zraka med 9.30 in 18.30. Iz diagrama je razvidno hitro in oscilirajoče gibanje rolete, kar pa se zaradi zakasnitve temperaturnega odziva ne odraža na krivulji notranje temperature zraka.	181
Slika 4.40	Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja osvetljenost med 9.30 in 18.30. Očitni so nezaželjeni hitri premiki rolete, kar se odraža na notranji osvetljenosti celice.	183
Slika 4.41	Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja temperatura zraka med 9.30 in 18.30. Vidni so hitri in zelo pogosti premiki rolete, kar pa se zaradi zakasnitve temperaturnega odziva celice ne odraža na krivulji notranje temperature zraka.	184
Slika 4.42	Regulacija notranje osvetljenosti testne celice s premiki rolete, temperatura notranjega zraka je uravnavana ločeno z grelci in ventilatorjem. Zaradi nizkih referenčnih vrednosti notranje osvetljenosti in visoke intenzitete sončnega sevanja je bila roleta večino dneva zaprta.	186
Slika 4.43	Diagrama prikazujeta regulacijo notranje temperature z dodatnimi viri ob sočasni regulaciji osvetljenosti celic s premikanjem rolete. S pomočjo izmenične aktivacije grelcev in ventilatorja, sistem uspešno sledi referenčnemu profilu notranje temperature zraka.	187
Slika 4.44	Prikaz količine in razmerja direktnega in difuznega sončnega sevanja v poletnem času.	191
Slika 4.45	Prikaz količine in razmerja direktnega in difuznega sončnega sevanja v zimskem času.	192

Slika 4.46	Vpliv sončnega sevanja na notranje in zunanje temperature zraka.	193
Slika 4.47	Kombiniran vpliv sončnega sevanja in odstopanj zunanjih temperatur od notranjih (želenih) temperatur. (Furlan, 1999, str.: 123)	195
Slika 4.48	Vstopno okno v računalniški nadzorni aplikaciji IRsNO.	203
Slika 4.49	Okno »Main« je glavno okno aplikacije IRsNO, na katerem so predstavljene vse merjene in zelene količine ter stanja aktuatorjev.	204
Slika 4.50	V oknu »Trendi« so grafično prikazani trendi izbranih merjenih količin.	205
Slika 4.51	V oknu »Eksperiment« je omogočeno zaganjanje in shranjevanje predhodno definiranih eksperimentov, prikazane so zelene vrednosti definirane v eksperimentu ter tudi trenutne vrednosti.	206
Slika 4.52	V oknu »Regulator« je uporabniku z administratorskimi pravicami omogočeno spreminjanje režimov, referenčnih vrednosti, histereznih zank ter načinov vodenja (ročno, avtomatsko).	207
Slika 4.53	V tabeli »Alarmi« je možen pregled in potrditev vseh izbranih alarmov ali samo posameznega alarma sistema. Alarmi uporabnika opozarjajo na delovanje sistema, ki je bilo sproženo zaradi nepričakovanih dogodkov kot je dež, močan veter in podobno.	208
Slika 4.54	Zgodovina alarmov omogoča ogled alarmnih sporočil za poljuben razpon datumov v preteklosti.	209
Slika 4.55	Osnovni podmeni za dostop do urnikov sistema IRsNO.	210
Slika 4.56	Meni za vnos urnikov omogoča časovno določevanje urnikov za vsak dan posebej ali pa za skupine dni z istimi značilnostimi (npr.: delavniki, prazniki).	210
Slika 4.57	Urejevalnik urnikov, v katerem je možno definirati časovno način delovanja sistema.	211
Slika 4.58	Primerjava med notranjo osvetljenostjo delovnega prostora 2 in zunanjo osvetljenostjo. Pričujoči dan je bil izredno oblačen z občasnimi snežnimi padavinami.	214
Slika 4.59	Notranja osvetljenost na obeh delovnih mestih.	215
Slika 4.60	Notranja osvetljenost na obeh delovnih mestih ob vključeni avtomatski regulaciji notranje osvetljenosti prostora kabineta KSKE.	216
Slika 4.61	Notranja in zunanja temperatura s prikazanima zelenima vrednostima v delovnem času (T-setpoint-del) in nočnem času (T-setpoint-red).	217
Slika 4.62	Korelacija med notranjo in zunanjo relativno vlažnostjo zraka. Manjši skoki v drugače konstantnem nivoju notranje vlažnosti zraka so posledica prezračevanja.	218
Slika 4.63	Prikaz vsebnosti CO ₂ v kabinetu KSKE III/1 prikazuje vpliv uporabnikov, prezračevanja in nezrakotesnosti ovoja stavbe.	219
Slika 4.64	Z uporabniki močno obremenjen prostor, viden je učinek avtomatskega prezračevanja prostora s sistemom IRsNO.	220
Slika 4.65	Vhodna spremenljivka SP-T mehkega regulatorja IRsNO_ill_1.	224
Slika 4.66	Vhodna spremenljivka ER mehkega regulatorja IRsNO_ill_1.	224
Slika 4.67	Matrika odločitev mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO_ill_1.	225
Slika 4.68	Vhodna spremenljivka RAD mehkega regulatorja IRsNO_temp_o.	226
Slika 4.69	Vhodna spremenljivka ER-T mehkega regulatorja IRsNO_temp_o.	226
Slika 4.70	Matrika odločitev mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO_temp_o.	227

Slika 4.71	Vhodna spremenljivka RAD mehkega regulatorja IRsNO_temp_h.	229
Slika.4.72	Vhodna spremenljivka ER-T mehkega regulatorja IRsNO_temp_h.	229
Slika 4.73	Matrika odločitev mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO_temp_h.	230

XX Košir, M. 2008. Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike.
Dok. dis. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

KAZALO PREGLEDNIC

2	STAVBNI OVOJ IN INTERAKCIJA Z NOTRANJIM OKOLJEM	21
Preglednica 2.1	Karakteristike zasteklitev. Podatki veljajo za proizvode podjetja Pilkington in so izračunani s pomočjo Pilkington Spectrum v02.01.01 [Pilkington Spectrum™ 2007] računalniške aplikacije, ki pri izračunu vrednosti U , τ_v in g upošteva standarda EN 673 [EN 673 1997] in EN 410 [EN 410 1998]. Izračuni veljajo za čista stekla ob pravokotnem vpadu sočnega sevanja.	29
Preglednica 2.2	Primerjava osnovnih značilnosti treh opisanih sistemov regulacije notranjega okolja –način harmonizacije, način optimizacije in eksperimentalni rezultati.	70
Preglednica 2.3	Primerjava osnovnih značilnosti treh opisanih sistemov regulacije notranjega okolja – načina regulacije toplotnih in svetlobnih tokov.	72
3	ZNAČILNOSTI TESTNEGA PROSTORA	79
Preglednica 3.1	Osnovne dimenzijske karakteristike testnega prostora IRsNO. A_n – površina netransparentnih elementov, A_t – površina transparentnih elementov stene.	81
Preglednica 3.2	Značilnosti in sestava netransparentnih konstrukcijskih sklopov.	84
Preglednica 3.3	Značilnosti in sestava transparentnih konstrukcijskih sklopov.	84
Preglednica 3.4	Izvleček rezultatov simulacije dnevne osvetljenosti obeh delovnih mest v prostoru kabineta KSKE III/1 pri CIE-standardnem oblačnem nebu.	88
Preglednica 3.5	Osončenost oziroma osenčenost okna v kabinetu KSKE III/1 v času zimskega solsticija.	88
Preglednica 3.6	Osončenost oziroma osenčenost okna v kabinetu KSKE III/1 v času spomladanskega in jesenskega ekvinokcija.	89
Preglednica 3.7	Osončenost oziroma osenčenost okna v kabinetu KSKE III/1 v času poletnega solsticija.	90
Preglednica 3.8	Izvleček rezultatov simulacije dnevne osvetljenosti obeh delovnih mest v prostoru kabineta KSKE III/1 pri CIE-standardnem jasnem nebu.	92
Preglednica 3.9	Izvleček kriterijev za načrtovanje notranjih bivalnih pogojev predlaganih v standardu CR 1752 za samostojne (celične) pisarne. Definirane so tri kategorije z različnimi odstotki nezadovoljnih uporabnikov (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied) ob zasedenosti 0.1 oseb/ m^2 in stopnji aktivnosti 1.2 met.	94
Preglednica 3.10	Oznake in karakteristike vgrajenih modulov PCL-ja sistema IRsNO.	102

4 INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM NOTRANJEGA OKOLJA		113
Preglednica 4.1	Posplošeni operatorji osnovnih operacij.	123
Preglednica 4.2	Povzetek eksperimentalnega dela in rezultatov sistema KAMRA.	132
Preglednica 4.3	Pomen na diagramih označenih in predstavljenih veličin.	143
Preglednica 4.4	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-TEMP-019.	147
Preglednica 4.5	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-TEMP-098.	149
Preglednica 4.6	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-TEMP-056.	151
Preglednica 4.7	Ocena različnih načinov reguliranja notranjih temperaturnih pogojev v testni celici KAMRA.	153
Preglednica 4.8	Pomen na diagramih označenih in predstavljenih veličin.	161
Preglednica 4.9	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-132.	165
Preglednica 4.10	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-136.	167
Preglednica 4.11	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-137.	169
Preglednica 4.12	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-141.	171
Preglednica 4.13	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-147.	173
Preglednica 4.14	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-148.	175
Preglednica 4.15	Ocena različnih načinov reguliranja notranje osvetljenosti pogojev v testni celici KAMRA.	177
Preglednica 4.16	Pomen na diagramih označenih in predstavljenih veličin.	179
Preglednica 4.17	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-HARM-027.	182
Preglednica 4.18	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-HARM-028.	185
Preglednica 4.19	Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-013.	189
Preglednica 4.20	Ocena načinov harmonizirane regulacije notranjega okolja celice KAMRA.	190
Preglednica 4.21	Vpliv sončnega sevanja na notranje temperaturno okolje stavbe. Prikazana je relacija med absolutnimi vrednostimi in opisnimi oziroma mehкими definicijami.	194
Preglednica 4.22	Vpliv zunanjih temperatur na notranje okolje definirano s pomočjo razlike med notranjo in zunanjo temperaturo (ΔT). Prikazana relacija definira povezave med opisnimi in absolutnimi vrednostimi.	194
Preglednica 4.23	Oris osnovnih parametrov vodenja osvetljenosti kabineta KSKE III/1.	197

Preglednica 4.24	Oris osnovnih parametrov vodenja temperature kabineta KSKE III/1.	199
Preglednica 4.25	Oris osnovnih parametrov vodenja kvalitete zraka kabineta KSKE III/1.	200

XXIV Košir, M. 2008. Integralen regulacijski sistem notranjega okolja na osnovi uporabe mehke logike.
Dok. dis. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

KAZALO PRILOG

PRILOGE

Priloga A: Primerjalna analiza vpliva U faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetske bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta

Priloga B: Analiza vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje 27-tih naključno izbranih objektov

Priloga C: Analizirani eksperimenti sistema KAMRA

Priloga D: IDR shema zasnove vodenja sistema IRsNO

1 UVOD

1.1 Bioklimatsko načrtovanje in integralno reguliranje notranjega okolja

Oblikovanje in načrtovanje energetske učinkovitih zgradb postaja vse bolj pereč problem gradbene stroke in širšega sociološko-ekonomskega okolja. To področje pa poleg tega, da predstavlja veliko težavo sodobnega graditeljstva, odpira tudi številne priložnosti za aplikacijo novih in inovativnih konceptov, prav tako pa tudi novih tehnologij. Kot nujno se za doseg cilja energetske učinkovitosti izkaže upoštevanje načel bioklimatskega načrtovanja stavbe, kar predvideva izkoriščanje klimatsko-geomorfoloških značilnosti makro, mezo in mikro lokacije stavbe. To omogoča učinkovito zmanjšanje energetske porabe že na nivoju same zasnove stavbe brez dodatnih tehnoloških posegov.

Zgodovinsko gledano bioklimatski pristop k oblikovanju ter izbiri bivalnega in delovnega okolja ne predstavlja sodobne inovacije, ampak spremlja človeka že od časov paleolitskih lovcev in nabiralcev, ki so s posebno skrbnostjo izbirali svoja naravna zavetišča (jame). V umetno ustvarjenem, grajenem okolju se principi bioklimatskega načrtovanja pojavljajo že v prvih človeških stalnih naselbinah z začetka neolitske revolucije pred približno 15000 leti. Natančno in zavestno razumevanje pretoka energije skozi stavbo in njeno interakcijo z okolico v pisnih virih prvič srečamo v času antične Grčije v tako imenovanem konceptu »Sokratove hiše« [Xenophon 1997]. Podobno 400 let kasneje rimski arhitekt Vitruvij poda natančna navodila za oblikovanje bivalnih prostorov, temelječih na poznavanju značilnosti lokacije in vpliva energetskih tokov v stavbi. Prav Vitruvijev delo Deset knjig o arhitekturi [Vitruvius 2002] kot edini ohranjeni antični arhitekturni traktat ključno vpliva na nadaljnji razvoj bioklimatskih principov v evropskem arhitekturnem prostoru. S pomočjo tega teksta se antična spoznanja o oblikovanju bioklimatskega grajenega prostora v času renesanse zasidrajo v mišljenje in ravnanje evropskih arhitektov, ki jih nadalje razvijajo in širijo. Z začetkom industrializacije pa se zaradi dostopnosti energetskih virov prične izločevanje stavb iz interakcijskega sistema okolje – stavba – človek, kar posledično vodi do večje energetske potratnosti objektov. S prvo energetsko krizo v 70. letih prejšnjega stoletja in s trenutno tendenco k energetske učinkovitosti zaradi globalnega segrevanja in pomanjkanja energetskih

virov bioklimatsko oblikovanje spet prodira v arhitekturo in graditeljstvo ter s tem omogoča že na nivoju zasnove objekta zmanjševanje porabe fosilnih goriv in emisij toplogrednih plinov ter tudi znižanje stroškov delovanja in vzdrževanja stavbe.

Najbolj razširjen in obilen energetski vir, ki ga lahko izkoristimo za zmanjšanje porabe klasičnih energentov v grajenem okolju, je seveda sonce. Poleg zelo razširjenega energetskega vira pa sonce predstavlja tudi vir dnevne svetlobe, ki primarno vpliva na kvaliteto bivalnega okolja, ker omogoča višjo storilnost ter na splošno izboljšuje počutje uporabnikov prostorov. Prav kombinacija toplotnega in svetlobnega vpliva sonca je najpomembnejši in hkrati tudi najkočljivejši vidik bioklimatskega načrtovanja stavb in bivalnega okolja. V notranjem grajenem okolju namreč velikokrat prihaja do nasprotujočih si zahtev glede osvetljenosti in toplotnega ugodja (npr.: v poletnem času se v prostorih pojavlja potreba po dnevni osvetlitvi ter tudi preprečevanju vstopa sončnega sevanja zaradi pregrevanja). Zato je nujno omogočiti primerno uskladitev toplotnega in optičnega vpliva sončnega sevanja tako, da ni negativnih vplivov na bivalno okolje, saj lahko to v nasprotnem primeru vodi do nerazumnega odziva uporabnikov, kot sta zasenčenost oken in prižgana umetna osvetlitev v sončnem vremenu.

Kot najbolj primeren način uravnavanja toplotnih in optičnih energetskih tokov skozi transparenten del ovoja stavbe se je že v preteklosti izkazala aplikacija fleksibilnih elementov, ki lahko selektivno prepuščajo ali zadržujejo sončno sevanje. S tem so predvsem mišljeni različni tipi premičnih zunanjih senčil na transparentnih delih ovoja stavbe ali pa uporaba naprednih tipov zasteklitev, kot so elektrokromna ali gasokromna stekla. Te naprave skupaj s transparentnimi deli ovoja stavbe predstavljajo kontinuirani vmesnik med zunanjim okoljem in notranjim bivalnim prostorom stavbe. Namen takšnega vmesnika je regulacija vplivov med dvema okoljema, pri čemer ima notranje okolje specifične bivalne zahteve, ki jih želimo zagotoviti s pomočjo dinamične regulacije stavbnega ovoja glede na zunanje danosti. Gledano s tehnološkega vidika, vmesnik predvsem uravnava pretok toplotne energije, dnevne svetlobe, stratifikacijo in kvaliteto zraka ter ob zadovoljivem nivoju avtomatske regulacije tvori učinkovit sistem uravnavanja notranjega okolja.

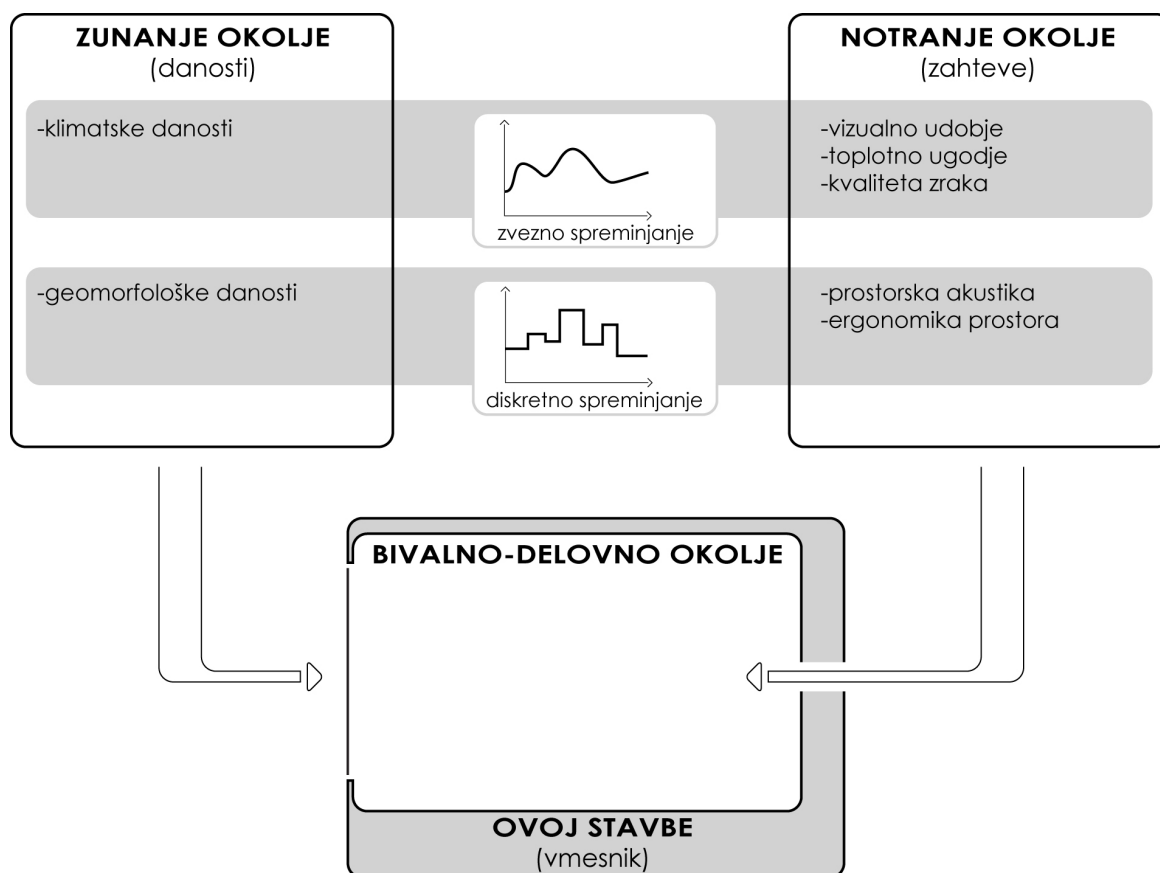
1.2 Notranje bivalno-delovno okolje

Človek s svojo dejavnostjo ustvarjanja umetnih prostorov bivanja in delovanja organizira sisteme, ki mu omogočajo učinkovitejše funkcioniranje znotraj sociološko-ekonomskega sistema človeške družbe. Ti sistemi pa niso diskretni in ločeni od naravnega okolja, ampak predstavljajo ključni element v povezavi okolje – stavba – človek. Prav zaradi vpetosti notranjega grajenega okolja med zunanje danosti in notranje zahteve uporabnikov predstavlja takšen sistem kompleksno izmenjavo energetskih tokov in snovi, ki ob zadostni kontroli omogočajo vzdrževanje metastabilnega stanja ugodnih bivalnih razmer ter primerno vpetost v prostorsko-časovne komponente človeške družbe.

Notranje okolje predstavlja presek uporabnikovih želja z zunanjimi naravnimi danostmi specifične lokacije stavbe ter mora velikokrat uskladiti veliko število pogosto kontradiktornih danosti in zahtev (Slika 1.1). Ključnega pomena pri oblikovanju notranjega okolja je tako primeren in pravilno zasnovan zunanji ovoj stavbe, ki z različnimi elementi omogoča usklajevanje notranjih in zunanjih pogojev. Takšen vmesnik s pomočjo svojega delovanja in dovajanja potrebne energije v sistem notranjega bivalnega okolja predstavlja celovito rešitev zagotavljanja želja uporabnikov. Ključni faktorji za oblikovanje notranjega okolja z vidikov ugodnega počutja uporabnikov so:

- **vizualno udobje** [ISO 8995 1989]: dnevna osvetlitev, umetna osvetlitev, nivo osvetlitve, enakomernost osvetlitve, kontrast, bleščanje, migetanje, pogled, barvno odražanje;
 - **toplotno ugodje** [CR 1752 1998]: temperatura zraka, temperatura površin, sevanje, hitrost premikanja zraka, nivo metabolizma uporabnikov, faktor obleke uporabnikov, relativna vlažnost zraka;
 - **kvaliteta zraka** [CR 1752 1998]: količina polutantov (CO₂, SO₂, NO_x, kancerogene spojine ...), prisotnost plesni, vonji, relativna vlažnost zraka, hitrost izmenjave zraka;
 - **prostorska akustika**: reverberacijski čas, rezidenčni šum, zvočna izolativnost;
 - **ergonomija prostora**: oblika prostora, razmerja prostora, materiali, oprema, barve, orientacija prostora.
-

Iz zgoraj naštetih faktorjev vpliva je očitno, da ne gre za med seboj nepovezane vplive, ampak da sistem notranjega okolja vsebuje številne interakcijske in povratne povezave. Kljub temu pa lahko ob določenih predpostavkah zmanjšamo število različnih vplivnih faktorjev na obvladljivejše število. Tako lahko ob predpostavki, da se zahtevam prostorske ergonomije zadovoljivo ugotovi v času načrtovanja in izvedbe stavbe, ta aspekt notranjega okolja obravnavamo kot pasivni faktor in ga je možno obravnavati kot danost prostora. Na podoben način lahko obravnavamo tudi prostorsko akustiko, ki jo je kot pri prostorski ergonomiji mogoče zagotoviti na nivoju lastnosti prostora oziroma stavbe. Nasprotno pa vizualno udobje, toplotno udobje in kvaliteta zraka predstavljajo izrazito dinamične vplivne faktorje, ki potrebujejo dinamično obravnavo pri regulaciji notranjega okolja. S pomočjo teh predpostavk se lahko pri oblikovanju integralnega regulacijskega sistema notranjega okolja oziroma krajše IRsNO (Raziskovalni program Konstrukcije v gradbeništvo – obnovljivi viri energije, MŠZŠ RS 2004-2008) osredotočimo na dinamične vplivne faktorje ter z njihovo pomočjo ob



Slika 1.1: Sistem formiranja notranjega bivalno-delovnega okolja.
 Fig. 1.1: Formation of internal living-working environment.

upoštevanju zunanjih klimatskih danosti omogočimo učinkovito regulacijo bivalno-delovnega okolja.

1.2.1 Vizualno udobje

Zagotavljanje vizualnega udobja v bivalnih in delovnih prostorih je ključnega pomena za funkcioniranje samega sistema notranjega okolja in predstavlja eno od primarnih zahtev za zadovoljivo počutje uporabnikov. Osvetljevanje prostorov lahko razdelimo na dva tipa, in sicer glede na izvor na dnevno in umetno svetlobo, pri čemer poskušamo s pomočjo bioklimatskega oblikovanja omogočiti maksimalno izkoriščanje razpoložljive dnevne svetlobe. Umetna osvetlitev tako predstavlja vir osvetljevanja v času, ko dnevna svetloba ni na voljo (nočni čas) ali pa je njena intenziteta nezadovoljiva (oblačno vreme). V tem kontekstu bomo pri oblikovanju IRsNO-ja primarno obravnavali regulacijo vizualnega udobja s kvaliteto in kvantiteto dnevne svetlobe, umetno svetlobo pa bomo upoštevali kot dodatni pomožni ukrep.

Skozi zgodovino oblikovanja grajenega okolja se je dnevna svetloba izkazala kot ključni faktor pri vzpostavljanju kvalitetnega bivalnega okolja, a sta se šele z nedavnimi raziskavami na področju fiziologije in fotobiologije dokazala njena neizpodbitna pomembnost pri cirkadianem ritmu ter posledično njen vpliv na zdravje in mentalne funkcije človeka. Dokazana je bila povezava med izpostavljenostjo svetlobi v frekvenčnem območju od 446 do 477 nm, kar v grobem odgovarja spektru modrega neba, in proizvodnjo hormona melatonina, ki uravnava spalni cikel in miselno zbranost [Brainard et al. 2001]. S pomočjo pravilne uporabe dnevne svetlobe v stavbah [Ander 2003] [Kladnik et al. 1997] je tako mogoče doseči boljše delovne in bivalne pogoje ter tudi znižati porabo energije za osvetljevanje in ogrevanje prostorov. Pozitivni vplivi dnevne svetlobe na ljudi v notranjem okolju so bili neizpodbitno dokazani s Heschong Mahoney Group (HMG) študijo [Ander 2003] [Heschong 2003a 2003b 2003c], objavljeno leta 2003. Ta je dokazala neposreden vpliv dnevne svetlobe na kvaliteto učenja pri učencih v osnovnih šolah kot tudi vpliv dnevne svetlobe na prodajo v trgovinah. V šolah je obširna primerjava med 2000 učilnicami v treh različnih okoljih (urbano – Seattle, suburbano – San Juan Capistrano, podeželsko mesto – Fort Collins) neizpodbitno dokazala, da so učenci v učilnicah z največjim deležem dnevne svetlobe bolje napredovali pri učnem

procesu. Dejanski rezultati so pokazali 20 % boljše rezultate pri standardiziranih matematičnih testih in 26 % hitrejše napredovanje pri branju in pisanju za učence, ki so obiskovali učilnice z velikim deležem dnevne svetlobe. Podobno se je pri primerjavi trgovin s strešnimi okni ali brez njih izkazalo, da bi se prodaja v trgovinah, ki nimajo vgrajenih strešnih oken, ob vgraditvi le-teh povečala v povprečju za neverjetnih 40 %.

Kljub vsem pozitivnim učinkom dnevnega osvetljevanja v notranjem okolju je pri uporabi in načrtovanju grajenih sistemov potrebna previdnost, saj lahko nepravilna uporaba dnevne svetlobe vodi do izrazito negativnih vplivov na uporabnike. Predvsem je potrebno poudariti, da samo dovolj velika kvantiteta dnevne svetlobe še ne pogojuje vizualnega udobja v bivalno-delovnem okolju, prav nasprotno- takšen pristop lahko vodi do nezaželenih rezultatov pri energetski učinkovitosti stavbe (pregrevanje v poletnem času ter velike transmisijske izgube v zimskem času) ter tudi do slabega počutja pri uporabnikih zaradi neugodnega osvetljevanja. Posledica tega so izrazito neprimerni odzivi uporabnikov, saj zaradi neprimerne osvetlitve z dnevno svetlobo popolnoma zastrejo okna in skozi celoten dan raje uporabljajo umetno osvetlitev [Kolokotsa et al. 2000]. Prav zato je nuja po primernem bioklimatskem načrtovanju in reguliranju dnevne osvetlitve toliko bolj pomembna, saj gre v končni fazi za razliko med »dobrim« in »slabim« sistemom notranjega okolja.

1.2.2 Toplotno ugodje

Toplotno ugodje uporabnikov v delovnih in bivalnih prostorih je neposredno povezano s sončnim sevanjem in soncem kot primarnim energetskim virom, ki dovaja toplotno energijo v sistem notranjega okolja. S tem je toplotno ugodje uporabnikov v večini primerov integrirano s sistemom dneve osvetlitve. Ker pa zunanji klimatski pogoji zaradi svojih dinamično-cikličnih sprememb večinoma onemogočajo vzdrževanje zaželenih notranjih temperaturnih pogojev le z izkoriščanjem sončnega sevanja, je potrebno v sistem notranjega okolja dovesti dodatno toplotno energijo. Uravnavanje dodatno dovedene energije, izkoriščanja razpoložljivega sončnega sevanja in primerne dnevne osvetlitve je ključnega pomena za formuliranje učinkovitega in primerne sistema toplotnega ugodja bivalno-delovnega okolja.

V zgodovinskem razvoju človeka je mogoče spremljati težnjo konstantnega zmanjševanja tolerančnega območja sprejemljivih temperaturnih pogojev v notranjem okolju. Tako si je že prazgodovinski človek v paleolitiku z iskanjem primerno orientiranih jam in uporabo ognja ter obleke poskušal ustvariti sistem bivalnega okolja, ki je imel manjša temperaturna nihanja od okolice. Oblikovanje temperaturno primerne notranjega okolja je s pomočjo tehnološko napredno oblikovanega stavbnega ovoja ter s široko dostopnostjo energetskih virov omogočilo, da dandanes ljudje le relativno ozek razpon temperatur obravnavamo kot temperaturno ugoden. Kot temperaturno ugodno okolje se v večini primerov definira okolje, v katerem nam ni niti prevroče niti prehladno oziroma je termoregulacijski sistem telesa najmanj obremenjen [Trobec-Lah 2003]. Kljub vsemu pa definiranje temperaturnega ugodja s pomočjo načina »niti-niti« le malo pove o tem, kaj dejansko je temperaturno ugodje. Na splošno bi lahko dejali, da temperaturno ugodje variira od osebe do osebe in je odvisno od stopnje metabolizma, obleke, hitrosti premikanja zraka in sevalne asimetrije prostora [CR 1752 1998] ter tako rezultat mnogih med seboj interaktivno povezanih vplivnih faktorjev. Za dovolj veliko število uporabnikov je seveda mogoče določiti statistične vrednosti, ki definirajo temperaturno prijetno okolje za »večino« uporabnikov, vendar se je potrebno zavedati, da pri takšnem načinu vedno ostane »manjšina«, ki je s takšnim okoljem nezadovoljna. Končni cilj reguliranja notranjega okolja bi moral biti personalizacija želja posameznika in ne le zadovoljitev želja večine na račun manjšine [Krainer et al. 2008].

Zaradi vpetosti toplotnega ugodja v kontekst sončnega sevanja in s tem tesne povezanosti z vizualnim ugodjem je pri zagotavljanju ugodnih temperaturnih pogojev v notranjem okolju potrebno posvetiti posebno pozornost interakcijam med tema dvema aspektoma notranjih bivalnih razmer. Predvsem se je potrebno izogniti potencialni pasti pri pretiranem zmanjševanju transmisijских izgub skozi zasteklitve, saj lahko takšen ukrep posledično vodi do nezadovoljive kvantitete in kvalitete osvetlitve z dnevno svetlobo. Prav tako je potrebna pozornost pri pretirano velikem deležu transparentnih površin, saj lahko sončno sevanje vodi do pregrevanja prostora in posledično do velike porabe energije za hlajenje.

Pri izbiri sistema za dodatno ogrevanje in ohlajevanje bivalno-delovnega okolja imajo načrtovalci na voljo velik spekter različnih sistemov. Na splošno pa so se na lokacijah z zmerno klimo kot najučinkovitejši in tudi najprijetnejši za uporabnikovo počutje izkazali

nizkotemperaturni radiacijski sistemi [Imanari et al. 1999] [Roulet et al. 1999] v obliki stropnega, talnega ali stenskega ogrevanja. Prednost teh sistemov je tudi, da se lahko uporabljajo za hidronično hlajenje in s tem zmanjšajo potrebo po klimatizaciji prostorov [Jeong, Mumma 2007] [Vangtook, Chirarattananon 2006].

1.2.3 Kvaliteta zraka

Poleg vizualnega in toplotnega ugodja na primerne bivalno-delavne razmere v notranjem okolju močno vpliva tudi prisotnost različnih motečih in škodljivih spojin v notranji atmosferi. Slednja tako predstavlja potencialen razlog za neugodje uporabnikov na dveh ravneh, in sicer kot vir neprijetnega postanelega zraka (zaznavna obremenitev) ter kot vir zdravju škodljivih kemičnih spojin (kemična obremenitev) [CR 1752 1998]. Glavni izvor onesnaževanja notranjega olfaktoričnega okolja predstavljajo uporabniki in dejavnosti, ki jih le-ti opravljajo v stavbah. Dodatno pa lahko onesnažujejo zrak tudi v stavbo vgrajeni materiali, oprema, skladiščene kemikalije in slabo vzdrževani ali napačno načrtovani prezračevalni in klimatizacijski sistemi.

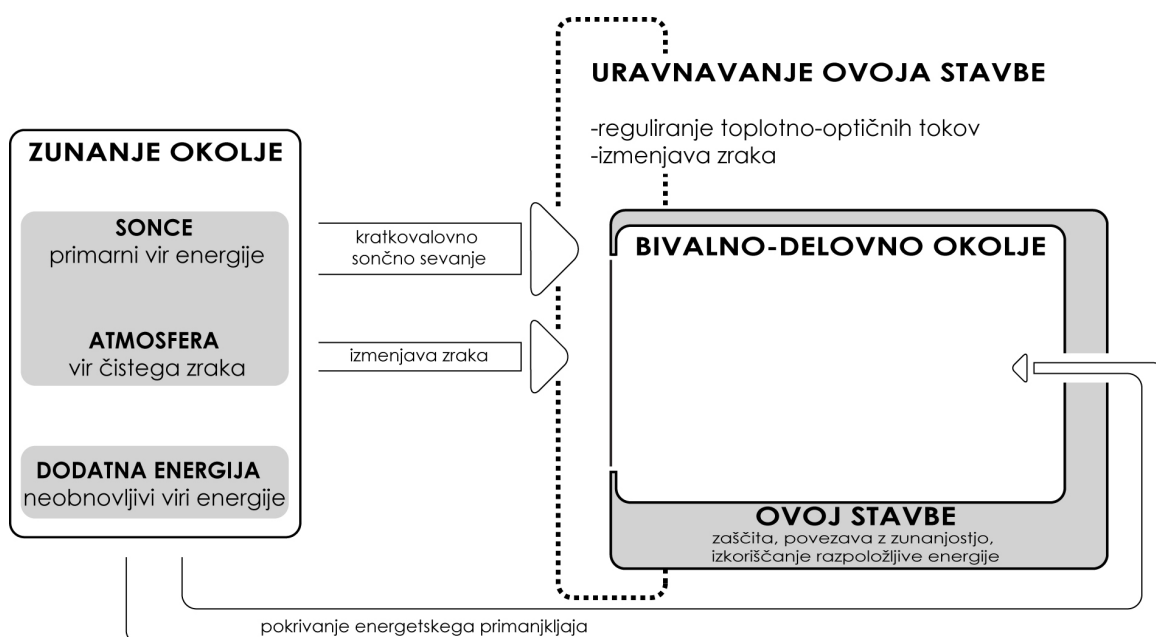
Zaradi prisotnosti velikega števila kemičnih spojin v grajenem okolju in nepoznavanja njihovega vpliva na zdravje ljudi je ocena kemične obremenitve notranje atmosfere v večini primerov prezahtevna naloga za splošno aplikacijo pri reguliranju notranjega okolja. Izjema je predvsem okolje, v katerem pričakujemo obremenjenost z dokazano nevarnimi polutanti, kot so azbest, formaldehidi, vinil klorid, benzen, svinec, toluen in druge strupene snovi, a tudi pri teh substancah je edini sprejemljiv ukrep odstranitev vira. Popolnoma drugače je pri zaznavni obremenitvi notranje atmosfere, kjer gre predvsem za kontaminacijo notranjega zraka s človeškimi biopolutanti. Najpomembnejši biopolutant v grajenem okolju je CO₂, ki ga proporcionalno njihovi metabolni stopnji oddajajo uporabniki notranjega okolja in se je kot takšen izkazal kot zelo zanesljiv pokazatelj koncentracije onesnaženosti notranje atmosfere [CR 1752 1998]. Kljub vsemu pa spremljanje koncentracije ogljikovega dioksida ni zadosten ukrep, kadar pričakujemo, da se bodo v prostoru pojavljale tudi druge nevarne spojine (ogljikov monoksid, radon ...), ki niso povezane s stopnjo uporabnikovega metabolizma.

Iz praktičnih razlogov se je v večini primerov, ko sta vir onesnaženja zraka v notranjem okolju človek in njegov metabolizem, izkazalo kot zadosten ukrep spremljanje koncentracije CO₂ in posledično prilagajanje stopnje prezračevanja prostora. Z zadostnim prezračevanjem je mogoče znižati koncentracijo CO₂ pod mejo, ki jo večina uporabnikov zazna kot neprijetno (460 ppm) v primerjavi z zunanjim zrakom. Način izmenjave zraka z zunanostjo se lahko izvaja s pomočjo naravnega ali umetnega prezračevanja na nivoju celotne stavbe ali pa lokalno znotraj posamičnih prostorov. Vse oblike prezračevalnih sistemov so lahko regulirane avtomatsko ali ročno s strani uporabnikov, pri čemer je ročna regulacija zaradi sposobnosti adaptacije ljudi danim pogojem v večini primerov neučinkovita. Pri formuliranju prezračevalnih sistemov stremimo k lokalnim prezračevalnim sistemom, saj ti omogočajo večjo fleksibilnost in prilagodljivost notranjim zahtevam kot centralizirani sistemi. Psihološki vpliv možnosti odpiranja oken in s tem prezračevanja je potrdila HGM-študija, ki je pokazala, da lokalno prezračevanje s pomočjo odpiranja oken predstavlja pozitiven vpliv na uporabnike. Tako so učenci v učilnicah, kjer so se lahko okna odpirala, v primerjavi s kolegi v učilnicah brez oken na odpiranje in z vgrajenim mehanskim prezračevanjem povprečno dosegali za 8 % boljše učne uspehe [Ander 2003] [Heschong 2003b]. Potrebno je poudariti, da gre v tem primeru za psihološki vpliv samega odpiranja oken in ne za boljši učinek prezračevanja, saj je le-to v primeru popolne ročne regulacije slabše od avtomatskega. Glede na opisane značilnosti bi optimalen prezračevalni sistem deloval lokalno z avtomatsko regulacijo, po možnosti z omogočenim odpiranjem oken. Vendar je pri uporabi naravnega prezračevanja z zunanjim zrakom potrebna previdnost, saj je le-to neprimerno na območjih, kjer je zunanji zrak močno onesnažen, s čimer predstavlja vir onesnaženja notranjega okolja. V takšnih primerih je smiselna oziroma nujna uporaba mehanskega prezračevanja s filtriranjem zunanjega zraka.

1.3 Regulacija bivalno-delovnih razmer

Ker uravnavanje notranjega okolja ni ločeno od zunanjih klimatskih razmer, je za primerno zagotavljanje notranjih ugodnih bivalnih pogojev nujna interakcija z zunanostjo. Zato bivalno-delovnega okolja ni mogoče obravnavati kot ločen samostojen sistem, ampak je nujna obravnava v širšem kompleksnem kontekstu celotnega naravnega in grajenega okolja. Za doseg učinkovite interakcije je primarnega pomena vzpostavitev vmesnika med notranjim in

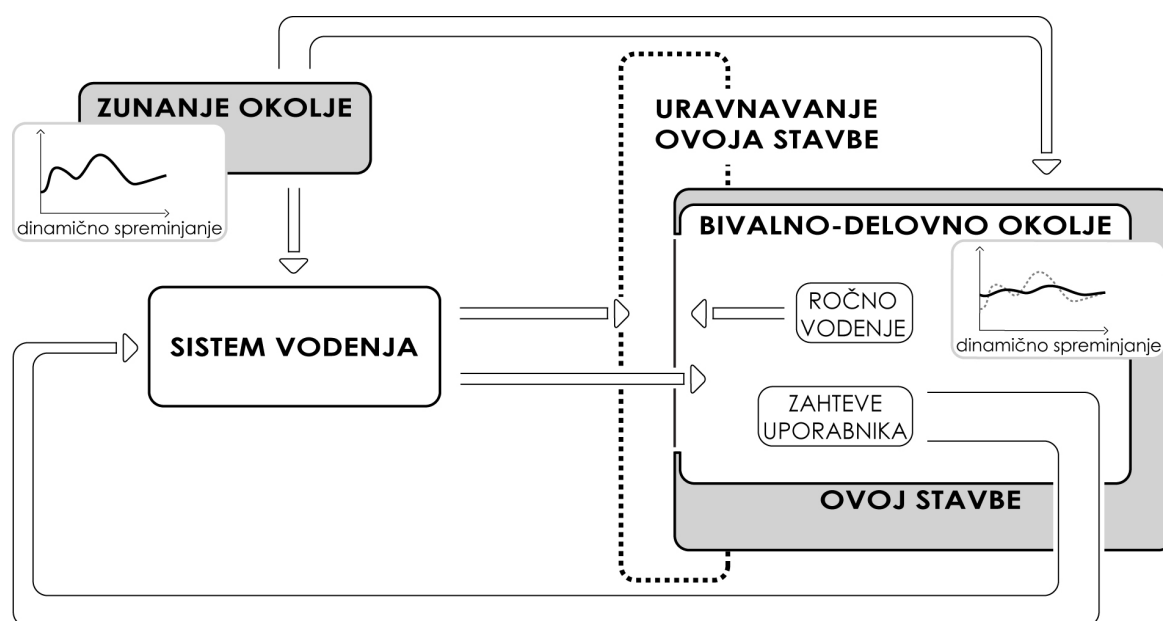
zunanjim okoljem, katerega funkcijo v kontekstu stavb opravlja zunanji ovojev, in sicer tako njegovi transparentni kot tudi netransparentni deli. Ker zaradi dinamike procesov v zunanjem okolju in nivoja trenutne tehnologije gradnje, netransparentni del ovoja stavbe izraža počasnejšo dinamiko v primerjavi s transparentnimi deli stavbnega ovoja, lahko trdimo, da se večina dinamičnih interakcij med zunanjim in notranjim okoljem opravi na nivoju transparentnega dela ovoja (Slika 1.2). Vmesnik med notranjim in zunanjim okoljem ni le pod stalnim vplivom izrazito dinamičnih in nelinearnih sprememb zunanjih pogojev, ampak je enakovredno obremenjen tudi z notranjimi zahtevami uporabnikov, ki so v veliki meri v nasprotju z zunanjimi danostmi. Takšna kontradiktornost interakcij vplivov in zahtev zahteva izrazito fleksibilnost ter odzivnost sistema, ki ga omogočata pravilno oblikovan transparenten del ovoja (zasteklitev, senčila ...) ter tudi zadovoljiv način kontrole delovanja (reulacijski sistem s primerno dinamiko delovanja). Nestacionarnost, kontradiktornost in nesorazmerje pri prenosu optičnih in termičnih tokov skozi transparenten del stavbnega vmesnika zahtevajo primeren nivo uravnavanja procesov s pomočjo delovanja elementov stavbnega vmesnika, ki lahko ob povezavi z drugimi ključnimi elementi regulacije notranjega okolja (ogrevanje, hlajenje, prezračevanje) in z zadovoljivim nivojem avtomatizacije dosežejo učinkovito bivalno-delovno okolje (Slika 1.3).



Slika 1.2: Dejavniki oblikovanja regulacijskega sistema bivalno-delovnega okolja.
 Fig. 1.2: Formation factors of regulating system of internal living-working environment.

Kot je bilo že omenjeno, je za učinkovito izvedbo vmesnika med zunanjim in notranjim okoljem ključnega pomena nivo oziroma način regulacije delovanja le-tega. Primarno se je v preteklosti, in v večini primerov še vedno tudi danes, za uravnavanje pretoka toplotno-optičnih tokov uporabljala predvsem ročna regulacija s strani uporabnikov. Takšen način se je v današnjem času na osnovi študij in izkušenj izkazal kot zelo nezanesljiv in predvsem neučinkovit, saj se človek zaradi velike sposobnosti adaptacije na neugodne bivalne razmere odziva prepozno (šele takrat, ko razmere postanejo nevzdržne), ko pa se odzove, so njegove reakcije sunkovite in disproporcionalne [Kraimer 1993]. Ker s pomočjo ročne regulacije skoraj ni mogoče doseči učinkovite harmonizacije med energetskega zahtevami in ugodnimi bivalnimi razmerami (dnevna svetloba, kvaliteta zraka ...), je za zagotovitev optimalnega razmerja med zgoraj navedenima zahtevama nujno potrebno uvesti avtomatsko uravnavanje odziva transparentnega dela stavbnega ovoja in notranjega okolja.

Med tradicionalnimi pristopi k reševanju problematike avtomatske regulacije lahko izpostavimo predvsem dvopoložajno (ON-OFF) in PID (proporcionalno-integrirno-diferencialno) regulacijo, ki pa sta se kljub zelo dobro razvitemu področju aplikacij izkazali za nepraktični rešitvi, ko želimo vzpostaviti učinkovito harmonizirano regulacijo optičnih in



Slika 1.3: Shema zasnove sistema vodenja notranjega bivalno-delovnega okolja.
Fig. 1.3: Scheme of internal living-working environment regulation system.

termičnih tokov skozi stavbni ovoj. Pri dvopoložajni regulaciji z enostavnim preklapljanjem med dvema stanjema ne dosegamo zadovoljive kvalitete regulacije pri kompleksnih sistemih, kot je prehod sončnega sevanja skozi transparentni del ovoja. PID-regulacija pa za zadovoljivo delovanje pri izrazito nelinearnih procesih (kot so optični procesi v transparentnem delu stavbnega ovoja) potrebuje natančen in kompleksen matematičen model. Potreba po matematičnem modelu pomeni, da se načrtovalci PID-regulatorjev zatekajo k poenostavitvam in približkom, kar pri relativno enostavnih sistemih ne predstavlja večje pomanjkljivosti, pri reguliranju kompleksnih in zelo nelinearnih sistemov pa lahko vodi do nezadovoljivega delovanja.

Prav kompleksnost notranjega okolja je tista, ki je privedla do iskanja nadomestila za sicer zelo kvaliteten, a za naš primer nepraktičen sistem PID-vodenja [Furlan 199] [Košir et al. 2006]. Tako se kot alternativen pristop zgoraj opisanim principom regulacije predstavlja uporaba t.i. inteligentnih tehnologij oziroma sistemov. S terminom inteligentne tehnologije opisujemo pristope, kot so: nevronske mreže, evolucijski algoritmi, odločitvena drevesa, mehke (fuzzy) množice, grobe množice in kaos [Kokol et al. 2001] [Munakata 1998]. Predvsem mehke množice so se izkazale kot zelo učinkovite pri regulaciji kompleksnih temperaturnih, električnih, plinskih in optičnih sistemov, če so se tradicionalne tehnike izkazale za nezadostne. Ker regulacija notranjega okolja v stavbi predstavlja fizikalno zelo kompleksen sistem, se uporaba mehke logike ponuja kot obetavna in praktična alternativa klasični regulaciji. Mehka logika zaradi omenjene »mehkosti« pri regulaciji omogoča definiranje vseh stopenj med strogim DA in strogim NE, s tem pa omogoča večjo fleksibilnost kot pri uporabi klasične (ostre) logike. Z uporabo hevristične metode je možno opisovanje zelo kompleksnih sistemov tudi brez matematičnega modela, saj se vhodno-izhodna razmerja oblikujejo s pomočjo nabora pravil v obliki ČE (pogoj) – POTEM (posledica) stavkov. Ker se za vhodno-izhodne variable uporabljajo lingvistični parametri, se takšen način regulacije močno približa človeškemu načinu razmišljanja in opisovanja problemov. Tako imamo z mehki množicami na voljo orodje, s katerim lahko predstavimo opisne vrednosti, kot so »majhno« ali »več«, le-te pa so tako za načrtovalca kot tudi uporabnika v večini primerov intuitivnejše in lažje razumljive kot matematične enačbe. Na splošno so se mehki regulatorji z uporabo v regulacijski tehniki izkazali za hitrejši,

enakomernejše, učinkovitejše, prožnejše in robustnejše od konvencionalnih sistemov ter so tako primerni za aplikacije pri kompleksnih nelinearnih sistemih.

1.3.1 Mehka logika

Ključni koncept teorije mehke logike in mehkih množic je zmožnost, da opišemo zvezno prehajanje med dvema diskretnima pojmom oziroma stanjema. V primerjavi s klasično teorijo ostre logike to pomeni, da lahko opišemo vsa stanja med popolno pripadnostjo (npr.: 1) in popolno nepripadnostjo (npr.: 0) nekega elementa določeni skupini ali množici. Ta značilnost nam omogoča, da opišemo stanje ali izjavo s stopnjo njene resničnosti in ne le z ostrim in strogim »da« ali »ne«. Kljub vsemu pa te značilnosti nikakor ne smemo zamenjati z verjetnostjo, saj stopnja resničnosti predstavlja pripadnost »mehko definiranim« množicam in ne verjetnosti nekega dogodka. Možnost opisa vseh vmesnih stanj vključno z diskretnima vrednostima »da« in »ne«, naredi mehko logiko izjemno primerno za uporabo pri negotovem sklepanju (ang.: approximate reasoning), ki olajša opis sistemov, katerih matematični modeli so težko opredeljivi [Kokol et al. 2001] [Palanippan 2005]. Na splošno si lahko predstavljamo mehko logiko kot nadgradnjo klasične ostre logike, ki omogoča operiranje s konceptom stopnje resničnosti [Škrjanc et al. 2001].

Osnovne elemente mehke logike tvorijo mehke množice z odgovarjajočimi pripadnostnimi funkcijami μ , ki definirajo vsako uporabljeno lingvistično spremenljivko. Pri uporabi ostre logike se pripadnost določenega elementa $a \in A$ množice B definira s karakteristično funkcijo $\mu(a)$, kjer $a \in A$ je ali pa ni član množice B . V primeru teorije mehkih množic pa pripadnost elementa $a \in A$ množici B ni absolutna, saj je opisana s pripadnostjo funkciji $\mu(a)$, ki lahko zavzame vse stopnje med pripadnostjo in nepripadnostjo. Poenostavljeno to pomeni, da lahko element a pripada več množicam ($A_1, A_2 \dots A_n$), ki se lahko med seboj tudi izključujejo, ter da lahko vsota pripadnosti posameznim množicam preseže vrednost 100 %. Osnova vseh mehkih sistemov so lingvistične spremenljivke, ki se najpogosteje uporabljajo v obliki ČE-POTEM (IF-THEN) pravil.

1.4 Namen naloge

Naloga je nastala kot posledica potrebe po integriranju ključnih dinamičnih faktorjev oblikovanja notranjega bivalno-delovnega okolja v celovit sistem kontrole, ki bi bil zmožen enotno uravnati različne vplive, ki delujejo nanj. Takšen sistem bi predstavljal aplikacijo, zmožno ugoditi željam uporabnika ter hkrati zagotoviti učinkovitejše delovanje z vidika porabe energije. Integralen regulacijski sistem notranjega okolja (IRsNO) tako predstavlja avtomatski sistem, ki dopolnjuje in nadgrajuje bioklimatsko stavbo v celovito zaključeno celoto energetskih in materialnih interakcij med zunanjim okoljem, notranjim grajenim okoljem ter uporabnikom.

IRsNO je zamišljen in izveden kot realna eksperimentalna aplikacija, ki v realnem času omogoča uravnavanje notranjih bivalno-delovnih pogojev s pomočjo odzivanja na zunanje vremenske pogoje. Sistem je nameščen v delovnem okolju kabineta KSKE III/1 v stavbi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Jamovi cesti 2, kar omogoča trenutno preverjanje primernosti delovanja s pomočjo odzivov uporabnikov prostora. Znotraj prostora IRsNO nadzoruje ter uravnava harmoniziran pretok toplotnih in optičnih tokov skozi transparentne dele ovoja stavbe s pomočjo spreminjanja pozicije zunanje nameščenih žaluzij venecijanskega tipa. Žaluzije so nameščene na šestih oknih kabineta, pri čemer so štiri okvirnih dimenzij 1 m x 2 m, dve pa sta večji, in sicer 1.8 m x 2 m. Skupna površina zasteklitve je 11.40 m². Žaluzije so tipa »Krpan 80«, izvedene v aluminiju in prepleskane s svetlo sivo barvo. Vgrajen motor omogoča premikanje in rotiranje lamel, kar pomeni, da se žaluzije spuščajo v popolnoma zaprti poziciji, šele ko dosežejo predvideno pozicijo, se lahko določi naklon lamel. Projektiran in vgrajen regulacijski sistem bo omogočal regulacijo vsake od šestih žaluzij posebej. Notranji temperaturni pogoji v prostoru kabineta KSKE III/1 se po potrebi regulirajo z ogrevanjem in hlajenjem prostora s pomočjo velikopanelnega stropnega radiacijskega sistema. Ker na ugodno počutje uporabnikov v prostoru zelo močno vpliva tudi kvaliteta zraka, aplikacija preko spremljanja koncentracije biopolutantov (CO₂) z avtomatsko regulacijo odpiranja in zapiranja okna vzdržuje zahtevan nivo kvalitete zraka.

Izvedba predlaganega regulacijskega sistema predstavlja zelo kompleksno nalogo, ki zahteva veliko predhodnih eksperimentalnih in simulacijskih podatkov. Zaradi kompleksnosti zasnove

IRsNO je bila glavna opora pri izvedbi predhodno opravljeno znanstveno raziskovalno delo na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente (KSKE) [Furlan 1999] [Kristl et al. 2007] [Trobec-Lah 2003,] [Trobec-Lah et al. 2005, 2006]. Predvsem pri uravnavanju harmonizacije toplotno-optičnih tokov skozi transparentni del stavbnega ovoja smo se opirali na izkušnje in rezultate, dosežene na testni celici KAMRA. Vendar IRsNO ne predstavlja le prenosa na večje merilo stavbe, ampak kvalitativen preskok z eksperimentalnega sistema brez vpliva uporabnika na sistem, delujoč v realnem delovnem okolju, ki pokriva reguliranje celote bivalno-delovnih pogojev notranjega okolja in ne le uravnavanje spremenljivih karakteristik transparentnega dela ovoja stavbe. Dodatno se v sistemu IRsNO regulirata tudi kvaliteta zraka in umetna osvetljenost prostorov. Sistem je nameščen v realnem okolju, v katerem biva uporabnik s svojimi zahtevami in željami. Vgrajen ogrevalno-hladilni sistem pa zaradi načina delovanja (radiacija) nikakor ni primerljiv z načinom ogrevanja uporabljenim v KAMRI. Takšen preskok v merilu, obsegu in kompleksnosti obravnavanega okolja predstavlja določene tehnološke specifikke, ki jih je potrebno razrešiti, predvsem pa se izpostavijo problemi načina zagotavljanja uporabniku prijetnega okolja. Vpliv uporabnika je zato predstavljal poseben izziv pri oblikovanju regulacijskega sistema, saj je bilo nujno potrebno ugoditi uporabnikovim zahtevam kot tudi omogočiti delovanje, ki bo vodilo do energetske učinkovitosti sistema. Eksperimenti, izvedeni s sistemom, so bili podlaga za izboljšanje nastavitvenih pravil mehkega regulatorja ter tudi način, kako potrditi začetno hipotezo o pomembnosti avtomatske regulacije za izboljšanje kvalitete bivalnega okolja in njegove energetske učinkovitosti. Glavne cilje aplikacije IRsNO lahko tako povzamemo v naslednjih točkah:

- **regulacijski sistem:** postavitvev in izvedba celovitega sistema regulacije notranjega okolja z vsemi potrebnimi pripadajočimi aktuatorji v realnem delovno-bivalnem okolju;
 - **oblikovanje sistema mehkih regulatorjev:** vzpostaviti odgovarjajoč nabor pravil regulatorja, ki bo sposoben uravnavati bivalne pogoje in omogočati energetske učinkovitost;
 - **harmoniziranje toplotno-optičnih procesov:** izvedba primerne usklajevanja med aspekti toplotnega ugodja in vizualnega udobja ob upoštevanju uporabe prostora (vpliv uporabnikov), energetske učinkovitosti in tehnoloških možnosti sistema;
-

- **eksperimentalno delovanje:** optimiziranje sistema bo potekalo skozi eksperimentalno delovanje, ki bo pokazalo pomanjkljivosti sistema, te pa bomo odpravili z nadaljnjim delom. Eksperimenti se bodo izvajali po zaključku dela, opisanega v pričujočem delu.

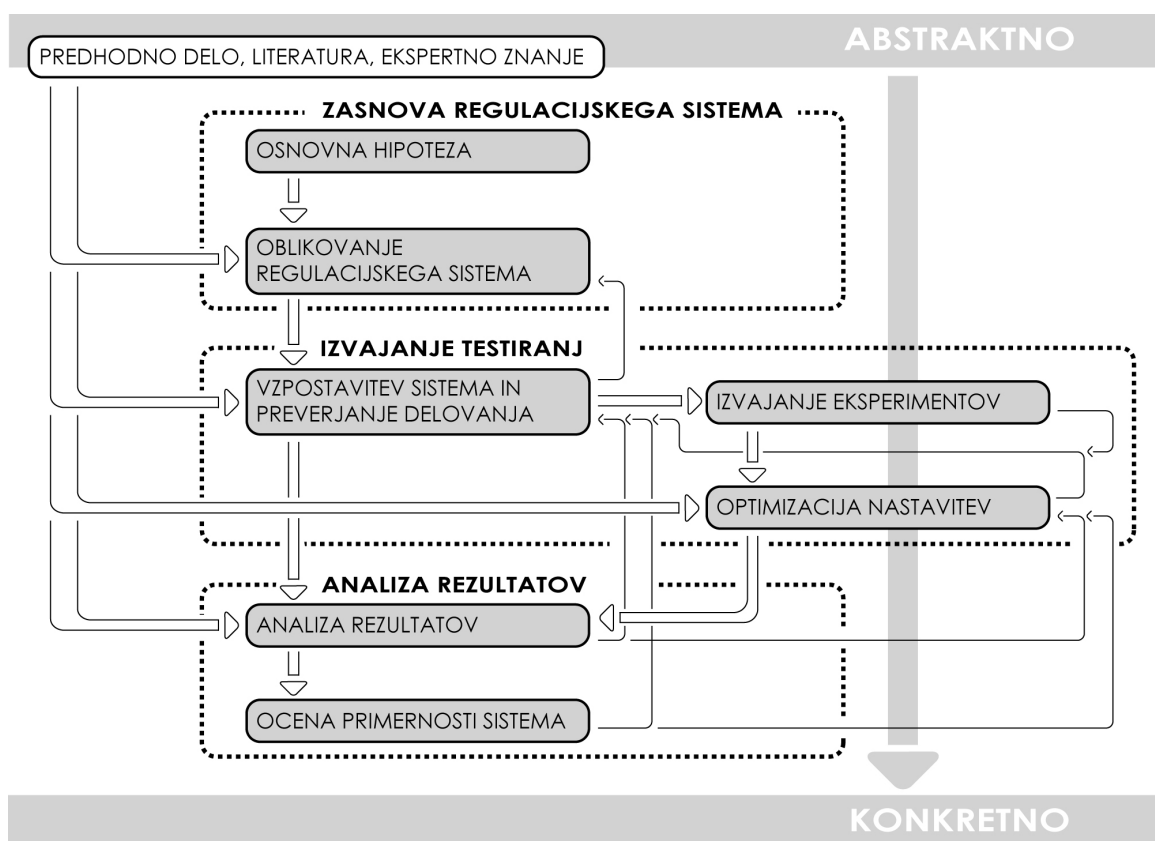
1.5 Metodologija

Pri celotnem oblikovanju in snovanju sistema IRsNO je kot glavno vodilo načrtovanja služila metodologija inženirskega oblikovanja, kar pomeni, da je razvoj sistema sledil poteku od abstraktnega koncepta h končni realni izvedbi regulacijskega sistema notranjega okolja. Ker je za postopek razvoja tako kompleksnega regulacijskega sistema, kot je IRsNO, značilno veliko število potrebnih povratnih zank za preverjanje in vrednotenje primernosti rešitev v odnosu do začetnih konceptov, lahko označimo celoten proces načrtovanja kot ciklični z značilnimi kronološkimi koraki, ki so nas pripeljali do končne rešitve. Zelo pomembno vlogo pri oblikovanju regulacijskega sistema so igrali tudi že predhodno opravljeno delo na KSKE ter drugi podobni sistemi regulacije notranjega okolja. To predhodno opravljeno delo predstavlja bazo podatkov oziroma znanja, ki je omogočilo nadgradnjo že doseženih rezultatov ter tako lažje in hitreje oblikovanje delujočega regulacijskega sistema.

Sistem IRsNO temelji na predhodnih raziskavah, opravljenih na sistemu KAMRA, razvitem na KSKE, ki predstavlja osnovo, na podlagi katere je bil zasnovan nov regulacijski sistem. Zato je v začetnem delu naloge veliko pozornosti posvečene analizi delovanja sistema KAMRA. Prav tako je poglobljeno obdelan pojav interakcije notranjega in zunanjega okolja skozi stavbni ovoj, ki predstavlja materialno-energetsko-informacijski vmesnik med obema okoljema. Preučeni so bili vpliv tipa izbrane zasteklitve (dvojna ali trojna zasteklitev) ter posledični vplivi na spremembe v notranjem okolju in delovanju stavbnega ovoja kot aktivnega vmesnika. Pregledane so bile tudi možnosti pri izbiri tipov senčil ter zasteklitev kot osnovnih elementov formiranja transparentnega dela stavbnega ovoja. Pri oblikovanju novega regulacijskega sistema gre predvsem za formulacijo novih okvirov delovanja IRsNO-ja znotraj kompleksnega sistema vplivnih faktorjev oblikovanja delovno-bivalnega okolja.

Celotno strukturo naloge bi lahko v grobem razdelili na tri med seboj prepletene in soodvisne dele. Ti v sebi združujejo vse vmesne korake v procesu oblikovanja in snovanja regulacijskega sistema ter skupaj s predhodno opravljenim raziskovalnim delom predstavljajo metodološki proces načrtovanja sistema IRsNO (Slika 1.4). Proces oblikovanja IRsNO-ja je sledil sledečim trem korakom. To so:

- **zasnova regulacijskega sistema** – v prvem delu naloge je bilo potrebno vzpostaviti osnovne predpostavke, na katerih bo temeljil sistem regulacije notranjega okolja. S tem je bil definiran okvir parametrov (notranje zahteve, zunanje danosti), s katerimi bo operiral regulacijski sistem in ki predstavljajo osnovne gradnike, na katerih se je izoblikoval IRsNO. V ta namen sta služila ocena in pregled že opravljenega dela na področju regulacije toplotnih in svetlobnih tokov v grajenem okolju. Analiza



Slika 1.4: Diagram metodologije uporabljene pri razvoju integralnega sistema notranjega delovno-bivalnega okolja.

Fig. 1.4: Methodology applied in the development of integral system of internal living-working environment.

dostopne relevantne literature je vsebovala pregled in oceno dela, izvršenega v okviru testne celice KAMRA na KSKE, ter tudi drugih podobnih raziskav. Dodatno je bil v pripravljalnem delu naloge obdelan in preučen pojav stavbnega ovoja kot interakcijskega vmesnika med dvema fizično ločenima, a konceptualno neločljivima okoljema, torej med notranjim in zunanjim prostorom. Na podlagi spoznanj iz zgoraj navedenih analiz so bile izbrane osnovne smernice integralne regulacije notranjega delovno-bivalnega okolja, ki predstavljajo celovito rešitev z upoštevanjem uporabnikovih želja, želje po energetskih prihrankih v zgradbah kot tudi tehnoloških možnostih zasnovanega sistema. Pri zasnovi regulacijskega sistema je bilo osnovno vodilo, kako zagotoviti uporabniku prijetne bivalno-delovne pogoje ter hkrati omogočiti energetske prihranke, vendar nikoli na škodo udobja. V sklopu te predpostavke je bil poseben poudarek pri izvajanju nastavitvev regulacijskih pravil posvečen harmonizaciji svetlobnih in toplotnih tokov, saj takšen način omogoča maksimalne energetske prihranke ob hkratnem upoštevanju želja uporabnikov. Kot zadnji korak pri vzpostavljanju nabora pravil mehke regulacije je bila izvedena optimizacija, katere primarni namen je bil doseči nastavitve, ki bi omogočale primerno delovanje sistema IRsNO v realnem delovnem okolju in s tem zadostile kvalitativnim in kvantitativnim kriterijem;

- **izvajanje testiranja** – drugi korak v snovanju sistema IRsNO se deli konceptualno na dva dela. V prvem delu se sistem regulacije izvede oziroma vzpostavi, njegovo delovanje pa preizkusi. Pri tem gre za testiranje delovanja senzorske mreže ter tudi strojne in programske opreme IRsNO. Po opravljenem testiranju in usklajevanju posameznih gradnikov sistema sledi vgraditev začetnih nastavitvev mehkih regulatorjev, ki so oblikovani na podlagi predhodnega dela in ekspertnega znanja s področja oblikovanja notranjega bivalno-delovnega okolja. Drugi del predstavlja izvajanje eksperimentov, ki se bodo in se že izvajajo v realnem okolju kabineta KSKE v stavbi FGG na Jamovi cesti 2, in potekajo v realnih vremenskih razmerah. Izvajanje eksperimentov poteka vzporedno s prvim korakom. Cilj eksperimentov je s pomočjo preverjanja različnih nastavitvev v realnem okolju neprestano širiti nabor znanja in omogočiti konstantno optimizacijo delovanja sistema, kar bo potekalo tudi po končanju pričujoče naloge.

- **Analiza rezultatov** – Rezultati, pridobljeni s fazo testiranja delovanja nastavitve regulatorja, so omogočili izvedbo kvantitativno-kvalitativne analize delovanja in zasnove sistema IRsNO. Analiza preliminarnih testiranj in ocena postavljenega sistema sta bili osnova za korekcije določenih nastavitvev regulacijskega sistema, predvsem pa podlaga za nadaljnje delo pri snovanju in izvedbi eksperimentov in najprimernejših nastavitvev regulacijskega algoritma. S takšnim pristopom paralelnega preverjanja delovanja sistema in vpeljavo povratnih zank pri oblikovanju IRsNO-ja je bila dosežena hitra odzivnost načrtovanja regulatorja. Način dela omogoča izvajanje analitičnega dela pred zaključkom eksperimentalne faze, saj potekata vzporedno ter s tem omogočata hitro odzivnost pri prilagajanju regulacijskih pravil mehkega regulatorja. Rezultati analiz dela pa ne predstavljajo le ocene izvedenega sistema, ampak tudi izgradnjo sistema mehkih pravil regulacije za uporabo na aplikaciji IRsNO ter na drugih podobnih sistemih.
-

2 STAVBNI OVOJ IN INTERAKCIJA Z NOTRANJIM OKOLJEM

2.1 Interaktivnost stavbnega ovoja

Ovoj stavbe kot vmesnik in ločilo med zunanjim in notranjim okoljem predstavlja ključen element pri tvorjenju umetnega notranjega bivalnega okolja. Notranje okolje bivanja in delovanja za ljudi, torej uporabnike, predstavlja za razliko od naravnega zunanjega okolja prostor nadzora tako na psihofizičnem kot fizičnem področju bivanja.

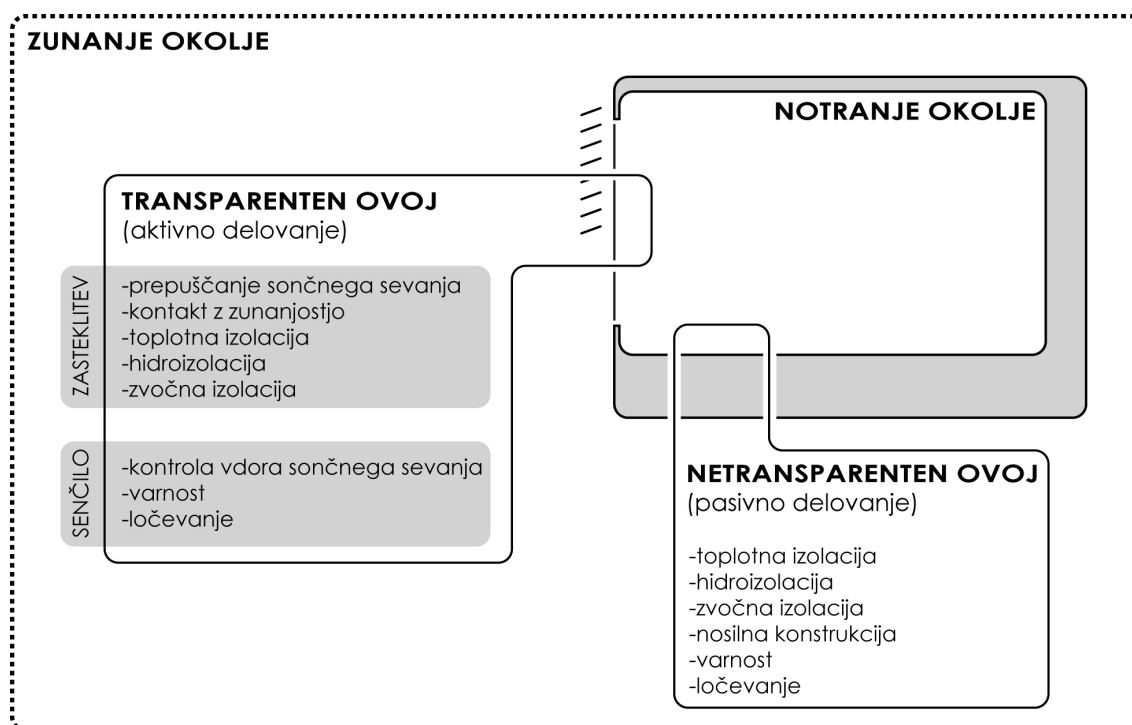
Z razvojem in specializacijo človeka in njegovega socio-ekološkega prostora se je in se še vedno dviga tudi stopnja specializacije in nadzora parametrov bivalno-delovnega okolja. Kot končno stopnjo takšnega razvoja bi lahko v hipotetičnem primeru pričakovali razvoj popolnoma izoliranega umetnega okolja, ločenega od kakršnih koli zunanjih vplivov. Vendar že krajši premislek o izvedljivosti takšnega sistema pokaže, da bodo grajeni sistemi vedno pozicionirani znotraj širšega naravnega okolja ter tako nanj fizično vezani vsaj s fizikalnimi procesi izmenjave energetskih tokov, če ne tudi snovi. Dodatno pa se stvari pričnejo zapletati pri človeški fiziologiji, psihi in psihološki vezanosti človeka na zunanje okolje, ne glede na to, kaj to zunanje okolje predstavlja. Ljudje za dolgotrajno dobro počutje v grajenih oziroma umetnih okoljih nujno potrebujejo stik z zunanostjo, saj si s tem vzpostavijo povezavo z zunanjim svetom in tako podkrepijo iluzijo o možnosti kontrole nad dogajanjem okoli sebe ter zmanjšujejo občutek klavstrofobičnosti in ujetosti v majhnem zaključenem prostoru. Dodatno takšna navezava na zunanost vnaša nepredvidljivo dinamiko zunanjih vplivov, ki vodijo do fizioloških šokov ter pozitivnega stresa, s katerim je telesu omogočena priprava na nepredvidljive situacije vsakdanjega bivanja. Nuja po izmenjavi informacij (čutnih dražljajev) z zunanostjo je postala pereč problem predvsem z nastopom industrijske revolucije, ko se prvič v zgodovini človeštva ljudje naseljujejo v zelo velikih koncentracijah, kar posledično vodi do minimalno oblikovanih bivalnih prostorov brez stika z zunanostjo. V isto časovno obdobje sodi tudi pripetljaj s prvimi vagoni londonske podzemne železnice, ki so jih inženirji oblikovali brez oken, saj so sklepali, da v temnem predoru ni potrebe po pogledu v zunanost. Te vagone, ki so jih potniki slikovito imenovali krste, so po začetni, zelo kratkotrajni uporabi

hitro zamenjali z naslednjim modelom, ki je že imel vgrajena okna. Ta pripetljaj iz zgodovine železnic nam na zelo ilustrativen način predstavi nekaj, kar je skupno vsem umetnim okoljem, v katerih se ljudje zadržujejo za daljši čas, pa naj bo to zaradi dela ali bivanja, in sicer da je za ugodje nujno potrebno zagotoviti neposreden stik z zunanjim okoljem. In prav udobno bivanje je predpogoj za zadovoljne in zdrave uporabnike prostorov.

Sistemi notranjega bivalno-delovnega okolja so z izmenjavo energije in informacij neločljivo vezani na zunanje okolje ter tako v konstantni dinamični interakciji z zunanjimi danostmi. Ta izmenjava pa se izvaja preko vmesnika, ki ima tako vlogo zaščite in ločevanja kot tudi posredovanja zelenih vplivov iz zunanosti v notranjost in obratno. Vmesnik, ki se v primeru stavb manifestira v obliki stavbnega ovoja, predstavlja element stavbe, ki omogoča interakcijo grajenega okolja z zunanostjo ter tako na splošno tudi definira obseg bivalno-delovnega okolja. Stavbni ovoj je zaključena celota, ki objema notranji prostor in ga ločuje ter hkrati povezuje z zunanostjo, kljub temu pa se znotraj same strukture ovoja pojavljajo zelo velike razlike glede sestave in funkcij posameznih elementov. Tako lahko ločujemo različne elemente stavbnega ovoja glede na strukturo (transparentni, netransparentni deli), funkcijo (toplotna zaščita, zvočna zaščita, psihofizična zaščita ...) in pozicijo v stavbi (strehe, odprtine, tla, stene ...). S stališča prenosa energije in informacij med zunanjim in notranjim okoljem je najbolj zanimiva delitev na transparentne in netransparentne elemente ovoja (Slika 2.1), saj nam takšna delitev glede na trenutno stanje tehnologije gradnje v grobem ločuje tudi na aktivne in pasivne elemente. Pri tem so transparentni elementi ovoja tisti, ki v večini primerov opravljajo večino funkcij povezav notranjega okolja z zunanostjo tako na nivoju stika uporabnikov z okolico kot tudi pri prenosu energije v sistem notranjega okolja s pomočjo sončnega sevanja. Zaščito in ločevanje notranjosti od zunanosti ob izpolnitvi dovolj velike toplotne zaščite opravlja netransparentni del ovoja. Aktivna vloga transparentnih elementov oziroma odprtin je v zelo veliki meri odvisna od strukture oziroma zasnove le-te. Tako lahko trdimo, da v principu gradnja na višjem tehnološkem nivoju omogoča tudi večjo prilagodljivost zunanjih odprtin željam in zahtevam uporabnikov. Pogled v konceptualno zasnovo oblikovanja transparentnih elementov pa odkrije, da v zadnjih 2000 letih na tem področju ni bilo večjih preskokov v zasnovi odprtin, saj je prihajalo le do tehnoloških izboljšav. Tako kot v preteklosti tudi dandanes osnovo zunanjega transparentnega dela stavbnega ovoja predstavljata zasteklitev in v neki obliki aplicirana sončna zaščita (senčila).

Okno oziroma zasteklitev v sistemu zunanjega transparentnega ovoja omogoča vizualni kontakt z zunanostjo, prehod sončnega sevanja v notranji prostor, izgubo toplotne energije ter z odpiranjem okna izmenjavo zraka z zunanostjo. Po drugi strani pa dajejo senčila uporabniku na voljo možnost regulacije dotoka sončnega sevanja ter ustvarjanje zasebnosti in varnosti, ko ni zaželen stik med notranjim in zunanjim prostorom. Oba funkcionalna sloja, združena v sistem transparentnega ovoja stavbe, predstavljata izrazito aktiven element interakcije notranjega okolja z zunanostjo. Seveda pa zasteklitev in senčilo nista nujno fizično ločena, ampak sta lahko v sodobnih naprednih zasteklitvah (elektrokromna in gasokromna stekla) združena v enoten tehnološko napreden proizvod, kjer ni več potrebe po mehanskih senčilih.

Zaradi aktivne narave transparentnega dela stavbnega ovoja je za primerno uravnavanje interakcije med zunanjim in notranjim okoljem potrebno vzpostaviti zadosten nivo regulacije funkcij elementov odprtine. V večini primerov se za spreminjanje karakteristik transparentnih



Slika 2.1: Shema konceptualne delitve stavbnega ovoja v kontekstu zunanjega in notranjega okolja.

Fig. 2.1: Conceptual division of building envelope in the context of external and internal environment.

elementov uporablja ročna regulacija s strani uporabnikov, ki pa se je zaradi človeške sposobnosti adaptacije na klimatske razmere izkazala kot neučinkovita. Naslednji tehnološki korak v oblikovanju elementov zasteklitve tako predstavlja zagotovitev primerne avtomatske regulacije. Pri tem se izpostavlja predvsem problem, kako oblikovati avtomatski regulacijski sistem, ki bo zadovoljil želje uporabnika ter hkrati ne bo predstavljal izvora dodatnega nezadovoljstva. Testirani avtomatski sistemi so pokazali, da uporabniki zavrnejo kakršen koli avtomatski sistem, če je njegovo delovanje moteče in če ne obstaja možnost enostavnega posega v njegovo delovanje. Tako večina uporabnikov zavrne tudi regulacijski sistem, ki deluje zadovoljivo, a ne omogoča hitrega in enostavnega prilagajanja delovanja sistema. Zato je nujno, da ima regulacijski sistem enostaven in predvsem pregleden vmesnik, ki daje uporabnikom občutek nadzora nad delovanjem avtomatskega sistema.

Zgoraj opisana aktivna vloga stavbnega ovoja kot vmesnika med zunanjim in notranjim okoljem je v bistvu bioklimatskega oblikovanja in snovanja stavb, saj predvideva izkoriščanje izmenjave energije, snovi in informacij za doseg uporabniku prijetnega, zdravega in energetske učinkovitega notranjega okolja. Poudariti je potrebno, da je udobno in zdravo notranje okolje vedno primarnega pomena in tako bolj pomembno kot energetska učinkovitost stavbe, saj lahko le zdravi in zadovoljni uporabniki zagotovijo tudi učinkovitejšo družbo, ki je predpogoj za ustvarjanje energetske manj potratnih sistemov. Kljub temu pa se pod okriljem perečih problemov energetske krize in sprememb globalnega klimatskega okolja v zadnjih letih poizkuša v graditeljstvu vzpostaviti način razmišljanja, ki propagira čim večje ločevanje notranjega od zunanjega okolja ter zmanjševanje dinamičnih interakcij med njima [Krainer et al. 2008]. Primarni cilj takšnih stavb je doseči večjo energetske učinkovitost s pomočjo vzpostavitve čim bolj neaktivnega stavbnega ovoja, ki onemogoča interakcijo notranjosti z zunanostjo. Tehnološki posegi v stavbah so večinoma naravnani na zmanjšanje porabe energije brez dejanskega premisleka o vplivih na kvaliteto bivalnega okolja in zdravje uporabnikov. Kot takšen ta pristop predstavlja ostanek pogleda na naravo in človeka iz 19. stoletja, saj ne priznava kompleksne povezanosti in interaktivnosti med človekom, naravo in umetno ustvarjenim okoljem človeške družbe. Pristati na takšen način razmišljanja pa bi v začetku 21. stoletja pomenilo priznati poraz v boju za razvoj človeške družbe, ki v svoji celotni zgodovini je in mora stremeti k oblikovanju boljšega in kvalitetnejšega okolja za prebivanje svojih članov.

2.2 Transparentni del stavbnega ovoja

Ovoj stavbe je glede na trenutno tehnološko stanje materialov in tehnologij za gradnjo sestavljen iz dveh ostro ločenih skupin elementov, kjer vsaka opravlja svoje specifične funkcije in naloge. Tako lahko ločimo transparentni in netransparentni del ovoja stavbe, kjer prvi opravlja izredno dinamično nalogo izmenjave energetskih, optičnih in informacijskih tokov, pri drugem pa so v ospredju statične naloge zaščite in ločevanja. Zaradi dinamične narave transparentnega dela ovoja stavbe nas pri bioklimatskem oblikovanju notranjega okolja in stavbe kot celote zanima predvsem možnost hitrega odziva ter prilagajanja lastnosti teh elementov. Tako nas v kontekstu reguliranja notranjih bivalnih parametrov zanimajo predvsem možnosti prilagajanja geometrije in karakteristik stavbnih odprtín z razlogom omogočanja odziva in sledenja tako zunanjim danostim kot tudi notranjim zahtevam uporabnikov.

Ker ob zagotovitvi dovolj velike toplotne izolativnosti netransparentnega dela stavbnega ovoja večina dinamičnih interakcij med notranjim in zunanjim okoljem poteka v okviru stavbnih odprtín, bodo v nadaljevanju predstavljene osnovne značilnosti le-teh. Zaradi narave sestave transparentnega dela stavbnega ovoja lahko le-tega ločimo na dva sistema, ki povezana tvorita celoto stavbnih odprtín, pri tem so mišljeni zasteklitve in elementi senčenja zasteklitve. Naslednja poglavja s pomočjo analiz utemeljujejo izbor materialov in sistemov tako senčil kot tudi zasteklitve ter osvetljujejo pasti in območja pozornosti pri izbiri sistemov, ki tvorijo aktivni vmesnik stavbe z zunanjim okoljem.

2.2.1 Zasteklitve

V sistemu transparentnega dela ovoja stavbe so zasteklitve del, ki omogočajo prepuščanje sončnega sevanja v določenem spektralnem območju, s tem v večini primerov prehajajo iz zunanosti v notranost tako toplotni kot tudi vidni del sončnega sevanja. Gledano z materialnega vidika, zasteklitve transparentnega dela stavbe nikakor ni nujno izvedena le s steklom, ampak se ponuja tudi zelo veliko število bolj ali manj primernih prosojnih in prozornih materialov. Zgodovinsko so se pred širšo uporabo stekla uporabljale predvsem različne kože, alabaster in papirji (japonska hiša), dandanes pa so na voljo tudi različni polimerni materiali (PMMA – polimetil metacrilat, PC – policarbonat, PET-A – polietilen

tereptalat, ETFE – etilen tetrafluoroetilen) [Kaltenbach (ur.) 2004]. Kljub širokemu izboru sodobnih polimernih transparentnih materialov pa zaradi kombinacije fizikalnih lastnosti in naprednih tehnološko dovršenih sistemskih rešitev steklo kot material za transparentni del ovoja stavbe še vedno ostaja najbolj uporabljan material. Polimerni materiali se uporabljajo predvsem pri posebnih aplikacijah, kjer so potrebne velike neprekinjene prozorne površine, ali pa pri izrednih tlačnih obremenitvah (akvarijska stekla, podmornice ...), ki posledično zahtevajo izjemno debele zasteklitve ter so tako veliko lažje izvedene iz polimernih materialov. Ne glede na material izvedbe in namen odprtine v stavbnem ovoju vse zasteklitve kot osnovni element transparentnega ovoja zagotavljajo sledeče funkcije:

- **prepuščanje celotnega sončnega spektra** – v kolikšni meri in katere valovne dolžine sončnega spektra prepušča zasteklitev, je odvisno od namena in materiala izvedbe, vendar če zasteklitev prepušča dovolj veliko količino energijskega toka sončnega sevanja, lahko le-ta zelo vpliva na energetska bilanco notranjega okolja;
- **prepuščanje vidnega spektra sončnega sevanja** – vsi tipi zasteklitev v določeni meri prepuščajo del vidnega spektra sončnega sevanja in s tem omogočajo osvetljevanje notranjega okolja z dnevno svetlobo, ki predstavlja najkvalitetnejši izvor osvetlitve;
- **zaščita pred zunanjimi vplivi** – kot del kontinuiranega zunanega ovoja morajo transparentni elementi (zasteklitve) zadostiti osnovnim funkcijam zaščite pred klimatskimi vplivi na nivoju toplotne izolacije (U faktor), hidroizolacije in zvočne zaščite ter dodatno izpolnjevati vsaj osnovne kriterije glede varovanja notranjega okolja pred nezaželenimi vdori v notranji prostor;
- **prepuščanje informacij** – za ugodno in uporabnikom prijetno notranje okolje mora biti zagotovljen vsaj vizualen stik z zunanostjo, prosojni elementi stavbnega ovoja so večinoma tisti, ki v kontekstu stavb omogočajo izmenjavo informacij med zunanjim in notranjim okoljem.

Steklo je kemično gledano, anorganski material, katerega agregatno stanje je definirano kot strjena tekočina, saj material preide iz tekoče oblike v trdno brez vmesne kristalizacije. Odsotnost kristalne strukture v steklu omogoča prehod svetlobe brez difuzije. Steklo se lahko pridobiva iz različnih anorganskih oksidov (silicij, bor, germanij, fosfor in arzenik), vendar je

večina stekel proizvedenih na osnovi silicijevega dioksida. V gradbeniških aplikacijah se uporablja t.i. alkalno kalcij silicijevo steklo, ki vsebuje: 69 % – 74 % SiO₂, 12 % – 16 % Na₂O, 5 % – 12 % CaO ter elemente v sledovih, ki vplivajo predvsem na barvo stekla. Proizvodnja stekla je znana že iz Egipta, kjer arheološke najdbe kažejo na proizvodnjo le-tega že iz časa 5000 let pr. n. š. Prvi tehnološki postopki za izdelavo stekla, dovolj velikega za uporabo v stavbah, pa se pojavijo pri Rimljanih v 1. stoletju pr. n. š., ki so bili s postopkom vlivanja sposobni izdelati plošče v velikosti do 70/100 cm. Za začetek sodobne industrijske neprekinjene izdelave stekla lahko štejemo izum tehnologije vlečenja, ki je bila razvita in patentirana leta 1905 (neodvisno sta jo razvila Emile Fourcault in Irwin W. Colburn). Skoraj vse steklo za zasteklitve pa je danes izvedeno po postopku »float«, ki ga je leta 1959 izumil Alastair Pilkington. S tem postopkom je v stanju trenutne tehnologije mogoče izvesti velikosti šip do 321/600 cm ter debelin 2 – 19 mm, čeprav so pri izredno višjih finančnih stroških mogoče tudi večje dimenzije.

Pri sodobnih zasteklitvah na osnovi stekla vedno govorimo o proizvodu, ki je sestavljen vsaj iz dveh šip z vmesnim plinskim polnjenjem (zrak, argon, kripton, ksenon, žveplov heksafluorid) [EN 673 1997], z dodajanjem različnih premazov pa se lahko izboljšajo optične (protirefleksijski, refleksijski in holografski premazi) in termične (nizkoemisijski premazi) lastnosti zasteklitve. Takšen element se nadalje vgrajuje v različne gradbene sisteme ter predstavlja visoko tehnološki ter izrazito fleksibilen del zgradbe.

2.2.1.1 Optično termične lastnosti zasteklitve – problem izbora

Pri snovanju sistema vodenja fizikalnih procesov prenosa svetlobe in toplote skozi transparentni del stavbnega ovoja je za primerno delovanje nadzora in zadostno stopnjo odzivnosti potrebno poznati in razumeti gradbeno-fizikalne značilnosti elementov, ki sestavljajo ovoj. Tako je potrebno pri zasnovi sistema regulacije optičnih in termičnih tokov v stavbi začeti na začetku, torej pri zasnovi stavbe, ter koncipirati stavbo in njene elemente tako, da že sam objekt omogoča kvalitetno zagotavljanje udobnih bivalnih pogojev. Ker so elementi transparentnega dela stavbnega ovoja tisti, ki v primerno bioklimatsko oblikovani stavbi odločujoče vplivajo na notranje bivalno okolje, sta primeren izbor zasteklitve in senčil ter

poznavanje njihovih fizikalnih značilnosti nujno potrebna za kvalitetno delovanje sistema vodenja notranjega bivalno-delovnega okolja.

Steklo omogoča transmisijo sončnega sevanja med 315 in 2500 nm (UV od 315 do 380 nm, vidni spekter od 380 do 780 nm in bližnji IR od 780 do 2500 nm), pri čemer steklo valovne dolžine nad 2500 nm in pod 315 nm popolnoma absorbira. Prav absorpcija dolgovalovnega IR-sevanja je razlog za efekt tople grede pri zasteklitvah, saj se prepuščeno kratkovalovno IR sevanje absorbira v notranje površine prostora, nato pa te površine ponovno sevajo nazaj v prostor v dolgovalovnem IR-spektru, za katerega je steklo neprepustno. Navadno silicijevo prozorno steklo, izdelano po »float« postopku, kot je na primer Pilkington Optifloat™ Clear (d = 4 mm), prepusti 89 % (τ_v) vidne svetlobe, 8 % (ρ_v) se je odbije, absorbira (α_v) pa se 3 % vpadnega sevanja. S posebnimi antirefleksijskimi premazi je mogoče izboljšati karakteristike stekla ter zmanjšati odboj na 1 %, s čimer se poveča prepustnost zasteklitve [Kaltenbach (ur.) 2004]. Seveda pa zgoraj navedene vrednosti veljajo le za enojno zasteklitev ob popolnoma čistih površinah ter ob pravokotnem vpadu sončnih žarkov, dodajanje nizkoemisijskih premazov, dodatne šipe, barvanje stekel, prašni delci in nepravokotni vpad sončnega sevanja se odražajo v veliko nižjih vrednostih dejanske prepuščene svetlobe v vidnem spektru, kar je potrebno upoštevati pri predvidevanju rezultatov v realnih situacijah [Krainer et al. 2008]. Tako ob upoštevanju korekcijskih faktorjev za umazanost stekel (neobremenjeno mestno okolje – 0.8) in nepravokoten vpad sončnega sevanja (geografske širine zmernega klimatskega pasu – 0.8) transmisija za vidno svetlobo enojne zasteklitve pade z 89 % na 57 % ($89 \% * 0.8 * 0.8 = 57 \%$).

Toplotna prehodnost (U) enojne zasteklitve v primeru Pilkington Optifloat™ Clear šipe znaša $5.94 \text{ W/m}^2\text{K}$ in se zanemarljivo povečuje s povečanjem debeline samega stekla, zato se za izboljšanje toplotne izolativnosti sistemov zasteklitev uporabljajo elementi z več stekli. Praviloma se uporabljajo dvojne zasteklitve, kjer je med dvema stekloma ujet inerten plin, pri čemer je v primeru uporabe suhega zraka mogoče doseči vrednosti U-faktorja okoli $3.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Pilkington Optifloat™ Clear 4 mm + zrak 10 mm + Pilkington Optifloat™ Clear 4 mm). Pri tem pa je prenos toplote skozi sistem dvojne zasteklitve sestavljen iz radiacijskega prenosa med dvema šipama, ki predstavlja 67 % celotnega prenosa, nadaljnjih 33 % pa se prenese s pomočjo konvekcije in transmisije skozi plin ter obrobne distančnike. Dodatna

izboljšanja karakteristik so mogoča z uporabo žlahtnih plinov, kot sta argon ali kripton, ter z dodajanjem nizkoemisijjskih premazov (low-e), ki zmanjšajo radiacijske izgube med dvema šipama. Z naštetimi posegi je mogoče zmanjšati toplotno prehodnost zasteklitve v primeru uporabe argona in nizkoemisijjskega premaza na $1.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Preglednica 2.1), pri čemer pa

Preglednica 2.1: Karakteristike zasteklitev. Podatki veljajo za proizvode podjetja Pilkington in so izračunani s pomočjo Pilkington Spectrum v02.01.01 [Pilkington SpectrumTM 2007] računalniške aplikacije, ki pri izračunu vrednosti U , τ_v in g upošteva standarda EN 673 [EN 673 1997] in EN 410 [EN 410 1998]. Izračuni veljajo za čista stekla ob pravokotnem vpadu sočnega sevanja.

Table 2.1: Glazing characteristics. The data is valid for Pilkington's products. Values were calculated by the Pilkington Spectrum v02.01.01 [Pilkington SpectrumTM 2007] computer application which calculates the U , τ_v and g values according to the EN 673 [EN 673 1997] and EN 410 [EN 410 1998] standards. Calculations are executed for clear glass and are not corrected for the nonorthogonal incident angles.

	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)	τ_v (%)	g (%)	T (kg/m^2)
ENOJNA ZASTEKLITEV (Optifloat TM Clear 4 mm)	5.94	89	85	10
DVOJNA ZASTEKLITEV – ZRAK (Optifloat TM Clear 4 mm + zrak 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm)	2.80	81	76	20
DVOJNA ZASTEKLITEV – ARGON (Optifloat TM Clear 4 mm + argon 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm)	2.69	81	76	20
DVOJNA ZASTEKLITEV – KRIPTON (Optifloat TM Clear 4 mm + kripton 10 mm + Optifloat TM Clear 4 mm)	2.65	81	76	20
DVOJNA ZASTEKLITEV – ZRAK, LOW-E (Optifloat TM Clear 4 mm + zrak 16 mm + Optitherm TM SN 4 mm)	1.40	78	63	20
DVOJNA ZASTEKLITEV – ARGON, LOW-E (Optifloat TM Clear 4 mm + argon 16 mm + Optitherm TM SN 4 mm)	1.16	78	63	20
DVOJNA ZASTEKLITEV – KRIPTON, LOW-E (Optifloat TM Clear 4 mm + kripton 10 mm + Optitherm TM SN 4 mm)	1.09	78	63	20
TROJNA ZASTEKLITEV – ZRAK (Optifloat TM Clear 4 mm + zrak 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm + zrak 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm)	1.78	73	68	30
TROJNA ZASTEKLITEV – ARGON (Optifloat TM Clear 4 mm + argon 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm + argon 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm)	1.68	73	68	30
TROJNA ZASTEKLITEV – KRIPTON (Optifloat TM Clear 4 mm + kripton 10 mm + Optifloat TM Clear 4 mm + kripton 10 mm + Optifloat TM Clear 4 mm)	1.66	73	68	30
TROJNA ZASTEKLITEV – ZRAK, 2xLOW-E (Optitherm TM SN 4 mm + zrak 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm + zrak 16 mm + Optitherm TM SN 4 mm)	0.78	69	50	30
TROJNA ZASTEKLITEV – ARGON, 2xLOW-E (Optitherm TM SN 4 mm + argon 16 mm + Optifloat TM Clear 4 mm + argon 16 mm + Optitherm TM SN 4 mm)	0.60	69	50	30
TROJNA ZASTEKLITEV – KRIPTON, 2xLOW-E (Optitherm TM SN 4 mm + kripton 10 mm + Optifloat TM Clear 4 mm + kripton 10 mm + Optitherm TM SN 4 mm)	0.58	69	50	30

se zmanjšata tudi prepustnost za vidno svetlobo ($\tau_v = 78 \%$) in celoten spekter sončnega sevanja ($g = 63 \%$). Nadaljnje izboljšave v smeri zmanjšanja U-faktorja zasteklitve vodijo do uporabe trojne zasteklitve, dveh nizkoemisijskih premazov in plinskega polnjenja z argonom ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$) ali kriptonom ($U = 0.58 \text{ W/m}^2\text{K}$), seveda pa se hkrati z izboljšanjem karakteristik toplotne prehodnosti zasteklitve poslabšajo njene transmissijske karakteristike za sončno sevanje, in sicer tako za vidni (τ_v) kot celotni spekter (g).

Posledice zmanjševanja prepustnosti za sončno sevanje pri zasteklitvah neposredno vplivajo na količino dnevne svetlobe v bivalno-delovnem okolju ter tudi na energetska bilanco stavbe. Zmanjševanje razpoložljive količine dnevne svetlobe v bivalnih in delovnih okoljih pa dokazano negativno vpliva na počutje, zdravje in storilnost uporabnikov [Heschong 2003a 2003b 2003c] [Krainer et al. 2008] ter tudi na porabo energije za osvetljevanje in hlajenje prostorov [Krainer et al. 2008] [Rubinstein et al. 1999] [Ruck et al. 2000]. Že študije, izvedene v ZDA v poznih 70. letih prejšnjega stoletja, so nakazale možne prihranke pri energiji za osvetljevanje poslovnih prostorov v rangi 15 % – 20 % [Košir et al. 2006], če bi bila zagotovljena dovolj velika količina dnevne svetlobe pri upoštevanju kvalitativnih kriterijev. Dokončno pa je prednosti in pozitivne učinke dnevne svetlobe pri povečanju storilnosti uporabnikov in prodaji v trgovinah potrdila 2003. leta izvedena HGM-študija [Heschong 2003a 2003b 2003c]. Zmanjšanje prepustnosti za celoten sončni spekter (g) zasteklitve podobno kot pri dnevni svetlobi povzroči zmanjšanje solarnih pritokov v notranje okolje ter s tem negativno vpliva na energetska bilanco stavbe. Seveda znižanje U-faktorja zasteklitve pripomore k zmanjšanju transmissijskih izgub stavbe, vendar če predvidevamo, da imajo netransparentni deli stavbnega ovoja faktor toplotne prehodnosti okoli $0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$, predstavlja večino toplotnih izgub takšnega objekta prezračevanje in ne transmisija skozi ovoj. V takšnem primeru je zmanjševanje U-faktorja okna ob hkratnem zmanjšanju transmisije za vidni in celotni sončni spekter z vidika celotne stavbe kot bioklimatsko oblikovanega okolja zelo vprašljiv ukrep [Krainer, Košir 2007] [Krainer et al. 2007]. Zaradi zgoraj naštetih razlogov in kompleksnih vplivov na delovanje celotnega sistema notranjega okolja zniževanja U-faktorja zasteklitve ni trivialno vprašanje ter zato zahteva tehten premislek in sistemsko obravnavo. V naslednjem poglavju so predstavljeni rezultati dveh raziskav vpliva spremembe U-faktorja zasteklitve na nivo notranje osvetlitve in energetska bilanco objektov, ki sta bili izvedeni na KSKE kot del raziskovalnega in izobraževalnega dela.

2.2.1.2 Vpliv U-faktorja zasteklitve

Na katedri za stavbe in konstrukcijske elemente sta bili izvedeni dve študiji, v okviru katerih smo raziskovali medsebojne interakcije med nivojem dnevne osvetlitve in energetske bilance stavbe v odvisnosti od U-faktorja uporabljene zasteklitve. Ker se z zmanjševanjem toplotne prehodnosti zasteklitve spreminjajo tudi optične značilnosti zasteklitve (Preglednica 2.1), nas je primarno zanimalo, v kolikšni meri znižanje U-faktorja poslabša nivo osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo. Ker pa se zaradi znižanja U-faktorja zasteklitve zmanjšajo transmisijske izgube stavbe, smo primerjali tudi, v kolikšni meri se energetska bilanca stavbe zaradi spremenjene zasteklitve izboljša in če ta izboljšava objektivno gledano upraviči poslabšanje dnevne osvetljenosti notranjega okolja.

Vpliv zmanjševanja U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetska bilanco stavbe je bil preverjen z dvema ločenima raziskavama [Krainer, Košir 2007] [Krainer et al. 2007], s tem pa smo poizkušali priti do rezultatov po dveh neodvisnih poteh ter zmanjšati možnost nepreverljivosti in pristranskosti rezultatov. To sta:

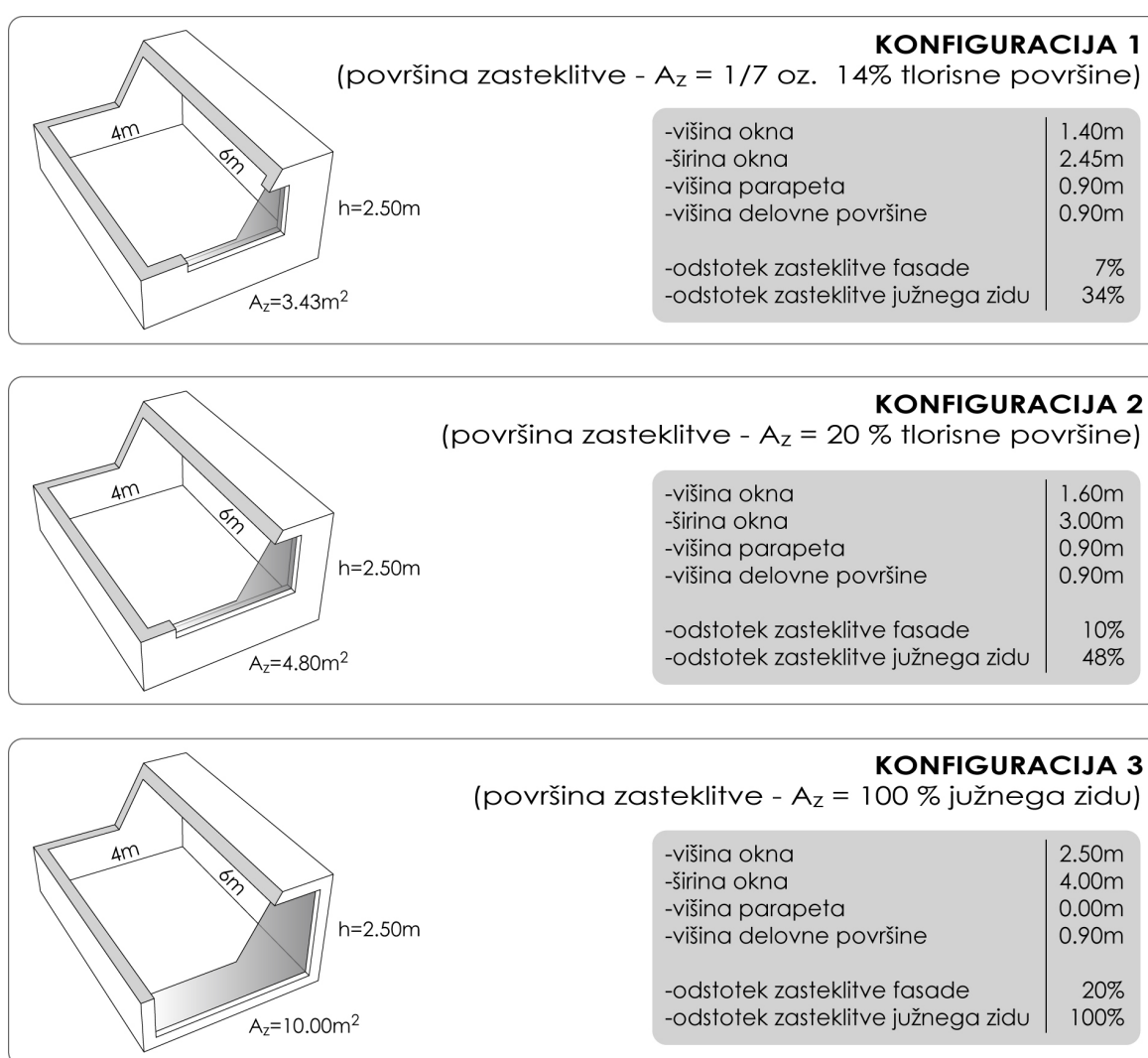
- **primerjalna analiza vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetska bilanco hipotetičnega eno prostornega objekta (Dodatek A)** [Krainer, Košir 2007], ki je bila izvedena kot interna raziskava v okviru KSKE in je obsegala preveritev toplotnega in svetlobnega odziva notranjega okolja pri dveh različnih tipih zasteklitve. Stavba je bila zasnovana kot paralelepiped z notranjimi dimenzijami prostora 4.00 m x 6.00 m ter svetlo višino prostora 2.50 m, orientacija objekta je bila predvidena tako, da je krajša stranica orientirana proti jugu, kjer se nahaja tudi odprtina. Preizkušena sta bila dva tipa zasteklitve, in sicer trojna ($U = 0.74 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.50$, $\tau_v = 0.66$) in dvojna zasteklitev ($U = 1.12 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.61$, $\tau_v = 0.76$) v treh različnih konfiguracijah površine zasteklitve (Slika 2.2) in z upoštevanjem korekcijskih faktorjev za umazanost stekel (0.80) in nepravokotnega vpada (0.80) sončnega sevanja. Netransparentni del stavbnega ovoja je bil oblikovan tako, da je bila za vse konstrukcijske sklope predvidena enaka vrednost U-faktorja, ki je znašal $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Primerjani so bili s simulacijami pridobljeni rezultati za dnevno svetlobo ob enakonočju (21. 3. in 21. 9. ob 12:00 za standardno oblačno CIE nebo)
-

ter letna poraba energije za ogrevanje brez upoštevanja hlajenja, izračunana po standardu EN 832 [EN 832 1998];

- **analiza vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje 27 naključno izbranih objektov (Dodatek B)** [Krainer et al. 2007], ki je bila izvedena v okviru seminarja pri predmetih Zgradba, Okolje, Energija (UL FGG UNI - Konstrukcijska smer, 4. letnik) in Bioklimatske zgradbe (UL FGG VŠŠ - Konstrukcijska smer, 3. letnik) v šolskem letu 2006/2007 in je obsegala naključno izbrane stavbe, za katere je bila izvedena analiza vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost izbranega prostora ter energetska bilanca celotne stavbe. Stavbe, ki so bile vključene v primerjalno analizo, so bile izbrane naključno, kar pomeni, da je vzorec vseboval tako manjše stanovanjske stavbe kot tudi šole ter večje javne in poslovne objekte. Z naključnim izborom, ki je obsegal zelo širok razpon tipov in oblik stavb (faktorji oblik stavb so se v izbranem vzorcu gibali od 0.10 do 1.00), je bila zagotovljena splošna veljavnost pridobljenih statističnih povprečnih rezultatov. Za vsakega od 27 izbranih objektov sta bili izračunani dnevna osvetljenost (21. 3. in 21. 9. ob 12:00 za standardno oblačno CIE nebo) in energetska bilanca (po standardu EN 832 [EN 832 1998]) pri dveh različnih tipih zasteklitev, pri čemer sta bila izbrana U-faktorja: $1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($g = 0.65$, $\tau_v = 0.70$) in $0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($g = 0.50$, $\tau_v = 0.50$).

Zaradi medsebojne primerljivosti rezultatov sta bila v obeh raziskavah za izračun primerjanih rezultatov uporabljena ista računalniška programa. Za izračun dnevne osvetljenosti prostorov je bila uporabljena računalniška simulacijska aplikacija SPOT™ v3.1 Sensor Placement+Optimization Tool [SPOT v3.0 2006], razvita pod okriljem Architectural Energy Corporation iz ZDA. Ta program uporabniku omogoča izračun osvetljenosti delovne površine tako z dnevno kot tudi umetno svetlobo, hkrati pa nudi avtomatsko pozicioniranje in optimizacijo fotosenzorjev za uravnavanje dnevnega in umetnega osvetljevanja. Bilanca porabe energije za ogrevanje stavbe je bil izračunana po standardu EN 832 v računalniški aplikaciji GEnV 1.1, ki je bila razvita na Fraunhoferjevem inštitutu za gradbeno fiziko v Stuttgartu. Izračun porabe energije po standardu EN 832 je po naravi statičen in upošteva klimatske specifikke dane lokacije, v obeh primerih primerjalnih analiz je bila zaradi primerljivosti uporabljena ista lokacija, t.j. Freiburg v Nemčiji.

Primerjalna analiza vpliva U faktorja na dnevno osvetljenost in energetsko bilanco hipotetičnega testnega objekta je bila izpeljana na treh različnih konfiguracijah objekta, pri čemer je bila variirana geometrija transparentnega dela zasteklitve (Slika 2.2). Vpliv U faktorja na notranje okolje stavbe je bil analiziran pri treh različnih geometrijah odprt in dveh tipih zasteklitve. Glavna pozornost analize je temeljila na vplivu gradbeno fizikalnih karakteristik zasteklitve na parametre notranjega okolja objekta. Izvedena primerjava je pričakovano pokazala izrazito negativen vpliv trojne zasteklitve v primerjavi z dvojno pri



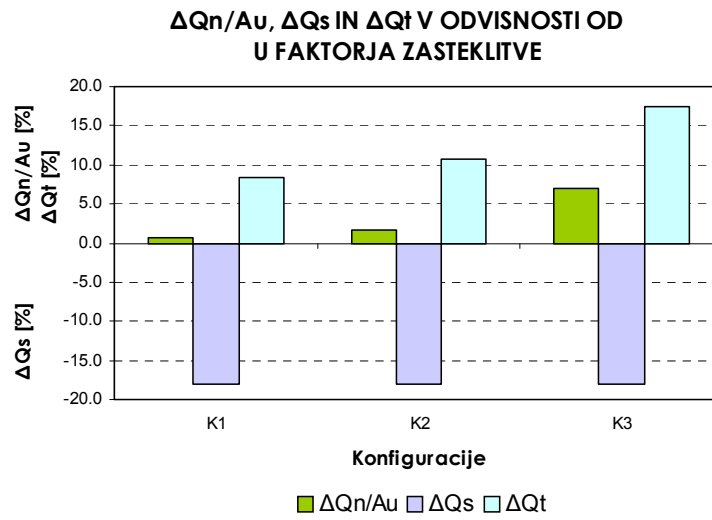
Slika 2.2: Osnovne karakteristike treh konfiguracij uporabljenih v analizi vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetsko bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta.

Fig. 2.2: Basic geometric characteristics of three configurations used in the study of the influence of glazing U-value on the levels of daylighting and energy consumption of a hypothetical single room building.

nivoju v prostor prepuščene dnevne svetlobe. Dokaj presenetljivi so bili predvsem rezultati glede energetske bilance, ki so pokazali minimalno zmanjšanje porabe energije objekta za ogrevanje pri zamenjavi dvojne zasteklitve s trojno. Tako se je pri konfiguraciji objekta z najmanjšo odprtino ($A_z = 1/7$ tlorisne površine) pokazalo, da pri energetski bilanci skoraj ni razlike, saj je pri uporabi trojne zasteklitve poraba objekta (Q_n/A_u) $67.80 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, pri dvojni zasteklitvi pa $68.33 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, kar pomeni, da objekt z dvojno zasteklitvijo porabi le 0.78% ogrevalne energije več kot pri uporabi trojne zasteklitve (Slika 2.3). Pri isti konfiguraciji geometrije objekta se ob zamenjavi dvojne zasteklitve s trojno zmanjša povprečna osvetljenost (E_{av}) prostora z dnevno svetlobo za 13.1% (Slika 2.4). Razlog za minimalno izboljšanje pri porabi energije za ogrevanje pri zamenjavi dvojne zasteklitve s trojno leži predvsem v zmanjšanju g-faktorja zasteklitve ter s tem posledičnem zmanjšanju solarnih pritokov (Q_s), ti zmanjšajo za 18% , pri čemer se transmisijske izgube (Q_t) celotnega ovoja povečajo le za 9.2% (Slika 2.3).

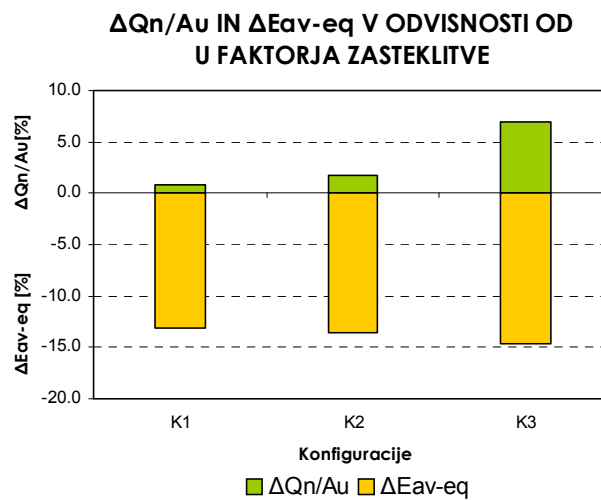
Pri tretji konfiguraciji (konfiguracija 3 - $A_z = 100 \%$ južnega zidu), ki je bila analizirana v okviru primerjalne analize, je bila celotna južna stena hipotetičnega objekta zastekljena, kar v kontekstu celotnega fasadnega ovoja predstavlja $1/4$ površine fasade oziroma 20% (Slika 2.2), kar je v primerjavi s prvo konfiguracijo kar trikrat večja zasteklitev fasadnega ovoja. Transmisijske izgube objekta so se pričakovano izrazito povečale, saj so se le-te pri zamenjavi trojne zasteklitve z dvojno dvignile za 17.4% , kar je skoraj enako spremembi solarnih dotokov, ki so se zmanjšali za 18.0% . Gledano v kontekstu celotne porabe energije za ogrevanje objekta pa se pri 100 -odstotni zasteklitvi južnega zidu ta poveča pri zamenjavi tipa zasteklitve le za 7.0% , istočasno se povprečna osvetljenost prostora zmanjša za 14.6% . V takšnem kontekstu je očitno, da pri dobro toplotno izoliranem netransparentnem delu stavbnega ovoja ($U = 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$) ter uporabi kvalitetne dvojne zasteklitve ($U = 1.12 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.61$, $\tau_v = 0.76$) za transparentni del ovoja večino energetskih izgub objekta predstavljajo prezračevalne izgube (v primeru konfiguracije 1 in dvojne zasteklitve predstavljajo prezračevalne izgube – Q_v , 57% celotnih izgub stavbe). Zato poseg v zniževanje U-faktorja zasteklitve pri objektih, ki imajo 10% – 20% fasadnega ovoja zastekljenega, v trenutnem tehnološkem stanju zasteklitev ni smiselna, saj se količina prepuščene dnevne svetlobe disproporcionalno zmanjša v primerjavi z zmanjšanjem porabe energije za ogrevanje.

Zmanjšanje količine dnevne svetlobe v notranjih bivalno-delovnih prostorih ne vpliva negativno samo na količino solarnih dotokov in nivo dnevne osvetljenosti prostora, ampak



Slika 2.3: Sprememba normirane letne porabe ogrevalne energije ($\Delta Q_n / A_u$), solarnih pritokov (ΔQ_s) in transmisijskih izgub (ΔQ_t) ob zamenjavi tipa zasteplitve.

Fig. 2.3: Change of yearly energy demand for heating ($\Delta Q_n / A_u$), solar gains (ΔQ_s) and transmission losses (ΔQ_t) when the glazing type is changed.



Slika 2.4: Primerjava spremenjene normirane letne porabe ogrevalne energije ($\Delta Q_n / A_u$) in povprečne osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo na ekvinokcij (ΔE_{av-eq}).

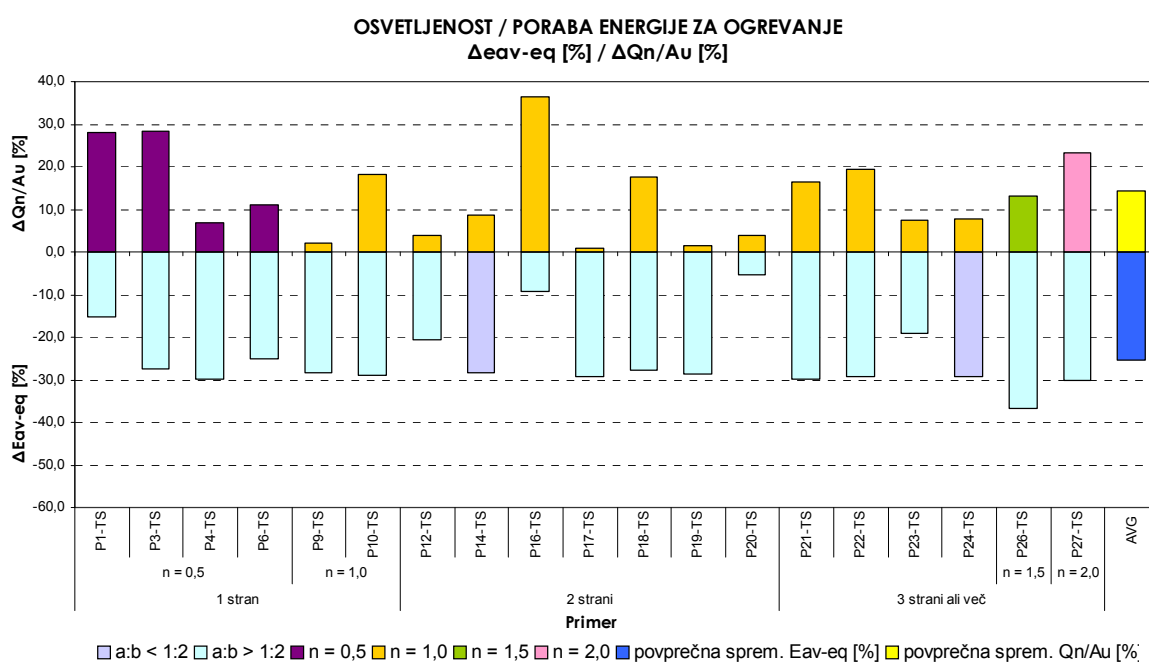
Fig. 2.4: Comparison of the changed yearly energy demand for heating ($\Delta Q_n / A_u$) and average illumination of the room on the equinox (ΔE_{av-eq}).

tudi na počutje in zdravje uporabnikov ter porabo električne energije za umetno osvetlitev. Predvsem poraba električne energije za umetno osvetljevanje prostorov je tista, ki tehtnico še dodatno nagne v smer zasteklitve z višjima količnikoma prepustnosti za vidni in celoten sončni spekter.

Zelo podobni zaključki kot pri zgoraj opisani primerjalni študiji so sledili tudi pri analizi vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje pri 27 naključno izbranih objektih, kjer je bila primerjava vplivov izvedena na širokem spektru zelo različnih tipov stavb. Ker so bile stavbe izbrane po naključnem vzorcu, so bili v analizo vključeni tako veliki kot majhni objekti z zelo različnimi vsebinami (npr.: stanovanjski, poslovni, upravni, šolski ...) ter tudi z različnimi konfiguracijami stavbnih ovojev. Zaradi takšne raznolikosti primerjanih objektov končni povprečni zaključki analize predstavljajo realno stanje trenutne arhitekturne in graditeljske produkcije. V okviru analize sta bila preizkušena dva tipa zasteklitve (dvojna zasteklitev: $U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.65$, $\tau_v = 0.70$ in trojna zasteklitev: $U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.50$, $\tau_v = 0.50$), pri čemer so vse ostale gradbeno-fizikalne kot tudi geometrijske značilnosti primerjanih stavb ostale nespremenjene. Povprečje 27 izbranih stavb je tako pokazalo pri zamenjavi dvojne zasteklitve s trojno na povprečno izboljšanje letne porabe energije za ogrevanje (Q_n/A_u) za 14.4 % pri hkratnem poslabšanju nivoja povprečne notranje osvetlitve (E_{av-eq}) izbranega referenčnega prostora z dnevno svetlobo za enormnih 25.3 %. V primerjavi z analizo hipotetičnega enoprostornega objekta dejanske vrednosti spremembe porabe energije ter zmanjšanja nivoja osvetljenosti prostora dokaj močno odstopajo zaradi zelo različnih konfiguracij izbranih objektov, vendar je v obeh primerih razmerje med njima identično, in sicer 1 : 2 v prid zmanjšanju nivoja notranje osvetljenosti z dnevno svetlobo. Prav to ujemanje potrjuje realnost pridobljenih podatkov obeh analiz, ki kažeta na težnjo izrednega poslabšanja nivoja notranje osvetljenosti pri hkratnem majhnem zmanjšanju porabe energije za ogrevanje, če se za zasteklitev stavbe uporablja trojna zasteklitev. Razmerje med zmanjšanjem porabe energije in osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo je v posameznih primerih še veliko slabše. Tako je primer P17-TS (Slika 2.5) dosegel 0,7-odstotno zmanjšanje porabe ogrevalne energije ter 29,2-odstotno zmanjšanje nivoja povprečne dnevne osvetljenosti prostora, podoben rezultat je bil dosežen tudi v primeru P19-TS (Slika 2.5) z zmanjšanjem porabe energije za 1.5 % ter poslabšanjem osvetljenosti z dnevno svetlobo za 27.8 %. Le v 3 od 27 primerov (P1-TS, P2-TS in P16-TS) je bil odstotek

izboljšanja porabe energije večji od zmanjšanja nivoja povprečne osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo.

Obe primerjalni analizi, izpeljani v okviru KSKE, sta neodvisno in vsaka posebej pokazali na trend izrednega zmanjšanja nivoja dnevne osvetljenosti prostorov pri zamenjavi dvojne zasteklitve s trojno ter hkratnem majhnem in v posameznih primerih celo zanemarljivem zmanjšanju porabe energije za ogrevanje. Iz obeh študij lahko zaključimo, da je trenuten tehnološki optimum zasteklitev na nivoju dvojne zasteklitve z enim nizkoemisijemskim premazom ter argonskim ali kriptomskim polnjenjem med šipama. Takšna zasteklitev doseže okvirne vrednosti U-ja v rangi okoli $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ in prepustnost za vidni in celotni sončni spekter okoli $\tau_v = 0.76$ in $g = 0.61$. Ker sta vrednosti g in τ_v podani za čisto zasteklitev ob



Slika 2.5: Primerjava spremembe porabe energije za ogrevanje in nivoja notranje dnevne osvetlitve pri vzorcu 27-tih naključno izbranih objektih ob zamenjavi tipa zasteklitve. Objekti so klasificirani glede na nivo izmenjave zraka (n [1/h]), razmerja stranic (a:b) ter glede na to s koliko strani (1, 2, 3 strani) je obravnavan prostor osvetljen.

Fig. 2.5: Comparison of change in energy demand for heating and in the level of internal daylighting in the case of 27 randomly selected buildings, when double glazing is switched to triple glazing. Buildings are classified according to the air exchange rate (n [1/h]), proportion of room sides (a:b) and the number of sides from which the room is lit (1, 2, 3 sides).

pravokotnem vpadu sončnega sevanja, je v realnosti pričakovati veliko slabše rezultate, ki se bi ob upoštevanju korekcijskih faktorjev (0.8) znižali na 0.49 za prepustnost za vidni spekter in 0.39 za celoten sončni spekter.

Dnevna svetloba kot ključen element kvalitetnega notranjega bivalno-delovnega okolja neposredno vpliva na zdravje in dobro počutje uporabnikov ter istočasno tudi na porabo električne energije za umetno osvetlitev, zato se ob aplikaciji trojne zasteklitve upravičeno zastavlja vprašanje smiselnosti takšnega ukrepa, saj zmanjšuje količino prepuščenega sončnega sevanja. Predvsem zaradi neposrednega vpliva na zdravje, počutje in storilnost uporabnikov prostorov [Ander 2003] [Heschog 2003b, 2003c] je uporaba trojne zasteklitve pri trenutnih karakteristikah ($U = 0.74 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.50$, $\tau_v = 0.66$ [Pilkington SpectrumTM 2007] z upoštevanjem korekcijskih faktorjev za umazanijo in nepravokotni vpad sevanja $g = 0.32$, $\tau_v = 0.42$) nesmiselna, saj poslabša notranje bivalno okolje ter hkrati zmanjša interaktivnost transparentnega dela stavbnega ovoja, ob tem pa izboljšanje U-faktorja glede na rezultate izvedenih analiz ne vodi do drastičnega zmanjšanja porabe ogrevalne energije. Trojna zasteklitev tako predstavlja ukrep, ki v okviru stavbe kot celote izboljšuje samo transmisijske lastnosti zasteklitve, zanemarja pa ostale gradbeno-fizikalne karakteristike. Takšno zasteklitev lahko označimo kot korak k ustvarjanju bolj »stacionarnega« sistema izmenjav optično-termičnih tokov skozi transparentni del stavbnega ovoja ter s tem negacijo bioklimatskih principov navezave in interakcije notranjega okolja z zunanjim. Pričujoči analizi, ki sta se osredotočili samo na vpliv dveh faktorjev elementa (okna) transparentnega dela stavbnega ovoja, sta nakazali nujnost avtomatske regulacije, saj pri uporabi bolj dinamičnega elementa (okno z dvojno zasteklitvijo) stavba in s tem notranje okolje potrebujeta za učinkovito delovanje bolj odziven, torej avtomatski sistem reguliranja. S tem se pokaže, da oblikovanje stavbnega ovoja (predvsem transparentnega dela) in vzpostavitev regulacije elementov le-tega kot tudi drugih vplivnih faktorjev na oblikovanje notranjih bivalno-delovnih pogojev nista ločena aspekta oblikovanja stavb, ampak predstavljata zaključeno celoto, ki pri oblikovanju zahteva celovit pristop.

2.2.2 Senčila

Senčila poleg zasteklitve predstavljajo ključen element transparentnega dela stavbnega ovoja. Njihova primarna funkcija je zagotoviti zadosten nivo fleksibilnosti prilagajanja geometrije odprtine, da se zadosti željam po zasebnosti, varnosti ter predvsem preprečevanju vdora sončnega sevanja, ko le-to ni zaželeno [Olgyay, Olgyay 1957]. Za vsa senčila bi tako lahko trdili, da do neke mere opravljajo vse ali pa vsaj del sledečih funkcij:

- **uravnavanje dnevne osvetlitve** – zagotavljanje vizualnega ugodja s pomočjo preprečevanja bleščanja in previsokih vrednosti osvetljenosti delovne površine;
- **uravnavanje toplotnih dotokov in izgub** – preprečevanje pregrevanja prostorov podnevi ter zmanjšanje radiacijskih izgub v nočnem času s pomočjo senčenja zasteklitve, dodatno lahko senčila, če so opremljena s toplotno izolacijo, delujejo tudi kot nočna izolacija oken;
- **psihofizična zaščita uporabnikov** – zagotavljanje zasebnosti in varnosti v prostoru ter tudi omogočanje vizualnega kontakta z zunanostjo ter tako vključitev notranjega prostora v kontekst širšega bivalnega okolja.

Zgoraj naštetih glavne funkcije senčil niso enakomerno zastopane pri vseh tipih senčil, ki se pojavljajo v stavbah, ampak variirajo glede na konstrukcijo, pozicijo vgradnje in način delovanja posameznega senčila. Predvsem način delovanja oziroma ali je senčilo fiksno ali ne, ključno vpliva na samo fleksibilnost ter tudi univerzalnost uporabe senčila. Tako glede na način delovanja ločimo:

- **fiksna senčila**, ki omogočajo predvsem senčenje ter s tem do določene mere uravnavajo nivo dnevne osvetlitve in preprečujejo pregrevanje notranjega okolja. Zaradi fiksne narave senčil njihova učinkovitost variira z obliko, pozicijo, orientacijo stavbe ter klimo, v kateri so uporabljena, na splošno omogočajo malo ali nič psihofizične zaščite. Učinek takšnih senčil je konstanten in vpliva na notranji prostor tudi takrat, ko je to nezaželeno (v času oblačnega vremena). Med fiksna senčila štejemo nadstreške, fiksne horizontalne ali vertikalne lamele ...
-

- **premična senčila**, ki omogočajo različne stopnje uravnavanja dnevne osvetlitve in toplotnih tokov, pri čemer je učinkovitost odvisna od njihove zasnove in uporabljenega materiala. Nadalje bi lahko premična senčila delili na dve podskupini, in sicer na neodstranljive rotirajoče lamele (horizontalne ali vertikalne lamele, ki se rotirajo okoli lastne osi – »aerofoil«) in na popolnoma odstranljiva senčila (tekstilni roloji, rolete, žaluzije in polkna), ki omogočajo popolno zastrtost ali odprtost okna. Večinoma so takšna senčila dražja ter težja za vzdrževanje od fiksnih tipov, saj vsebujejo veliko mehanskih elementov, a omogočajo večjo učinkovitost in prilagodljivost pri reguliranju dnevne osvetlitve, toplotnih tokov in psihofizične zaščite. Za najbolj prilagodljiv in učinkovit tip senčil bi lahko označili žaluzije, saj omogočajo reguliranje naklona posameznih lamel ter višine oziroma odstotek pokritosti zasteklitve;
- **napredna zasteklitve s spremenljivimi optičnimi karakteristikami** [Kaltenbach (ur.) 2004], ki omogoča s posredovanjem informacije (npr.: električni impulz) uravnavanje optičnih karakteristik zasteklitve. Strogo gledano ne gre za senčila, ampak za zasteklitve, ki omogoča spreminjanje optičnih in toplotnih karakteristik. V glavnem gre za elektrokromne in gasokromne zasteklitve ter v manjši meri zaradi omejitev pri uporabi v stavbah tudi za termokromna stekla in zasteklitve z apliciranimi tekočimi kristali.

Na učinkovitost delovanja uporabljenih senčil pri uravnavanju klimatskih lastnosti notranjega bivalno delovnega okolja odločilno vpliva tudi pozicija vgraditve. Glede na vgradnjo senčila lahko ločimo dve možni poziciji, in sicer na zunanji strani transparentnega dela stavbnega ovoja ali pa na notranji strani le-tega. Če so pri zasteklitvi odprtini uporabljene šipe z dvojno ali trojno zasteklitvijo, je mogoče nekatere tipe (žaluzije, roloje) senčil vgraditi tudi med dvoje stekel. Pozicija senčila ne vpliva na njegovo učinkovitost glede reguliranja nivoja notranje osvetlitve, a zelo vpliva na učinkovitost senčila pri uravnavanju termičnih aspektov sončnega sevanja [Bauer et al. 1996]:

- **senčila na zunanji strani** transparentnega dela stavbnega ovoja omogočajo glede na svojo konstrukcijo in uporabljene materiale do 100-odstotno preprečevanje vdora sončnega sevanja v notranje okolje. Za fiksna senčila je pozicija na zunanji strani

ovoja edina smiselna, pri aplikaciji premičnih senčil pa je potrebno računati na večji začetni finančni vložek saj takšna senčila zahtevajo višje stroške vzdrževanja ter bolj robustno konstrukcijo;

- **senčila na notranji strani** zasteklitve ne ponujajo skoraj nikakršne zaščite pred pretiranimi dotoki sončne energije (pregrevanje), saj energijo, prejeta s kratkovalovnim sončnim sevanjem, enostavno spet reradiirajo v notranji prostor v obliki dolgovalovnega toplotnega sevanja. V primerjavi z zunanjimi senčili bi lahko učinkovitost notranjih senčil pri preprečevanju vstopa sončnega sevanja ocenili na maksimalno 10 % ter so zato primerna le za uravnavanje nivoja dnevne osvetljenosti. Prednost notranje pozicije senčil je predvsem v njihovi nižji ceni in lažjem vzdrževanju;
- **senčila med dvema elementoma** zasteklitve se po učinkovitosti in delovanju nahajajo nekje med dvema ekstremoma zunanjih in notranjih senčil. Glede na konstrukcijo, izvedbo in tip senčila je njihova učinkovitost pri regulaciji termalnih aspektov sončnega sevanja v rangi 30 % – 40 %. Pri sodobnih zasteklitvah, ki imajo prostor med dvema šipama zapolnjen z žlahtnim plinom (argon, kripton), je izvedba takšnih senčil zelo zahtevna in delikatna.

2.2.2.1 Tipi premičnih senčil

V kontekstu oblikovanja integralnega regulacijskega sistema notranjega okolja (IRsNO) je smiselno največ pozornosti posvetiti premičnim in odstranljivim senčilom, torej rolojem, roletam, žaluzijam in polknom. Ta senčila za razliko od ostalih rotirajočih in fiksnih senčil omogočajo največjo fleksibilnost pri prilagajanju geometrije transparentnega dela odprtine ter hkrati zato predstavljajo največji izziv z vidika avtomatske regulacije. Prav popolnoma odstranljiva senčila so tista, ki lahko v kombinaciji z avtomatsko regulacijo dosežejo izboljšanje reguliranih parametrov notranjega okolja, predvsem pa izdatno povečajo možnosti odzivnosti in fleksibilnosti sistema.

Namen in odzivnost premičnih tipov senčil sta v veliki meri odvisna od njihove mehanske zasnove in uporabljenih materialov. Določeni tipi premično odstranljivih senčil tako omogočajo izredno kontrolo nad vdorom sončnega sevanja (žaluzije), a je zato potrebna bolj

sofisticirana konstrukcija senčila, na drugi strani pa preprostejša senčila (roloji) ne ponujajo fleksibilnosti prvih, a so enostavnejša ter posledično cenejša in enostavnejša za vzdrževanje. Pri izbiri primernega senčila je zaradi kompleksnosti vpliva različnih faktorjev tako senčila kot tudi objekta in specifične lokacije potrebno pretehtati več med seboj interaktivno povezanih faktorjev. Tako so najpomembnejši sledeči faktorji: zmožnost preprečevanja vdora sončnega sevanja (učinkovitost senčenja), fleksibilnost pri regulaciji dnevne osvetljenosti, omogočanje stika z zunanostjo, način vzdrževanja, življenjska doba, možnost uporabe kot nočne izolacije ... Zastopanost posameznih faktorjev pri specifičnem senčilu je v največji meri odvisna od njegove zasnove in uporabljenega materiala [Bauer et al. 1996].

- **Tekstilni roloji** so tip senčil, pri katerih je mogoče kontrolirati le odstotek pokritosti (senčenja) transparentne odprtine stavbnega ovoja in zato skoraj ne omogočajo uravnavanja nivoja bleščanja, razen če se pri zelo bleščavem notranjem okolju okno popolnoma zasenči. Ker je za strukturo senčila uporabljen tekstilni material, z roloji ni mogoče doseči popolne prekinitve vdora sončnega sevanja v notranji prostor, saj imajo različni tekstilni materiali transmisijski koeficient za solarno radiacijo v razponu 10 % – 30 %. V primerjavi z žaluzijami so tekstilni roloji manj fleksibilni, a cenejši in enostavnejši za vzdrževanje ob hkratni primerljivi odpornosti na zunanje vremenske vplive.
- **Rolete** so po zasnovi zelo podobne tekstilnim rolojem, vendar zaradi izvedbe iz plastičnega, kovinskega ali lesenega materiala omogočajo nekoliko manjšo fleksibilnost uporabe. Podobno kot pri rolojih je edini parameter, ki se regulira pri roleti, odstotek senčenja okna. Tako ni mogoče učinkovito kontrolirati bleščanja v prostoru. Prednost izvedbe v popolnoma netransparentnem materialu je, da rolete popolnoma blokirajo sončno sevanje ter hkrati omogočajo uporabo za nočno izolacijo okna, saj so lamele, ki sestavljajo senčilo, lahko napolnjene s toplotno izolacijskim materialom. PVC avtomatizirana roleta je bila za senčenje odprtine testne celice uporabljena pri sistemu vodenja KAMRA.
- **Žaluzije** od vseh tipov senčil omogočajo največjo fleksibilnost regulacije prehoda sončnega sevanja v notranji prostor, saj omogočajo uravnavanje tako odstotka pokritosti okna kot tudi naklon posameznih lamel. Pri večini trenutno dostopnih motoriziranih žaluzijah pa se del te fleksibilnosti izgubi, saj je neodvisna regulacija

naklona težavna - lamele so v horizontalni poziciji pri dviganju in v vertikalni poziciji pri spuščanju senčila. Potreba po regulaciji dveh parametrov (naklona in pozicije), ki sicer omogoča veliko fleksibilnost uporabe žaluzij, predstavlja tudi dodaten zaplet pri izvedbi avtomatskih regulacijskih algoritmov, saj se struktura regulatorja zaplete. V večini primerov so lamele žaluzij izdelane iz kovine (aluminij, jeklo), redkeje pa tudi iz umetnih mas. Zmožnost žaluzij pri preprečevanju transmisije sončnega sevanja je lahko zelo visoka, saj se da doseči vrednosti v okviru 1 %, pri čemer ni upoštevana reradiacija v obliki dolgovalovnega infrardečega sevanja [Bauer et al. 1996], podobno velja tudi za dnevno svetlobo, pri čemer ni mogoče doseči 100-odstotne blokade dnevne svetlobe.

- **Polkna** so verjetno eno od najstarejših, če ne najstarejša premično-odstranljiva senčila, ki so se pojavljala predvsem v preteklosti in pri venakularni arhitekturi srednjeevropskega in mediteranskega območja. Primerno oblikovana in uporabljena so lahko zelo fleksibilna in vsestransko primerna tudi v sodobnem času. Strukturno gledano bi lahko trdili, da gre za predhodnika rolete in žaluzije, pri čemer so polkna drsno ali nihajno odstranljiva. Tradicionalno so sestavljena iz krila, v katerega so vgrajene horizontalne lesene lamele, katerim se prilagaja naklon ne pa tudi pozicija. Prav zaradi zgoraj opisanega načina delovanja polkna ne dosežajo fleksibilnosti uporabe žaluzij, rolojev in rolet, saj je okno ob namestitvi že v začetku osenčeno v dokaj veliki meri. Kljub manjši fleksibilnosti pa so polkna atraktivna zaradi možne uporabe za nočno izolacijo ter omogočanja dodatne varnosti. Izvedena so tradicionalno iz lesa, v sodobnih variantah pa največkrat iz kovin in umetnih mas. Izvedba avtomatsko premičnih polken je težavna predvsem zaradi potrebe po kompleksnih mehanskih elementih (potrebna bi bila dva sistema- za premikanje celotnega polkna in uravnavanje naklona lamel).

2.2.2.1 Senčilo kot solarni kolektor

Fasadni ovoj stavbe je močno izpostavljen sončnemu sevanju ter skupaj s streho predstavlja zunanjo površino stavbe, ki jo je mogoče izkoristiti za aktivni zajem sončne energije ter tako povečati potencial izkoriščanja vpadnega sončnega sevanja. Sevanje, ki pade na stavbni ovoj je mogoče s pomočjo solarnih kolektorjev pretvoriti v toplotno energijo ali pa s

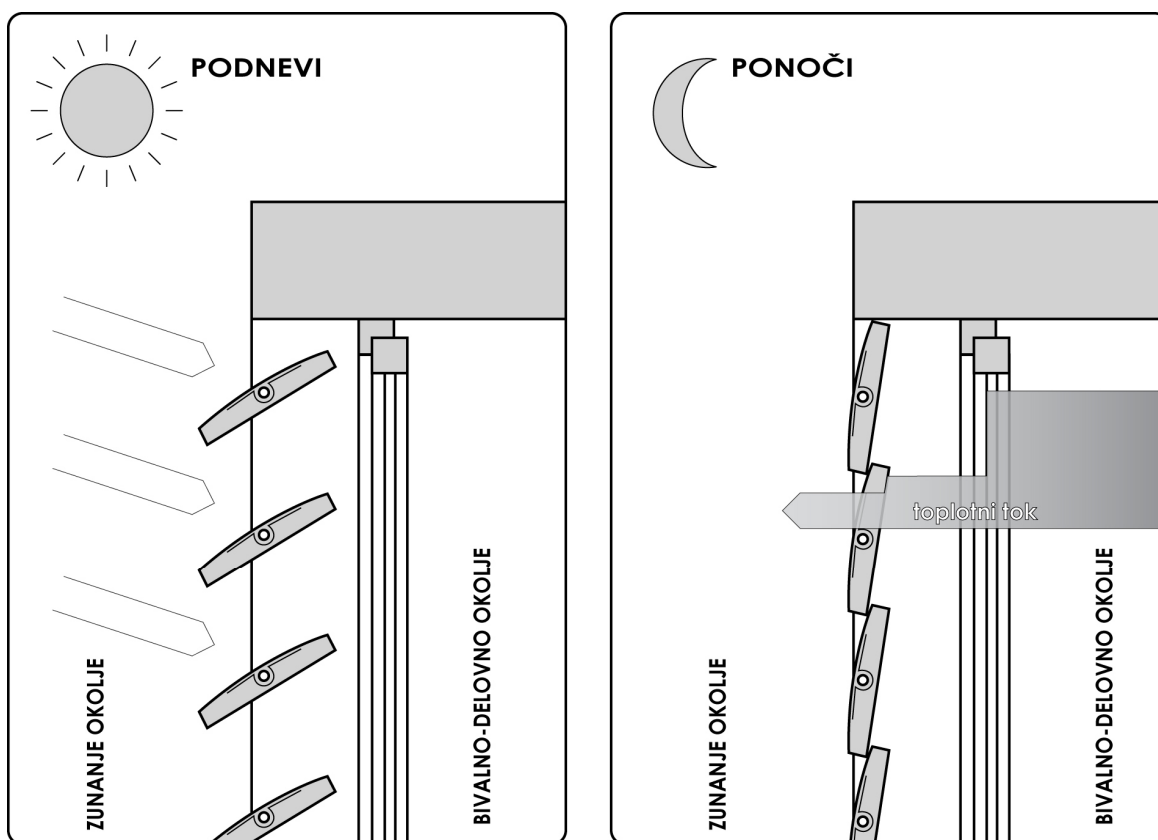
fotovoltaičnimi moduli neposredno v elektriko. Ker pa so sodobne fasade poslovnih, javnih in industrijskih objektov velikokrat močno zastekljene, je uporaba klasičnih kolektorjev in fotovoltaičnih modulov na fasadnih površinah omejena, hkrati pa velikokrat tudi ni zaželena iz estetskih razlogov. V takšnih primerih bi bila smiselna integracija solarnih kolektorjev ali fotovoltaičnih modulov v fiksna ali še boljše - premična senčila. Pri integraciji solarnih kolektorjev v senčilu se pojavlja več z izvedbo povezanih potencialnih težav, saj današnji spektralno selektivni premazi (TSSS - Thickness Sensitive Spectrally Selective), ki se uporabljajo na kolektorjih, zahtevajo tanke nanose in zaščito pred atmosferskimi vplivi (zasteklitev). Dodatno so ti premazi večinoma dostopni samo v odtenkih črne barve in tako predstavljajo estetsko omejitev pri oblikovanju senčil kot fasadnih elementov. Rešitev se potencialno kaže v aplikaciji spektralno selektivnih premazov, ki so neobčutljivi na debelino nanosa (TISS – Thickness Insensitive Spectrally Selective) [Orel et al. 2007a, 2007b], so odporni na atmosferske vplive in jih je mogoče izvesti v različnih barvnih odtenkih. Dodatno je TISS-premaze mogoče kombinirati s kovinskimi delci ter takšno barvo uporabiti na cenejši plastični podlogi absorberja - senčila in s tem znižati stroške izdelave senčila. Poleg prednosti pa TISS-premazi izkazujejo v primerjavi s TSSS-premazi izrazito slabšo spektralno selektivnost (tako absorptivnost kot tudi emisivnost), kar posledično pomeni slabši izkoristek kolektorja.

Zaradi težav pri izvedbi mehanskih oziroma strojnih inštalacij razvoda vode v senčila in iz njih bi bila smiselna aplikacija senčil z integriranim solarnim kolektorjem le v primeru velikih zastekljenih površin ter v fiksna ali premična neodstranljiva (rotirajoča) senčila. Prav integracija v rotirajoča neodstranljiva senčila bi z zadostnim nivojem avtomatizacije omogočala doseganje optimalnih rezultatov, saj bi se lahko prilagajala trenutnim vremenskim pogojem ter zahtevam uporabnikov. Z avtomatsko regulacijo senčenja je mogoče doseči ugodne notranje razmere ter hkrati slediti optimalnemu vpadnemu kotu sončnega sevanja in tako omogočiti maksimalen izkoristek solarnih kolektorjev. Najprimernejši tip senčil za izvedbo integriranega senčila - kolektor bi bila predvsem vsa lamelna horizontalna ali vertikalna senčila primernih dimenzij za praktično integracijo vseh potrebnih elementov kolektorja. Pri tem je lahko postavitve senčila v odnosu do primarnega dela stavbnega ovoja, torej zasteklitve, v dveh osnovnih pozicijah: na zunanji ali notranji strani ovoja. Zunanja pozicija je bolj zaželena, saj ne posega v bivalno-delovni prostor, hkrati pa omeji možnost

pregrevanja prostora zaradi reradiacije dolgovalovnega sevanja v notranjem prostoru. Slabost takšne namestitve je v izpostavljenosti kolektorja atmosferskim vplivom, ki sčasoma degradirajo spektralno selektiven premaz, zaradi česar je vzdrževanje senčila dražje. Rešitev se ponuja v izvedbi dvojnega fasadnega ovoja, ki sicer zaščiti kolektorje, vendar podraži izvedbo fasadnega ovoja. Zaradi visokih stroškov takšne izvedbe bi bila le-ta smiselna samo pri visokih objektih, kjer je vzdrževanje zunanjih senčil prezahtevno. Z upoštevanjem trajnosti TISS-premazov na osnovi silikona ali poliuretana lahko zaključimo, da bi bila z uporabo takšnih premazov za večino objektov najprimernejša namestitev senčil na zunanji strani brez dodatne zaščite, saj takšna senčila omogočajo najboljšo fleksibilnost senčenja in izkoriščanja sončnega sevanja ob hkratni obstojnosti na agresivne atmosferske vplive. Seveda iste smernice glede uporabe senčil z integriranimi solarnimi kolektorji veljajo tudi za druge zastekljene površine v stavbah. Tako je aplikacija možna na zastekljenih strehah, zimskih vrtovih in atrijih.

Lamela senčila z integriranim solarnim kolektorjem bi predstavljala komponento sistema zajema sončne energije z relativno enostavno strukturo, ki ne zahteva tehnološko kompleksnih postopkov izvedbe. Strukturno gledano bi bilo takšno senčilo sestavljeno iz ohišja, v katerem se nahaja razvod vode, in toplotne izolacije na »hrbtini« strani senčila, ki bi preprečevala toplotne izgube. Stranica, izpostavljena sončnemu sevanju (absorber), je prekrita s TISS-premazom v zeleni barvi. Zaradi uporabe TISS spektralno selektivnega premaza bi bilo mogoče celotno senčilo izdelati iz plastike, kar bi tako cenovno kot tudi tehnološko predstavljalo prednost pred klasičnimi kolektorji, ki za doseganje spektralne selektivnosti potrebujejo kovinsko podlogo in pri uporabi TISS-premazov tudi zasteklitev za preprečitev degradacije premaza. Poleg izvedbe senčila kot klasičnega solarnega kolektorja bi bila možna tudi tandemska izvedba s fotovoltaičnimi celicami. Fotovoltaične tankoslojne fleksibilne celice bi bilo mogoče prilepiti na površino senčila, kjer bi opravljale neposredno pretvorbo sončnega sevanja v električno energijo, hkrati pa bi se senčilo uporabljalo tudi kot solarni kolektor za ogrevanje vode. Takšno delovanje bi bilo mogoče zaradi temne površine fotovoltaičnih celic, ki se pri izpostavljenosti sončnemu sevanju močno segreva. Slabost tandemske izvedbe pa bi bila podobno kot pri TISS-premazih omejenost pri naboru barv (zaradi fotovoltaičnih celic), hkrati pa bi bilo potrebno z eksperimenti potrditi upravičenost tandemske izvedbe.

Senčilo – kolektor bi v kontekstu vmesnika med zunanjim okoljem in notranjim bivalnim prostorom predstavljalo aktivni element uravnavanja svetlobnih in toplotnih tokov skozi transparentni del ovoja. Omogočeno bi bilo energetske izkoriščanje sončnega sevanja s segrevanjem vode v solarnih kolektorjih ali pa z neposrednim zajemom ob namestitvi senčil tako, da omogočijo neposredni vpad sončnega sevanja v prostor. S svojo fleksibilnostjo bi takšni elementi predstavljali potencialno pomemben element bioklimatskega oblikovanja zunanega ovoja stavbe, hkrati pa tudi način za uravnavanje notranjega okolja (Slika 2.6). Pri postavitvi in dimenzioniranju senčil bi bil nujno potreben temeljit premislek glede dimenzij lamel in gostote njihove postavitve, saj lahko močno vplivajo na počutje uporabnikov z omejevanjem vidnega stika z zunanostjo. Ker bi bilo potrebno iz tehnoloških razlogov lamele senčila – kolektorja toplotno izolirati, bi lahko le-te ob primerni vgraditvi v objekt uporabili kot dodatno toplotno izolacijo v nočnem času (Slika 2.6) za transparentni del ovoja stavbe. Izvedba senčil, ki bi opravljala tudi funkcijo nočne toplotne izolacije, bi bila relativno



Slika 2.6: Način delovanja senčila-solarnega kolektorja v dnevnem in nočnem režimu.
 Fig. 2.6: Operation of the collector-shading device in the day and night time.

enostavna ob predpogoju, da so senčila na objekt pritrjena tako, da se pri popolnem zaprtju navezujejo na toplotnoizolacijski ovoj celotnega objekta. Prednost takšne konfiguracije je dodatno zmanjšanje toplotnih izgub skozi transparentne dele ovoja v nočnem času, ko sončno sevanje ni na voljo. Avtomatska premična senčila so v takšnem primeru nujna, saj brez avtomatske regulacije zapiranja in odpiranja takšnih senčil ni mogoče pričakovati primerne odziva sistema. Prav nujna po avtomatizaciji delovanja senčila – kolektor se neposredno navezuje na oblikovanje regulacijskega sistema notranjega okolja, ki bi z uporabo opisanega sistema senčil pridobil dodaten element oblikovanja transparentnega dela stavbnega ovoja. Kot ideja se senčilo – kolektor navezuje na razširitev možnosti bioklimatskega oblikovanja stavbe, njenega ovoja ter notranjega okolja, v kontekstu oblikovanja sistema IRsNO pa širi možnosti aplikacij in učinkovitosti sistema. Regulacijski sistem notranjega okolja bi z možnostjo regulacije senčil omogočal delovanje senčila – kolektorja, hkrati pa bi takšna senčila povečala izkoristke razpoložljivega sončnega sevanja ter s tem učinkovitost in upravičljivost regulacijskega sistema, kot je zasnovani IRsNO

2.3 Analiza sistemov reguliranja notranjega okolja

Zaradi kompleksnosti vzpostavitve celovitega regulacijskega sistema uravnavanja notranjega bivalno-delovnega okolja je pred oblikovanjem takšnega sistema smiselno izvesti oceno različnih strategij nadzora. Predhodno opravljeno delo na področju regulacije stavbnega ovoja ter notranjega okolja stavbe lahko predstavlja koristen nabor virov, ki omogočajo lažjo identifikacijo težav in njihovih potencialnih rešitev. Ker bo IRsNO temeljil predvsem na delu, opravljenem na pilotni celici KAMRA, je v nadaljevanju največ pozornosti namenjene predvsem ustroju in delovanju tega sistema, izvedenega na KSKE. Dodatno so orisani tudi nekateri drugi znanstveni dosežki s področja regulacije toplotnih in optičnih tokov skozi stavbni ovoj. Pregledno obravnavanje že opravljenega dela na KSKE ter tudi drugje omogoča oceno primernosti določenih ukrepov in nastavitvev ter tako skrajša potreben čas za oblikovanje in usklajevanje parametrov regulacijskega sistema.

Povečano zanimanje za energetske učinkovitost ter želja po izboljšanju delovnih in bivalnih razmer v stavbah sta v zadnjih 15 letih privedla do velikega števila raziskav na področju

optimizacije osvetljenosti in energetske obremenjenosti prostorov. Predvsem zaradi velikih potencialnih prihrankov pri električni energiji za osvetljevanje v pisarniških in proizvodnih prostorih uporaba optimiziranega dnevnega osvetljevanja predstavlja zelo atraktiven način za zmanjšanje operativnih stroškov stavb [Ruck et al. 200]. Dodatno pa dnevna svetloba pozitivno vpliva na počutje in storilnost uporabnikov prostorov ter neposredno fiziološko vpliva na človeško telo [Adner 2003] [Brainard et al. 2001]. Poskusi s sistemom za uravnavanje umetne osvetlitve v odvisnosti od razpoložljive dnevne svetlobe so pokazali potencialne prihranke 30 % – 40 % pri porabi električne energije za svetila najbližja oknom ter 16 % – 22 % pri svetilih globlje v prostoru [Rubinstein et al. 1999]. Vendar se možnosti pozitivnih učinkov sistema, ki uravnava prehod svetlobe skozi stavbni ovoj, ne končajo pri dnevni osvetlitvi ter 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 ohlajevanje. 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 energetske prihranke. 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. Prav zaradi kompleksnosti medsebojnih povezav med različnimi, velikokrat tudi nasprotujočimi se zahtevami v takšnem celovitem sistemu je naloga oblikovanja delujočega regulacijskega sistema notranjega okolja izjemno zahtevna.

Nadaljnja poglavja bodo podrobno in temeljito predstavila regulacijski sistem testne celice KAMRA, ki je za razvoj IRsNO-ja predstavljal osnovo oziroma izhodišče. Poleg KAMRE bosta predstavljena in v osnovah opisana tudi dva druga poskusa v regulaciji prehoda toplotnih in optičnih energetskih tokov skozi transparentni del stavbnega ovoja. Namen takšne primerjave je vzpostaviti delen pregled trenutnega stanja raziskovalnih aplikacij na pričujočem področju ter identificiranje potencialnih nadaljnjih smeri razvoja z namenom uporabe pri snovanju nove aplikacije IRsNO. Predstavljeni in kasneje primerjani so sledeči regulacijski sistemi (poleg spodaj naštetih glej tudi [Calvino et al. 2004] [Gouda et al. 2001] in [Lee et al. 1998].):

- primer 1: KAMRA - KSKE, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, UL [Kristl et al. 2007] [Trobec-Lah 2003] [Trobec-Lah et al. 2005, 2006],
- primer 2: Laboratorij za elektroniko tehnične univerze na Kreti [Kolokotsa et al. 2000, 2002, 2005],
- primer 3: LESO-PB (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) [Guillemin, Morel 2001].

Čeprav je vsem zgoraj naštetim sistemom skupno uravnavanje pretoka toplotnih in svetlobnih tokov skozi stavbni ovoj, je neposredna primerjava med njimi zaradi veliko različnih specifičnih detajlov posameznih sistemov ter različnih metod testiranja vsaj problematična, če ne že kar nemogoča. Prav zato je bil izbran drugačen pristop, pri katerem bodo posamezni sistemi orisani s svojimi specifikami in doseženimi eksperimentalnimi rezultati. Tako naj bi postali vidni osnovni koncepti oziroma strategije posameznih regulatorjev, le-te pa je možno primerjati na konceptualni ravni ter ovrednotiti njihove prednosti in slabosti.

2.4 Testni regulacijski sistem KAMRA

Testna celica KAMRA je bila zasnovana in izvedena na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente UL FGG z namenom izvajanja eksperimentov s sistemom uravnavanja energetskega tokov skozi transparentni del njenega ovoja. Celotna testna celica je bila oblikovana kot poenostavljeni model realne stavbe z enostavno geometrijo in majhnim volumnom ter s tem tudi s hitrim odzivom na zunanje vremenske razmere. V prvi fazi so se na njej izvajali eksperimenti z regulacijskim sistemom, ki je uravnaval le toplotne aspekte prehoda kratkovalovnega sončnega sevanja iz zunanosti v notranjost celice. Ti poskusi so bili primarno namenjeni potrditvi predhodnih numeričnih simulacij dinamičnega termičnega odziva stavbe in mehkega regulatorja za uravnavanje toplotnih tokov s pomočjo spremenljive geometrije odprtij [Furlan 1999] [Kladnik 1997].

Večina nadaljnjega dela je bila usmerjena v nadgraditev toplotnega regulatorja v sistem sposoben uravnavanja vizualnega ugodje znotraj celice ter harmoniziranja med toplotnimi in vizualnimi zahtevami v notranjem okolju. Zaradi kompleksnosti fizikalnih pojavov pri

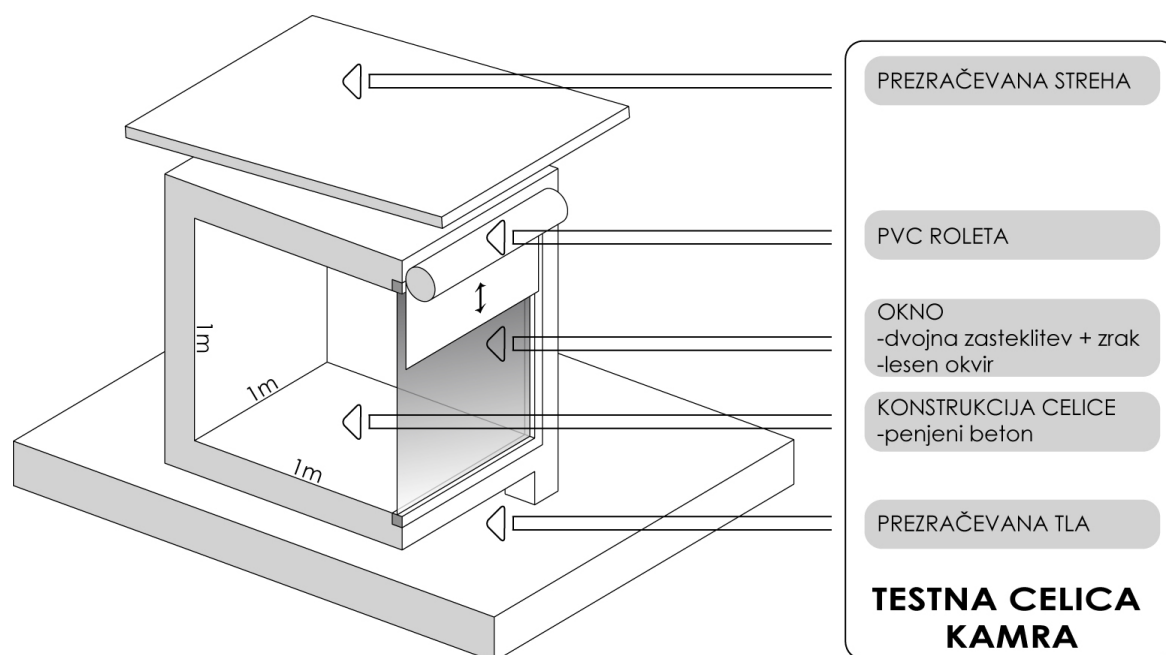
prehodu svetlobe iz zunanosti v notranji prostor je bil za izvedbo svetlobnega regulatorja izbran eksperimentalni pristop brez predhodnega matematičnega modela, kar je bilo omogočeno z uporabo mehke logike [Trobec-Lah 2003] pri snovanju regulatorja. Celoten sistem je bil intenzivno testiran v daljšem časovnem obdobju pri različnih zunanjih vremenskih pogojih ter je v tem obdobju uspešno sledil številnim notranjim zahtevam. Z regulacijskim sistemom KAMRA je bilo pridobljenih ogromno izkušenj in eksperimentalnih podatkov, ki predstavljajo zelo pomembno oporo pri koncipiranju IRsNO-ja. Takšna baza podatkov je omogočila hitrejše koncipiranje nastavitvenih pravil regulacijskega sistema ter pomoč pri izogibanju potencialnim težavam in stranpotem.

2.4.1 Značilnosti testne celice KAMRA

Testna celica je bila postavljena na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Jamovi cesti 2 v Ljubljani (zemljepisna širina = 46.05° , zemljepisna dolžina = 14.30°) s transparentnim delom ovoja, orientiranim na jug. Notranje dimenzije celice so znašale $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$, celotna južna stran ovoja celice pa je bila zastekljena in izpostavljena sončnemu sevanju. Reguliranje spreminjanja površine odprtine je bilo doseženo z zunanjo lamelno PVC roletu, ki se je premikala glede na ukaze regulacijskega sistema. 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 ter ohladila. Vsi opisi testne celice KAMRA in eksperimentalnih rezultatov so povzeti po literaturi [Kristl et al. 2007] [Trobec-Lah 2003] [Trobec-Lah et al. 2005, 2006].

2.4.1.1 Geometrija testne celice

Celotna testna celica je postavljena v lesen okvir, širine 5 cm, in dvignjena od tal tako, da je notranja kota tal celice dvignjena od nivoja zunanjega zaključnega sloja strehe stavbe FGG za 50 cm, s tem je bilo omogočeno vplivanje zunanjih vremenskih pogojev na celoten ovoj celice. V lesen okvir je vstavljen zunanji ovoj iz 10 cm debelih blokov penjenega betona ($k = 0.27\text{ W/mK}$, $\rho = 500\text{ kg/m}^3$, $c = 0.27\text{ Wh/kgK}$), ki v primeru strehe in tal ležijo na 2.5 cm debeli vezani plošči ($k = 0.41\text{ W/mK}$, $\rho = 900\text{ kg/m}^3$, $c = 0.67\text{ Wh/kgK}$). Notranjost celice je



Slika 2.7: Aksonometrični prerez skozi testno celico KAMRA in prikaz njenih osnovnih geometrijskih in konstrukcijskih značilnosti.

Fig. 2.7: Axonometric section through the test cell KAMRA featuring all major geometric and construction specifications.

prepleskana z belo barvo. Streha je položena na lesene »I« nosilce, kar omogoča izvedbo prezračevalnega sloja med ovojem celice in hidroizolacijo na strehi ter s tem zmanjšuje vpliv pregrete pločevine na notranjost celice v poletnih mesecih. V južno steno je vgrajeno transparentno enokrilno okno, dimenzij zasteklitve 1 m x 1 m, ter z lesenim okvirjem debeline 5 cm. Zasteklitev je sestavljena iz dveh navadnih »float« šip z zrakom v vmesnem prostoru. Nad oknom je na zunanjih nosilcih pritrjena pločevinasta kasetna s PVC-lamelno toplotno izolacijsko pomično roletno v beli barvi.

2.4.1.2 Elementi testne celice

Poleg same konstrukcije tvorijo sistem testne celice KAMRA tudi izvršni členi ter merilno-regulacijski elementi, celoten sistem je prikazan na sliki 2.8. Med izvršne člene sistema KAMRA spadajo naprave, ki izvršujejo ukaze regulacijskega sistema:

- **PVC-roleta**, sestavljena iz lamel z vgrajeno toplotno izolacijo, je pritrjena nad zasteklitvijo testne celice in s pomočjo enosmernega elektromotorja (Somfy LS 40

Ares) s končnima stikaloma omogoča reguliranje efektivne površine zasteklitve. Roleta je opremljena na zgornjem delu stranskega vodila z induktivnim stikalom končne lege (IPS), ki skrbi za ugotavljanje, kdaj je roleta v skrajnem položaju, torej kdaj je okno popolnoma nezasenčeno. Ko IPS zazna, da je roleta v maksimalnem zgornjem položaju, se vrvi števec impulzov premikov rolete prenastavi na ničto vrednost. Števec impulzov je vgrajen na spodnjem delu zasteklitve in je z roletto povezan preko jeklenice ter namenjen sprotnemu spremljanju položaja rolete;

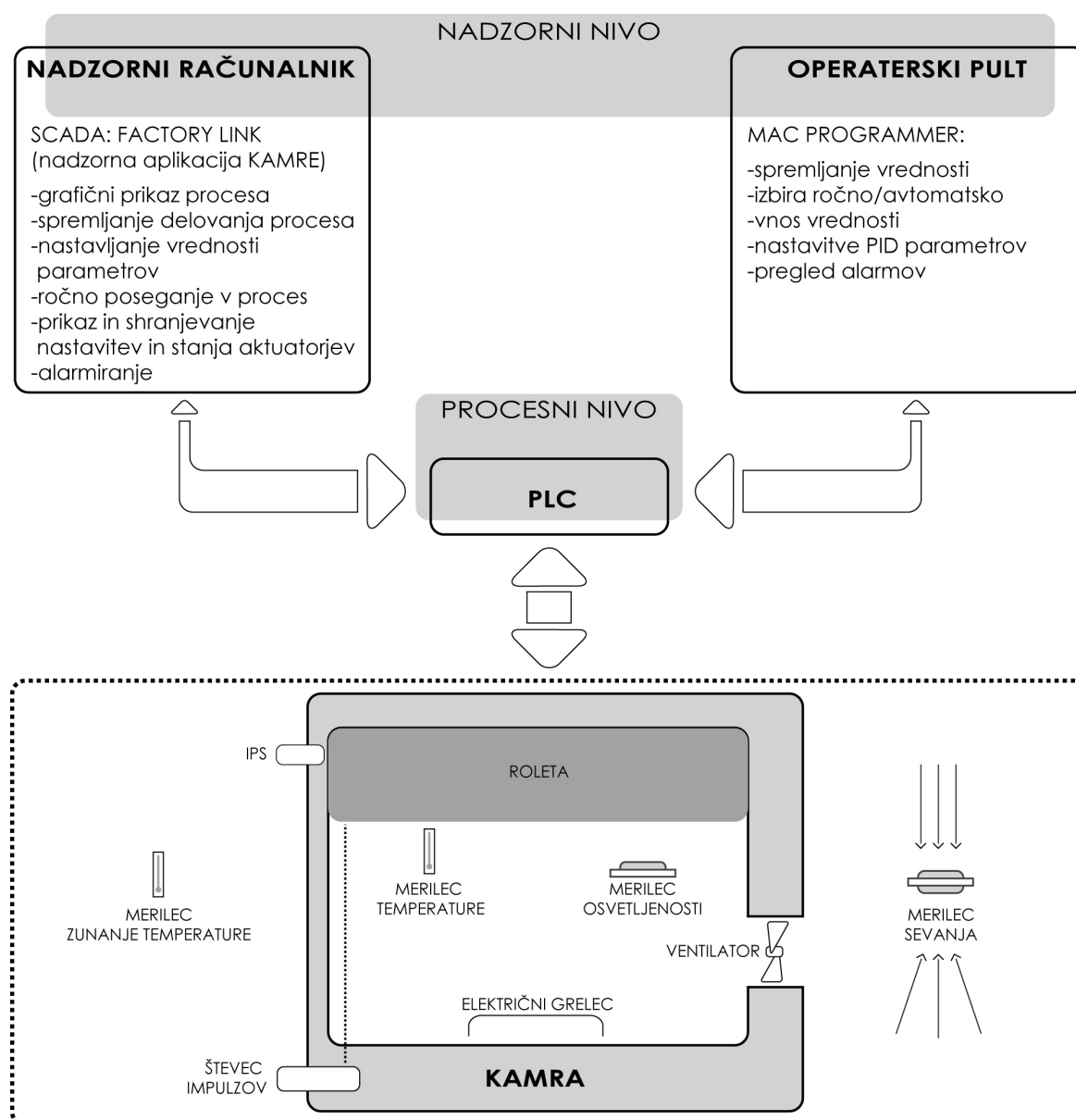
- **grelec** je pozicioniran na sredini tal testne celice. Sestavljen je iz kovinske plošče z osmimi uporovnimi grelnimi elementi moči 50W. Grelec je namenjen ogrevanju testne celice;
- **ventilator**, ki je vgrajen v odprtino, premera 9 cm v sredini vzhodne stranice celice, ima kapaciteto 8 m³/h. Na nasprotni stranici se nahaja identična odprtina, namenjena zajemu zunanjega zraka. Obe odprtini sta prekrite na zunanji strani s premičnima loputama, ki se ob aktivaciji ventilatorja odpreta in omogočita pretok zraka skozi celico. Ventilator je namenjen ohlajevanju celice v primeru pregrevanja.

Merilna oprema obsega inštrumente, ki spremljajo zunanje in notranje pogoje na testni celici. Vsi inštrumenti so preko digitalno-analognih pretvornikov povezani s programirljivim logičnim krmilnikom (PLC) in tako s celotnim sistemom vodenja. Merilna oprema obsega sledeče inštrumente:

- **piranometer in albedometer CM7B** (Kipp&Zonen Delft BV), ki spremlja zunanjo globalno in odbito komponento sončnega sevanja. Odzivni čas inštrumenta je 5 s, gostota energijskega toka je izražena v W/m²;
- **termo člen tipa E** iz materiala NiCr-CuNi, ki spremlja zunanjo temperaturo zraka. Nameščen je na severni strani celice, kar omogoča zaščito pred vplivom neposrednega sončnega sevanja. Pred vplivom vetra pa je termočlen zaščiten s plastičnim tulcem;
- **luksmeter LUX cell**, ki meri nivo notranje osvetljenosti. Pritrjen je na strop celice, kjer je zaščiten pred vplivom neposredno sončnega sevanja;

- **termo člena tipa T** iz materiala Cu-CuNi, ki sta namenjena spremljanju notranje temperature zraka in sta pozicionirana tako, da nista izpostavljena neposrednemu sočnemu sevanju.

Oprema vodenja sistema KAMRA se lahko v grobem deli v dve ločeni skupini, in sicer v procesni ter nadzorni nivo:



Slika 2.8: Shema sistema KAMRA s prikazanimi aktuatorji, regulacijsko in merilno opremo ter osnovnimi povezavami.

Fig. 2.8: Schematics of the KAMRA system with actuators, measuring and regulating equipment shown.

- **procesna oprema** sistema je sestavljena iz komunikacijskega modula, programirljivega logičnega krmilnika (PLC) Mitsubishi serije AnS vključno s koprocesorjem in napajalno enoto, ki opravlja vodenje testne celice. Naloga PLC-ja je izvajanje regulacije sistema KAMRA po regulacijski shemi, načrtovani v programskem orodju IDR BLOK 3.05. Vsi programi za izvajanje operacij na PLC-ju se izvajajo s programskim orodjem GX Developer 7. Ker je potrebno količine, dobljene z merilnimi napravami, preoblikovati v obliko, primerno za PLC, to opravi merilno-regulacijska oprema (MRO), ki signale pretvori v območju 4 – 20 mA in jih tudi ojača;
- **nadzorna oprema** je sestavljena iz nadzornega računalnika (osebni računalnik s programskimi orodji za načrtovanje in izvajanje regulacijskih shem, razvitih v okolju Factory Link) in operatorskega pulta (MAC E200). Slednji je namenjen neposredni komunikaciji s PLC-jem in spremljanju termično-optičnih procesov v testni celici. Izvajanje teh funkcij omogoča MAC Programmer aplikacija za konfiguriranje prikazov na operatorskem pultu. Za nadzor in prikaz eksperimentov na osebem računalniku je bilo uporabljeno programsko orodje SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition & Human Machine Interface), v katerem se izvaja aplikacija za nadzor in spremljanje procesa vodenja.

2.4.2 Opis regulatorja KAMRA

Pri koncipiranju sistema KAMRA je bilo glavno vodilo za zasnovo regulacijskega algoritma oblikovati sistem, ki bi poskušal s spreminjanjem geometrije zasteklitve (senčenje odprtine) regulirati notranje pogoje v celici glede na zunanje klimatske danosti. Ker pa so notranje zahteve ter zunanji pogoji v poletnem in zimskem času različni je že na samem začetku snovanja postalo očitno, da bo moral regulacijski sistem zadostiti vsaj dvema osnovnima sezonskima režimoma.

- **Poletni režim** mora preprečevati pregrevanje celice pri hkratnem zagotavljanju zadovoljivega nivoja osvetljenosti. Čeprav lahko pri velikem številu primerov v poletnem času zagotovimo zadovoljiv nivo notranje osvetljenosti že z zagotavljanjem
-

vidnega stika z okolico (minimalno odprto senčilo), predstavlja ta zahteva potencialen konflikt interesov, saj se preprečevanje pregrevanja in zagotavljanje osvetljenosti do neke mere medsebojno izključujeta. V idealnem primeru, ko je zasteklitev orientirana proti južni strani neba in je vreme skozi celoten dan popolnoma sončno, bi se roleta v dnevnem ciklu premikala po parabolični krivulji. V nočnem času je zastekljeni del ovoja popolnoma nezastrt, saj s tem omogočamo radiacijsko hlajenje.

- **Zimski režim** okarakterizira stremenje k čim večjemu omogočanju zajema solarnih pritokov, kar v idealnem primeru pomeni, da bi bilo okno ob izpolnitvi pogojev osvetljenosti podnevi popolnoma nezastrito. V nočnem času pa so senčila popolnoma zaprta, saj tako delujejo kot nočna izolacija.
- **Pomladno-jesenski režim** predstavlja svojevrstno kombinacijo med zimskim in poletnim režimom, saj lahko vremenske razmere v toku enega dneva zaobjamejo vse značilnosti zimskih in poletnih klimatskih pojavov. Prav zaradi nabora različnih možnih vremenskih pojavov v tem času predstavljata jesen in pomlad z vidika regulacije potencialno najbolj težavna letna časa.

Ker je dinamika sprememb zunanjih temperatur (nekaj °K v minutnem časovnem intervalu) v primerjavi z dinamiko sprememb osvetljenosti (hipna sprememba v razponu 1000 lx – 5000 lx ali celo več) relativno počasna, je bil sistem regulacije transparentnega dela ovoja že na samem začetku hierarhično urejen, in sicer tako, da ima regulacija osvetljenosti vedno prednost pred regulacijo temperature. Takšna organiziranost je predvsem pomembna, ker je regulacijski sistem omogočal harmoniziranje med notranjo osvetljenostjo in regulacijo notranjih temperatur. Poleg spremljanja nastavljenih zelenih notranjih vrednosti temperature in osvetljenosti je morala regulacija senčila izpolniti tudi psihološke pogoje delovanja, saj bi prehitri in prepogosti premiki rolete v prostoru z uporabniki predstavljali zelo moteč vpliv na kvaliteto bivanja. Poleg regulacije notranje osvetljenosti in temperature s spreminjanjem geometrije zasteklitve je sistem KAMRA vseboval tudi regulacijo grelcev in ventilatorja za uravnavanje notranjih temperatur celice.

Regulacijske zanke, ki sestavljajo sistem KAMRA, bi lahko delili na glavni zanki (temperatura, osvetljenost) in pomožno za grelce in ventilator. Toplotni in svetlobni

regulacijski zanki sta lahko konfigurirani tako, da sodelujeta (harmoniziranje) ali pa delujeta vsaka posebej ter s tem regulirata samo temperaturo ali pa samo osvetljenost v celici. Regulacijska zanka za osvetlitev je strukturirana tako, da uravnava položaj rolete glede na referenčno vrednost in dejansko osvetljenost celice. Podobno je zasnovana tudi temperaturna zanka, ki glede na vneseno referenco in izmerjeno temperaturo zraka v celici z upoštevanjem razpoložljivega zunanjega sončnega sevanja uravnava položaj rolete. Pri regulaciji grelcev in ventilatorja se sistem za aktivacijo odloči na podlagi primerjanja referenčne vrednosti z dejansko notranjo temperaturo celice. Ker simultano delovanje grelca in ventilatorja ni dovoljeno, se regulacijska zanka odloči za vklop enega ali drugega glede na primerjanje izhodnih količin odgovarjajočih regulatorjev.

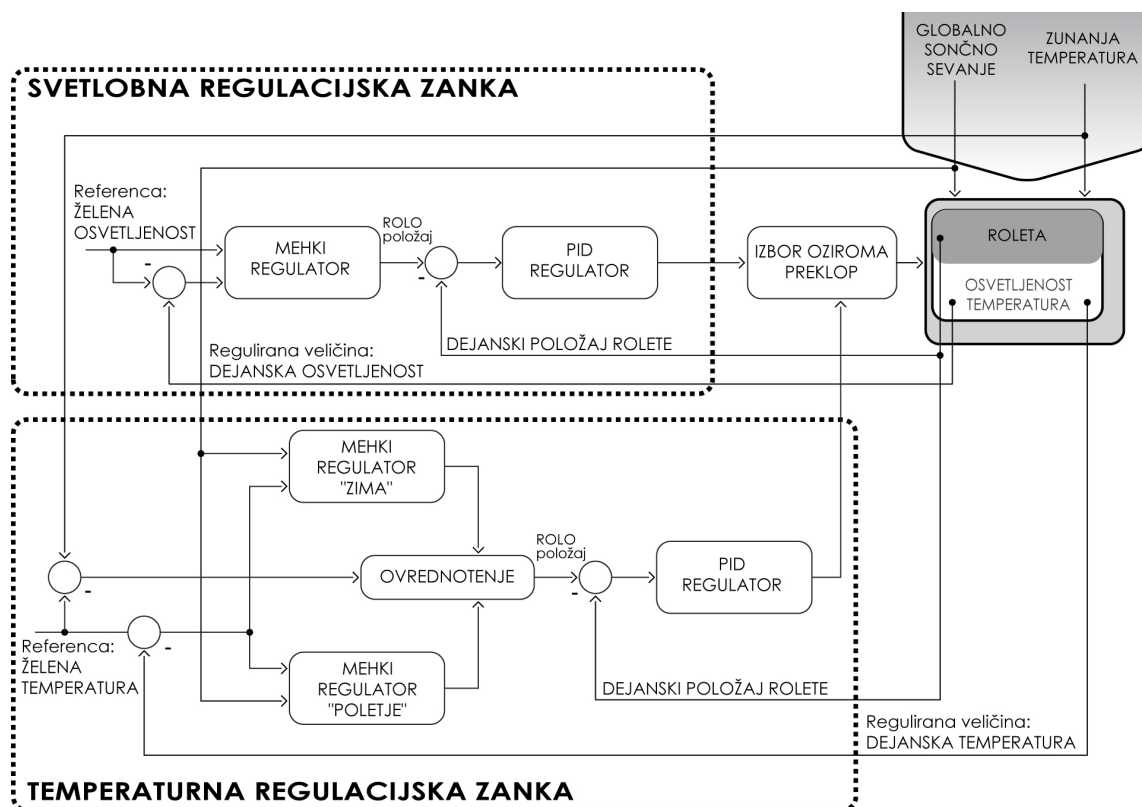
Obe glavni veji regulacijskega sistema sta zasnovani kot kaskadni regulacijski zanki, pri čemer je glavni regulator mehkega tipa, dodatni pomožni pa klasičen PID-regulator s pomožno regulirano veličino. To pomeni, da glavni mehki regulator s pomočjo vhodne referenčne vrednosti (npr.: zelena osvetljenost) in regulirane vrednosti regulacijske zanke (npr.: dejanska notranja osvetljenost) nastavi kot izhod referenčno vrednost za pomožni regulator – zeleni položaj rolete, le-ta pa to primerja z dejanskim položajem rolete ter kot svoj izhod pošlje signal za ustrezni pomik senčila. Uporabljeni pomožni PID-regulator je hitrostni PID/V regulator z izhodom, ki predstavlja spremembo položaja naprave v razponu vrednosti od +100 % do -100 %, pri čemer negativne vrednosti predstavljajo zapiranje, pozitivne pa odpiranje senčila. Slika 2.9 predstavlja poenostavljeno shemo temperaturne in svetlobne regulacijske zanke sistema KAMRA.

Pri snovanju algoritma za temperaturno regulacijsko zanko so bile kot osnova uporabljene numerične simulacije, izvedene v MATLAB/Simulink programskem okolju **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.** Nastavitve mehkega regulatorja so bile še dodatno optimizirane z izvedenimi eksperimenti. Omenjeno je bilo, da je zaradi narave sezonsko spreminjajočih se zunanjih klimatskih pogojev smiselno vzpostaviti vsaj dva regulacijska algoritma, in sicer za zimski ter poletni čas. Pri sistemu KAMRA oba mehka regulatorja prispevata k reguliranju pozicije rolete, razmerje izraženega vpliva med posameznima regulatorjema pa se določa s pomočjo temperaturne razlike med zunanjo in zeleno notranjo temperaturo zraka. Kar v primeru nižjih zunanjih temperatur od notranjih zelenih temperatur

zraka pomeni, da na spreminjanje pozicije rolete vpliva le mehki regulator za zimski režim. V obratnem primeru pa pozicionirata roletu oba regulatorja, pri čemer se količina vpliva posameznega regulatorja določi s sledečo evaluacijsko funkcijo:

položaj rolete = $((\text{fuzzy_rol_S}/100 * \text{Terr}/2) + (\text{fuzzy_rol_W}/100 * (100 - \text{Terr})/2)$, kjer sta »fuzzy_rol_S (W)« izhodna signala poletnega (S) in zimskega (W) mehkega temperaturnega regulatorja. Terr je razlika med zunanjo temperaturo in notranjo želeno temperaturo zraka.

Na takšen način je mogoče pokriti tudi vse zunanje razmere v pomladnem in jesenskem času, ki dejansko predstavljajo kombinacijo dveh klimatskih ekstremov, torej poletja in zime. Za bolj enakomerno in tekoče delovanje regulacijske zanke in posledično premikanje rolete so v temperaturno zanko vgrajeni tudi dodatni filtri, ki izločijo vpliv višfrekvenčnih motenj merjenih signalov.

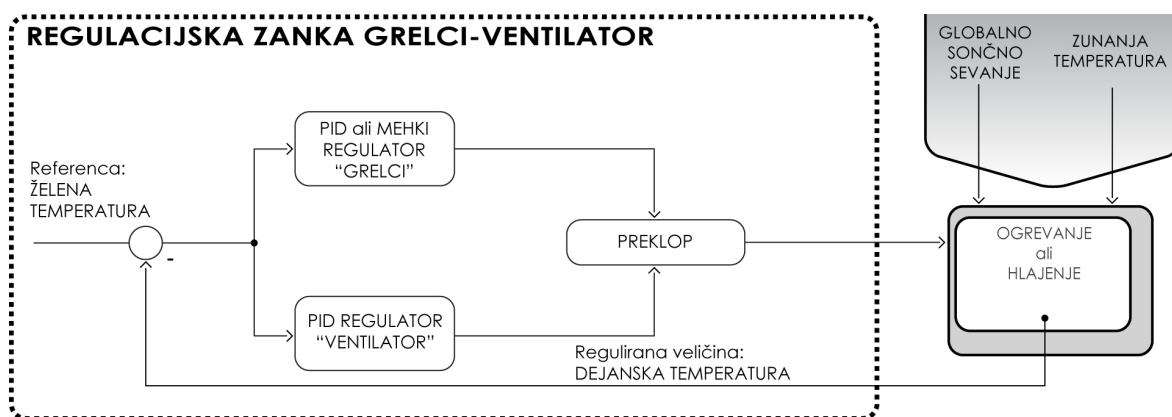


Slika 2.9: Poenostavljena bločna shema svetlobne in toplotno regulacijske zanke sistema KAMRA.

Fig. 2.9: KAMRA's simplified block diagram of illumination and thermal regulation loop.

Svetlobna regulacijska zanka je bila za razliko od toplotne zasnovana samo s pomočjo eksperimentov na testni celici brez predhodnih simulacij na numeričnem modelu. Osnovni razlog za takšen pristop pri snovanju regulacijskega algoritma so bili kompleksna fizikalna narava problema prehoda svetlobe skozi transparentni del stavbnega ovoja in spremljajoči optični pojavi absorpcije in odboja svetlobe v prostoru. Posledično bi razvoj modela zahteval veliko časa ter številne poenostavitve in linearizacije, ki bi potencialno vplivale na natančnost in veljavnost tako pridobljenih rezultatov. Zaradi zelo izrazite dinamičnosti procesa naravne osvetlitve (pojavljanje hitrih in trenutnih sprememb v nivoju zunanje globalnega obsevanja, npr: oblaki prekrijejo sonce) je bilo oblikovanje odgovarjajočih mehkih pravil izredno delikatno delo, ki je zahtevalo veliko ekspertnega znanja in veliko količino izvedenih eksperimentov. Z eksperimenti se je izkazala tudi potreba po uvedbi dveh filtrov, ki sta opravljala nalogo blaženja prehitrih ali prepogostih premikov rolete, ti pa bi lahko negativno vplivali na nivo ugodja potencialnih uporabnikov prostora.

Za vodenje delovanja grelcev in ventilatorja je bila oblikovana regulacijska zanka, sestavljena iz dveh regulatorjev ter bloka, ki se na osnovi primerjave izhodnih vrednosti regulatorja za ventilator in regulatorja za grelce odloča, katerega bo aktiviral (Slika 2.10). Vhodne vrednosti za oba regulatorja sta želena temperatura kot referenčna vrednost in dejanska temperatura zraka v testni celici kot regulirana veličina, na podlagi odstopanj med tema dvema vrednostima regulatorja določita odgovarjajoč odziv ventilatorja in grelca. Ventilator v



Slika 2.10: Bločna shema regulacijske veje sistema KAMRA za aktivacijo grelcev in ventilatorja.

Fig. 2.10: Block diagram of KAMRA's regulation loop for the activation of heaters and ventilator.

primeru testne celice KAMRA predstavlja poenostavljeno nadomestilo za hlajenje, saj učinkuje le takrat, ko so zunanje temperature nižje od notranjih. Krmiljenje ventilatorja je izpeljano s pomočjo klasičnega PID-regulatorja pozicijskega tipa (PID/P), ki da kot izhod ustrezno časovno pogojeno akcijo za določen položaj naprave v območju od 0 % do 100 %. Pri reguliranju grelcev sta bila razvita dva regulatorja, prvi je bil prav tako kot pri ventilatorju pozicijski PID/P-regulator, drugi pa je bil mehki regulator. V obeh primerih je bil izhod regulatorjev določitev položaja aktuatorja, torej moči delovanja grelca (od 0 % do 100 %). Čeprav sta se regulatorja za grelec in ventilator nahajala vsak v svoji veji, je bilo istočasno delovanje onemogočeno s preklopnim blokom.

Kot je bilo že omenjeno, je temperaturno regulacijsko zanko in svetlobno regulacijsko zanko mogoče povezati med seboj tako, da se hkrati v testni celici regulirata oziroma harmonizirata obe količini. To je doseženo s pomočjo posebnega bloka, ki omogoča preklon med obema regulatorjema (Slika 2.9). Zaradi večje občutljivosti ljudi na spremembe nivoja osvetljenosti ter na splošno kompleksnejše regulacije uravnavanja dnevnega osvetljevanja testne celice je svetlobna regulacijska zanka vedno primarna pri določanju položaja rolete. Ko regulacija notranje osvetljenosti doseže zadovoljiv nivo znotraj tolerančnega območja okoli referenčne vrednosti, prevzame regulacijo pozicije rolete temperaturna zanka regulacijskega sistema. Edina omejitev za pozicioniranje rolete pri takšnem delovanju je, da se morajo premiki rolete, ki jih vodi temperaturna regulacijska zanka, gibati znotraj definiranega tolerančnega območja nivoja notranje osvetljenosti.

2.4.3 Eksperimentalni rezultati

Eksperimenti, izvedeni s pomočjo testne celice KAMRA, so potekali skozi daljše časovno obdobje treh let skoraj brez vmesnih prekinitev. V tem času so bili na testni celici izvedeni trije konceptualni sklopi eksperimentov. Prvi sklop je obsegal eksperimente, ki so bili namenjeni določitvi toplotno optičnih parametrov obnašanja testne celice, v drugem sklopu so se definirale filterske časovne konstante na koncu, v tretjem sklopu testiranj pa so se izvajale nastavitve mehkih regulatorjev z namenom optimiziranja le-teh. Vse tri stopnje eksperimentov so bile izvedene pri različnih vremenskih razmerah ter različnih referenčnih profilih, s čimer je bila zagotovljena vsestranskost definiranih nastavitvev regulatorja.

Regulacijski zanki (toplotna in svetlobna) sta bili testirani ločeno in povezani v harmoniziranem načinu delovanja.

Testiranja z regulacijsko zanko osvetljenosti testne celice so pokazala, da je z zadovoljivimi nastavitvami parametrov mehkega regulatorja in filtrskih časov sistema mogoče s pomočjo premikov rolete slediti referenčnemu profilu notranje osvetljenosti v mejah odstopanj, manjših od ± 300 lx. Pri najbolj optimiziranih nastavitvah regulatorja je bil sistem zmožen slediti referenčnim vrednostim z napako, manjšo od 200 lx. Največja odstopanja so se pojavila pri stopničasti spremembi referenčne vrednosti notranje osvetljenosti ter, kot je bilo pričakovati, pri nenadnih spremembah zunanjih vremenskih pogojev (oblaki prekrijejo sonce). Pri delovanju temperaturne regulacijske zanke se je pokazalo, da se celica v času višjih zunanjih temperatur ter visokih vrednostih sončnega sevanja zelo hitro pregreje, regulacijski sistem pa ni zmožen primerno uravnati notranje temperature. Takšen odziv sistema je bil sicer pričakovan, saj se testna celica zaradi majhnega volumna, velike površine zasteklitve ter majhne akumulacijske mase zelo hitro odziva na zunanje temperaturne spremembe. Eksperimenti z vključeno regulacijo grelcev in ventilatorja se pokazali, da vgrajeni ventilator ni zmožen drastično vplivati na notranjo temperaturo zraka, saj je imel premajhno moč. Kljub tendenci celice do pregrevanja pa so rezultati regulacije notranje temperature zraka s premiki rolete pokazali zmožnost sistema, da vzdržuje v času prehodnih letnih časov (pomlad, jesen) notranje temperature 1 – 4 K višje od zunanjih v večernem času, kar je zaželen pojav v pomladno-jesenskem času. Zabeležene vrednosti notranje osvetljenosti v času uravnavanja premikov rolete samo s toplotno regulacijsko zanko so bile 2 – 3 krat nad zaželenimi vrednostmi.

Pri harmoniziranem delovanju sistema, kjer sta bili regulacijski zanki osvetljenosti in temperature povezani med seboj tako, da je imela osvetljenost notranjega prostora prednost pred regulacijo notranje temperature, so se pokazale težave s pretiranimi oscilirajočimi premiki rolete. Kljub nesprejemljivemu gibanju senčila pa je sistem še vedno vzdrževal zadovoljive notranje pogoje pri sledenju referenčnim vrednostim osvetljenosti in temperature.

2.5 Pregled drugih sistemov

Kot primerljiva sistema regulacije notranjega okolja s pomočjo prilagajanja karakteristik zunanega dela transparentnega ovoja stavbe bosta v nadaljevanju predstavljena dva primera sistema regulacije. Oba temeljita na uporabi mehke logike ter sta tako po načinu delovanja primerljiva s predhodno opisanim sistemom KAMRA. Prvi sistem je bil razvit v Laboratoriju za elektroniko tehnične univerze na Kreti, drugi pa v LESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. V pričujočih poglavjih bosta sistema najprej predstavljena ter nato primerjana s sistemom KAMRA. Namen je orisati širši spekter pristopov k problemu regulacije notranjega bivalno-delovnega okolja ter s tem pridobiti čim večji spekter informacij, potrebnih za izgradnjo IRsNO.

2.5.1 Laboratorij za elektroniko Tehnične univerze na Kreti

Opisani sistem regulacije notranjega okolja s pomočjo prilagajanja karakteristik transparentnega dela zunanega ovoja temelji na osnovi mehke logike ter je bil razvit v Laboratoriju za elektroniko tehnične univerze na Kreti. Vgrajen in testiran je bil v realnem okolju zgradbe laboratorija za elektroniko. Rezultate testiranja smo primerjali s predhodno izmerjenimi parametri notranjega okolja obravnavane stavbe. Vse značilnosti sistema, opisane v naslednjih poglavjih, so povzete po literaturi: [Kolokotsa et al. 2000, 2002, 2005].

Sistem regulacije notranjega okolja je pri svojem delovanju reguliral toplotno ugodje, vizualno udobje in kvaliteto zraka. Pri tem so bile merjene vrednosti: notranja in zunanja temperatura, mean radiant temperature, hitrost premikanja notranjega zraka, relativna vlažnost, koncentracija CO₂ ter notranja osvetljenost. Kot način preverjanja delovanja mehkega regulacijskega sistema je bila uporabljena primerjava z obstoječim regulacijskim sistemom zgradbe, ki je bil sestavljen iz dvopoložajnega ON-OFF-sistema za ogrevanje in hlajenje ter iz ročne regulacije osvetljevanja. Osnovna arhitektura regulacijskega sistema je sestavljena iz treh delov. To so:

- **sistem pametne kartice** (smart card), ki spremlja prisotnost uporabnikov ter omogoča vnašanje uporabnikovih preferenc. Le-te so uporabljene za nadaljnjo adaptacijo pravil mehkega regulatorja;
- **programirljiv logični krmilnik** (PLC), ki izvaja regulacijo sistema po predpisani regulacijski shemi mehkega regulatorja. ;
- **osebni računalnik**, ki izvaja nadzor in zapisovanje vseh dogodkov v sistemu regulacije. Ta računalnik tudi opravlja adaptacijo pravil mehkega regulatorja glede na želje in zahteve uporabnikov vnesene preko pametne kartice. Adaptacija algoritma se izvaja s pomočjo genetskih algoritmov (GA).

2.5.1.1 Opis regulatorja

Vhodne vrednosti regulatorja predstavljajo PMV (predicted mean vote) indeks, zunanja temperatura, koncentracija in hitrost izmenjave CO₂ ter notranja osvetljenost. Tem vhodnim vrednostim regulator predpiše s pomočjo nabora mehkih ČE-POTEM pravil v obliki trikotnih ali trapezoidnih pripadnostnih funkcij odgovarjajoče izhodne reakcije sistema. Odzivi sistema so lahko ogrevanje ali hlajenje, odpiranje in senčenje okna ter prižiganje umetne osvetlitve. V osnovni varianti regulatorja so mehka pravila nastavljena tako, da je omogočeno maksimalno izkoriščanje pasivnih ukrepov za doseganje zelenih ugodnih notranjih bivalno-delovnih pogojev. Z uporabo sistema se te nastavitve spreminjajo glede na želje uporabnikov, ki lahko s svojimi preferencami vplivajo na optimizacijo algoritma. Prav ta »optimizacija« lahko pri nerazumnih zahtevah uporabnika privede do energetsko neučinkovitega sistema regulacije.

Iz razpoložljive literature je razvidno, da so snovalci regulacijskega sistema oblikovali dve osnovni regulacijski zanki, in sicer toplotno in osvetlitveno. Pri toplotni zanki so bila pravila regulatorja oblikovana tako, da je uporabljal različne regulacijske strategije za posamezne letne čase. Tako regulator omogoča odpiranje oken v času prehodnih letnih časov ter s tem omogoča naravno ohlajanje prostora s pomočjo prezračevanja. Poleti in pozimi pa so okna zaprta, kar zmanjšuje izgube pri ogrevanju (zima) in hlajenju (poletje). Dodatno uporablja toplotna regulacijska zanka senčenje okna, in sicer tako, da v poletnem času senčila preprečujejo solarne dotoke ter s tem pregrevanje prostora, obraten način delovanja je uporabljen v zimskem času. Čeprav v dostopni literaturi avtorji navajajo, da sistem upošteva

letne čase, pa ne povedo, kako so le-ti definirani. Pri osvetlitveni regulacijski zanki so pravila regulatorja oblikovana tako, da takrat, ko je na voljo dnevna svetloba, ne dovoljujejo aktivacije luči ter uravnavajo nivo notranje osvetlitve izključno s senčenjem transparentnega dela stavbnega ovoja. Ko pa nivo razpoložljive dnevne svetlobe pade pod določen minimum (zelo oblačno vreme) ali pa je le-ta dejansko nična (noč), sistem aktivira dodatno umetno osvetlitev. Regulacijski sistem uravnava tudi koncentracijo ogljikovega dioksida v notranjem prostoru, žal pa avtorji v pregledani literaturi ne navajajo dovolj podatkov, da bi lahko sklepali na samo oblikovanje oziroma strukturo regulacije tega aspekta sistema.

Za začetne referenčne vrednosti regulacijskega sistema so bili izbrani kar priporočeni parametri iz izbrane literature:

- PMV indeks – P.O.Fanger, 1979,
- koncentracija CO₂ - CIBSE Guide Section A4, Air Infiltration and Natural Ventilation, 1994,
- osvetljenost - CIBSE Code for Interior Lighting, 1994.

Specifične začetne referenčne vrednosti so se potem, kot je bilo že omenjeno, prilagajale uporabnikovim zahtevam, ki se posredujejo sistemu skozi vmesnik pametne kartice. Kot del prilagajanja regulacijskih nastavitvev mehkega regulatorja sistem izvaja natančno optimizacijo le-teh s pomočjo genetskih algoritmov. Pri tem je končni cilj omogočiti dolgoročno zadovoljstvo uporabnikov ob hkratnih energetskih prihrankih. Kljub vsemu je potrebno omeniti, da takšen istem vodi do zelenih rezultatov le pod pogojem, da uporabnik od sistema zahteva pogoje, ki omogočajo delovanje, s katerim se doseže prihranke, saj v nasprotnem primeru sistem sicer zadovolji uporabnikove želje, vendar ne omogoča energetskih prihrankov.

2.5.1.2 Eksperimentalni rezultati

Pred uporabo sistema v dejanskem realnem okolju so bile za izoblikovanje pravil mehkega regulatorja izvršene numerične simulacije na hipotetični stavbi s površino 15 m², locirani v Atenah. Simulacija je bila izvedena za specifičen zimski dan z začetnimi vrednostmi

referenčnih faktorjev ($PMV=-0.5$, $CO_2=800$ ppm, notranja osvetljenost=500 lx). Vhodne vrednosti mehkega regulatorja so bile sestavljene iz uporabnikovih zahtev, vnesenih preko pametne kartice, ter iz razlike med dejanskimi in zahtevanimi vrednostmi spremljanih spremenljivk. S pomočjo začetne optimizacije nastavitve parametrov regulatorja z genetskimi algoritmi niso bili pridobljeni zadovoljivi rezultati za PMV-faktor, zato so avtorji dodatno spremenili nastavitve GA ter v naslednjih ciklih dosegli primerne začetne nastavitve za regulator. Pridobljeni parametri referenčnih faktorjev ($PMV=-1.0$, $CO_2=771$ ppm, notranja osvetljenost=510 lx) so bili potem uporabljeni za definiranje pripadnostnih funkcij mehkega regulatorja.

Po preliminarnih numeričnih testiranjih in optimizaciji parametrov je bil regulacijski sistem vgrajen in preizkušen na realni stavbi laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti. 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. Rezultati novega sistema so pokazali v primerjavi z obstoječim regulacijskim sistemom 26.5 % prihranka energije za ogrevanje ter 14.0 % prihranka pri hlajenju, kar bi na letni ravni pomenilo 20.5 % prihranka energije za hlajenje in ogrevanje. Največji prihranek je regulacijski sistem dosegel pri osvetljevanju, kjer je bil dosežen kar 66,0-odstotni prihranek. Omeniti je potrebno, da je tako visoka vrednost energetskega prihranka za osvetljevanje predvsem posledica tega, da predhodno v stavbi laboratorija ni bilo avtomatske regulacije osvetljevanja. Tako velik prihranek energije v primerjavi s predhodno ročno regulacijo osvetljevanja kaže na neučinkovitost reguliranja notranjih bivalnih razmer z ročno intervencijo uporabnikov ter tako potrjuje potrebo in nujno po avtomatizaciji regulacije notranjega bivalno-delovnega okolja.

2.5.2 LESO-PB (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)

Regulacijski sistem razvit, na Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (federalni politehnični šoli v Lusani), je bil v osnovi razvit za testiranje in razvijanje algoritma za kontrolo senčenja in umetne osvetlitve v notranjih prostorih. Kot celostni sistem nadzora notranjega okolja poleg osvetljevanja in senčenja obravnava in s tem tudi regulira ogrevanje

in prezračevanje bivalno-delovnega okolja. Opis in značilnosti regulacijskega sistema so povzeti po: [Guillemin, Morel 2001].

Preizkušanje regulacijskega sistema je bilo izvedeno na realni stavbi, in sicer v dveh celičnih pisarnah poslovne stavbe LESO-PB. V enem prostoru je bil nameščen nov sistem regulacije notranjih bivalno-delovnih razmer, v drugem pa obstoječ sistem kontrole, ki je reguliral le ogrevanje prostora. Pisarni sta tlorisnih dimenzij 4.75 m x 3.60 m (17.10 m²) in svetle etažne višine 2.80 m, zasteklitev se nahaja na južni zunanji steni in meri 5.75 m², na zunanji strani je opremljena s tekstilnim pomičnim rolo senčilom. Čeprav sta prostora identična v dimenzijah in gradbeno-fizikalnih karakteristikah, sta bila sistema regulacije izmenjana med prostoroma v 14-dnevnih intervalih. Tako je bil ublažen vpliv načina uporabe prostora in obnašanja uporabnikov na končne rezultate testiranja. Oba sistema sta bila krmiljena preko istega računalnika, ki je komuniciral z aktuatorji preko LonworksTM bus s standardnim "Dynamic Data Exchange" protokolom. Sistem je temeljil na mehki logiki, za optimizacijo pripadnostnih funkcij regulatorja pa so načrtovalci uporabili GA. Med načrtovanjem je bilo razvitih in preizkušenih sedem različnih algoritmov, vendar bo zaradi enostavnosti opisa delovanja sistema predstavljen le najučinkovitejši izmed njih.

2.5.2.1 Opis regulatorja

Sistem je v grobi zasnovi strukture regulatorja mogoče razdeliti na tri dele oziroma zanke. Prvi del sistema opravlja prenos odgovarjajočih fizikalnih vrednosti v ukaze za izhodne naprave oziroma aktuatorje (npr.: pozicija senčila, pozicija ventila ...). V drugem delu se nahajajo mehki modeli za regulacijo toplotnih in svetlobnih tokov v stavbi ter regulacijo kvalitete zraka. V zadnjem delu sistem regulacije vsebuje GA za dolgoročno optimizacijo mehkih regulacijskih pravil sistema. Struktura celotnega algoritma sistema notranjega okolja je sestavljena tako, da je le prvi del oziroma prva regulacijska zanka specifična za določen objekt, ostala dva dela sistema pa je mogoče prilagoditi kakršnim koli izhodnim napravam.

Regulator za zunanje tekstilno rolo senčilo, ki je bil uporabljen v opisanem sistemu in eksperimentih, lahko glede na prisotnost in želje uporabnika deluje v dveh regulacijskih načinih. Če sistem zazna prisotnost uporabnika v prostoru, regulator vodi pomike senčila

tako, da zadosti zahtevam glede osvetljenosti prostora. Pri daljših odsotnostih uporabnikov pa regulacijski sistem preklopi v regulacijo toplotnih vidikov notranjega okolja. Pri reguliranju notranje osvetljenosti sistem poleg sledenju referenčni vrednosti notranje zaželeno osvetljenosti prostora pri vodenju premikov senčila upošteva tudi zahteve zagotavljanja ugodnega vizualnega okolja z vidika bleščanja. Regulator najprej določi maksimalno sprejemljivo odprtost senčila glede na zahteve bleščavosti delovnega okolja ter poskuša znotraj te omejitve referenčnim vrednostim nivoja zagotoviti notranje osvetljenosti. Določitev največje dovoljene odprtosti senčila je definirana s pomočjo upoštevanja relativne pozicije sonca na nebu glede na fasado stavbe, v kateri se nahaja obravnavana odprtina. Sistem upošteva tako azimut kot tudi elevacijo sonca, kar mu omogoča natančno spremljanje poti sonca ter upoštevanje nizkih vpadnih kotov (sonce je blizu horizonta), ki so lahko potencialno zelo moteči za uporabnike prostora. V takšnem primeru sistem popolnoma zapre senčilo ter prepreči moteče bleščanje. Odziv sistema pa je obraten, ko zazna samo difuzno radiacijo, kar pomeni, da neposredno sončno sevanje ni prisotno ter tako tudi ni pogojev za nastanek bleščanja, v takšnem primeru ni omejitve za maksimalno odprtost senčila. Potem ko je odpravljena možnost nastanka bleščanja, regulator določi dokončno pozicijo senčila znotraj danih robnih pogojev glede na referenčno vrednost notranje osvetljenosti s pomočjo rešitve enačbe »razmerja osvetljenosti« (ang.: Illuminance Ratio – RI). Pričujoča enačba ($E_{in} = RI(\alpha) \cdot E_{out}$) povezuje zunanjo vertikalno osvetljenost (E_{out}) z notranjo referenčno horizontalno osvetljenostjo (E_{in}) s pomočjo faktorja α , ki določa končno pozicijo senčila. Kot je bilo že omenjeno, je v primeru prisotnosti neposrednega sončnega sevanja edina omejitev za končno pozicijo senčila maksimalna dovoljena odprtost le-tega zaradi preprečevanja bleščanja. Posledično to pomeni, da če notranja osvetljenost prostora še vedno ne dosega referenčne vrednosti, sistem aktivira umetno osvetlitev.

Če sistem za določen čas ne zazna prisotnosti uporabnika, preklopi na regulacijo toplotnih aspektov prostora. Ta del regulatorja temelji na osnovni predpostavki, da skozi zasteklitev potekata dva osnovna mehanizma izmenjave toplote. Prvi je neposredni energijski dotok zaradi solarnih pritokov skozi zasteklitev, drugi mehanizem pa je transmisija toplotne energije skozi zasteklitev zaradi temperaturnih razlik med zunanostjo in notranostjo. Regulator določi »želeno energetska razmerje okna« (ang.: desired window heat balance – DWHB) ter s tem posledično glede na specifični letni čas tudi obnašanje senčila. Pozitivna vrednost DWHB-ja

odgovarja zelenim solarnim dotokom za notranji prostor. Osnovna pravila, ki so uravnavala obnašanje regulacije senčila, so zahtevala, da sistem vedno »pomaga« ogrevalnemu ali hladilnemu sistemu notranjega okolja, to pomeni, da so v zimskem času prioriteta solarni dotoki, poleti pa senčenje ter s tem blokiranje neposredne solarne radiacije. Za prehodna letna časa (pomlad in jesen) pa glede regulacije toplotnih aspektov notranjega okolja pravil ni mogoče enoznačno definirati, zato so načrtovalci sistema definirali, kdaj uporabiti »poletno« in kdaj »zimsko« strategijo s pomočjo povprečne dnevne zunanje temperature zraka. Podoben način določanja prehodnih letnih časov je bil uporabljen tudi pri sistemu KAMRA, razvitem na KSKE (poglavje 2.4.2).

Adaptacija mehkih pravil regulatorja se izvaja vsako noč s pomočjo GA. Osnovna ideja za adaptacijski proces je aplikacija majhnih popravkov k nastavitvam regulatorja, kar skozi daljše časovno obdobje privede do boljšega regulatorja. Sam proces prilagajanja regulacijskih pravil ne da novih vrednosti specifičnega parametra, ampak predpiše le spremembo k predhodni vrednosti parametra. Takšen postopek omogoča sledljivost sprememb za nazaj ter tudi »shranjevanje izkušenj«, saj sistem ne izgubi podatkov o predhodnih nastavitvah regulatorja.

2.5.2.2 Eksperimentalni rezultati

Eksperimenti, izvedeni z opisanim sistemom regulacije notranjega okolja, so potekali v zimskem času v obdobju 94 dni, pri čemer sta bila regulatorja med opisanimi sobama zamenjana po 48 dneh, kar je približno polovica trajanja testiranja. Predstavljeni rezultati odražajo le delovanje sistema v zimskem času, saj regulator do objave uporabljene dostopne literature še ni bil testiran v drugačnih pogojih.

Regulator je v sončnem vremenu senčilo skoraj popolnoma zaprl (okno je bilo izpostavljeno sončnemu sevanju le z 20 % površine), kar je bil tudi pričakovan rezultat za zimsko sončno vreme, ko je sonce pozicionirano nizko nad horizontom in je možnost pojavljanja bleščanja zelo visoka. Ko je bil uporabnik odsoten, je sistem popolnoma odprl senčilo ter s tem omogočil pasivni zajem neposrednega sončnega sevanja v prostoru. Največje težave z delovanjem regulatorja so se pokazale v primeru nezadovoljstva uporabnikov s trenutnimi nastavitvami sistema. V takšnem primeru so uporabniki prostora lahko ročno spremenili

nastavitve ter s tem za 1 uro prekinili avtomatsko regulacijo, kljub vsemu pa se ta prekinitev ni odražala pri nadaljnjih adaptacijah sistema, kar lahko potencialno vodi v ponovitev težav z nezadovoljevanjem zahtev uporabnika. Regulacija notranje osvetlitve je pri referenčni vrednosti 600 lx omogočila zadovoljiv nivo notranje osvetlitve, saj so bila maksimalna odstopanja znotraj relativno sprejemljivega območja odstopanj (± 230 lx). Ti rezultati so bili v večini primerov bili doseženi le z 42 premiki senčila, kar je dovolj nizko, da ne vpliva bistveno moteče na počutje oziroma dožemanje vizualnega ugodja uporabnikov. Pri porabi energije za ogrevanje je v primerjavi z obstoječim regulatorjem sistem na osnovi mehke logike dosegel 25-odstotni prihranek v času 94-dnevnega obdobja. Tako velik prihranek pri porabi energije je bil dosežen zaradi naravnosti sistema, da je predvidel pokritje dela potrebe po ogrevanju zvečer s solarnimi pritoki, doseženimi popoldne. Dodatno je sistem tudi zmanjševal referenčne vrednosti v nočnem času in med vikendi. Čeprav takšen ukrep ni specifičen samo za mehke regulatorje, gre za enostavno časovno odvisno zmanjšanje referenčne vrednosti notranje temperature, obstoječi sistem, s katerim je bil primerjan nov regulator, ni omogočal takšnih nastavitvev.

2.6 Primerjava opisanih sistemov

Med opisanimi primeri regulacije notranjega okolja je opaziti veliko podobnosti ter tudi kar nekaj razlik. Predvsem pri pristopih k testiranju delovanja sistemov ni mogoče izpeljati neposrednih vzporednic, ki bi omogočale neposredno primerjavo učinkovitosti sistemov. Zaradi takšne raznolikosti različnih pristopov kot tudi rezultatov delovanja je edini možen in upravičen način primerjave sistemov izluščitev konceptualnih osnov, ki tvorijo strategije k reguliranju notranjega bivalno-delovnega okolja. Prav ti koncepti in posledično strategije, ki jih sestavljajo, so najuporabnejše gradivo za nadaljnji razvoj podobnih sistemov, saj nazorno kažejo osnovne značilnosti različnih pristopov brez nepotrebnih detajlov specifične dejanske izvedbe. Pri snovanju IRsNO smo si tako lahko v veliki meri pomagali s predhodnim znanjem, pridobljenim na sistemu KAMRA, kot tudi z dodatnimi informacijami, pridobljenimi s pomočjo analize različnih strategij. Rezultat takšnega pristopa k primerjavi opisanih sistemov je spisek oziroma preglednica (Preglednica 2.2 in Preglednica 2.3) reprezentativnih značilnosti vsakega posameznega sistema, ki omogoča njihovo medsebojno

primerjavo. V nadaljnjih treh poglavjih bodo podani naslednji kratki komentarji k trem glavnim značilnostim tvorjenja regulacijskega sistema notranjega bivalnega okolja:

- regulacija osvetljenosti notranjega bivalno-delovnega okolja,
- regulacija toplotnih aspektov notranjega bivalno-delovnega okolja,
- uravnavanje med nasprotujočimi zahtevami osvetljevanja in ogrevanja (harmonizacija) notranjega bivalno-delovnega okolja.

2.6.1 Reguliranje osvetlitve

Pri vseh opisanih sistemih regulacije osvetljenosti prostora je bila notranja referenčna vrednost osvetljenosti na delovni površini uporabljena kot ključen faktor pri regulaciji zelenih vrednosti. Različni pristopi so bili uporabljeni pri merjenju in upoštevanju razpoložljivega zunanega sončnega sevanja. V primeru regulacijskega sistema LESO-PB so avtorji merili sončno sevanje na vertikalni površini fasade stavbe, v kateri se nahaja transparentna odprtina obravnavanega prostora. Takšen pristop da zelo natančno sliko o dejanski razpoložljivi količini sončnega sevanja za dnevno osvetljevanje prostora. Dodatno je regulator upošteval tudi dejansko pozicijo sonca na nebu, kar je omogočilo predvidevanje pojavnosti ter posledično preprečevanje bleščanja. Podoben sistem merjenja zunanje osvetljenosti je bil uporabljen tudi pri sistemu KAMRA, kjer pa je bilo sončno sevanje merjeno v horizontalni ravnini v relativni bližini zasteklitve testne celice. Primerjava med zunanjo razpoložljivo ter notranjo trenutno osvetljenostjo omogoča regulatorju, da glede na zahteve referenčne vrednosti določi ustrezen pomik senčila. V primeru tretjega obravnavanega sistema regulacije notranjega okolja pa v pregledani literaturi ni natančnega opisa, kako se zajemajo meritve zunanega razpoložljivega sončnega sevanja, kljub vsemu pa je mogoče sklepati, da je sistem saj v grobem zelo podoben sistemoma KAMRA in LESO-PB.

Iz zgornjega opisa glavnih značilnosti primerjanih regulacijskih sistemov je razvidno, da sistem zajemanja podatkov o zunanjih klimatskih danostih pri regulatorju LESO-PB prednjači tako po sofisticiranosti izvedbe kot tudi količini spremljanih in upoštevanih parametrov. Kljub temu pa primerjava učinkovitosti sistema pri sledenju referenčnim vrednostim notranje osvetljenosti delovne površine s sistemom KAMRA pokaže skoraj enako učinkovitost

Preglednica 2.2: Primerjava osnovnih značilnosti treh opisanih sistemov regulacije notranjega okolja – način harmonizacije, način optimizacije in eksperimentalni rezultati.

Table 2.2: Comparison of basic characteristics of the three described systems – mode of harmonization, optimization algorithm and experimental results.

	Laboratory of electronics of technical University of Crete	LESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	KAMRA, KSKE, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, UL
NAČIN HARMONIZACIJE	1. harmonizacija: <ul style="list-style-type: none"> • Preklapljanje med toplotno in svetlobno reg. zanko. • Prisotnost uporabnika kot odločujoči faktor (smart card). • Uporabnik prisoten: osvetljenost. • Uporabnik odsoten: toplota. 	1. harmonizacija: <ul style="list-style-type: none"> • Preklapljanje med toplotno in svetlobno reg. zanko. • Prisotnost uporabnika kot odločujoči faktor (zaznava). • Uporabnik prisoten: osvetljenost. • Uporabnik odsoten: toplota. 	1. harmonizacija: <ul style="list-style-type: none"> • Dinamična koregulacija svetlobne in toplotne regulacijske zanke. • Prednostna je regulacija osvetljenosti. • Uporabnik ni bil prisoten.
OPTIMIZACIJA ALGORITMA	1. način uravnavanja: <ul style="list-style-type: none"> • Uporaba genetskih algoritmov za uravnavanje mehkega regulatorja. • Ročno uravnavanje. 	1. način uravnavanja: <ul style="list-style-type: none"> • Uporaba genetskih algoritmov za uravnavanje mehkega regulatorja. 	1. način uravnavanja: <ul style="list-style-type: none"> • Ročno uravnavanje mehkega regulatorja. • Metoda »poskusi in popravi«.
EKSPERIMENTALNI REZULTATI	1. tipi eksperimentov: <ul style="list-style-type: none"> • Numerično testiranje. • Preizkušeno v zasedeni stavbi. 	1. tipi eksperimentov: <ul style="list-style-type: none"> • Numerično testiranje. • Preizkušeno v zasedeni stavbi. 	1. tipi eksperimentov: <ul style="list-style-type: none"> • Numerično testiranje. • Preizkušeno v eksperimentalni celici.
	2. prednosti sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Interakcija uporabnikov s sistemom preko »smart card«. 	2. prednosti sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Napreden regulator osvetljenosti. • Uravnavanje bleščanja. 	2. prednosti sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Dinamična koregulacija regulacijskih zank. • Učinkovit regulator osvetljenosti.
	3. slabosti sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Učinkovitost sistema je zelo odvisna od obnašanja uporabnika. 	3. slabosti sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Uporabniku ni omogočen dolgotrajen vpliv na delovanje sistema. 	3. slabosti sistema: <ul style="list-style-type: none"> • Pojav oscilatornega delovanja izvršilnih členov ob uporabi dinamične koregulacije.
	4. rezultati testiranj: <ul style="list-style-type: none"> • Izkazani energetski prihranki, vendar v dostopni literaturi ni podatkov o delovanju sistema. 	4. rezultati testiranj: <ul style="list-style-type: none"> • Zadovoljivo delovanje obeh regulatorjev. • Efektivno preprečevanje bleščanja. 	4. rezultati testiranj: <ul style="list-style-type: none"> • Zadovoljivo delovanje obeh regulatorjev.

regulacije. Tako je bila z regulatorjem KAMRA dosežena natančnost regulacije osvetlitve v razponu ± 200 lx od referenčne vrednosti, zelo podobne rezultate je dal tudi sistem LESO-PB, ki je uspešno sledil referenčnim vrednostim z odstopanji znotraj obsega ± 230 lx (Preglednica 2.3). Razliko med učinkovitostjo obeh sistemov oziroma »slabše« delovanje LESO-PB regulatorja gre po vsej verjetnosti pripisati temu, da sistem upošteva in aktivno preprečuje pojav bleščanja, kar lahko v določenih primerih privede do večjega odstopanja od zelenih referenčnih vrednosti osvetljenosti. Žal za učinkovitost delovanja sistema regulacije laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti v literaturi ni bilo podanih podatkov, ki bi vrednostno določili učinkovitost sistema pri regulaciji notranje osvetljenosti referenčne delovne površine.

Iz podanih značilnosti sistemov ter učinkovitosti sistemov za sledenje zastavljenim referenčnim vrednostim je mogoče sklepati, da oba načina zajema zunanjih podatkov tako pri sistemu LESO-PB kot KAMRI dajeta glede regulacije nivojev notranje osvetljenosti prostora podobne rezultate. Na podlagi teh rezultatov lahko sklepamo, da oba načina zajema zunanjih podatkov privedeta do ekvivalentnega delovanja in ne predstavljata odločujoče prednosti enega pred drugim. Seveda pa je potrebno poudariti, da zgornji zaključek velja le za regulacijo nivoja osvetljenosti delovno-bivalnega okolja, saj v nasprotju s sistemom LESO-PB KAMRA ni regulirala pojava bleščanja v prostoru.

2.6.2 Reguliranje toplote

V primeru zasnove regulacije osvetljenosti smo v prejšnjem poglavju opazili podobne pristope k zasnovi reguliranja, pri oblikovanju toplotne regulacijske zanke pa so bili pri treh predstavljenih primerih uporabljeni dokaj različni pristopi, ki v osnovi temeljijo na skupnih izhodiščih. V vseh treh primerih se je pokazala potreba po definiranju razlike med notranjo referenčno ter zunanjo dejansko temperaturo zraka ter s tem tudi način določevanja notranjega toplotnega ugodja. V primeru KAMRE in LESO-PB-regulatorja je bilo notranje toplotno ugodje definirano le s temperaturo notranjega zraka, torej s pomočjo referenčne vrednosti notranje temperature zraka. Drugačen pristop je bil uporabljen pri regulatorju, razvitem na tehnični univerzi na Kreti, kjer so razvijalci za definiranje notranjih referenčnih vrednosti

toplotnega ugodja uporabili PMV-faktor, ki poleg notranje temperature zraka upošteva tudi druge vplivne faktorje, kot so: zračna vlažnost, faktor obleke ...

Preglednica 2.3: Primerjava osnovnih značilnosti treh opisanih sistemov regulacije notranjega okolja – načina regulacije toplotnih in svetlobnih tokov.

Table 2.3: Comparison of basic characteristics of the three described systems – mode of illumination and thermal control.

	Laboratory of electronics of technical University of Crete	LESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	KAMRA, KSKE, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, UL
REGULACIJA OSVETLJENOSTI	1. parametri: <ul style="list-style-type: none"> Referenčna notranja osvetljenost. Zunanji parametri niso bili opisani v dostopni literaturi. 	1. parametri: <ul style="list-style-type: none"> Referenčna notranja osvetljenost. Zunanja globalna osvetljenost na vertikalni površini. Zaznavanje pozicije sonca na nebu. 	1. parametri: <ul style="list-style-type: none"> Referenčna notranja osvetljenost. Zunanja globalna osvetljenost na horizontalni površini.
	2. regulacija bleščanja: <ul style="list-style-type: none"> Sistem ne uravnava bleščanja. 	2. regulacija bleščanja: <ul style="list-style-type: none"> Sistem zazna in uravnava bleščanje. Zazna difuzno sevanje. 	2. regulacija bleščanja: <ul style="list-style-type: none"> Sistem ne uravnava bleščanja.
	3. učinkovitost: <ul style="list-style-type: none"> V dostopni literaturi ni podatkov. 	3. učinkovitost: <ul style="list-style-type: none"> Referenca ± 230 lx. 	3. učinkovitost: <ul style="list-style-type: none"> Referenca ± 200 lx.
REGULACIJA TOPLOTE	1. parametri: <ul style="list-style-type: none"> PMV faktor (P.O.Fanger, 1972). Letni časi (zima, poletje, prehodno obdobje). Število regulacijskih zank ni navedeno v literaturi. 	1. parametri: <ul style="list-style-type: none"> Referenčna notranja temperatura. Razmerje med solarnimi pritoki in transmisijskimi izgubami (DWHB). Letni časi (zima, poletje, prehodno obdobje). 2 regulacijski zanki (zima in poletje). 	1. parametri: <ul style="list-style-type: none"> Referenčna notranja temperatura. Temperatura zunanjega zraka. Letni časi (zima, poletje, prehodno obdobje). 2 regulacijski zanki (zima in poletje).
	2. definiranje prehodnih obdobj: <ul style="list-style-type: none"> Definicija prehodnega obdobja ni navedena v dostopni literaturi. 	2. definiranje prehodnih obdobj: <ul style="list-style-type: none"> Glede na zaznano zunanjo povprečno temperaturo zraka. 	2. definiranje prehodnih obdobj: <ul style="list-style-type: none"> Glede na razliko med zunanjo in notranjo temperaturo zraka.
	3. učinkovitost: <ul style="list-style-type: none"> 20.5 % letni prihranek pri energiji za hlajenje in ogrevanje. 	3. učinkovitost: <ul style="list-style-type: none"> 25 % prihranek pri ogrevalni energiji v 94 dnevem testnem obdobju. 	3. učinkovitost: <ul style="list-style-type: none"> 1-4 K višje notranje temperature v času prehodnega obdobja.

Ker so bili vsi sistemi regulacije razviti za najbolj kompleksno klimatsko okolje, torej za klimo zmernege pasu, kjer se poleg dveh skrajnih in diametralnih letnih časov (zima in poletje) pojavljata tudi dva prehodna letna časa (jesen in pomlad), je bilo za zadovoljivo delovanje regulatorja nujno vzpostaviti letnim časom specifična pravila delovanja regulatorja. Gledano z vidika klimatskih razmer, sta poletje in zima relativno neproblematična, saj prvi predstavlja potrebo po hlajenju, medtem ko je potrebno v zimskem času notranje prostore ogrevati. Glede na to je dokaj logično, da vmesna prehodna obdobja predstavljajo v nekem določenem razmerju kombinacijo obeh ekstremov ter s tem s stališča zasnove regulatorja problematičen aspekt zasnove regulacijskih pravil. Ključnega pomena je določitev trenutka, ko se prične prehodno obdobje ter s tem prehod iz zimskega v poletni toplotni režim. Ker iz vsakodnevnih izkušenj vemo, da astronomska in meteorološka definicija letnih časov ne odražata realnega klimatskega stanja, se je pri vseh treh sistemi izkazalo nujno definirati začetek in konec prehodnih letnih časov s posebnimi pripadnostnimi funkcijami regulatorja. Pri regulatorju sistema KAMRA 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 zimskim toplotnim režimom, v obratnem primeru pa v določenem razmerju vplivata na senčilo tako zimska kot tudi poletna temperaturna regulacijska zanka (glej poglavje 2.4.2). S takšnim načinom je mogoče upoštevati raznoliko število različnih zunanjih temperaturnih klimatskih danosti. Drugačen, a vendar kljub vsemu dokaj podoben način preklopa med zimskim in poletnim toplotnim režimom je bil uporabljen pri toplotnem regulatorju sistema LESO-PB, kjer so bili prehodi med letnimi časi določeni s pomočjo povprečnih zunanjih dnevniških temperatur zraka. V vseh treh sistemih so bile uporabljene različne regulacijske zanke za posamezne letne čase kot tudi ločene pripadnostne funkcije za definiranje prehoda iz enega v drug toplotni režim. Vendar v primeru regulatorja laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti podobno kot pri osvetlitveni regulacijski zanki tudi pri toplotni regulacijski zanki v pregledani literaturi ni bil naveden opis določitve prehoda iz zimskega v poletni toplotni regulacijski režim.

Testiranja učinkovitosti posameznih regulacijskih sistemov so bila izvedena na tako zelo različne načine, da je objektivna primerjava pridobljenih rezultatov popolnoma nemogoča.

Dodatno neposredno primerjavo onemogoča tudi to, da sta bila sistem laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti in sistem LESO-PB preizkušena v dejanskem realnem okolju s prisotnostjo uporabnikov, nasprotno pa je bil sistem KAMRA apliciran na pomanjšani modelni celici brez uporabnika. Kljub vsemu je vsak posamičen sistem izkazal pozitivne efekte na energetske bilanco v testiranem okolju (Preglednica 2.2), tako je v primerjavi z obstoječim regulacijskim sistemom mehki regulator laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti dosegel kumulativen prihranek 20.5 % energije za ogrevanje in hlajenje. V primeru sistema LESO-PB so snovalci mehki regulator primerjali z obstoječim dvopoložajnim (ON-OFF) sistemom za ogrevanje v časovnem obdobju 94 dni ter dosegli zmanjšanje porabe energije za ogrevanje za 25.0 %. Pri sistemu KAMRA pa zaradi gradbeno-fizikalnih specifik testne celice ne bi bilo objektivno govoriti o odstotkih prihrankov energije za ogrevanje, saj za takšno primerjavo ni bilo referenčnih vrednosti, zato je bila opazovana dinamika sprememb notranjih temperatur v primerjavi s spremembami zunanje temperature zraka. Kot ključno je bilo izbrano obdobje prehodnih letnih časov, ko je mogoče s pravilnim delovanjem regulatorja doseči pokritje določenega dela potreb po ogrevanju s pasivnim izkoriščanjem sončnega sevanja. Želen efekt je bil zvišanje notranje temperature zraka s pomočjo neposrednega zajema sončnega sevanja v primerjavi z zunanjo v večernopopoldanskem času ter s tem dokazati možnost pokrivanja energetskega primanjkljaja s pomočjo pravilno delujočega regulacijskega sistema. Eksperimenti s sistemom KAMRA so pokazali potencial povišanja notranjih temperatur zraka v večernem času od 1 do 4 K. Pri tem je potrebno omeniti, da sta bili toplotna kapaciteta in toplotna izolacija testne celice zelo slabi.

Opisani rezultati, pridobljeni s testiranjem vseh treh regulacijskih sistemov, kažejo na prednosti uporabe mehkih regulacijskih sistemov pred klasičnimi dvopoložajnimi sistemi reguliranja ogrevanja in hlajenja v stavbah. Pri sistemu laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti in LESO-PB sta oba regulatorja dosegla 20 – 25-odstotno zmanjšanje porabe energije, kar je drastična izboljšava, če pri tem upoštevamo, da ni bilo drugih posegov v stavbo. Z regulacijskim sistemom KAMRA je bilo dokazano, da je mogoče samo s pomočjo uravnavanja karakteristik transparentnih delov ovoja zagotoviti boljši izkoristek solarnih pritokov ter s tem vplivati na zmanjšanje porabe energije za ogrevanje ter hlajenje stavbe.

2.6.3 Uravnavanje med aspekti toplotne in svetlobne regulacije

Toplotna in svetlobna regulacija notranjega okolja velikokrat postavljata kontradiktorne zahteve glede obnašanja izvršnih členov ter tako privedeta do potrebe po odločitvi, kako uskladiti oba vpliva na notranje okolje. Tipičen primer takšnega scenarija se odvija v poletnem času, ko sta zahteva po zagotavljanju minimalnega vpliva neposrednega sončnega sevanja na pregrevanje prostora in potreba po dnevnem osvetljevanju v popolnem nasprotju, saj bi toplotni del regulatorja popolnoma zaprl senčilo, pri čemer bi onemogočil naravno osvetljevanje prostora. Ključ za rešitev takšnih kontradiktornih situacij je v primernem delovanju in usklajevanju toplotnega in svetlobnega dela regulatorja. Pri pregledanih sistemih regulacije sta se izpostavila dva zelo različna pristopa, ki pa vsak na svoj način rešujeta nastalo situacijo nasprotujočih zahtev.

Pri regulatorjih LESO-PB in laboratorija za elektroniko tehnične univerze na Kreti so se snovalci odločili za način, ki se glede na prisotnost uporabnikov odloča, ali bo aktiven toplotni ali svetlobni del regulatorja. Ta »preklopni« način v primeru odsotnosti uporabnikov vodi senčilo samo glede na zahteve toplotne regulacije, v obratnem primeru pa le glede na zahteve svetlobne regulacije. Glavna prednost takšnega pristopa je enostavnost izvedbe, saj se prehod med načinoma regulacije izvede s pomočjo enostavnega preklopa. Seveda pa takšen pristop zanemari istočasno vplivnost toplotnih in svetlobnih procesov, ki v stavbi nastopajo kontinuirano, ter tako v času zasedenosti reguliranega prostora popolnoma zanemari potencial energetske prihrankov, ki bi nastopili, če bi sistem upošteval oba procesa. Takšen pristop je bil vgrajen v sistem KAMRA, ki omogoča istočasno uravnavanje tako toplotnih kot svetlobnih vidikov notranjega okolja. Ta način harmoniziranega pristopa se ravna po osnovnem vodilu, da so uporabniki, torej ljudje, veliko bolj občutljivi na spremembe v nivoju osvetljenosti kot na spremembe v temperaturi okolja. Zaradi takšne naravnosti človeškega odziva na pogoje vizualnega udobja je nujno, da sistem regulacije primarno zadosti pogojem zadovoljive osvetljenosti, ki se vedno giblje znotraj nekega tolerančnega območja okoli referenčne vrednosti. Ko regulator doseže nivo osvetljenosti znotraj tolerančnega območja, pa lahko toplotna regulacijska zanka poskuša optimizirati pozicijo senčila s stališča toplotnih aspektov sistema. Edini pogoj, ki mora biti izpolnjen v času optimiziranja s pomočjo toplotne zanke, je ta, da nivo osvetljenosti delovne površine ne sme zapustiti tolerančnega območja

referenčne vrednosti. Pri testiranju takšnega pristopa na testni celici KAMRA se je pokazala potencialna šibka točka tega pristopa, saj se pri delovanju v realnih pogojih pojavijo oscilacije ter moteči pogosti premiki senčila.

Končna ocena primernosti »preklopnega« ali harmoniziranega pristopa k uravnavanju zahtev toplotne in svetlobne regulacije je težavna, saj vsak od zgoraj opisanih sistemov predstavlja določene prednosti ter tudi slabosti. Na splošno bi lahko ocenili, da je harmoniziran sistem bolj sofisticiran in se dejansko bolje odziva na realno stanje, kljub temu pa je »preklopni« način enostavnejši ter za izvedbo na realnem objektu bolj praktičen. Gledano celostno, predstavlja harmonizacija boljše rešitev problema usklajevanja toplotno optičnih tokov skozi transparentni del stavbnega ovoja.

2.7 Pomen odziva uporabnikov

Izkušnje pri uporabi ročnih in avtomatskih sistemov regulacije nivoja notranje osvetlitve delovnih in bivalnih prostorov so pokazale izrazito neučinkovitost ročne regulacije. V večini primerov uporabniki, potem ko opravijo neko prilagoditev notranjega okolja (prižgejo luči, premaknejo senčilo), teh nastavitvev niso pripravljani več spreminjati, saj se človeško telo in njegov senzorski sistem zaradi velike sposobnosti adaptacije prilagodita novim notranjim pogojem. Prav sposobnost adaptacije človeškega organizma spreminjajočim se zunanjim pogojem je razlog za relativno neučinkovitost popolnoma ročnih sistemov regulacije notranjega delovno-bivalnega okolja.

Pri uporabi popolnoma avtomatiziranih regulacijskih sistemov se je izkazalo, da se zaznana učinkovitost sistema s strani uporabnikov lahko zelo razlikuje od dejanske fizikalne učinkovitosti [Ruck et al. 2000] le-tega, kar lahko posledično privede do nezadovoljnosti uporabnikov. Slednji bodo zaradi motečega delovanja (hitri premiki senčila, pogosto izklapljanje luči, hrup ...) takšen sistem verjetno zavrnil ali pa ga poskušali onemogočiti. Dodatno se je izkazalo, da je omogočanje vsaj delnega nadzora nad delovanjem sistema zelo pomembno pri pripravljenosti uporabnikov, da avtomatski sistem sprejmejo. Možnost posega uporabnika v nastavitve in delovanje regulacijskega sistema notranje osvetljenosti kot tudi

toplotnih karakteristik notranjega okolja dodatno omogoča individualizacijo nastavitvev ter s tem v določenih okvirih tudi boljše delovanje celotnega sistema. Seveda sistem, ki upošteva želje uporabnikov, deluje bolje in energetsko varčneje le pri smiselnih zahtevah in nastavitvah delovanja. Prav tako mora biti komunikacija z regulacijskim sistemom izvedena na nivoju kompleksnosti, ki ne presega znanja in sposobnosti povprečnega uporabnika, saj v nasprotnem primeru le-ta takšnega sistema ne bo želel uporabljati. Pri prekompleksni komunikaciji med uporabnikom in regulacijskim sistemom obstaja možnost, da bo sistem ostal izključen oziroma se bo uporabljal le v ročnem načinu upravljanja. Prekompleksna komunikacija med uporabnikom in regulacijskim sistemom je zelo problematična tema tudi v tehnološko naprednejših okoljih industrijske proizvodnje, kjer zaradi neizkušenosti in slabe usposobljenosti kadra regulatorji velikokrat ostajajo neizkoriščeni, slabo nastavljeni ali celo v ročnem načinu upravljanja [Shaw 1998]. Zaradi potencialnih problemov v komunikaciji med uporabniki in avtomatskim regulacijskim sistemom je potrebno pri zasnovi sistema oziroma vmesnika (human machine interface) med uporabnikom in regulatorjem posvetiti veliko pozornost, saj se lahko drugače sicer dobro oblikovan sistem na tem mestu zlomi.

Velikokrat spregledan aspekt pri uporabljanju regulacijskih sistemov notranjega okolja v zgradbah je vzdrževanje oziroma upravljanje delovanja sistema. Zaradi kompleksne narave regulacijskih sistemov, ki se uporabljajo za uravnavanje parametrov notranjega okolja zgradb, je potrebno za primerno vzdrževanje ter upravljanje zagotoviti kader, ki bo sposoben odreagirati na specifične probleme uporabe avtomatskega sistema regulacije. Upravljalci stavb morajo biti seznanjeni z načinom delovanja regulacijskega sistema ter usposobljeni za primerne ukrepe pri nastopu potencialnih težav pri delovanju sistema.

2.8 Izkušnje

Kompleksna narava interakcij med notranjim grajenim ter zunanjim danim okoljem zahteva za zadovoljivo rešitev ugodnih notranjih bivalnih razmer celovito obravnavo sistema vplivov in zahtev. Pri oblikovanju regulacijskega sistema, ki bi bil zmožen slediti potrebam uporabnikov po prijetnem in ugodnem notranjem bivalno-delovnem okolju ter bi hkrati omogočal energetsko učinkovite odzive na zunanje dane klimatske pogoje, je nujna uporaba

širokega spektra znanj s področja gradbene fizike, regulacijskih sistemov in simulacij. Prav zaradi kompleksne narave interakcij med notranjim in zunanjim okoljem so se sicer zelo dobro razviti in preverjeni sistemi industrijskih PID-regulatorjev izkazali za prezahtevno in pretirano kompleksno rešitev, da bi se lahko splošno uporabljali v stavbah. Kot privlačna alternativa so se v kombinaciji s klasičnimi PID-regulatorji izkazali mehki regulatorji, ki so se, kot je bilo v predhodnih poglavjih opisano, zelo dobro obnesli pri uravnavanju toplotnih in svetlobnih karakteristik notranjega okolja. Ključnega pomena pri sistemih, ki temeljijo na mehki logiki, je uporaba ekspertnega znanja s področja gradbeno-fizikalnih fenomenov interakcij med zunanjim in notranjim okoljem.

3 ZNAČILNOSTI TESTNEGA PROSTORA

Prostor, v katerem je nameščen integralen regulacijski sistem notranjega okolja, se nahaja v stavbi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Jamovi cesti 2 (zemljepisna širina = 46.05° , zemljepisna dolžina = 14.30°). Sistem regulira delovno okolje v sobi 1 kabineta Katedre za stavbe in konstrukcijske elemente III/1, ki se nahaja v tretjem nadstropju stavbe FGG. Prostor je orientiran proti jugozahodu in zamaknjen za 26.7° proti jugu. Slika 3.1 prikazuje pozicijo prostora kabineta III/1 na fasadi stavbe fakultete, prikazano z Jamove ceste in Lepega pota.

3.1 Geometrijske in funkcionalne značilnosti testnega prostora IRsNO

Kabinet KSKE 1/III je sestavljen iz dveh prostorov, ki sta med seboj povezana in v katera se vstopa s hodnika v tretjem nadstropju stavbe FGG. Sobi sta med seboj zaporedno povezani, kar pomeni, da se v sobo 2 kabineta KSKE vstopa skozi sobo 1. Sistem regulacije notranjega delovno-bivalnega okolja je nameščen le v sobi 1, zato bo v nadaljnjih opisih značilnosti prostora obravnavan le ta prostor in bo zaradi krajšega zapisa opuščena notacija sobe 1. V tem poglavju bodo predstavljene osnovne geometrijske ter gradbeno fizikalne značilnosti obravnavanega prostora. Poleg geometrije bodo predstavljeni tudi: način uporabe prostora, pozicija delovnih mest, dispozicija notranje opreme in simulacijski izračun potenciala dnevnega osvetljevanja.

3.1.1 Kabinet III/1

Prostor, v katerem je nameščen IRsNO, se nahaja na zahodni strani objekta Fakultete za gradbeništvo in geodezijo ter je osnovnih tlorisnih dimenzij 7.48 m x 4.93 m ter svetle etažne višine 3.88 m. Kabinet je z zahodno stranico orientiran proti zunanosti, z ostalimi tremi stranicami pa se stika s sosednjimi prostori, in sicer: na severni strani s sobo 2 kabineta KSKE III/1, na južni strani s hodnikom ter na vzhodni strani delno s hodnikom in delno s prostorom za sanitarije. Vse notranje površine, razen tal, so ometane in prepleškane z belo barvo, tla pa so finalno obdelana s svetlo sivim linolejem v ploščah, prilepljenih na betonski estrih.



Slika 3.1: Pozicija sobe 1 kabineta KSKE III/1 označena na fasadi stavbe FGG, pogledane iz smeri Jamove ceste (jugozahod) in Lepega pota (zahod).

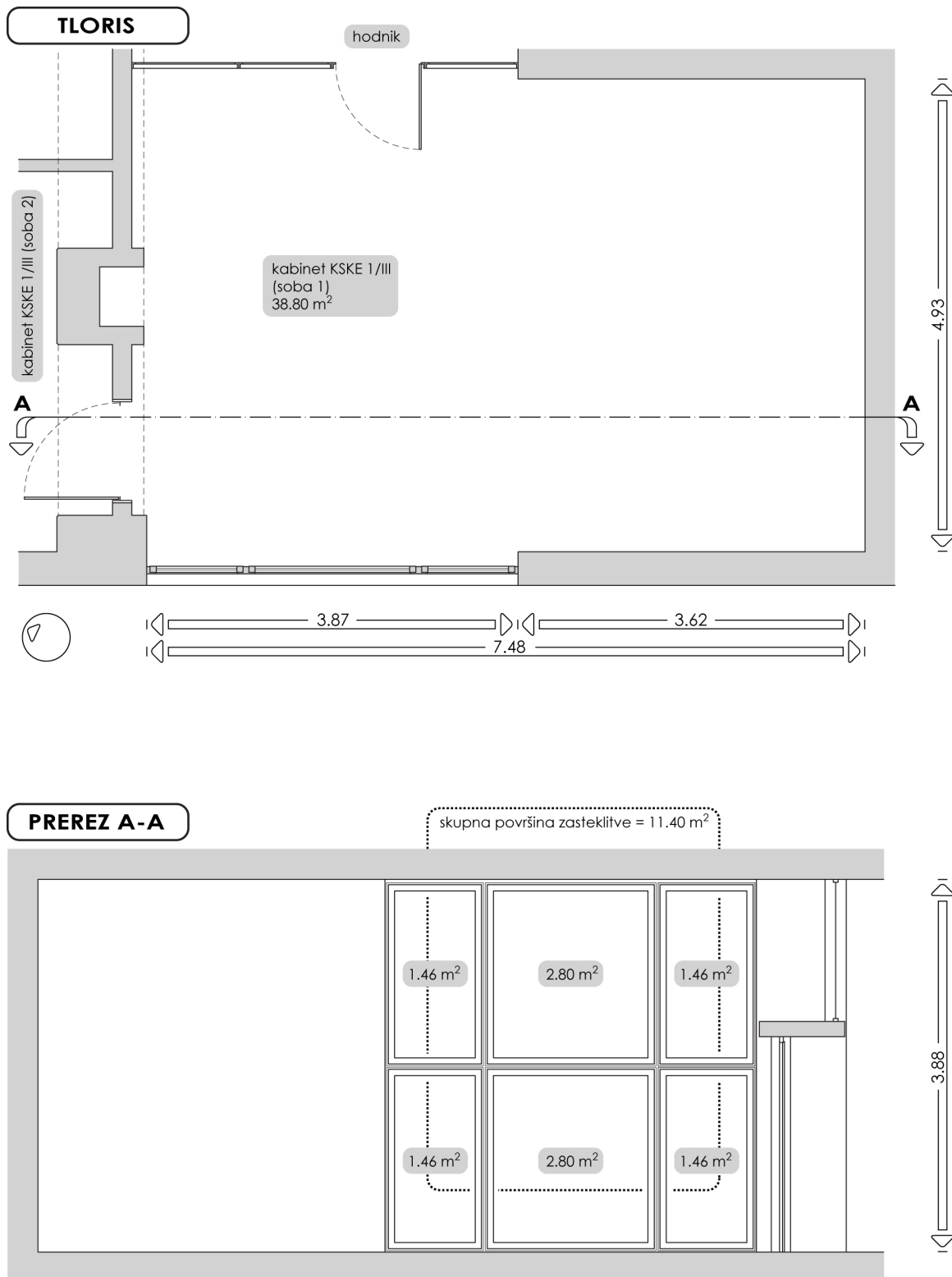
Fig. 3.1: Position of room 1 of cabinet KSKE III/1 relative to the facade of the FGG building shown from the Jamova road (south west) and Lepega pota (west).

Transparentni elementi ovoja prostora se nahajajo tako na zunanji steni kot tudi na notranjih predelnih stenah. V zahodni zunanji steni se nahaja odprtina s svetlimi dimenzijami 3.87 m x 3.88 m, v katero je vgrajeno okno s skupno površino zasteklitve 11.40 m². Pri predelnih stenah pa se zastekljeni predelni elementi nahajajo v vzhodni steni, kjer je zastekljen celoten del stene, ki meji na vzhodni hodnik, ter v severni steni, ki je zastekljena v višini 1.48 m pod stropom. Vse osnovne geometrijske karakteristike obravnavanega prostora so predstavljene v preglednici 3.1 in na sliki 3.2 in 3.3.

Preglednica 3.1: Osnovne dimenzijske karakteristike testnega prostora IRsNO. A_n – površina netransparentnih elementov, A_t – površina transparentnih elementov stene.

Table 3.1: Dimensional characteristics of the test room IRsNO. A_n – area of nontransparent elements, A_t – area of transparent elements.

	A_n (m ²)	A_t (m ²)
TLA		
Linolej	38.80	/
ZAHODNA (ZUNANJA) STENA		
Omet + belež	29.70	15.00
VZHODNA STENA		
Omet + belež	28.10	16.60
JUŽNA STENA		
Omet + belež	19.10	/
SEVERNA STENA		
Omet + belež	18.10	5.40
STROP		
Omet + belež	41.70	/
VOLUMEN PROSTORA = 163.40 m³		

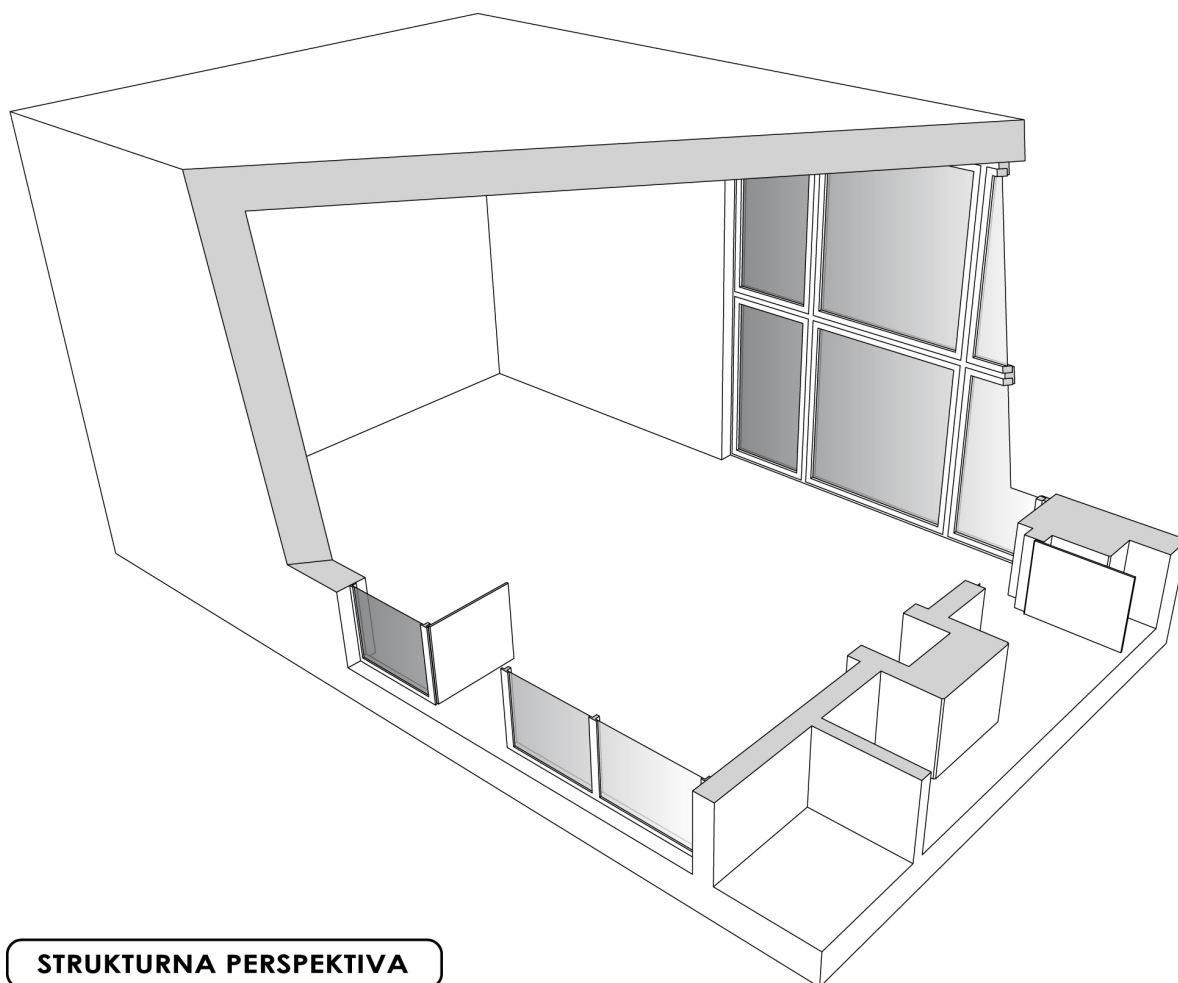


Slika 3.2: Tloris in prerez sobe 1 kabineta KSKE III/1, v katerem je nameščen IRsNO.

Fig. 3.2: Plan and section of room 1 of the cabinet KSKE III/1 in which the IRsNO is situated.

3.1.2 Gradbeno-fizikalne karakteristike konstrukcijskih sklopov

V preglednici 3.2 so predstavljene sestave in značilnosti konstrukcijskih sklopov netransparentnega dela ovoja kabineta KSKE III/1, le-ta je sestavljen iz medetažne konstrukcije ter dveh tipov sten- notranje predelne in zunanje stene. Podobno kot pri netransparentnih konstrukcijskih sklopih sta tudi oba transparentna elementa, ki se pojavljata v ovoju kabineta KSKE III/1, naštetata in opisana v preglednici 3.3. Ključen gradbeno-fizikalen podatek pri transparentnih elementih je poleg U-faktorja (toplotna prehodnost) tudi prepustnost zasteklitve za dnevno svetlobo (τ_v), saj le-ta pove, na kolikšen delež razpoložljive dnevne svetlobe lahko računamo pri ocenah dnevne osvetlitve prostora ter kakšni bodo solarni toplotni pritoki v obravnavanem prostoru.



Slika 3.3: Prostorski prikaz osnovnih geometrijskih značilnosti testnega prostora IRsNO.
Fig. 3.3: Perspective view of the test room IRsNO.

Preglednica 3.2: Značilnosti in sestava netransparentnih konstrukcijskih sklopov.

Table 3.2: Characteristics and composition of nontransparent constructional complexes.

	d (m)	k (W/mK)	R_i (m²K/W)	U (W/m²K)
MEDETAŽNA KONSTRUKCIJA				0.830
R _{s,i}			0.170	
Linolej	0.003	0.190	0.015	
Betonski estrih	0.050	1.160	0.043	
Zvočna izolacija	0.010	0.041	0.244	
Tlačna AB plošča	0.050	2.040	0.025	
Super 40	0.400	0.610	0.656	
Omet	0.010	0.990	0.010	
R _{s,e}			0.040	
ZUNANJA STENA				1.290
R _{s,i}			0.130	
Omet	0.010	0.870	0.011	
Penobetonski bloki	0.200	0.350	0.571	
Betonske fasadne plošče	0.050	2.040	0.025	
R _{s,e}			0.040	
PREDELNA STENA				1.170
R _{s,i}			0.130	
Omet	0.010	0.870	0.011	
Penobetonski bloki	0.200	0.350	0.570	
Omet	0.010	0.870	0.011	
R _{s,e}			0.130	

Preglednica 3.3: Značilnosti in sestava transparentnih konstrukcijskih sklopov.

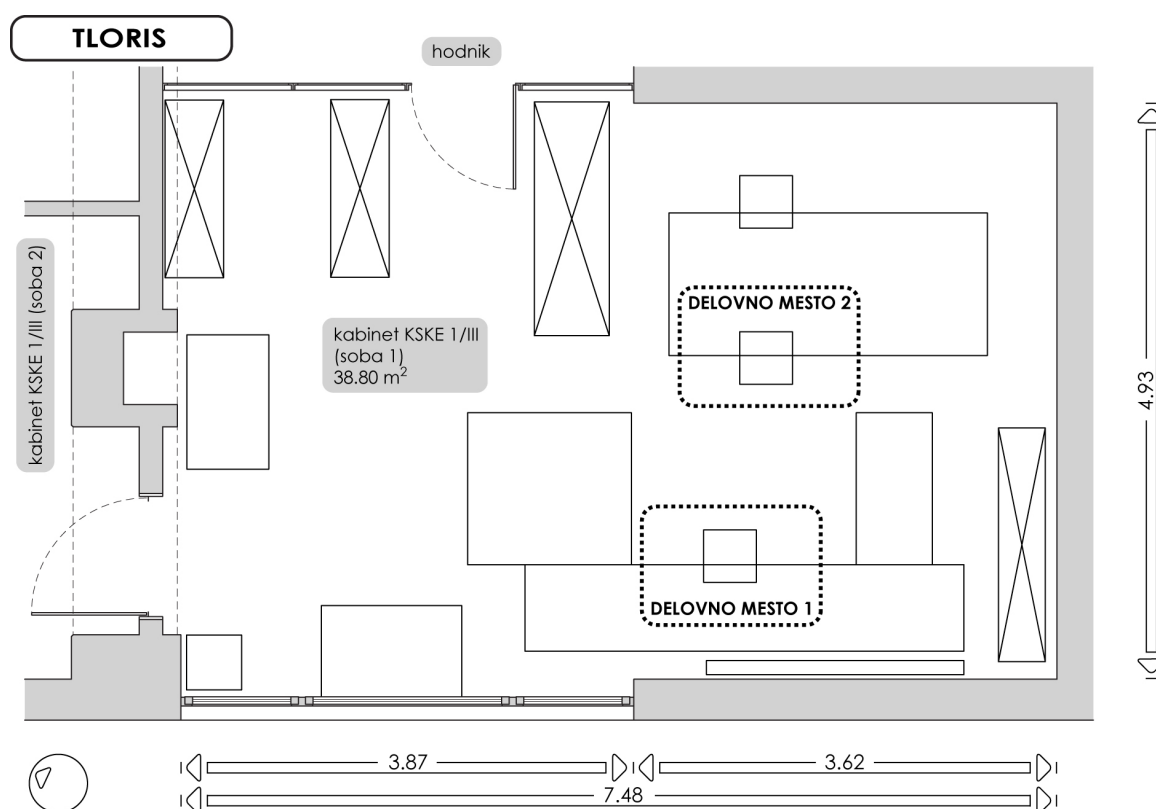
Table 3.3: Characteristics and composition of transparent constructional complexes.

	τ_v (%)	U (W/m²K)
OKNO		80.00
Steklo		2.90
Zračna plast		
Steklo		
Aluminijast okvir		
NOTRANJA ZASTEKLITEV		85.00
Steklo		5.90
Lesen / jeklen okvir		

3.1.3 Uporaba prostora

Prostor kabineta KSKE III/1 je bil prvotno končni del osrednjega hodnika v učilniškem traktu stavbe FGG in tako nikoli ni služil kot kabinet oziroma delovno okolje. Zaradi prostorske stiske je bil prostor ob zaključku hodnika kasneje pregrajen s stekleno predelno steno in vključno z učilnico ob njem namenjen prostoru za pedagoge. Zaradi prehodne narave sobe 1, iz katere se vstopa v sobo 2 kabineta KSKE (glej slike 3.2, 3.3 in 3.4), je bila edina možnost pozicioniranja delovnih mest v prvi sobi v njen jugovzhodni del, torej stran od oken in s tem izvora dnevnega osvetljevanja. V prostoru se nahajata dve delovni mesti, kar pri tlorisni površini 38.80 m^2 predstavlja zasedenost prostora z 0.05 oseb/m^2 .

Slika 3.4 prikazuje tlorisno razporeditev elementov notranje opreme kabineta KSKE III/1 z označenima pozicijama obeh delovnih mest. Ker se v prostoru opravlja delo, ki bi ga lahko okarakterizirali kot pisarniško delo primarno povezano z računalnikom, je ključnega pomena



Slika 3.4: Dispozicija notranje opreme v kabinetu KSKE III/1 z označenima pozicijama obeh delovnih mest.

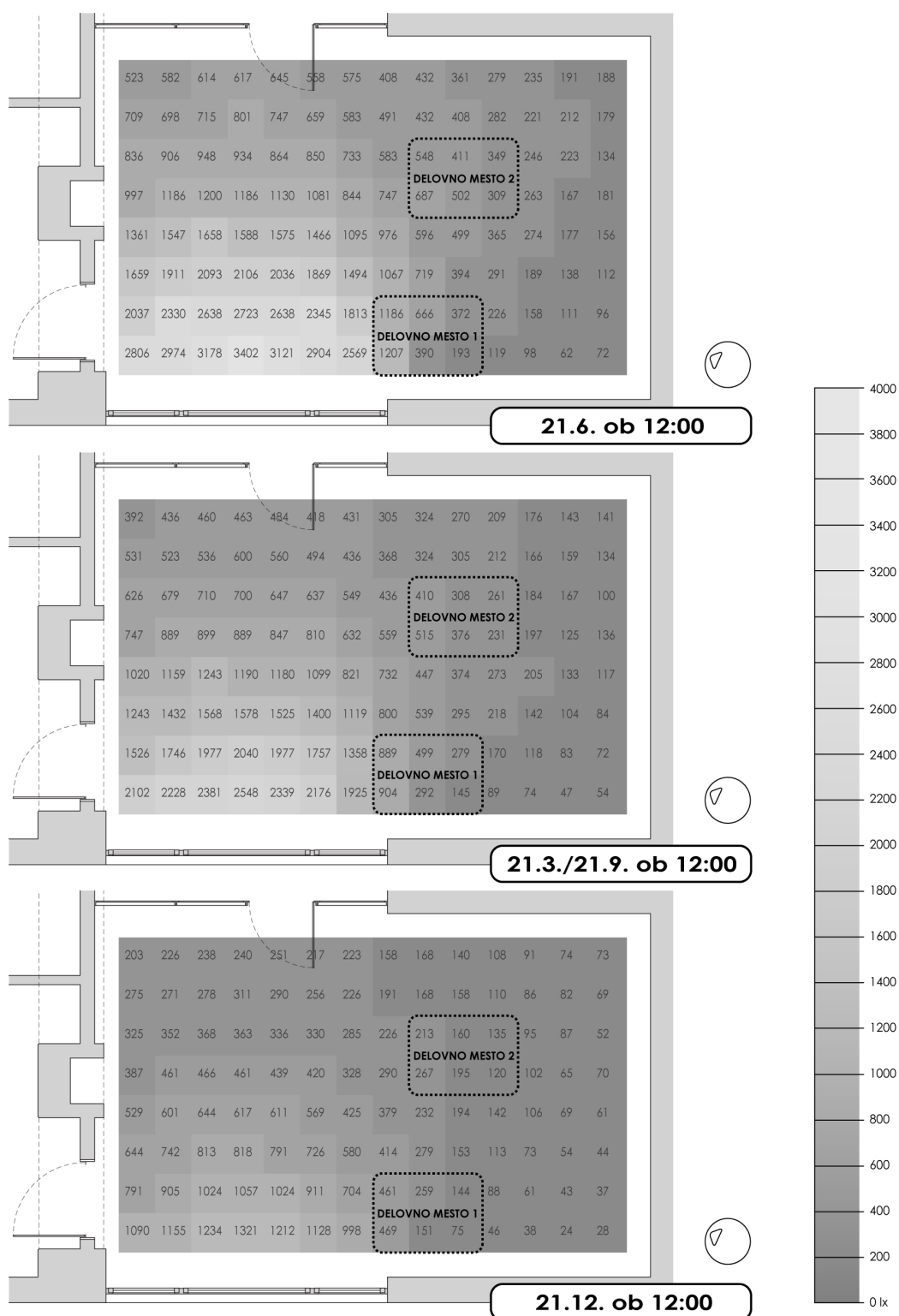
Fig. 3.4: Disposition of furniture in the cabinet KSKE III/1 with the two work areas marked.

za zagotovitev ugodnih delovnih pogojev predvsem primerno vizualno udobje ob hkratnem zagotavljanju toplotnega ugodja in kvalitetnega zraka. Da bi bolje spoznali danosti obravnavanega prostora, so bile pred začetkom testiranja sistema IRsNO izvršene preliminarne analize in simulacije obstoječega stanja glede na parametre notranjega ugodja. Dodatno so bila pregledana tudi priporočila različnih standardov [CR 1752 1998] [ISO 8995 1989], ki obravnavajo področje oblikovanja ugodnega notranjega bivalno-delovnega okolja.

3.1.3.1 Simulacija razpoložljive dnevne osvetlitve

Kot minimalen nivo osvetlitve delovne površine, kjer se delo opravlja dalj časa, standard ISO 8995 [ISO 8995 1989] priporoča 200 lx. Isti standard dodatno priporoča za računalniške sobe in splošne pisarniške prostore nivo osvetlitve v razponu od 300 lx do 750 lx, pri čemer je specifična vrednost osvetlitve odvisna predvsem od vizualne zahtevnosti opravljanega dela. Da bi preverili dejansko stanje osvetljenosti obeh delovnih mest v kabinetu KSKE III/1, je bil za ta namen uporabljen računalniški program za simulacijo dnevne osvetljenosti. Uporabljena je bila računalniška aplikacija SPOT™ v3.1 Sensor Placement+Optimization Tool, razvita pod okriljem Architectural Energy Corporation iz ZDA [SPOT v3.0 2006]. Poleg količine dnevne svetlobe v prostoru je bila preverjena tudi osončenost oziroma osenčenost zunanjskega transparentnega dela ovoja testnega prostora. S takšnim podatkom je mogoče oceniti, kdaj bo v prostoru teoretično na voljo več razpoložljive dnevne svetlobe ter kdaj se bo pojavljala potreba po senčenju zaradi neposrednega sončnega sevanja v prostor. Hkrati pa je čas, kdaj je odprtina osončena, pomemben tudi za oceno možnosti pasivnega zajema sončne energije skozi transparentne elemente ovoja stavbe. Izračun osončenja okna kabineta je bil izveden z računalniškim programom The Solar Tool v2.0, ki je bil razvit v podjetju Square One Research ter omogoča izračun osenčenja zunanje odprtine stavbe.

V simulaciji dnevne osvetlitve prostora kabineta KSKE III/1 je bila uporabljena poenostavljena geometrija prostora z notranjimi tlorisnimi dimenzijami 7.64 m x 4.93 m in svetlo etažno višino 3.88 m. Upoštevana višina delovne ravnine je bila privzeta standardna [ISO 8995 1989] višina 0.85 m. Uporabljena je bila simulacijska mreža s korakom 0.5 m, pri čemer se zaradi vplivov odbojev robnih površin ne upoštevajo rezultati, odmaknjeni manj kot



Slika 3.5: Simulacija osvetljenosti prostora v štirih kritičnih dneh v letu. Za izračun dnevne osvetljenosti je bil uporabljen program SPOT™ v3.1, ki je izračune izvršil ob uporabi CIE-standardnega oblačnega neba.

Fig. 3.5: Simulation of illumination of the room during four critical days of the year. Simulation was executed using SPOT™ v3.1 according to the CIE standard cloudy sky conditions.

0.5 m od katerekoli stene. Pri obravnavanju rezultatov je bilo predvideno, da specifično delovno mesto zavzema površino 1.50 m x 1.00 m oziroma 6 kvadratov simulacijske mreže. Kot merodajni so bili upoštevani rezultati za štiri kritične dneve v letu (21. 12. – zimski solsticij, 21. 6. – poletni solsticij, 21. 3. – spomladanski ekvinokcij in 21. 9. – jesenski ekvinokcij) ob poldnevu (12:00)

Preglednica 3.4: Izvleček rezultatov simulacije dnevne osvetljenosti obeh delovnih mest v prostoru kabineta KSKE III/1 pri CIE-standardnem oblačnem nebu.

Table 3.4: Extract of simulation results for the daily illumination of the two working spaces in the cabinet KSKE III/1 according to the CIE standard cloudy sky.

	E_{avg} (lx) 21.6. 12:00	E_{avg} (lx) 21.3./21.9. 12:00	E_{avg} (lx) 21.12. 12:00
DELOVNO MESTO 1			
	669	501	260
$E_{max}:E_{min}=$	6:1	6:1	6:1
DELOVNO MESTO 2			
	467	350	182
$E_{max}:E_{min}=$	2:1	2:1	2:1

Preglednica 3.5: Osončenost oziroma osenčenost okna v kabinetu KSKE III/1 v času zimskega solsticija.

Table 3.5: Insolation of the window in the cabinet KSKE III/1 in the time of winter solstice.

	Čas (h)	Azimut (°)	Elevacija (°)	Senčenje (%)
sončni vzhod=07:48 sončni zahod=16:13				
21.12.				
	08:00	127.2	1.7	100
	08:30	132.9	5.7	100
	09:00	138.8	9.3	100
	09:30	144.9	12.5	100
	10:00	151.4	15.2	0
	10:30	158.2	17.4	0
	11:00	165.3	19.1	0
	11:30	175.5	20.1	0
	12:00	179.8	20.4	0
	12:30	-175.9	20.1	0
	13:00	-165.6	19.1	0
	13:30	-158.6	17.5	0
	14:00	-151.8	15.4	0
	14:30	-145.3	12.6	0
	15:00	-139.1	9.4	0
	15:30	-133.1	5.8	0
	16:00	-127.5	1.9	0

Preglednica 3.6: Osončenost oziroma osenčenost okna v kabinetu KSKE III/1 v času spomladanskega in jesenskega ekvinokcija.

Table 3.6: Insolation of the window in the cabinet KSKE III/1 in the time of equinox.

Čas (h)	Azimut (°)	Elevacija (°)	Senčenje (%)
sončni vzhod=06:11 sončni zahod=18:08			
21.3./21.9			
06:30	93.8	3.3	100
07:00	99.2	8.4	100
07:30	104.9	13.5	100
08:00	110.7	18.5	100
08:30	116.9	23.2	100
09:00	123.6	27.7	100
09:30	130.8	31.9	100
10:00	138.7	35.6	100
10:30	147.2	38.7	100
11:00	156.4	41.2	0
11:30	166.3	42.8	0
12:00	176.5	43.6	0
12:30	-173.1	43.4	0
13:00	-163.0	42.4	0
13:30	-153.3	40.4	0
14:00	-144.3	37.7	0
14:30	-136.0	34.4	0
15:00	-128.4	30.5	0
15:30	-121.3	26.3	0
16:00	-114.8	21.7	0
16:30	-108.8	16.9	0
17:00	-103.0	11.9	0
17:30	-97.4	6.7	0
18:00	-92.0	1.6	0

ter ob uporabi CIE-standardnega oblačnega neba. Grafično predstavljeni rezultati na sliki 3.4 kažejo relativno neugodno pozicioniranje delovnih mest, če privzamemo kot zelen nivo osvetljenosti delovne površine 500 lx. Dodatno so rezultati za posamezno delovno mesto prikazani tudi v preglednici 3.4, v kateri so preglednicirane povprečne vrednosti osvetljenosti (E_{avg}) v obravnavanih kritičnih dneh ter razmerje med maksimalno (E_{max}) in minimalno (E_{min}) vrednostjo osvetljenosti z upoštevanjem velikosti delovnega mesta 1.50 m x 1.00 m. Tako pridobljeni rezultati kažejo s strani vizualnega udobja dokaj neugodna delovna mesta, saj pri delovnem mestu 2 v nobenem letnem času ni bila dosežena zelena meja 500 lx, pri prvem delovnem mestu pa je izrazit problem kontrast, saj znotraj definirane delovnega mesta dosega razmerje, večje od 6 : 1.

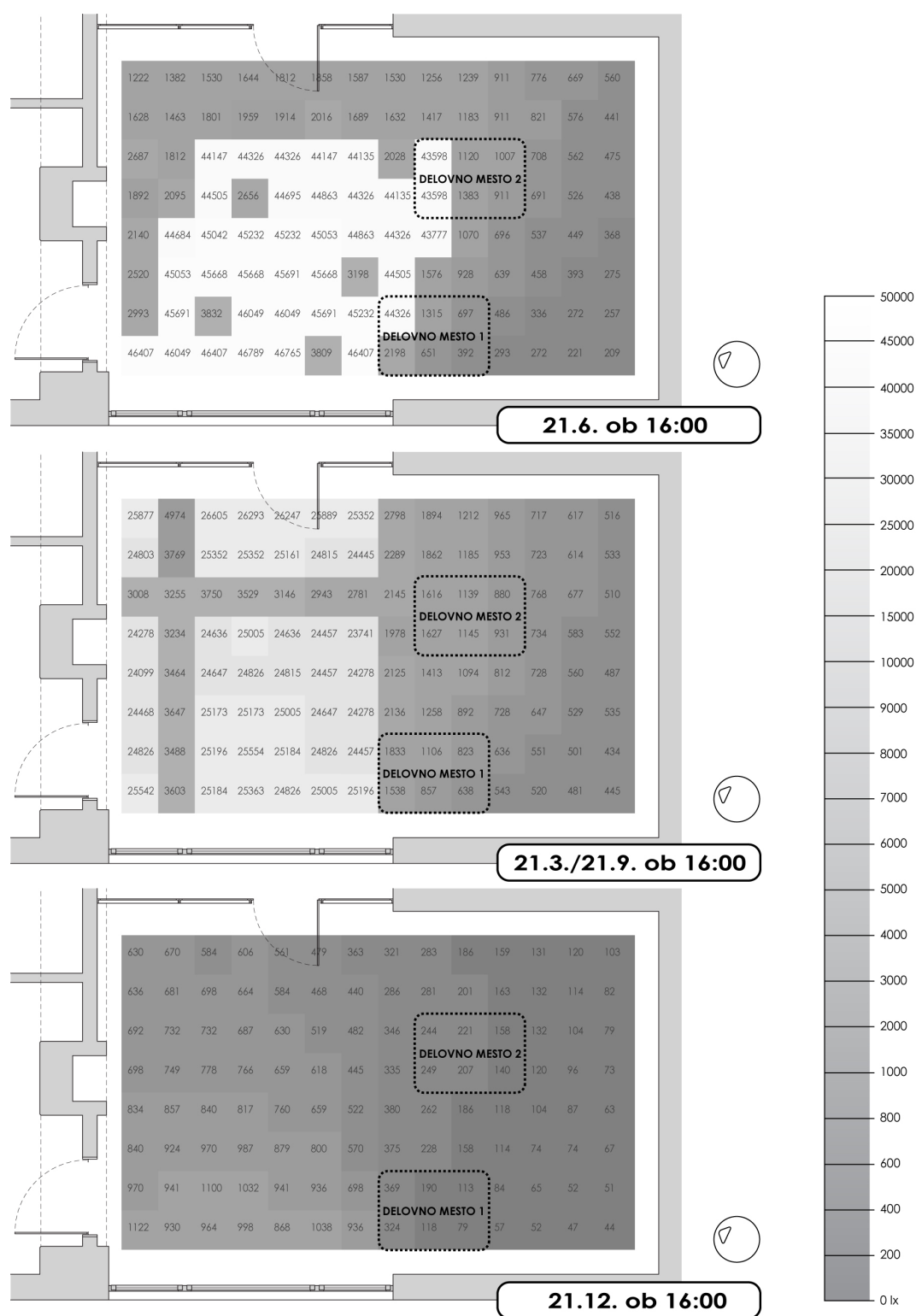
V sklopu simulacij dnevne osvetlitve prostora kabineta KSKE III/1 je bila preverjena tudi izpostavljenost okna neposrednemu sončnemu sevanju. Takšen podatek pomaga pri oceni

Preglednica 3.7: Osončenost oziroma osenčenost okna v kabinetu KSKE III/1 v času poletnega solsticija.

Table 3.7: Insolation of the window in the cabinet KSKE III/1 in the time of summer solstice.

Čas (h)	Azimut (°)	Elevacija (°)	Senčenje (%)
sončni vzhod=04:17 sončni zahod=19:51			
21.6.			
04:30	57.3	1.8	100
05:00	62.5	6.3	100
05:30	67.6	11.0	100
06:00	72.5	15.9	100
06:30	77.5	20.9	100
07:00	82.5	26.1	100
07:30	87.7	31.2	100
08:00	93.1	36.4	100
08:30	99.0	41.6	100
09:00	105.4	46.7	100
09:30	112.8	51.6	100
10:00	121.5	56.2	100
10:30	131.9	60.4	100
11:00	144.7	63.9	100
11:30	160.0	66.3	0
12:00	177.4	67.3	0
12:30	-165.0	66.8	0
13:00	-149.0	64.7	0
13:30	-135.4	61.5	0
14:00	-124.4	57.5	0
14:30	-115.2	53.0	0
15:00	-107.5	48.2	0
15:30	-100.8	43.1	0
16:00	-94.8	38.0	0
16:30	-89.2	32.8	0
17:00	-84.0	27.6	0
17:30	-79.0	22.4	0
18:00	-74.0	17.4	0
18:30	-69.0	12.5	0
19:00	-64.0	7.7	0
19:30	-58.8	3.1	0

možnosti zajema sončne energije ter pri razumevanju, kdaj bo v prostoru večja potreba po senčenju zunanjih odprtih ter s tem preprečevanju pretirane osvetljenosti delovnih mest in prevelikih kontrastov. Podobno kot pri simulaciji dnevne osvetljenosti prostora je bila osončenost zunanje odprtine preverjena za štiri kritične dni v letu (21.6, 21.12., 21.3. in 21.9.). Izračuni so bili izvedeni za lokacijo stavbe FGG na zemljepisni širini 46.05° ter zemljepisni dolžini 14.30° . Predvideno je bilo okno, dimenzij $3.87\text{ m} \times 3.88\text{ m}$ brez zunanjih ovir, saj zaradi višine objekta FGG okoliške zgradbe ne senčijo odprtine kabineta KSKE III/1, omeniti pa je potrebno, da rezultati za dvižne kote (elevacija) manjše kot 10° ne odražajo



Slika 3.6: Simulacija osvetljenosti prostora v štirih kritičnih dneh v letu. Za izračun dnevne osvetljenosti je bil uporabljen program SPOT™ v3.1, ki je izračune izvršil ob uporabi CIE-standardnega jasnega neba.

Fig. 3.6: Simulation of illumination of the room during four critical days of the year. Simulation was executed using SPOT™ v3.1 according to the CIE standard clear sky conditions.

Preglednica 3.8: Izvleček rezultatov simulacije dnevne osvetljenosti obeh delovnih mest v prostoru kabineta KSKE III/1 pri CIE-standardnem jasnem nebu.

Table 3.8: Extract of simulation results for the daily illumination of the two working spaces in the cabinet KSKE III/1 according to the CIE standard clear sky.

	E_{avg} (lx) 21.6. 16:00	E_{avg} (lx) 21.3./21.9. 16:00	E_{avg} (lx) 21.12. 16:00
DELOVNO MESTO 1			
	8263	1133	199
$E_{max}:E_{min} =$	113:1	3:1	2:1
DELOVNO MESTO 2			
	15270	1223	203
$E_{max}:E_{min} =$	48:1	2:1	2:1

realnega stanja, saj pri takšnih pogojih zemeljska topografija in okoliški objekti mečejo zelo dolge sence. Tako pridobljeni rezultati (Preglednice 3.5, 3.6 in 3.7) kažejo, da je okno kabineta v dopoldanskih urah skozi celotno leto v nasevni senci kar pomeni, da v tem času ni vpliva

neposrednega sončnega sevanja. Kot je bilo pričakovati zaradi zahodne orientacije prostora in neprisotnosti zunanjih ovir, je v popoldanskem času okno ves čas osončeno. Posledica takšne situacije je, da se v sončnem vremenu v tem času lahko pojavi pregrevanje prostora (poletni čas) oziroma da je takrat omogočen zajem sončnega sevanja (zimski in spomladansko-jesenski čas).

Na podlagi podatkov o osončenju zunanje odprtine sobe 1 kabineta KSKE III/1 so bile naknadno opravljene še simulacije dnevne osvetljenosti prostora z upoštevanjem neposredne sončne osvetlitve (CIE-standardno jasno nebo) s programom SPOT™. Ker je zunanja odprtina osončena skozi celotno leto le popoldne, je bila analiza izvedena za štiri kritične dni v letu (21. 12. – zimski solsticij, 21. 6. – poletni solsticij, 21. 3. – spomladanski ekvinokcij in 21. 9. – jesenski ekvinokcij) ob 16:00 (slika 3.6). Kot je bilo pričakovati so rezultati te analize pokazali na zelo velik problem bleščanja, saj razpon osvetljenosti prostora v poletnem času dosega tudi 45000 lx, kar je izrazito neugodno delovno okolje. Izvleček rezultatov za obe delovni mesti v preglednici 3.8 kaže, da se na definiranih delovnih mestih pojavljajo zelo visoke vrednosti osvetljenosti ter izjemno visoka kontrastna razmerja, ki dosežejo pri

delovnem mestu 1 v poletnem času celo razmerje 113 : 1, potreba po senčenju in reguliranju dnevne osvetlitve v takšnih primerih je več kot očitna.

Iz zgoraj navedenih simulacij osvetljenosti in osončenosti prostora kabineta KSKE III/1 je bilo mogoče sklepati na »obnašanje« notranjega delovno-bivalnega okolja pri kritičnih robnih pogojih. Za osvetljenost prostora pri standardnem CIE-oblačnem nebu se je izkazalo, da na splošno prostor v območju obeh delovnih mest ne zadosti kriterijem kvalitetne dnevne osvetlitve. Kot glavna problema se pojavljata prenizek nivo osvetljenosti pri delovnem mestu 2 in preveliko kontrastno razmerje na površini delovnega mesta 1, zato so za zadovoljitev kvalitetnega notranjega vizualnega ugodja nujni dodatni ukrepi, kot sta dodatna umetna osvetlitev ter senčenje odprtih za preprečevanje bleščanja ter s tem zmanjšanje kontrastnih razmerij. Analiza osončenosti zunanje odprtine kabineta je pokazala na časovno distribucijo neposrednega sončnega sevanja, ko je le-to na voljo. Kot je bilo mogoče sklepati iz orientacije objekta FGG, je v dopoldanskih urah kabinet KSKE III/1 v samosenci ter ni izpostavljen neposrednemu sončnemu sevanju. Na podlagi tega so simulacije notranje osvetlitve pri CIE-standardnem jasnem nebu dokazale kredibilnost sklepa, da bo v popoldanskih urah obstajala potreba po senčenju zunanjih odprtih ter s tem preprečevanju previsokih nivojev osvetljenosti notranjega okolja in pregrevanja zraka. Iz istih rezultatov lahko sklepamo tudi na časovno razporeditev solarnih pritokov, ki jih bo mogoče realizirati v dani situaciji v popoldanskih urah.

3.1.3.2 Operativna temperatura prostora

Operativna notranja temperatura zraka v prostoru predstavlja razpon vrednosti, sprejemljivih za uporabnike v določenem tolerančnem območju. Pri določanju notranje temperature zraka je potrebno posvetiti pozornost tudi temperaturam obodnih površin in hitrosti premikanja zraka, dodatno pa na toplotno udobje v prostoru vplivata tudi število uporabnikov in njihova aktivnost metabolizma. Ker imamo ljudje zelo močan mehanizem adaptacije na sezonske klimatske spremembe, je sprejemljiva temperatura zraka v zimskem in poletnem času različna, na splošno to pomeni, da je potrebno pri ogrevanju in ohlajevanju uporabljati različne nastavitvene vrednosti temperature zraka v bivalno-delovnem okolju.

Preglednica 3.9: Izvleček kriterijev za načrtovanje notranjih bivalnih pogojev predlaganih v standardu CR 1752 za samostojne (celične) pisarne. Definirane so tri kategorije z različnimi odstotki nezadovoljnih uporabnikov (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied) ob zasedenosti 0.1 oseb/m² in stopnji aktivnosti 1.2 met.

Table 3.9: Extract of design criteria for the internal living conditions according to the CR 1752 standard for single offices. The three categories are defined for the occupation of 0.1 person /m² and 1.2 met activity rate of users.

OPERATIVNA TEMPERATURA		POVPREČNA MAKSIMALNA HITROST PREMIKANJA ZRAKA	
Hlajenje (°C)	Ogrevanje (°C)	Hlajenje (m/s)	Ogrevanje (m/s)
PPD<6%			
KATEGORIJA A			
24.50 ± 1.00	22.00 ± 1.00	0.18	0.15
PPD<10%			
KATEGORIJA B			
24.50 ± 1.50	22.00 ± 2.00	0.22	0.18
PPD<15%			
KATEGORIJA C			
24.50 ± 2.50	22.00 ± 3.00	0.25	0.21

Pri definiranju splošnih začetnih vrednosti za notranje temperaturne pogoje v prostoru kabineta KSKE III/1 smo se pri snovanju sistema IRsNO opirali na vrednosti, predlagane v standardu CR 1752: Ventilation for buildings – Design criteria for the indoor environment [CR 1752 1998]. V dotičnem standardu so predlagane vrednosti za temperaturo zraka ter povprečno hitrost premikanja zraka, pri katerih se definirane skupine uporabnikov počutijo udobno. Preglednica 3.9 predstavlja izvleček predlaganih vrednosti za celične pisarne pri zasedenosti 0.1 oseb/m² in stopnji aktivnosti metabolizma 1.2 met, tri kategorije (A, B in C) definirajo skupine uporabnikov glede na odstotek nezadovoljnih uporabnikov (PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied) pri definiranih pogojih operativne temperature zraka. Predlagane vrednosti predstavljajo realna izhodišča za aplikacijo pri testiranju sistema regulacije notranjega okolja v okviru danih pogojev in značilnosti prostora kabineta KSKE.

3.2 Namen IRsNO

IRsNO oziroma integralen regulacijski sistem notranjega okolja je sistem celovitega uravnavanja kvalitativnih in kvantitativnih parametrov bivalno-delovnega okolja stavb. Notranje okolje v stavbah predstavlja prostor kompleksnih interakcij zunanjih vremensko

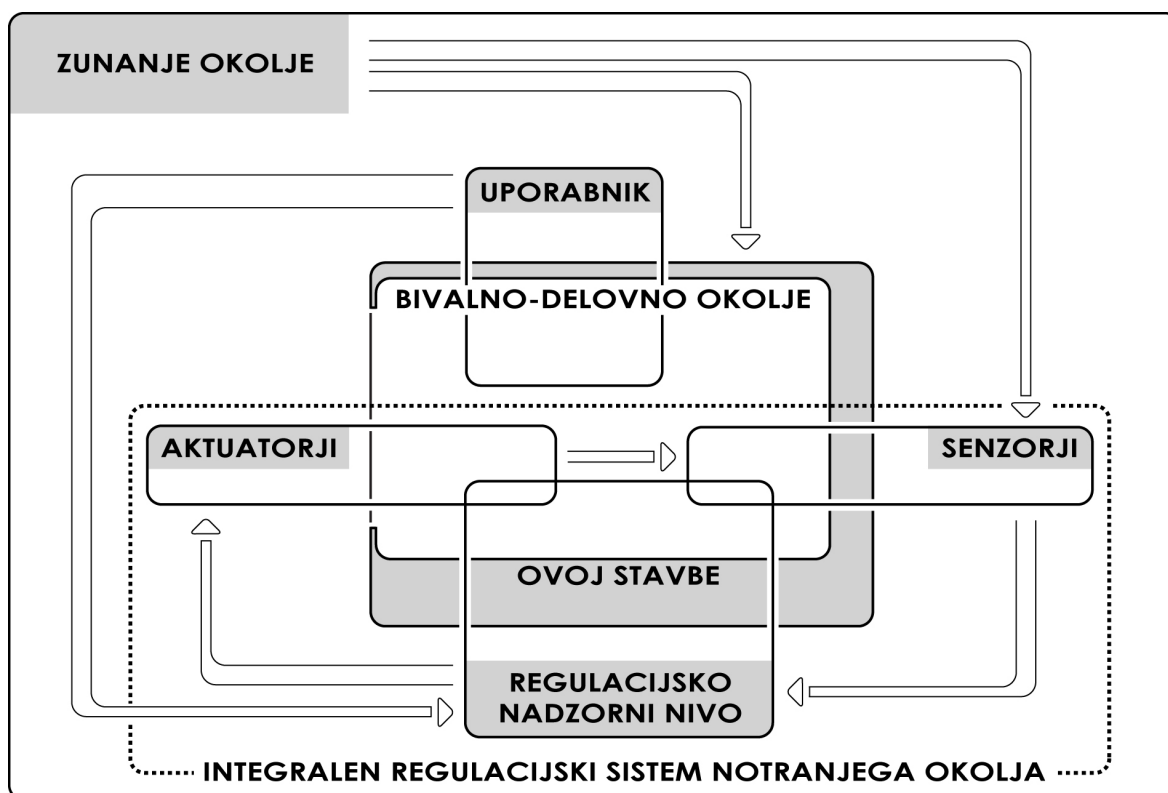
klimatskih pogojev in notranjih bivalnih zahtev, za katerega so značilni izredno dinamični in časovno spremenljivi nelinearni odnosi med vplivnimi faktorji. Pri takšnem procesu je zato težko določiti in oblikovati matematični model, nujen pri vzpostavitvi klasične regulacije [Trobec-Lah 2003]. Zaradi težavnosti oblikovanja regulacijskega sistema notranjega okolja s pomočjo klasične regulacijske tehnike (PID) je bil sistem oblikovan na osnovi teorije mehkih množic, ki omogoča opisovanje kompleksnih sistemov z enostavnimi ČE – POTEM pravili. S takšnim pristopom je mogoče v regulacijski sistem vgraditi človeške izkušnje in človeški način obravnavanja regulacijskih problemov s pomočjo opisnih pojmov (veliko, manjše, več ...). Največja slabost uporabe mehkih regulatorjev je prav potreba po zelo obsežnem ekspertnem znanju o obravnavanem oziroma reguliranem procesu, saj brez tega ni mogoče izoblikovati primernih regulacijskih pravil ter s tem kvalitetne regulacije.

Aplikacija IRsNO v okviru realnega delovnega okolja kabineta KSKE III/1 omogoča oblikovanje primernih regulacijskih pravil sistema kot posledice neposrednega vpliva dejanskih zunanjih vplivov in želja uporabnikov. Eksperimentalen pristop k oblikovanju regulacijskih nastavitvev mehkega regulatorja omogoča definiranje sistema kot neposreden odziv na trenutne zahteve in danosti brez predhodnih simulacij, čeprav bi bile le-te dobrodošla pomoč pri hitrejšem oblikovanju nastavitvenih pravil. Kot glavna opora pri zasnovi, oblikovanju in nastavitvah regulatorjev IRsNO je bila uporaba že pridobljenega znanja in izkušenj s področja regulacije optično-termičnih procesov v testni celici KAMRA [Furlan 1999] [Trobec-Lah 2003]. Namen izoblikovanja IRsNO je vzpostaviti sistem, s katerim bo v realnem okolju in realnem času mogoče doseči sledeče cilje:

- definirati nabor pravil mehkih regulatorjev za uravnavanje svetlobnega ugodja (osvetljenost z dnevno svetlobo, umetna osvetlitev), toplotnega udobja (ogrevanje, hlajenje) in kvalitete zraka (koncentracija CO₂);
 - vzpostaviti sočasne (harmonizirane) regulacije optičnih in termičnih vplivov sončnega sevanja z upoštevanjem kriterijev psihofizičnega počutja uporabnikov;
 - izvajati eksperimente, s katerimi je mogoče preveriti delovanje in razvijati nove nastavitve regulatorjev;
 - preveriti možnosti ter predstaviti priložnosti za prihranek energije z uporabo avtomatske regulacije toplotnih in optičnih procesov v bivalnem okolju.
-

3.3 Struktura IRsNO

V kontekstu sistema »okolje, stavba, človek« predstavlja regulacija notranjih parametrov bivalno-delovnih pogojev način, s katerim je mogoče vplivati na interakcije med različnimi deli sistema oblikovanja notranjega okolja. Kot postopek vzdrževanja primernih notranjih bivalnih pogojev je regulacija le-teh znana že od začetka pojava objektov, v katerih se je zadrževal oziroma bival človek. Stavbe in prostore v njih je bilo potrebno vedno in v vseh klimatskih pogojih primerno prilagajati zunanjim danostim, ki so narekovale potreben odziv sistema za zadovoljitev želja uporabnikov glede notranjih bivalnih pogojev. Ukrepi za zadovoljitev notranjih bivalnih razmer so bili do razvoja avtomatskih regulacijskih tehnik osnovani predvsem na nivoju primerne izbora strukture ovoja stavbe ter spreminjanju notranjih pogojev s pomočjo ročnega upravljanja elementov in naprav s strani uporabnikov. Ker pa ročna regulacija zaradi človekove sposobnosti adaptacije trenutnim razmeram ne zagotavlja fleksibilnosti in natančnosti, pričakovane v sodobnih bivalnih prostorih, je



Slika 3.7: Shema strukture IRsNO s prikazanimi interakcijskimi povezavami vplivov med zunanjim okoljem, uporabnikom, notranjim okoljem ter regulacijskim sistemom.
Fig. 3.7: Structure of IRsNO with paths of interaction between external environment, users, internal environment and regulation system shown.

potrebno v sistem notranjega okolja vpeljati elemente, ki bodo uspeli pri zadovoljivi avtomatizaciji regulirati bivalne razmere glede na uporabnikove želje in zunanje klimatsko-vremenske danosti. Osnovna struktura takšnega sistema z glavnimi potmi pretoka informacij in energije je prikazana na sliki 3.6.

Strukturno gledano, je regulacijski sistem IRsNO mogoče ločiti na tri osnovne dele, ki s skupnim delovanjem in sodelovanjem zagotavljajo notranje bivalne razmere pod vplivom zunanjega okolja in želja uporabnikov. Te elemente predstavljajo naprave za zajem informacij o trenutnem stanju spremljanih količin (temperature zraka, osvetljenost delovnih površin, relativna vlažnost ...), regulacijski sistem (regulatorji in nadzorna oprema) ter izvršni členi oziroma aktuatorji (senčila, grelna telesa, luči ...), ki izvršujejo ukaze regulatorjev ter s tem uravnavajo notranje bivalno-delovne razmere (Slika 3.7). Sistemu je z uporabo senzorjev omogočeno spremljanje dejanskih pogojev v notranjem in zunanjem okolju, ki jih regulator uporablja za primerjavo z referenčnimi vrednostmi reguliranih veličin. Pri odstopanjih dejanskih vrednosti od referenčnih regulacijskih vrednosti sistem s pomočjo izvršnih členov vpliva na notranje okolje ter s tem spreminja razmere v njem tako, da privede dejanske vrednosti v sprejemljivo območje odstopanj od zelenih vrednosti.

Senzorska mreža sistema IRsNO nadzira sledeče količine notranjih razmer bivalno-delovnega okolja in stanja aktuatorjev:

- notranje temperature zraka (Tai),
 - notranje osvetljenosti na dveh delovnih mestih (Ili1, Ili2),
 - notranje relativne vlažnosti zraka (RHi),
 - porabe energije za ogrevanje in hlajenje,
 - koncentracije CO₂ (CO2),
 - pozicije posameznih žaluzij (6x),
 - odprtosti okna,
 - aktiviranosti umetne osvetlitve,
 - delovanja grelno-hladilnih elementov (Cg – ogrevanje, Ch – hlajenje).
-

Senzorska mreža sistema IRsNO nadzira sledeče količine zunanjih vremenskih razmer:

- zunanje temperature zraka (T_{ao}),
- zunanje osvetljenosti (I_{lo}),
- zunanje relativne vlažnosti zraka (RH_{o}),
- globalnega sončnega obsevanja – direktna komponenta (I_{rgo}),
- globalnega sončnega obsevanja – difuzna komponenta (I_{rdo}),
- smeri vetra (W_d),
- jakosti vetra (W_p).

Nadzorno regulacijski nivo IRsNO sestavljajo sledeči elementi:

- programirljiv logični krmilnik (PLC) proizvajalca Mitsubishi tipa MELSEC A2SHCPU(S1) s spremljajočim koprocesorjem, napajalno enoto in komunikacijskim modulom,
- operaterski pult MAC/MTA E200 za neposredno komunikacijo s PLC-jem,
- osebni računalnik s programskimi orodji za nadzor in načrtovanje regulacijskih shem ter z aplikacijo za nadzor sistema IRsNO, ki je bila razvita v programskem okolju SCADA.

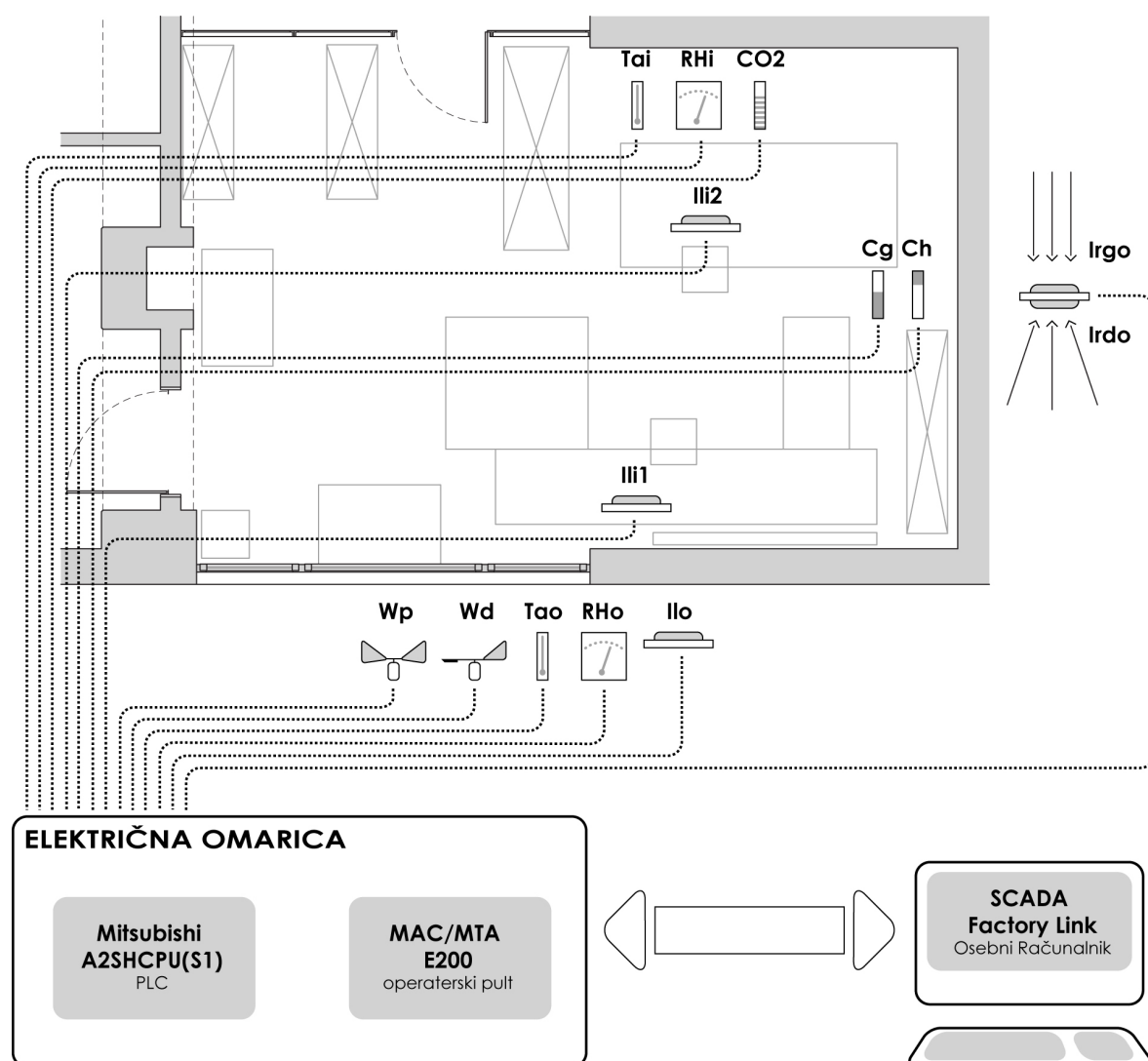
Sistem IRsNO sestavljajo sledeči izvršni členi:

- zunanje žaluzije tipa »KRPAN 80« (6x),
- stropni radiacijski hladilno-grelni paneli (6x),
- stropne viseče fluorescentne sijalke (6x),
- okno z mehanizmom za avtomatsko zapiranje in odpiranje.

3.4 Merilno-regulacijska oprema IRsNO

Merilno-regulacijska oprema (MRO) sistema IRsNO je sestavljena iz elementov regulacije, senzorske mreže in izvršnih členov. S pomočjo senzorske mreže se zajemajo podatki o stanju

merjenih vrednostih notranjega in zunanjega okolja, na podlagi meritev se regulacijski sistem odloča za izvajanje določenih ukrepov s pomočjo aktuatorjev, ki vplivajo na karakteristike prostora in notranjega okolja ter s tem poskušajo vzdrževati notranje vrednosti v okviru želenih. Naslednja poglavja bodo predstavila sestavne dele in njihove osnovne značilnosti vsake od treh posameznih skupin, ki tvorijo regulacijski sistem notranjega okolja v kabinetu KSKE III/1.



Slika 3.8: Senzorska mreža sistema vodenja IRsNO.
Fig. 3.8: IRsNO sensor array.

3.4.1 Merilna oprema

Merilna oprema sistema za integralno regulacijo notranjega okolja v kabinetu KSKE III/1 je sestavljena iz dveh glavnih skupin merilnih inštrumentov, ki so razvrščeni glede na okolje, katerih parametre spremljajo. Tako lahko delimo vso merilno opremo v skupino senzorjev, ki spremljajo pogoje zunanjega okolja, ter na senzorje za spremljanje pogojev v notranjem bivalno-delovnem okolju. Slika 3.8 prikazuje shemo senzorske mreže sistema IRsNO.

3.4.1.1 Notranji pogoji

Spremljanje parametrov notranjega okolja kabineta KSKE III/1 se v okviru regulacijskega sistema IRsNO izvaja z merilnimi senzorji, ki sistemu omogočajo odzivanje na notranje spremembe glede na zunanje pogoje ter želje uporabnikov. Nabor senzorjev spremlja notranjo temperaturo in relativno vlažnost zraka, osvetljenost delovnih mest ter koncentracijo ogljikovega dioksida. Dodatno so nameščeni tudi senzorji za spremljanje temperature ogrevalnega oziroma hladilnega medija v nizkotemperaturnem radiacijskem ogrevalno hladilnem sistemu. Merilna oprema, uporabljena za merjenje zgoraj naštetih količin, je sledeča:

- **senzor proizvajalca E+E tipa EE80-2CTF3**, ki omogoča kombinirano merjenje notranje temperature, relativne vlažnosti zraka in koncentracije CO₂. Meritve koncentracije ogljikovega dioksida v zraku so omogočene v razponu od 0 do 2000 ppm z napako ± 50 ppm + 2 % izmerjene vrednosti z odzivnim časom, manjšim od 90 s. Relativna vlažnost je merjena v razponu od 0 do 100 % z natančnostjo meritev ± 3 % v razponu od 30 do 70 % RH ter natančnostjo ± 5 %, v razponu od 10 do 90 % RH. Natančnost temperaturnih meritev je ± 0.3 °C, razpon omogočenih meritev pa je med 0 in 50 °C;
- **senzor za notranjo osvetljenost tipa LI06 LRA proizvajalca Thermokon**, ki omogoča spremljanje nivoja notranje osvetljenosti delovnega mesta do maksimalne vrednosti 100000 lx s ± 5 % natančnostjo;

- **kalorimetra za merjenje porabe ogrevalnega in hladilnega medija**, ki nista vgrajena ter bosta nameščena v naslednji fazi izvajanja eksperimentov v času posodobitve ogrevalno-hladilnega radiacijskega sistema.

3.4.1.2 Zunanji pogoji

Merjene in spremljane količine zunanjih vremenskih in klimatskih pogojev omogočajo sistemu integralne regulacije notranjega delovno-bivalnega okolja, primerno odzivanje na zunanje spremembe ter s tem kvalitetno in uporabnikovim zahtevam prilagojeno reguliranje notranjega okolja. Sistem IRsNO spremlja zunanje globalno in difuzno sončno sevanje, zunanjo temperaturo zraka, vlažnost zraka, zunanjo osvetljenost ter smer in jakost vetra. Merilna oprema, uporabljena za merjenje zgoraj naštetih količin, je sledeča:

- **piranometer in albedometer CM7B proizvajalca Kipp & Zonen**, ki spremljata zunanjo globalno in difuzno sončno sevanje v spektralnem obsegu od 305 do 2800 nm z odzivnim časom, manjšim od 18 s. Gostota energijskega toka je izražena v W/m^2 , razpon merjenja pa je od 0 do $1400 W/m^2$. Natančnost meritev je odvisna od različnih vplivnih faktorjev, tako da ni mogoče definirati dejanske natančnosti meritev, saj le-ta variira s spremembo temperature, osončenosti in vpadnega kota sevanja. Po klasifikaciji World Meteorological Organization spada piranometer in albedometer tipa CM7B v »prvi razred« natančnosti;
 - **senzor proizvajalca E+E tipa EE21-FT3A25/T02**, ki omogoča kombinirano merjenje zunanje temperature in relativne vlažnosti zraka. Senzor omogoča merjenje relativne vlažnosti zraka v razponu od 0 do 100 % z natančnostjo meritve $\pm 2 \%$, v merilnem obsegu od 0 do 90 % ter $\pm 3 \%$ natančnostjo v obsegu meritev od 90 do 100 % relativne vlažnosti. Temperaturni obseg je merljiv v razponu od -40 do $+60$ °C z natančnostjo od ± 0.7 °C pri -40 °C do ± 0.2 °C pri $+20$ °C;
 - **senzor za zunanjo osvetljenost tipa LI65 LRA proizvajalca Thermokon**, ki omogoča spremljanje nivoja zunanje osvetljenosti do maksimalne vrednosti 100000 lx s $\pm 5 \%$ natančnostjo;
 - **senzor hitrosti vetra tipa FV615-2 proizvajalca Ahlborn**, ki omogoča merjenje jakosti vetra v horizontalni smeri v razponu od 0.5 do 50 m/s s $\pm 3 \%$ natančnostjo.
-

Senzor je pozicioniran na zunanji strani zahodnega zidu kabineta KSKE III/1 tik ob zasteklitvi;

- **senzor smeri vetra tipa FVA614 proizvajalca Ahlborn**, ki je namenjen zaznavanju in določanju smeri vetra v horizontalni ravnini s $\pm 5^\circ$ natančnostjo. Senzor je nameščen ob senzorju za hitrost vetra FV615-2 na zahodni zunanji strani stavbnega ovoja kabineta KSKE III/1.

3.4.2 Oprema vodenja

Oprema vodenja sistema IRsNO obsega dva sklopa, kjer prvi sklop opravlja procesne naloge vodenja sistema, drugi pa nadzoruje delovanje regulatorjev in omogoča ogled stanja sistema ter poseg v njegovo delovanje. Oba sklopa predstavljata jedro regulacijskega sistema, kjer se vršijo vse odločitve glede delovanja oziroma ukazov izvršnim členom ter komunikacija med napravami in človekom (human machine interface). Opremo vodenja sestavljajo sledeči elementi:

- **programirljiv logični krmilnik proizvajalca Mitsubishi tipa MELSEC A2SHCPU(S1)**, ki izvršuje izvajanje regulacije celotnega sistema IRsNO po predhodno določeni shemi in pravilih regulacije, definiranih v programskem okolju IDR BLOK. Programirljiv logični krmilnik je sestavljen iz procesne enote s

Preglednica 3.10: Oznake in karakteristike vgrajenih modulov PCL-ja sistema IRsNO.
Table 3.10: Characteristics of used modules in the PLC of the IRsNO.

KOMPONENTA	OZNAKA	OPIS
Procesna enota	A2SHCPU(S1)	Procesna enota s 192 kB vgrajenega spomina (RAM) in 1024 vhodno-izhodnimi točkami.
Komunikacijski modul	A1SJ7UC24-R4	Modul, ki skrbi za komunikacijo med vgrajenimi elementi PLC-ja.
Digitalni vhodi	A1SX80	Komponenta s 16-timi digitalnimi vhodnimi točkami.
Analogni vhodi	A1S68AD	Komponenta z 12-timi analognimi vhodi.
Digitalni izhodi	A1SY10EU	Komponenta s 16-timi digitalnimi izhodi.
Napajalnik	A1S62PN	Napajalnik, ki pretvarja 100 – 240 V dvosmerne napetosti v enosmerno napetost s 5 V, 3 A ali 24 V, 0.6 A.
Ohišje 8 I/O	A1S38B	Ohišje z možnostjo vgradnje maksimalno 8-ih modulov.

koprocetorjem s 192 kB polnilnika, napajalnika, komunikacijskega modula, vhodno-izhodnih modulov ter ohišja. Preglednica 3.10 prikazuje oznake in karakteristike vseh elementov PLC-ja. Priključeni vhodni in izhodni moduli omogočajo 16 digitalnih in 12 analognih vhodov ter 16 digitalnih izhodov. PLC komunicira z operaterskim pultom, ki je vgrajen v vrata električne omarice preko komunikacijskega kanala RS422, ki poteka skozi komunikacijski vmesnik RS422. Povezava z osebnim računalnikom je kot pri operaterskem pultu vzpostavljena preko komunikacijskega vmesnika RS422, vendar skozi kanal RS232. Elementi PLC-ja so prikazani na sliki 3.9;

- **operaterski pult MAC/MTA E200**, ki je vgrajen v vrata električne omarice, v kateri je nameščen PLC. Operaterski pult omogoča neposredno komunikacijo s PLC-jem preko RS422 komunikacijskega kanala ter povezavo krmilnika z osebnim računalnikom skozi komunikacijski kanal RS232. Pult je sestavljen iz štirivrstičnega



Slika 3.9: Vgrajeni moduli PLC-ja; 1. napajalnik, 2. procesna enota, 3. komunikacijski modul, 4. digitalni vhodi, 5. digitalni izhodi, 6. analogni vhodi.

Fig. 3.9: Modules of PLC: 1. power supply, 2. processing unit, 3. communication module, 4. digital inputs, 5. digital outputs, 6. analog inputs.

črno-belega grafičnega LCD-prikazovalnika, 5 funkcijskih in 20 namenskih tipk ter elektronike in opozorilnih LED-diod, videz operatorskega pulta je prikazan na sliki 3.10. Preko operatorskega pulta je mogoče spremljati trenutno stanje sistema, nastavitve regulatorjev, opozorila ter spreminjati in nastavljati nastavitve regulatorjev;

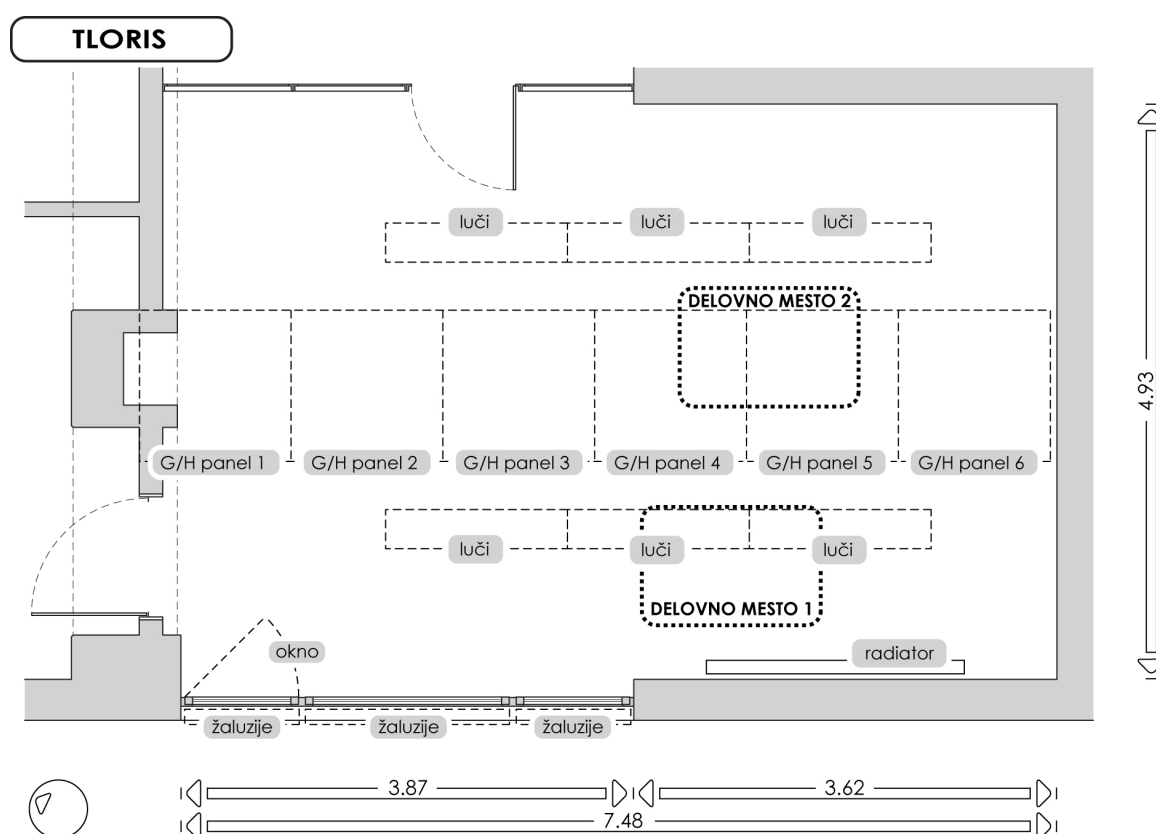
- **osebni računalnik s programskimi orodji za nadzor in načrtovanje regulacijskih shem ter z aplikacijo za nadzor sistema IRsNO**, ki je nameščen v sobi 2 kabineta KSKE III/1 ter je s PLC-jem povezan preko komunikacijskega vmesnika RS422 s kanalom RS232. Na računalniku se izvaja nadzorni sistem IRsNO, ki je bil razvit s programskimi orodjem SCADA Factory Link proizvajalca US Data in se izvaja v operacijskem okolju Windows XP. Poleg predhodno omenjene programske opreme sistem IRsNO omogoča shranjevanje procesnih vrednosti in meritev sistema preko podatkovne baze SQL Server 2005.



Slika 3.10: Pogled na operatorski pult MAC/MTA E200.
Fig. 3.10: Operational platform MAC/MTA E200.

3.4.3 Izvršni členi

Izvršni členi sistema IRsNO omogočajo reguliranje treh različnih aspektov notranjega bivalno-delovnega okolja, in sicer uravnavanje vizualnega udobja, toplotnega ugodja ter kvalitete zraka. Na vsakega od naštetih aspektov notranjega okolja je mogoče vplivati z določenim aktuatorjem ali kombinacijo vplivov več aktuatorjev sistema IRsNO, pri čemer ima vedno prednost reguliranje notranjega okolja z ukrepi na nivoju stavbnega ovoja. Vse



Slika 3.11: Dispozicija aktuatorjev sistema IRsNO v kabinetu KSKE III/1. Vsi grelnohladilni paneli (G/H panel) so na spodnji strani obloženi z 1.25 cm debelo mavčno kartonsko ploščo, razen G/H panel 2, ki je obložen z masivno kamnito ploščo debeline 2 cm ter G/H panel 3, ki je obložen z 1.5 cm ALU-kamnito kompozitno ploščo (3 mm kamna + 12 mm aluminijasto satovje).

Fig. 3.11: Disposition of IRsNO actuators in the cabinet KSKE III/1. Heating-cooling panels (G/H panels) are on the underside finished in gypsum boards except G/H panel number 2, which is finished in 3 cm thick massive stone slab and G/H panel number 3, which is finished in 1.5 cm thick aluminum-stone composite plate (3 mm of stone + 12 mm aluminum honeycomb).

izvršne člene sistema regulacije notranjega okolja IRsNO je tako mogoče deliti v tri skupine (Slika 3.11):

- **aktuatorji za regulacijo vizualnega udobja:** v prvi vrsti sistem IRsNO uravnava notranji nivo vizualnega odboja oziroma osvetljenosti delovne površine z ukrepi na nivoju reguliranja penetracije razpoložljive zunanje dnevne svetlobe s pomočjo motoriziranih zunanjih žaluzij. Kot sekundaren in s tem pomožen ukrep za dosego želenega nivoja osvetljenosti pa sistem upravlja s prižiganjem in ugašanjem umetne razsvetljave;
- **aktuatorji za regulacijo toplotnega ugodja:** podobno kot pri regulaciji nivoja osvetljenosti notranjega bivalno-delovnega okolja se tudi pri uravnavanju toplotnih aspektov notranjega ugodja uporabnikov sistem IRsNO zanaša primarno na ukrepe na nivoju stavbnega ovoja, ko so možnosti le-teh izčrpane, pa se dodatno vključijo sistemi za ogrevanje ali hlajenje notranjega okolja. Notranje temperaturno ugodje je tako mogoče regulirati s pomočjo žaluzij, s katerimi se lahko uravnava neposredne solarne pritoke, ter tudi s pomočjo pasivnega hlajenja z odpiranjem okna. Dodatno uravnavanje notranjega toplotnega ugodja je mogoče doseči tudi z ogrevanjem ali ohlajevanjem s pomočjo grelno-hladilnih nizkotemperaturnih stropnih radiacijskih panelov in tudi z vključitvijo klasičnega radiatorskega ogrevanja (po potrebi ga ročno vključi uporabnik);
- **aktuatorji za regulacijo kvalitete notranjega zraka:** kvalitetna izmenjava notranjega zraka v okviru sistema IRsNO je zagotovljena s pomočjo naravnega prezračevanja s pomočjo avtomatskega zapiranja in odpiranja dela zasteklitev v sistemu transparentnega dela stavbnega ovoja.

3.4.3.1 Senčila

Senčenje transparentnega dela stavbnega ovoja prostora kabineta KSKE III/1 je zagotovljeno z zunanje nameščenimi motoriziranimi venecijskimi žaluzijami tipa »KRPAN 80«. Žaluzije so sestavljene iz horizontalnih lamel, širine 80 mm, ki so izdelane iz eloksiranega aluminija v svetlo sivem barvnem tonu ter vodene z bočnimi aluminijastimi vodili (Slika 3.12). Žaluzije so motorizirane z elektromotorjem proizvajalca Somfy tip Orienta M/MU, ki omogoča



Slika 3.12: Detajl lamel in bočnega vodila venecianskih žaluzij tipa »KRPAN«.
Fig. 3.12: Detail of side rail of Venetian blinds, type »KRPAN«.

dviganje in spuščanje senčila ter ob dosegu končne pozicije tudi rotacijo lamel, neodvisna kontrola rotacije in pozicije lamel žaluzij ni mogoča. Zaradi te omejitve se žaluzije spuščajo (odpirajo) vedno popolnoma zaprte ter dvigajo (zapirajo) vedno popolnoma odprte. Šele ko je dosežena zelena pozicija žaluzij (v principu popolnoma spuščena), je možna regulacija naklona lamel, ki se upravlja z istim motorjem kot premik žaluzij. Opisani način upravljanja senčila predstavlja določeno slabost z vidika avtomatske regulacije, saj način dviganja in spuščanja predstavljata prehodna vmesna pojava, ki ne odražata končnega stanja izvršnega člena ter lahko predvsem pri uravnavanju notranjega nivoja osvetlitve predstavljata težavo za regulacijski sistem. Dodatno je zaradi takšnega načina vodenja žaluzij zelo težko določiti pozicijo senčila v vmesnem stanju (npr.: polovično zasenčeno okno), saj spreminjanje naklona lamel malo spremeni tudi dejansko pozicijo senčila.

Žaluzije so vgrajene na vsakem od šestih oken, ki sestavljajo transparentni del ovoja kabineta KSKE III/1 (Sliki 3.1 in 3.2), s čimer je omogočena največja možna fleksibilnost pri regulaciji notranjih toplotnih in svetlobnih pogojev. Takšna konfiguracija omogoča

individualno upravljanje senčenja vsakega okna posebej ter s tem veliko fleksibilnost avtomatskega regulacijskega sistema.

4.4.3.2 Umetna osvetlitev

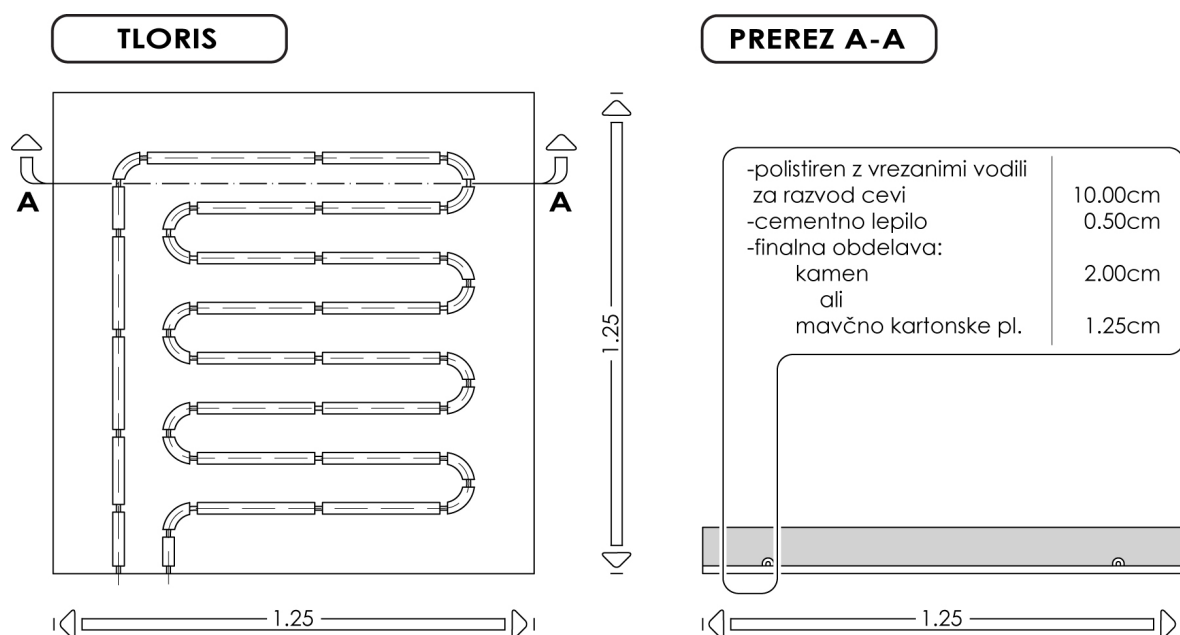
Prostor kabineta KSKE III/1 je opremljen s šestimi stropnimi visečimi fluorescentnimi sijalkami, ki zagotavljajo umetno osvetlitev, če z dnevno svetlobo ni mogoče doseči zadovoljivih kvantitativnih in kvalitativnih kriterijev notranje osvetlitve. Svetila so razporejena v dve vrsti s tremi svetili (Slika 3.11), pri čemer ima vsako svetilo vgrajeni dve fluorescentni sijalki tipa F33 z močjo 36 W. Svetila so nameščena 2.26 m nad delovno ravnino oziroma 3.16 m nad tlemi, kar pomeni, da so spuščene 72 cm pod nivojem stropa. Prižiganje in ugašanje vseh luči se izvaja z dvopoložajnim ON-OFF-stikalom.

4.4.3.3 Ogrevalni in hladilni elementi

Dovajanje dodatne toplotne energije v prostor kabineta KSKE III/1 je zagotovljeno z dvema različnima sistemoma ogrevalnih elementov. Prvi sistem je klasično radiatorsko ogrevanje, drugi pa nizkotemperturni radiacijski ogrevalni sistem, ki poleg ogrevanja v poletnih mesecih omogoča tudi hidronično hlajenje. V prostoru je nameščen 1 radiator dimenzij 220 x 58 cm s termostatskim ventilom ter 6 stropnih radiacijskih nizkotemperturnih grelno-hladilnih panelov dimenzij 125 x 125 cm (Slika 3.11). Pri reguliranju notranjega toplotnega ugodja sistem IRsNO vedno preferira uporabo radiacijskih stropnih panelov, le v primerih, ko zaradi zelo nizkih zunanjih temperatur paneli niso sposobni zadostiti zahtevanim notranjim tempereturnim pogojem, se ročno vključi tudi klasično radiatorsko ogrevanje.

Stropno radiacijsko hlajenje ter tudi ogrevanje sta se izkazala kot zelo primerna rešitev za vključitev nizkotemperturnega ogrevanja in hlajenja v objekte, kjer ni možnosti za vgraditev talnega ali zidnega ogrevanja. Prednost radiacijskega ogrevanja pred v Evropi zelo razširjenim radiatorskim (konvekcijskim) ogrevanjem prostorov je predvsem v nižji temperaturi ogrevalnega medija ter v možnosti vzpostavitve toplih obodnih površin, ki posledično omogočajo znižanje notranje temperature zraka [Asada, Boelman 2004] [Paić 2002], kar neposredno vpliva na toplotne izgube objekta. Tako se v prostoru pri znižanju

temperature zraka za 2 K zmanjšajo potrebe po ogrevalni energiji za kar 14 % [Paić 2002]. Dodatno takšen sistem vzpostavi v prostoru stanje »toplih nog in hladne glave«, kar je prav obratno od radiatorskega ali toplozračnega ogrevanja, kjer velja ravno obratno, torej, da je zrak uporabnikov v območju glave toplejši kot v območju nog [Imanari et al. 1999] [Paić 2002]. Kljub dobrim lastnostim ima takšen način ogrevanja in hlajenja tudi določene omejitve oziroma slabosti. Predvsem pri ogrevanju lahko takšen sistem pri uporabi materialov z veliko toplotno kapaciteto izraža zelo veliko toplotno inercijo ter se zato ni sposoben hitro odzivati na skokovite zunanje temperaturne spremembe. Dodatno lahko takšen sistem stropnih radiacijskih panelov povzroči relativno veliko vertikalno temperaturno asimetrijo, ki lahko prestopi splošno sprejeto zgornjo sprejemljivo mejo razlike 10 K ter tako postane vzrok nezadovoljstva med uporabniki. Kljub temu pa so v večini testiranj uporabniki v primerjavi s toplozračnim ali klasičnim radiatorskim ogrevanjem še vedno ocenili kot udobnejše stropno radiacijsko ogrevanje [Imanari et al. 1999] [Miriel et al. 2002]. Glavna težava, ki se lahko pojavi pri uporabi radiacijskih stropnih panelov za hlajenje, je predvsem površinska



Slika 3.13: Tloris in prerez grelno-hladilnega nizkotemperaturnega radiacijskega panela, ki so nameščeni v kabinetu KSKE III/1. V tlorisnem pogledu so prikazani utori za razvod cevi.

Fig. 3.13: Plan and section of heating-cooling low temperature radiating panel, which are installed in the cabinet KSKE III/1. In the plan the grooves for the piping are shown.

kondenzacija zračne vlage na ohlajeni ploskvi panela, vendar se je temu problemu v zmernih klimatskih pogojih mogoče izogniti z omejitvijo minimalne temperature vode v ceveh panela na 16 °C [Miriel et al. 2002]. Pri uporabi radiacijskega hlajenja v izrazito vlažni klimi je za preprečitev kondenzacije na hlajeni površini potrebno sistem dopolniti s sistemom za izsuševanje zraka [Imanari et al. 1999].

Hladilno-grelni radiacijski stropni paneli v kabinetu KSKE III/1 so dimenzij 125 x 125 cm ter sestavljeni iz 10 cm debele polistirenske toplotne izolacije, v katero je vrezan razvod za cevi z ogrevano ali ohlajeno vodo (Slika 3.13). Na spodnji strani so 4 od skupaj 6 G/H panelov obdelani s kontaktno prilepljenimi 1.25 cm debelimi mavčno-kartonskimi ploščami ter s štirimi jeklenimi sidri pritrjeni v stropno nosilno konstrukcijo. Ostala dva panela imata na spodnji strani pritrjeni kamniti plošči, pri čemer ima eden pritrjeno masivno, 2 cm debelo marmornato ploščo, drugi pa kompozitno ploščo, sestavljeno iz 12 mm debelega aluminijastega satovja, na katero je prilepljena 3 mm debela kamnita plošča. Prav tako kot vsi ostali grelno-hladilni paneli sta tudi ta dva pritrjena v stropno nosilno konstrukcijo s štirimi sidrnimi vijaki. Radiacijski paneli so pozicionirani v isti ravnini kot elementi umetne osvetlitve, torej 72 cm pod nivojem stropa oziroma 3.16 m nad tlemi ter so tlorisno postavljeni v vzdolžen niz, ki je postavljen okvirno na sredini prostora kabineta (Slika 3.11). Paneli so v ogrevalni in hladilni sistem povezani zaporedno preko razvoda ventilov, ki omogočajo izklapljanje vsakega panela posebej, ter črpalke na termostatski mešalni ventil. Izbira med hlajeno ali ogrevano vodo, ki vstopa v sistem panelov, se izvaja z ročnim preklopom ventilov za dotok odgovarjajočega medija. Če prostor kabineta ni mogoče zadovoljivo ogreti, je kot dodaten ukrep mogoče vključiti tudi klasično radiatorsko ogrevanje in s tem dvigniti temperaturo notranjega zraka ter tako doseči zelen nivo toplotnega udobja.

3.4.3.4 Prezračevanje in pasivno hlajenje

Prezračevanje je zagotovljeno z avtomatskim odpiranjem in zapiranjem zgornjega desnega okna v sistemu zasteklitve kabineta KSKE III/1 (Slika 3.2). Okno je opremljeno z avtomatskim odpiralnim mehanizmom proizvajalca GEZE tipa OL 350 EN 200 mm, ki omogoča odpiranje okenskega krila do maksimalnega kota 45° ter v končni zaprti poziciji

mehansko zaklene okno, kar preprečuje odpiranje ob močnih sunkih vetra. Okensko krilo je velikosti 97 x 187 cm ter izdelano iz aluminija.

Odpiranje okna v sistemu IRsNO omogoča zagotavljanje prezračevanja ter s tem vzdrževanje zadovoljivega nivoja olfaktoričnega notranjega okolja. Dodatno je mogoče z izmenjavo notranjega in zunanjega zraka doseči v jesenskih in spomladanskih mesecih efekt pasivnega hlajenja, če je izpolnjen predpogoj, da so zunanje temperature zraka nižje od notranjih. Podobno je mogoče s prezračevanjem ohlajati prostor tudi v poletnih mesecih v nočnem času ko je možno s pomočjo izmenjave zraka hladiti notranje prostore.

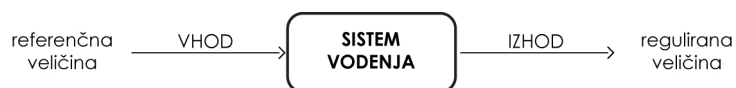
4 INTEGRALEN REGULACIJSKI SISTEM NOTRANJEGA OKOLJA

4.1 Avtomatsko vodenje razmer bivalno-delovnega okolja

Avtomatsko vodenje predstavlja v razvoju sodobne znanosti in tehnologije enega od ključnih elementov, ki so omogočili eksplozijo sodobne tehnološke družbe. Dandanes avtomatizacija procesov ni prisotna samo na tehnološko zelo zahtevnih področjih, kot sta letalstvo in vojaška tehnologija izstrelkov, temveč je že močno prodrla v vse dele industrije ter se z vsakdanjimi izdelki vse bolj prenaša tudi v vsakdanje življenje. Avtomatizacija zahtevnih in zapletenih proizvodnih procesov je omogočila in še vedno omogoča večjo produktivnost in predvsem večjo natančnost izdelave ter s tem tudi višjo kvaliteto izdelkov [Zupančič 1996]. Z večjo učinkovitostjo se zmanjšujeta poraba energije ter tudi sociološko-ekološki vpliv avtomatiziranih procesov. Čeprav je sodobni svet vse bolj prepleten z avtomatiziranimi sistemi, ki omogočajo boljše delovanje (železnice, letalstvo industrijske proizvodne linije...), pa avtomatizacija uravnavanja notranjega okolja bivalnih in delovnih prostorov še ni dosegla. Posamezni sklopi ali elementi notranjega okolja stavb, kot sta ogrevalni ali hladilni sistemi, že dosegajo visoko raven avtomatizacije z zelo naprednimi regulacijskimi sistemi, vendar se takšni sistemi nanašajo le na del izrazito kompleksnega sistema notranjega okolja. Celostno obravnavanje avtomatizacije notranjega okolja stavb bi omogočalo večjo učinkovitost in posledično boljše bivalne in delovne razmere ter v končni fazi pri primerni uskladitvi s pasivnimi ukrepi pri oblikovanju objektov (primeren stavbni ovoj) tudi izrazite prihranke pri porabi energije. Prav znižanje porabe energije za delovanje stavb z izboljšanjem njihovega delovanja bi omogočilo izrazite prihranke pri porabi energije ne samo na nivoju samih objektov, ampak ob številčno dovolj razširjeni aplikaciji tudi na državnem in mednarodnem nivoju. Dolgoročno bi avtomatizacija notranjega delovno-bivalnega okolja pripomogla k zmanjšanju porabe energije in k izboljšanju bivalnih pogojev ter s tem zvišanju učinkovitosti delovanja uporabnikov.

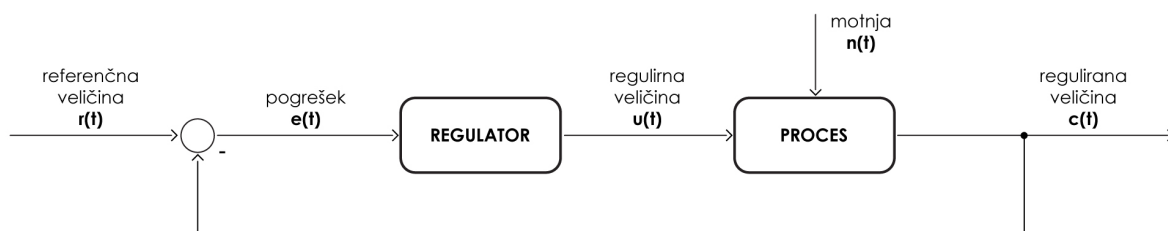
4.1.1 Sistemi vodenja

Sistem vodenja v najosnovnejši obliki predstavlja proces, za katerega je značilno, da pri nekem vhodnem signalu, ki predstavlja želeno oziroma referenčno ($r(t)$) vrednost, priredi izhodni signal oziroma regulirano vrednost ($c(t)$) v taki meri, da je pod vplivom zunanjih dejavnikov oziroma motenj ($n(t)$) le-ta čim bližje željeni. Slika 4.1 prikazuje osnovno shemo sistemov vodenja. Pri vodenju procesov sta možna dva osnovna pristopa k oblikovanju, in sicer odprtozančni oziroma krmilni sistem ter zaprtozančni oziroma regulacijski sistem vodenja. Pri prvem krmilnik vpliva na proces, ne da bi upošteval dejansko stanje izhodnega signala ter tako ne more odreagirati na motnje, ki delujejo na krmiljeni proces. Pri takšnem načinu vodenja je kvaliteta vodenja slaba, saj je izhodna veličina le redko enaka željeni. Z umestitvijo povratne zanke v sistem odprtozančnega vodenja se le-ta preoblikuje v zaprtozančnega, s čimer se kvaliteta vodenja izrazito izboljša. Da je doseženo boljše sledenje referenčni vrednosti, se s pomočjo razlike med želeno in regulirano vrednostjo generira napako ($e(t)$), ki deluje kot vhod v regulator. Regulator na podlagi napake generira regulirno veličino ($u(t)$) tako, da zmanjšuje odmik od referenčne vrednosti. S slike 4.2, kjer je prikazana shema zaprtozančnega vodenja, je razvidno, da je z umestitvijo povratne zanke omogočeno reagiranje regulatorja na motnje, ki delujejo na reguliran sistem [Zupančič 1996]. Povratnozančna regulacija je nujna pri vodenju vseh procesov, kjer se pričakuje, da bo med delovanjem prišlo do motenj ali pa takrat, ko je reguliran proces hitro spreminjajoč se, dinamičen in nelinearen. Tako je tudi regulacijski sistem IRsNO v svoji osnovi zasnovan kot kompleksen povratnozančni regulacijski sistem.



Slika 4.1: Osnovna shema sistema vodenja. (Zupančič, 1996, str.: 2)

Fig. 4.1: Basic scheme of a control system. (Zupančič, 1996, str.: 2)



Slika 4.2: Bločni diagram zaprtozančnega regulacijskega sistema. (Zupančič, 1996, str.: 6)

Fig. 4.2: Block diagram of a closed loop regulating system. (Zupančič, 1996, str.: 6)

Avtomatsko vodenje procesov mora ne glede na to, za kakšen sistem gre in kakšen način vodenja je uporabljen, izpolnjevati tri osnovne zahteve [Shaw 1998], da lahko trdimo, da je vodenje primerno oziroma uspešno. Zaradi delovanja regulatorjev v zelo različnih in pogosto naglo spreminjajočih se razmerah je prva naloga sistema vodenja sposobnost in zmožnost kompenzacije kakršnih koli nezaželenih zunanjih vplivov. Seveda se mora sistem obnašati stabilno znotraj vseh pričakovanih razmer delovanja in nazadnje je nujno, da vodenje zagotavlja optimalno delovanje procesa ne glede na to, ali gre za proizvodnjo industrijskega izdelka ali pa kot v našem primeru za zagotavljanje primernih vizualnih, toplotnih ter olifaktoričnih pogojev v bivalno-delovnem okolju stavbe.

4.1.2 Klasični regulatorji

Področje tako imenovane klasične regulacije sistemov obsega zelo širok spekter regulacijskih pristopov, med katerimi so najpomembnejši stopenjsko delujoči in zvezno delujoči regulatorji. Prav slednji se zelo pogosto uporabljajo pri regulaciji različnih industrijskih ter tudi drugih procesov, saj sta njihovo načrtovanje in delovanje zelo dobro razvita, hkrati pa zaradi svoje narave omogočajo zelo širok spekter aplikacij. Za zvezne regulatorje je predvsem značilno, da lahko regulirana veličina v regulirnem območju (območje delovanja) zavzame katero koli vrednost. Standardno regulirno območje pri industrijskih regulatorjih je večinoma na območju od 4 do 20 mA. Zvezne regulatorje lahko delimo na enega od treh tipov, pri tem pa so možne tudi različne kombinacije:

- **proporcionalno delujoči regulatorji (P-regulator),**
- **integrirno delujoči regulatorji (I-regulator),**
- **diferencirno delujoči regulatorji (D-regulator).**

Diferencirni regulator se ne uporablja samostojno, saj je zaradi svoje narave neuspešen pri regulaciji procesov, zato se vedno pojavlja s proporcionalnim (PD-regulator) ali proporcionalno integrirnim regulatorjem (PID-regulator). V nadaljevanju si bomo ogledali osnovne značilnosti zvezno delujočih regulatorjev ter s tem orisali jedro klasične industrijske regulacije. Lastnosti in značilnosti so povzete po literaturi [Zupančič 1996].

4.1.2.1 Proporcionalni regulator

Proporcionalni regulator deluje na osnovi regulacijskega algoritma, za katerega je značilno, da je regulirna veličina premosorazmerna z napako regulatorja. Proporcionalni regulator je temeljni algoritem v industrijski regulaciji in ga je mogoče opisati s sledečo enačbo:

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (4.1)$$

Ojačanje regulatorja oziroma K_p določa strmino statične karakteristike, ki definira odvisnost med napako in regulirano veličino v ustaljenem stanju. Proporcionalni regulator običajno ne izniči pogreška v ustaljenem stanju, kar je tudi njegova glavna slabost.

4.1.2.2 Integrirni in proporcionalno-integrirni regulator

Če napaka v ustaljenem stanju ni zaželeno, jo lahko izničimo z uporabo integrirnega regulatorja, za katerega je značilno, da je regulirna veličina premosorazmerna integralu napake. Integrirni regulator je opisan s sledečo enačbo:

$$u(t) = K_I \int e(t) dt \quad (4.2)$$

Pri tem K_I predstavlja ojačanje integrirnega regulatorja. Ker proporcionalni regulator ne odpravlja napake v ustaljenem stanju, integrirna pa ga se z ustrezno nastavitvijo parametrov obeh regulatorjev lahko realizira PI-regulator, ki združuje dobre lastnosti obeh členov. PI regulator se realizira s paralelno vezavo P- in I-člena ter je opisan z enačbo, kjer je T_I integrirni čas:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_I \int e(t) dt = K_p (e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt) \quad (4.3)$$

4.1.2.3 Diferencirni in proporcionalno-integrirno-diferencirni regulator

Kot je bilo že omenjeno, diferencirni regulator samostojno ni učinkovit, zato se vedno pojavlja v kombinaciji s P- ali PI-členom. Regulator upošteva le spremembo napake, pri čemer je regulirna veličina premosorazmerna z odvodom napake. Diferencirni dodatek k regulatorjema P ali PI opisuje sledeča enačba:

$$u(t) = K_D * \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.4)$$

K_D predstavlja ojačanje diferencirnega regulatorja. Ker pa diferencirni regulatorji nikoli ne delujejo samostojno, se pojavljajo v kombinaciji s proporcionalnimi in integrirnimi regulatorji. PD-regulator opisuje enačba 4.5, kjer je T_D diferencirni čas:

$$u(t) = K_P * e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P (e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.5)$$

PID-regulator pa je predstavljen z enačbo 4.6:

$$u(t) = K_P * e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P (e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.6)$$

PI- in PID-regulatorja se realizirata tako kot PI-regulator s paralelno vezavo posameznih členov, kjer diferencirni člen povzroči veliko občutljivost regulatorja na signal napake ter deluje prediktivno z izvajanjem hitrih popravkov v regulacijski zanki ter tako preprečuje znatnejše naraščanje napake. Sistemi z diferencirnim dodatkom postanejo stabilnejši z večjim dušenjem, kar posledično omogoča povečanje ojačanja proporcionalnega člena ter s tem zmanjšanje napake v ustaljenem stanju.

PID-regulatorji imajo vnaprej določeno strukturo, zato se postopek njihovega nastavljanja oziroma načrtovanja poenostavi na določanje posameznih parametrov. Sam postopek določanja parametrov PID-regulatorjev je v osnovi odvisen, ali je načrtovalcem na voljo model reguliranega procesa ali ne. Če je pri načrtovanju regulatorja mogoče uporabiti matematični model reguliranega procesa ali pa je takšen model mogoče izdelati, se lahko za določitev nastavitvenih parametrov PID-regulatorja uporabijo simulacije, v primeru

odsotnosti modela pa so načrtovalci vezani na nastavitvena pravila [Zupančič 1996]. Pri zelo kompleksnih in izrazito nelinearnih procesih je izvedba matematičnega modela zelo velik zalogaj. Dodatno se pri izvedbi modelov procesov le-te poenostavi v linearne sisteme, kar je v večini primerov dovolj kompetenten približek, slabost takšnega pristopa se pokaže pri izrazito nelinearnih sistemih, saj takrat model nezadovoljivo opisuje realno stanje. Pri regulaciji termično-optičnih procesov skozi stavbni ovoj se izkaže, da je termični proces še obvladljiv na nivoju izvedbe matematičnega modela in zadovoljivo opiše realno stanje kljub vpeljavi poenostavitve [Furlan 1999] [Kladnik 1987]. Prav nasprotno se izkaže za optične procese, ki bi zaradi dinamike sprememb in kompleksnosti fizikalnega procesa zahtevali izrazito kompleksen ter zelo natančen model. Izvedba takšnega modela bi bila izrazito težavna in zamudna. Podobne težave nastopijo tudi pri kompleksnih kemičnih procesih, regulaciji prometnih sistemov ter pri vseh podobnih nelinearnih in izrazito kompleksnih procesih [Munakata 1998].

Kot ena izmed možnih alternativnih rešitev k uporabi klasičnih metod vodenja procesov (PID-regulacija) se kaže uporaba regulatorjev na osnovi mehke logike, saj ti ne potrebujejo nujno matematičnega modela. Mehki regulatorji omogočajo regulacijo kompleksnih in izrazito nelinearnih sistemov glede na predhodne izkušnje oziroma ekspertno znanje z uporabo serije enostavnih ČE-POTEM pravil. Ker pa imajo mehki regulatorji določene specifične slabosti, se je v praksi izkazalo, da je mogoče najboljše rezultate doseči z združitvijo mehkih regulatorjev s klasičnimi PID-regulatorji [Furlan 1999] [Trobec-Lah 2003] ter s tem uporabiti prednosti obeh pristopov.

4.1.3 Mehka logika

Mehko logiko je kot matematično teorijo nadgradnje klasične ostre logike v šestdesetih letih prejšnjega tisočletja uvedel ameriški matematik L. Zadeh ter s tem razvil orodje, ki je omogočalo zvezen opis vseh vmesnih stopenj med dvema diskretnima vrednostima. Teorija ostre logike omogoča, da lahko elementi zasedejo le dve vrednosti, tipično pripadnost (označeno z 1) ali nepripadnost (označeno z 0) določeni množici ali skupini, mehka logika pa pojem pripadnosti razširi na vsa vmesna stanja med popolnim »da« in popolnim »ne« ter se s

tem približa človeškemu načinu razumevanja. Posplošeno bi lahko dejali, da teorija mehke logike vnaša v matematični svet možnost opisa subjektivnosti.

S stališča systemske teorije je bistveni prispevek mehke logike možnost zapisa preslikave med vhodnim in izhodnim prostorom z množico pogojno-posledičnih pravil. S pomočjo teh pravil lahko definiramo povezavo med vhodnimi spremenljivkami na ČE-strani (IF) in izhodnimi spremenljivkami na POTEM-strani (THEN) pogojno-posledičnih pravil [Furlan 1998]. Te preslikave temeljijo na logičnem sklepanju, ki posnema način človeškega razmišljanja.

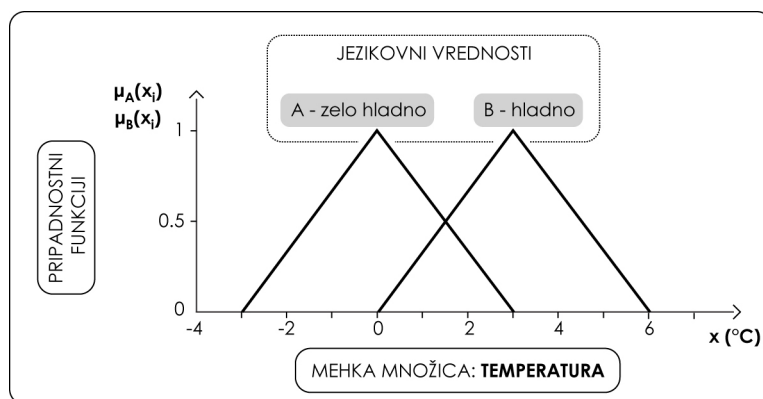
4.1.3.1 Mehke množice

Tako kot se klasične množice neposredno navezujejo na klasično teorijo logike, tudi mehke množice predstavljajo osnovno idejo in jedro aplikacije teorije mehke logike. Matematični pojem mehke množice je definiran s pomočjo pripadnosti v obliki pripadnostne funkcije ($f(x)$). V nadaljevanju bodo predstavljene osnove mehkih množic, ki so povzete po literaturi [Donlaić e tal. 1995] [Kokol e tal. 2001] [Munakata 1998] in [Shaw 1998].

Mehka množica vsebuje elemente, definirane na intervalu z ustrežno pripadnostno funkcijo nad njim, te so lahko poljubnih oblik, vendar se najpogosteje uporabljajo trikotne, trapezne, gausove in parabolične oblike. Vse mehke množice ($A, B, C \dots$) so definirane znotraj osnovnega mehkega prostora (X) na pripadajočem intervalu z diskretnimi vrednostnimi ter s ustreznimi pripadnostnimi funkcijami ($f_A, f_B, f_C \dots$). Neizrazitost posamezne množice je podana s pripadnostno funkcijo, ki za vsako numerično vrednost osnovnega mehkega prostora X definira njegovo stopnjo pripadnosti (μ) določeni množici. Tako je X domena vhodne spremenljivke, katere elementi so x , in mehka množica A je znotraj X določena kot množica urejenih parov:

$$A = \{x, \mu_A(x)\} | x \in X \tag{4.7}$$

Pripadnost elementa x mehki množici $A, B, C \dots$ je določena s pripadnostnimi funkcijami $f_A, f_B, f_C \dots$, ki je podana s stopnjo pripadnosti $\mu_A(x), \mu_B(x), \mu_C(x) \dots$ na intervalu $[0,1]$ v obliki realnega števila (Slika 4.3).



Slika 4.3: Predstavitev lingvistične spremenljivke temperatura v mehkem prostoru.
 Fig. 4.3: Representation of linguistic variable temperature in fuzzy space.

Teorija mehkih množic uvaja tudi pojem lingvistične spremenljivke (npr.: temperatura; slika 4.3), ki lahko zavzame določene lingvistične vrednosti, definirane v obliki jezikovnih vrednosti oziroma predikatov (npr.: zelo hladno, hladno ...; slika 4.3). Vse lingvistične vrednosti so interpretirane v obliki mehkih množic s pomočjo pripadnostnih funkcij na intervalu vhodnega mehkega prostora X (Slika 4.3). Lingvistične spremenljivke se v ničemer ne razlikujejo od klasičnih spremenljivk, tako jim lahko pripišemo neko vrednost, poizvemo po njihovi vrednosti ali pa jih primerjamo z vrednostmi ostalih spremenljivk. Jezikovne spremenljivke se v obliki posledično-pogojnih stavkov povezujejo v jezikovna pravila, ki definirajo pogojno-posledične zveze. Pravila posnemajo enostavno obliko človeškega odločanja ter omogočajo matematično formulacijo procesa odločitve.

4.1.3.2 Mehki operatorji

Procesiranje med mehкими množicami je izvajanje operacij s splošnimi operatorji. Iz teorije ostrih množic oziroma iz binarne logike se v teorijo mehkih množic prenesejo tri osnovne operacije med množicami:

- **unija oziroma disjunkcija; ALI (OR)** – funkcija unije je podana z operaterjem maksimuma. Unijo C med množicama A in B predstavljajo vsi elementi, ki pripadajo množici A ali/in množici B :

$$C = A \cup B = \max \{A, B\} \quad (4.8)$$

$$\mu_C = \max \{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.9)$$

- **preseka oziroma konjunkcija; IN (AND)** – funkcija preseka je podana z operaterjem minimuma. Presečno množico C med množicama A in B predstavljajo vsi elementi, ki pripadajo množici A in množici B hkrati;

$$C = A \cap B = \min \{A, B\} \quad (4.10)$$

$$\mu_C = \min \{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.11)$$

- **negacija oziroma komplement; NE (NOT)** – funkcija negacije je podana s komplementom. Množica C je podana s tistimi elementi, ki ne pripadajo množici A.

$$C = \neg A = \{1 - A\} \quad (4.12)$$

$$\mu_C = \{1 - \mu_A(x)\} \quad (4.13)$$

Izvajanje osnovnih operacij nad jezikovnimi spremenljivkami poteka z uporabo posplošenih operatorjev, ki izpolnjujejo matematične aksiome komutativnosti, monotonosti, asociativnosti, zveznosti in idempotence. Vsi aksiomi so izpolnjeni na robovih intervala oziroma pripadnostne funkcije. Posplošeni operatorji so predstavljeni v preglednici 4.1. Za izvajanje osnovnih operacij je potrebno dopolnilno gledanje na funkciji dveh spremenljivk, ki ju dobimo s kombinacijo dveh mehkih množic. Tako imenovani splošni prostorski operatorji oziroma norme nam omogočajo, da se spustimo v pripadnost mehke množice. Znotraj tega intervala morajo biti izpolnjeni aksiomi monotonosti, asociativnosti in komutativnosti. Opazujemo produktno operacijo $p = [0,1] \times [0,1]$, ki tvori prostorsko lupino:

- **trikotna oziroma T-norma** – uporablja se za oblikovanje povprečja dveh mehkih množic oziroma za modeliranje operatorja IN. T-norma pomeni dvoparametrsko funkcijo, definirano na območju $[0,1] \times [0,1]$:
-

$$t[\mu_A A(x), \mu_B B(x)] \quad (4.14)$$

- **trikotna konorma oziroma S-norma** – uporablja se za združevanje spremenljivk in predstavlja korespondenčen operator k T-normi. Služi za modeliranje operatorjev oblike ALI. S- in T-norma sta med seboj povezani z De Morganovim teoremom:

$$t[\mu_A A(x), \mu_B B(x)] = 1 - s\{s[1 - \mu_A A(x)], s[1 - \mu_B B(x)]\} \quad (4.15)$$

Vse opisane operacije nad mehкими množicami se nanašajo na elemente iste množice, v praksi pa je velikokrat potrebno obdelovati simultano elemente dveh ali več množic oziroma elemente več podmnožic. Recimo, da sta X in Y mehki normirani množici, iz njunih elementov $x \in X$ in $y \in Y$ želimo z nekim pravilom tvoriti elemente $(x, y) \in R(x, y)$.

Relacija se imenuje dvojiška oziroma binarna relacija ter je definirana s sledečim izrazom:

$$R = \{(x, y), \mu_R(x, y)\}; (x, y) \in P = A \times B \quad (4.16)$$

A in B sta podmnožici X in Y

$$P = A \times B = \{(x, y); x \in A, y \in B\} \quad (4.17)$$

Tudi pripadnostna funkcija dvojiške relacije je funkcija obeh spremenljivk. Govorimo o realizaciji kartezijskega produkta, pri čemer je mehki kartezijski produkt praviloma definiran z operatorjem minimuma, kar v primeru binarne relacije zapišemo kot:

$$\mu_R(x, Y) = \min_{A \times B} [\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (4.18)$$

Postopek, ki zaobjame horizontalno povezavo med mehкими relacijami ter vertikalno povezavo med mehкими množicami, se imenuje inferenčni postopek. Inferenca temelji na ČE-POTEM stavkih in z operatorji kompozicije omogoča preslikavo med vhodnim in izhodnim prostorom. Inferenčni postopek definira pripadnostno funkcijo končne mehke množice kot kompozicijo pravil regulacije, ki sestavljajo algoritem vodenja. Pri aplikacijah mehkih regulatorjev v krmilni tehniki se najpogosteje uporabljata Mamdanijev minimum operator

Preglednica 4.1: Posplošeni operatorji osnovnih operacij.
 Table 4.1: Generalized operators of basic operations.

POSPLOŠITEV OPERATORJA IN (AND)	
algebrajski produkt	$\mu_C = \mu_A \mu_B$
algebrajska vsota	$\mu_C = \mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B$
maksimum	$\mu_C = \max(\mu_A, \mu_B)$
minimum	$\mu_C = \min(\mu_A, \mu_B)$
omejena vsota	$\mu_C = \min(1, \mu_A + \mu_B)$
omejena diferenca	$\mu_C = \max(0, \mu_A + \mu_B - 1)$
POSPLOŠITEV OPERATORJA ALI (OR)	
maksimum	$\mu_C = \max(\mu_A, \mu_B)$
omejena vsota	$\mu_C = \min(1, \mu_A + \mu_B)$
Einsteinova vsota	$\mu_C = (\mu_A + \mu_B) / (1 + (\mu_A \mu_B))$
algebrajska vsota	$\mu_C = \mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B$
POSPLOŠITEV OPERATORJA NE (NOT)	
mehki kompliment	$\mu_C = 1 - \mu_A$

(MAX-MIN) in Larsenov operator (MAX-PROD). Inferenčni proces predstavlja jedro mehkega odločanja v regulacijski tehniki in ga opišemo v treh osnovnih korakih (Slika 4.4):

- **mehčanje (fuzzification)** – vsem vhodnim podatkom, če so to realna števila (meritve), je potrebno prirediti bazne mehke množice s čimer se določi njihova stopnja pripadnosti. Vhodnim spremenljivkam (npr.: osvetljenost) je potrebno prirediti bazne mehke množice, ki predstavljajo jezikovne vrednosti dotične jezikovne spremenljivke (npr.: svetlo, temno, mračno ...) in so razporejene skozi celoten definicijski prostor, enak postopek velja tudi za izhodne spremenljivke. Vsak posamezen podatek v obliki numerične vrednosti je potrebno postaviti v mehki prostor s prireditvijo pripadnostnih funkcij in stopnje pripadnosti;
- **inferenca** – realizacija horizontalnega sklepanja med premiso in konsekvenco za vsako pravilo mehkega sklepanja nam poda po eno izhodno mehko vrednost za vsako pravilo. Končni rezultat inferenčnega procesa je vertikalna unijska združitev vseh pravil v končno izhodno mehko množico. Ta postopek predstavlja inferenco

celotnega jezikovnega modela sistema, zapisanega s pomočjo mehke logike. Inferenčno sklepanje se nazorno prikaže v relacijski matriki celotnega sistema in je kot takšno jedro mehkega algoritma ter s tem tudi mehkega regulatorja;

- **ostrenje (defuzzification)** – ker so na izhodih mehkih sistemov v večini primerov naprave, ki delujejo po principu binarne logike, je potrebno prevesti končno mehko vrednost v ostro, ki jo je izvršni člen sposoben izvesti. Ostrenje je postopek, ki iz poteka pripadnostne funkcije izhodne mehke množice določa izhodni ostri signal. Pri pocesiranju mehkih množic se uporablja več pristopov k ostrenju izhodnih vrednosti, podrobno pa si bomo ogledali le težiščno metodo (COG – Center of Gravity Method), ki se najpogosteje uporablja v mehkih regulatorjih. Pri tej metodi se obravnava področje pod funkcijo $\mu(y)$ kot površino, kateri se določi koordinate težišča, ki definirajo končno izhodno ostro vrednost (y_0). Prednost takšne metode je, da ne upošteva le maksimumov pripadnostne funkcije, ampak njen celoten potek. Izračun končne ostre vrednosti y_0 se izvede po sledečem postopku:

$$y_0 = \frac{\int y * \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} \quad (4.19)$$

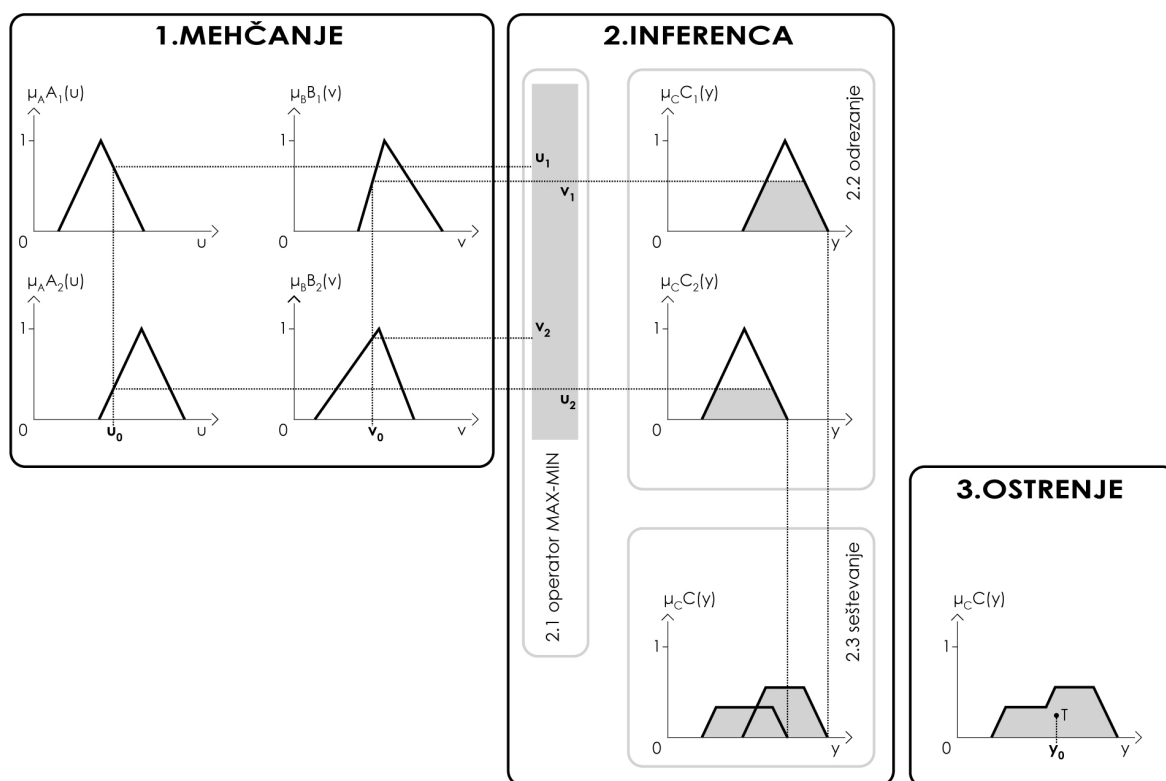
Izraz za izračun ostre vrednosti je mogoče poenostaviti tako, da se ostrenje pripadnostne funkcije skrči v eno od nič različno številčno vrednost (singleton). S S_i označimo n-omejenih singleton vrednosti za n-pravil, s čimer dobimo sledeči izraz za izračun končne ostre vrednosti po težiščni metodi:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i S_i)}{\sum_{i=1}^n (S_i)} \quad (4.20)$$

4.1.3.3 Mehki regulatorji

Mehki regulatorji predstavljajo alternativo klasičnim regulacijskim pristopom v primerih, kjer se izkaže, da s klasično regulacijo ni mogoče doseči želenih rezultatov. Takšne situacije nastopijo predvsem pri izrazito fizikalno kompleksnih sistemih, saj je le-te težavno in zamudno ter včasih tudi nemogoče zadovoljivo opisati z matematičnimi modeli na osnovi

diferencialnih enačb, kar pa je bistvo klasične regulacijske teorije. Mehka regulacija pa omogoča, da takšen pristop zaobidemo ter k reševanju problema pristopimo inženirsko z izkušnjami in ekspertnim znanjem načrtovalcev. Takšen pristop ponuja oblikovalcem regulacijskih sistemov nov odnos do informacij, saj omogoča matematičen zapis in obdelavo informacij v podobni obliki, kot jih obdelujemo in dojemamo ljudje, torej s subjektivnim pojmovanjem eksaktnih vrednosti. Prav področje sistemov vodenja se je izkazalo kot eno prvih področij, ki je sprejelo uporabo mehke logike kot zelo primeren in uspešen način reševanja zastavljenih problemov. Posebno dobro so se odrezali kombinirani sistemi, kjer se mehko vodenje dopolnjuje s klasičnimi PID-regulatorji, vezanimi v kaskadni sistem. Pri takšni konfiguraciji predstavlja izhod mehkega regulatorja referenco v klasičen regulator. Medsebojna povezava klasičnih in mehkih regulatorjev se odraža v večji prilagodljivosti lokalnim značilnostim opazovanega oziroma reguliranega sistema.



Slika 4.4: Inferenčni postopek mehkega odločanja pri dveh vhodnih signalih v_0 in u_0 . Uporabljen je MAX – MIN operator, za določitev končne izhodne vrednosti pa je bila uporabljena težiščna metoda.

Fig. 4.4: Inference procedure in fuzzy reasoning on input signals v_0 and u_0 . The MAX – MIN operator was applied, while the centre of gravity method was used for determining the final output value.

Mehke regulatorje najlažje opišemo z njihovimi osnovnim značilnostimi (povzeto po [Trobec-Lah 2003]):

- **povzemanje človeških izkušenj** – sinteza jezikovnega modela temelji na opazovanju pri vodenju kompleksnega dinamičnega procesa, kar se prevede v mehki algoritem vodenja;
 - **vklučitev poljubne procesne veličine** – mehki regulatorji poleg regulirane veličine omogočajo vključitev dodatnih poljubnih procesnih veličin, kar omogoča predstavitev dodatnih informacij o procesu;
 - **nelinearnost** – nelinearna struktura mehkega regulatorja nudi široke možnosti pri reševanju zahtevnih in izrazito nelinearnih problemov, ker omogoča natančnejšo regulacijo. Vhodno-izhodni odnos pri regulatorju z dvema vhodoma in enim izhodom se odraža kot nelinearno oblikovana lupina, ki predstavlja površino odločitev v odvisnosti od vhodnih informacij. Oblika lupine je odvisna od stopnje subjektivnosti vhodnih informacij, formuliranih pravil in izbora operatorjev z njihovim spreminjanjem se spreminja tudi oblika lupine;
 - **transparentnost** – zaradi transparentno oblikovane strukture mehkega regulatorja in neposredne navezave na dogajanje so posegi v mehki algoritem regulatorja enostavni. Prilagoditve na spremenjene parametre delovanja je mogoče zaobseči z enostavnimi posegi neposredno v regulatorjevem algoritmu;
 - **časovna invariantnost in statičnost** – zaradi statične nelinearne karakteristike mehkih regulatorjev in odsotnosti dinamičnih členov le-ti niso sposobni odpraviti napake v ustaljenem stanju. Zaradi te lastnosti se mehki regulatorji kombinirajo s klasičnimi, ki so sposobni odpraviti napako v ustaljenem stanju;
 - **neuniverzalnost** – formuliranje nastavitvenih pravil mehkega regulatorja je iterativen proces, pri katerem je nujna visoka stopnja poznavanja obravnavanega problema. Zaradi kompleksnosti nastavljaljivih parametrov mehki regulatorji omogočajo dobro prilagoditev regulacije, s tem pa tudi izgubljajo univerzalnost. Posledica zmanjšanja univerzalnosti regulatorja je povečanje potrebnega časa za doseg primernih nastavitvev ob hkratni večji možnosti formuliranja slabih nastavitvenih pravil.
-

4.1.3.4 Postopek snovanja mehkih regulatorjev

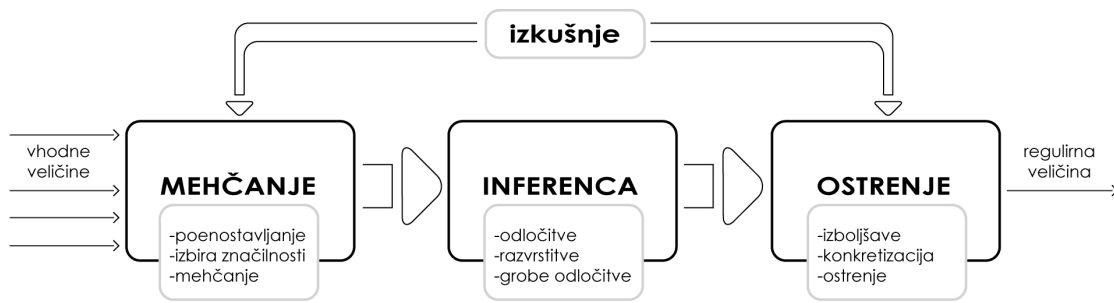
Slika 4.5 prikazuje tri osnovne delne postopke, ki so del načrtovanja mehkih regulatorjev ter s tem predstavljajo osnovo njegovega delovanja. Ti postopki so: mehčanje, inferenca in ostrenje. V nadaljevanju si bomo ogledali lastnosti in podpostopke vsakega od njih (povzeto po literaturi [Đonlaić e tal. 1995] [Kokol e tal. 2001] [Trobec-Lah 2003]).

- **MEHČANJE – sestavljeno iz treh podpostopkov:**

1. določanje množice vhodno-izhodnih veličin – potek določitve vhodno-izhodnih veličin poteka po enakem postopku kot pri klasičnih regulatorjih in je oblikovano v večini primerov tako, da vhodna stran prejme dva signala, izhod pa je eden. Kot vhod regulatorja je v večini primerov uporabljena napaka, ki je odvisna od realiziranega regulatorja, časovnega odvoda napake ali pa neposredne informacije o fizikalnem procesu. Ker mehki regulatorji niso dinamični, se za vnos dinamike velikokrat priklaplja na vhod D-členi, na izhod pa I-členi klasičnih regulatorjev;

2. določanja intervala obravnave vhodnih in izhodnih spremenljivk – določitev intervala vhodnih in izhodnih vrednosti jezikovnih spremenljivk (pogosto gre za merjene vrednosti) je v večini primerov prepuščeno subjektivni oceni načrtovalca, ki se izoblikuje na podlagi izkušenj, predvidevanj in opazovanj;

3. postopek mehčanja vhodnih spremenljivk – vhodne signale se predstavlja kot jezikovne spremenljivke, ki se jih definira v vhodnem mehkem prostoru ter se jim s pomočjo izkušenj priredijo pripadnostne funkcije. Mehčanje vhodnih spremenljivk pomeni dobesedno subjektivizacijo in redukcijo vhodnih informacij po pravilu pomembno – nepomembno. Oblika predpisanih pripadnostnih funkcij vhodnih spremenljivk neposredno vpliva na delovanje mehkega regulatorja. V večini primerov za primerno delovanje regulacijskih sistemov zadostujejo pripadnostne funkcije trikotne oblike, pri čemer se skoraj vedno izkaže, da je potrebna zgostitev v okolici delovne točke. Pri definiranju števila uporabljenih pripadnostnih funkcij pri večini primerov zadostuje 3 do 7 funkcij, pri čemer večje število povzroča nepreglednost vhodnega mehkega prostora. V izogib nezveznega obnašanja regulatorja je potrebno pripadnostne funkcije prekrivati. Število uporabljenih



Slika 4.5: Shema osnovnega delnega postopka mehkega regulatorja s pripadajočimi podpostopki. (Donlaić, 1995, str.:53)

Fig. 4.5: Basic partial procedure of fuzzy regulator with all sub procedures. (Donlaić, 1995, str.:53)

pripadnostnih funkcij vpliva na ravnotežje med točnostjo in hitrostjo delovanja regulatorja, gostota razporeditve pa na občutljivost delovanja.

- **INFERENCA – sestavljena iz dveh podpostopkov:**

1. sestava algoritma krmiljenja (zakona regulacije) – v večini primerov se pravila regulacije določajo s pomočjo izkušenj ali opazovanja izurjenega človeškega operaterja, če je na voljo simulacijski model, ga je mogoče uporabiti za določitev zakonov regulacije. Pravila povezujejo vhodne in izhodne parametre in predstavljajo jedro in najpomembnejši del mehkega regulatorja. Oblikovana so v obliki nabora pogojno-posledičnih pravil, ki so podana za regulator z dvema vhodoma in enim izhodom v sledeči obliki:

ČE (E=E_i) IN/ALI (DE=DE_i) TEDAJ (Y=Y_i)

V pogojnem delu stavka nastopata osnovni mehki operaciji IN, ALI, ki se realizirata z uporabo mehkih splošnih operaterjev, operacijo ALI se večinoma uporablja za uvajanje mejnih pogojev v proces krmiljenja. Za zagotovitev zveznega prehoda med IN- in ALI-operatorjem lahko uvedemo γ -operator, ki sodi med kompenzatorske operaterje in je definiran s sledečim izrazom:

$$\mu_{A\gamma B} = [\mu_A(x) * \mu_B(x)]^{(1-\gamma)} 1 - \{[1 - \mu_A(x)] * [1 - \mu_B(x)]\}^\gamma, \gamma \in [0,1] \quad (4.21)$$

$\gamma = 0$ predstavlja čisti IN, $\gamma = 1$ predstavlja čisti ALI

2. oblikovanje operatorjev inference – regulacijska pravila, oblikovana v obliki pogojno-posledičnih stavkov, v mehkem regulatorju predstavljajo horizontalne relacije odločanja, za definiranje končne izhodne množice je potrebno izvesti še postopek inference. Inferenčni postopek iz množice pravil krmiljenja s pomočjo unijske združitve definira izhodno mehko množico. V regulacijski tehniki se za ta proces največkrat uporabljata Mamdanijev (MAX-MIN) in Larsenov operator (MAX-PROD), ki sta predstavljena na sliki 4.6. Končna izoblikovana mehka množica je določena s pripadnostno množico, nastalo z unijsko združitvijo konsekvenčnih mehkih množic pravil ter je odraz vhodnih informacij trenutka v časovnem prostoru.

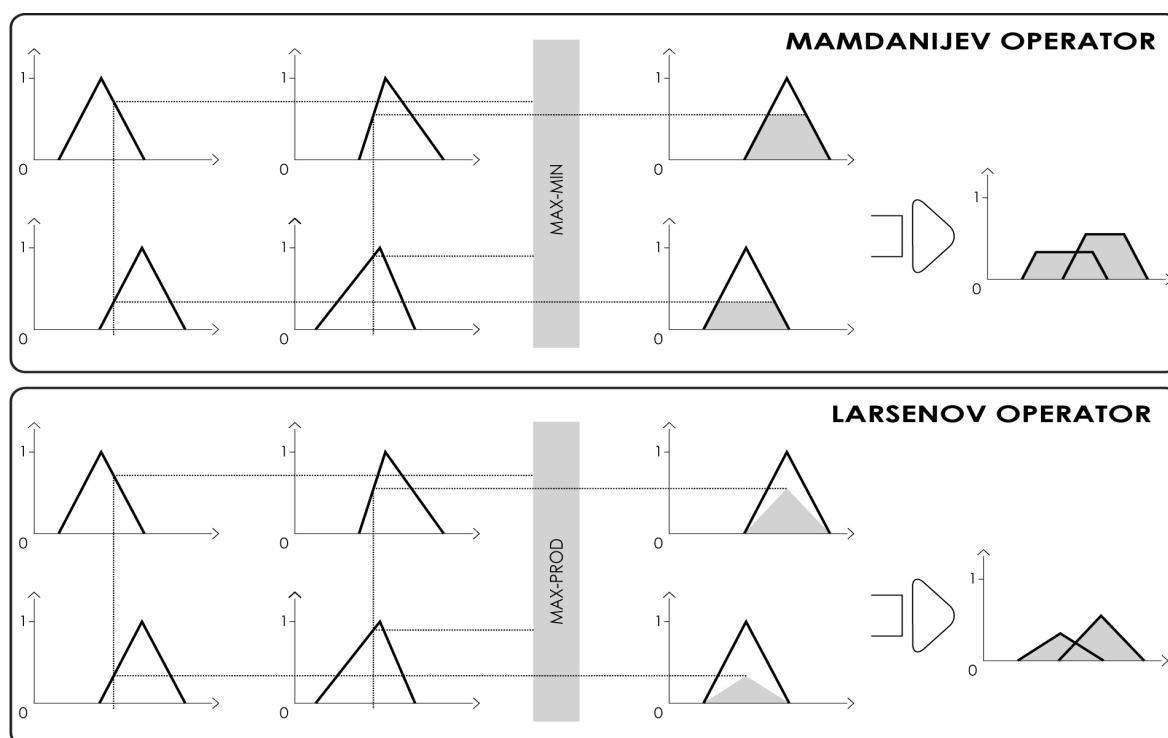
- **OSTRENJE:**

1. določitev končne ostre vrednosti kot izhod mehkega regulatorja – za potrebe regulacije določitev končne ostre vrednosti s težiščno metodo popolnoma zadostuje. S tem je izhod mehkega regulatorja ostra vrednost, ki jo lahko naprej procesiramo s klasičnimi regulatorji ali pa uporabljamo kot regulirano veličino. Za večino primerov pri uporabi težiščne metode zadostuje poenostavljen izračun, predstavljen v poglavju 4.1.3.2 in podan z izrazom (4.19).

Optimalno delujoče mehke regulatorje karakterizirajo stabilnost, robustnost, kvalitetna regulacija glede na izbrane kriterije ter robustnost glede spreminjanja parametrov, nezanesljivosti modela in motenj [Đonlaić e tal. 1995]. Če regulator izpolnjuje opisane kriterije, ga lahko označimo za optimalno delujočega. Ker so mehki regulatorji nelinearni, brez spomina in časovne dinamike ter delujejo po pravilih kot zasnovan ekspertni sistem, je njihova optimizacija težavnejša in bolj problematična kot pri klasični regulaciji za težave, ki se lahko pojavijo. Literatura [Đonlaić e tal. 1995] navaja sledeče rešitve:

- **nezveznost delovanja regulatorja** – pri delovanju regulatorja se lahko ob določenih vhodnih vrednostih pojavi nezveznost delovanja, ki je v večini primerov posledica nepokritosti dela definicijskega območja v okolici delovne točke s pravili regulacije. Odprava težave se izvaja s posegom v inferenco postopka;
-

- **prevelika napaka v ustaljenem stanju** – napaka se lahko zmanjša s spremembo pripadnostnih funkcij in posegom v pravila regulacije;
- **nestabilno delovanje** – če se pojavi nestabilno delovanje mehkega regulatorja, je potrebno kritično preveriti celoten proces odločanja ter pregledati fazo mehčanja, torej preveriti pripadnostne funkcije ter njihovo prekrivanje in zgostitev;
- **predolgi časi nastavitve ter pojav prenehajev v prehodnem pojavu** – možni ukrepi so sledeči:
 1. z optimizacijo jezikovnih spremenljivk vhodnih količin je z zožitvijo pripadnostnih funkcij okoli delovne točke mogoče doseči močnejše spremembe izhodne veličine;
 2. če pripadnostne funkcije ležijo preblizu delovne točke, lahko nastopi nestabilno delovanje regulatorja. Izredna zgostitev pripadnostnih funkcij v okolici delovne točke posledično pomeni razširitev robnih pripadnostnih funkcij ter s tem nastajanje »špranj« v relacijski matriki. Izboljšanje delovanja dosežemo s povečanjem pravil v matriki;
 3. skrajšanje časa nastavitve se doseže z odmikom izhodne pripadnostne funkcije



Slika 4.6: Shema postopka Mamdanijevega in Larsenovega operatorja.

Fig. 4.6: The Mandani and Larsens operators.

(»singeltona«) od delovne točke. Potrebna je pozornost, saj prevelik odmik pripelje do prenehajev pri delovanju regulatorja;

4. razširitev strukture s pomočjo PI-člena na izhodu regulatorja. Takšna rešitev privede do boljše regulacije v smislu sledenja in časa nastavitve.

4.2 Osnove za nastavitve regulacijskega sistema IRsNO

Izhodiščne nastavitve mehkih regulatorjev sistema IRsNO izhajajo iz analize dela, opravljenega na testnem regulacijskem sistemu KAMRA. Opravljeni eksperimenti na sistemu KAMRA so trajali skoraj polna tri leta in doslej še niso bili sistematično analizirani in pregledani, saj so bili v literaturi [Trobec-Lah 2003] predstavljeni le v smislu kronološke izpeljave in optimizacije posameznih regulacijskih nastavitv sistema. Zaradi potreb nadaljnjega dela pri sistemu vodenja notranjega okolja je bilo potrebno najprej vse izvedene eksperimente pregledati in sistematično razvrstiti ter nato oceniti uspešnost posameznih uporabljenih nastavitv in konceptualnih pristopov. Iz množice obdelanih in pregledanih eksperimentalnih podatkov je bil v končni fazi analize opravljenega dela na sistemu KAMRA izveden izbor regulacijskih nastavitv (mehki regulatorji) in reprezentativnih eksperimentov, ki najbolje ilustrirajo izhodišča sistema IRsNO. Nadaljnja poglavja bodo predstavila izbor analiziranih podatkov delovanja sistema KAMRA ter s tem najučinkovitejše nastavitve regulatorjev za uravnavanje toplotnih in svetlobnih procesov. Učinkovitost ter odzivnost regulacijskega sistema bosta predstavljeni z izborom izvedenih eksperimentalnih meritev.

Eksperimenti v okviru testiranja sistema KAMRA so potekali skoraj neprekinjeno 30 mesecev. Povprečen eksperiment je trajal od 3 do 7 dni, čeprav so se nekateri eksperimenti izvajali tudi krajši čas (najkrajši eksperimenti so trajali 24 ur). V analizo in pregled eksperimentalnega dela KAMRA so bili uvrščeni eksperimenti iz celotnega obdobja trajanja testiranja, kar pomeni, da so analizirani podatki obsegali tako začetne kot tudi končne optimizirane nastavitve regulacijskega sistema. Skupno število vseh obdelanih eksperimentov je bilo 308, od tega je 129 eksperimentov s toplotno regulacijsko zanko (EX-TEMP-001 do -129), 151 eksperimentov s svetlobno regulacijsko zanko (EX-SVET-001 do -151) ter 28 eksperimentov s harmoniziranim delovanjem toplotne in svetlobne regulacije (EX-HARM-001 do -028).

Spisek in časovni razpored analiziranih eksperimentov sta priložena v prilogi C. V času izvajanja eksperimentov s sistemom KAMRA so bili preverjeni vsi aspekti odzivnosti prostora testne celice ter tudi delovanja in optimizacije regulacijskega sistema. Velik del

Preglednica 4.2: Povzetek eksperimentalnega dela in rezultatov sistema KAMRA.

Table 4.2: Summary of experimental work and results acquired with KAMRA.

	REGULACIJA TOPLOTE	REGULACIJA SVETLOBE	HARMONIZIRANA REGULACIJA
Regulatorji	<ul style="list-style-type: none"> fuzzy_rol_S fuzzy_rol_W <p>(regulacijska algoritma sta bazirala na predhodnih numeričnih simulacijah, med izvajanjem testiranj so bile izvedene le manjše optimizacije parametrov regulatorjev)</p>	<ul style="list-style-type: none"> fuzzy_L1_A fuzzy_L1_B fuzzy_L1_C fuzzy_L1_D fuzzy_L1_E fuzzy_L1_F fuzzy_L1_G fuzzy_L2_A fuzzy_L2_B fuzzy_L2_C fuzzy_LP1 fuzzy_LP2 	
Harmonizacija			<ul style="list-style-type: none"> Osvetljenost in notranja temperatura zraka se regulirata s pomiki rolete. Osvetljenost se regulira s pomiki rolete, temperatura zraka pa z dodatnimi viri.
Dodatni viri:			
Grelci	<ul style="list-style-type: none"> fuzzyPD_temp regulator tipa PID/P 		
Ventilator	<ul style="list-style-type: none"> regulator tipa PID/P 		
Eksperimenti:			
Prosti tek	<ul style="list-style-type: none"> Odprta roleta. 	<ul style="list-style-type: none"> Odprta roleta. 	
Regulacija z roletom	<ul style="list-style-type: none"> Pozicioniranje rolete uravnava notranjo temperaturo zraka 	<ul style="list-style-type: none"> Pozicioniranje rolete uravnava notranjo osvetljenost 	<ul style="list-style-type: none"> svetloba + toplota
Regulacija z dodatnimi viri	<ul style="list-style-type: none"> Regulacija samo z dodatnimi viri. Regulacija z dodatnimi viri in pomiki rolete. 		<ul style="list-style-type: none"> toplota + dodatni viri svetloba + dodatni viri
Trajanje testiranja	<ul style="list-style-type: none"> 27 mesecev 	<ul style="list-style-type: none"> 30 mesecev 	<ul style="list-style-type: none"> 14 mesecev
Število analiziranih eksperimentov	<ul style="list-style-type: none"> 129 	<ul style="list-style-type: none"> 151 	<ul style="list-style-type: none"> 28
Učinkovitost regulacije	<ul style="list-style-type: none"> Zadovoljivo sledenje referenčnim vrednostim. Z uporabo dodatnih virov popolno sledenje. 	<ul style="list-style-type: none"> Sledenje referenčnim vrednostim s pogreškom manjšim od ± 300 lx. 	<ul style="list-style-type: none"> Učinkovito sledenje referenčnim vrednostim. Pojav oscilatornega premikanja rolete.
Učinkoviti regulatorji osvetljenosti		<ul style="list-style-type: none"> fuzzy_L1_E fuzzy_L1_F fuzzy_LP1 	

eksperimentov je bil usmerjen v določitev primernih regulacijskih nastavitvev regulatorja osvetljenosti, saj je ta temeljil na izkušnjah in testiranjih in ne kot regulator notranjih temperatur na predhodnih numeričnih simulacijah [Furlan 1999]. Med izvajanjem eksperimentov so bili na testni celici izvedeni trije konceptualni sklopi preizkusov. Prvi sklop je obsegal eksperimente, ki so bili namenjeni določitvi toplotno-optičnih parametrov obnašanja testne celice, v drugem sklopu so se definirale filtrske časovne konstante, v tretjem sklopu testiranj pa so se izvajale nastavitve mehkih regulatorjev z namenom optimiziranja letih. V naslednjih treh poglavjih je predstavljen reprezentativen izbor eksperimentov, ki so bili izbrani med 308 analiziranimi eksperimenti sistema KAMRA z namenom, da prikažejo odzivnost testne celice na zunanje pogoje ter osvetlijo delovanje najuspešnejših regulacijskih nastavitvev, ki bodo uporabljene za nadaljnje delo pri oblikovanju regulatorjev IRsNO. Predstavljeni eksperimentalni rezultati so razdeljeni v tri skupine, te pa predstavljajo značilne elemente regulacije notranjih toplotno-optičnih procesov s spreminjanjem geometrije zunanjega dela transparentnega ovoja stavbe. Ti elementi so sledeči:

- reguliranje toplotnih karakteristik brez obravnavanja aspektov osvetljenosti (analiziranih 129 eksperimentov, predstavljeni 4 karakteristični eksperimenti);
- reguliranje osvetljenosti brez obravnavanja toplotnega vpliva sončnega sevanja (analiziranih 151 eksperimentov, predstavljenih 7 karakterističnih eksperimentov);
- celotna regulacija optično-toplotnega pojava v testni celici s hkratno uporabo tako svetlobne regulacije kot tudi toplotne regulacijske zanke – harmonizirana regulacija (analiziranih 28 eksperimentov, predstavljeni 4 karakteristični eksperimenti).

Osnovne značilnosti in karakteristike poteka dela tako pri testiranjih kot tudi oblikovanju sistema KAMRA so predstavljeni in opisani v pregledni matriki (Preglednica 4.2). Matrika predstavlja celotno obdobje izvajanja testov, iz katerega bodo v naslednjih poglavjih izbrani najbolj karakteristični, informativni ter tudi najuspešnejši primeri eksperimentov. Slednji bodo predstavljeni po zgoraj opisanih korakih, torej najprej eksperimenti s toplotno regulacijsko zanko, nato s svetlobno regulacijsko zanko, na koncu pa bo predstavljeno tudi harmonizirano delovanje sistema. Pred dejanskimi predstavljenimi eksperimenti bodo opisane tudi nastavitve posameznih mehkih regulatorjev. Zaradi velikega števila oblikovanih in uporabljenih regulatorjev za regulacijo osvetljenosti (Preglednica 4.2) bosta v analizi

podatkov predstavljena le najuspešnejša tipa (fuzzy_L1_E in fuzzy_LP1). Vsak od regulatorjev je predstavljen s tremi osnovnimi predstavitvami mehkih regulatorjev, torej s prikazom oziroma definicijami mehkih vhodnih jezikovnih spremenljivk, z matriko odločitev regulatorja ter z lupino rešitev, ki prikazuje prostorsko predstavljene vhodno-izhodne povezave regulatorja.

Analizirani eksperimenti so bili izbrani tako, da predstavljajo vse ključne elemente delovanja predstavljenih in opisanih regulatorjev ter tudi odzivnosti testne celice. Nabor izbranih in preučenih eksperimentov tako zaobjema tudi prosti tek celice, pri katerem je bila roleta popolnoma odprta in neaktivna. Rezultati prostega teka prikazujejo notranje temperaturne in osvetlitvene razmere pod vplivom zunanjih vremenskih danosti brez posegov regulacijskega sistema ter s tem definirajo izhodiščno stanje eksperimentalnega okolja. Pri ostalih eksperimentih, kjer je bil regulacijski sistem aktiven, pa je izbor usmerjen predvsem v demonstriranje uspešnosti posameznih elementov in načinov regulacije. Primeri so izbrani glede na vsebinske kriterije, saj je pozornost posvečena predvsem uspešnosti regulacije v določenih vremenskih pogojih. Glavni kriterij za ocenjevanje je bila zmožnost regulatorja, da sledi definiranemu referenčnemu (želenemu) profilu znotraj odstopanj, ki so še sprejemljiva glede na psihofiziološke zahteve potencialnih uporabnikov. Dodatno je bila ključnega pomena tudi dinamika premikanja senčila in sicer tako pogostnost kot tudi sunkovitost premikov. Pri prehitrih in prepogostih premikih rolete je regulacija kljub izpolnjevanju kriterijev o natančnosti sledenja referenčnemu profilu s stališča uporabnikov izredno moteča ter zato tudi neuspešna.

4.2.1 Eksperimenti s toplotno regulacijsko zanko

Termične procese v testni celici KAMRA je bilo mogoče uravnati na dva načina, in sicer s pomočjo premikov rolete in/ali z notranjimi viri. Regulacija notranje temperature v celici s pozicioniranjem rolete je zagotovljena s pomočjo mehkega regulatorja za zimsko obdobje (**fuzzy_rol_W**) in mehkega regulatorja za poletno obdobje (**fuzzy_rol_S**), razmerje vplivanja obeh regulatorjev na končno pozicijo rolete je zagotovljeno s pomočjo evaluacijske funkcije (glej poglavje 3.2.2). Regulator grelca v testni celici je bil oblikovan kot razširjen mehki PD-regulator (**fuzzyPD_temp**). V nadaljevanju bodo predstavljeni nastavitve mehkih regulatorjev ter eksperimenti s toplotno regulacijsko zanko.

4.2.1.1 Mehki regulator fuzzy_rol_W

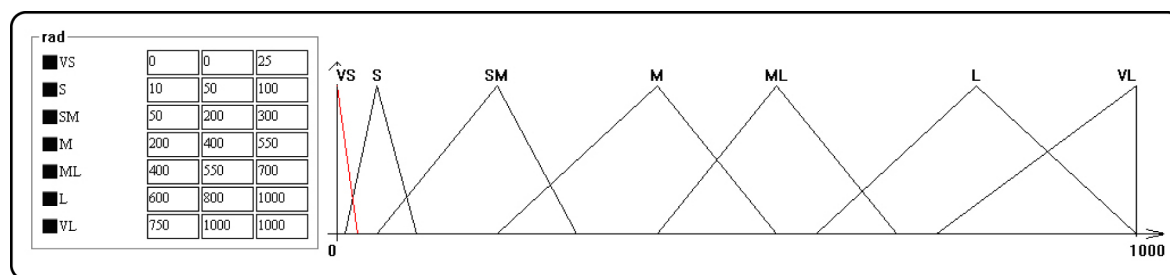
Vhodne veličine fuzzy_rol_W regulatorja:

- globalno sončno sevanje (**FL_global_rad** označeno z oznako **rad** na vmesniku mehkega regulatorja) je definirano na območju od 0 do 1000 W/m². Vhodna spremenljivka je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.7); VS – very small, S – small, SM – small medium, M – medium, ML – medium large, L – large in VL – very large. Na sliki 4.7 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice.
 - razlika med dejansko notranjo (**in_temp_FL**) in želeno notranjo (**Setpoint_temp**) temperaturo. Na vmesniku mehkega regulatorja je veličina označena z oznako **E_temp** in definirana na območju od - 6 do + 6 °C. Vhodna spremenljivka je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.8): LN – large negative, MN – medium negative, SN – small negative, ZE – zero, SP – small positive, MP – medium positive, LP – large positive. Na sliki 4.8 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice.
-

Izhodna veličina fuzzy_rol_W regulatorja:

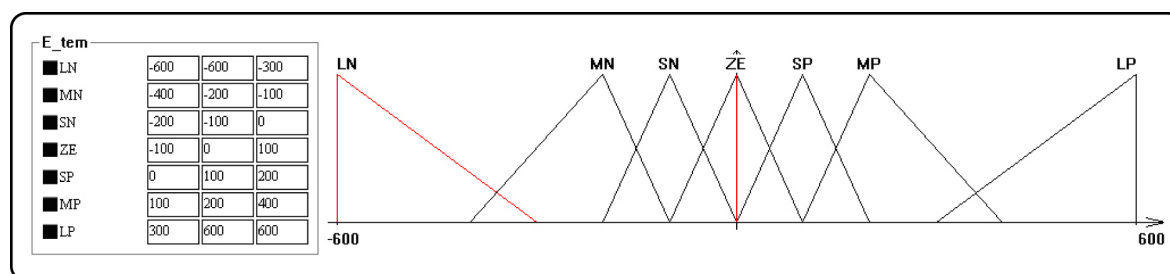
- položaj rolete z oznako **rolet** na vmesniku mehkega regulatorja in definicijskim območjem od 0 do 100 cm.

Pravila odločanja v mehkem regulatorju za regulacijo temperature v času zimskega režima so definirana v obliki logične matrike, ki predstavlja način zapisa ČE – POTEM pravil (Slika 4.9). Izhodni signali regulatorja se potem nahajajo na odgovarjajočem mestu tridimenzionalne prostorske lupine rešitev (Slika 4.10), ki odraža celoten sistem regulacije notranje temperature v celici KAMRA za zimski režim.



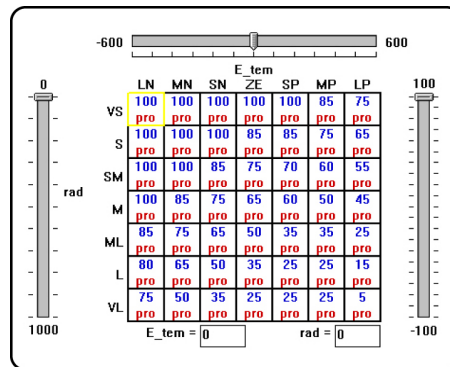
Slika 4.7: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **rad**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/102)

Fig. 4.7: Fuzzy space of input linguistic variable **rad**. The values of linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/102)



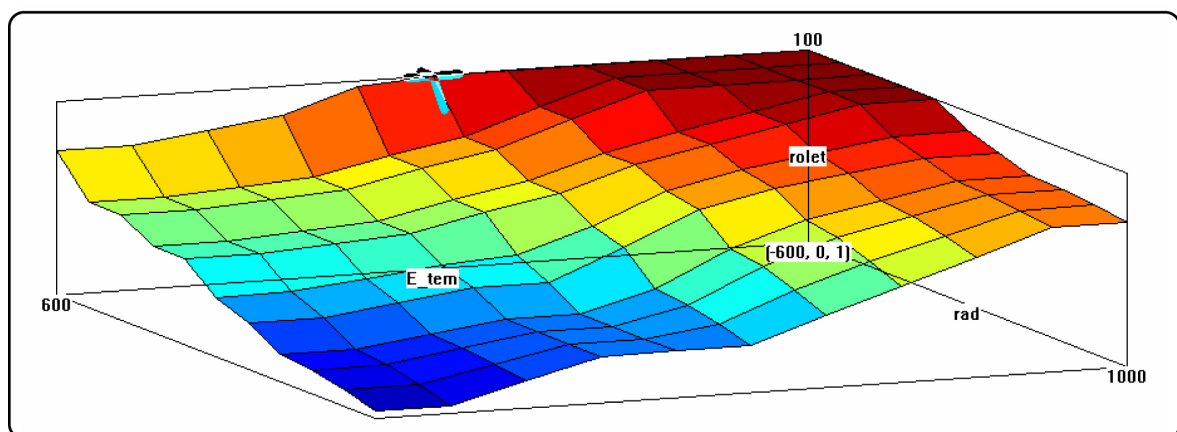
Slika 4.8: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **E_tem**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/102)

Fig. 4.8: Fuzzy space of input linguistic variable **E_tem**. The values of linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/102)



Slika 4.9: Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju temperature za zimski čas. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih **rad** (y os) in **E_tem** (x os) in izhodni veličini **rolet** (z os). Primer pravila: **IF E_tem = LN pro** (izbran logični operator) **rad = VS THEN rolet = 100**. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/103)

Fig. 4.9: Decision matrix of a fuzzy regulator for temperature in the winter time. The matrix represents IF – THEN rules for input parameters **rad** (y axis) and **E_tem** (x axis) and output parameters **rolet** (z axis). Example of a rule: **IF E_tem = LN pro** (chosen logical operator) **rad = VS THEN rolet = 100**. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/103)



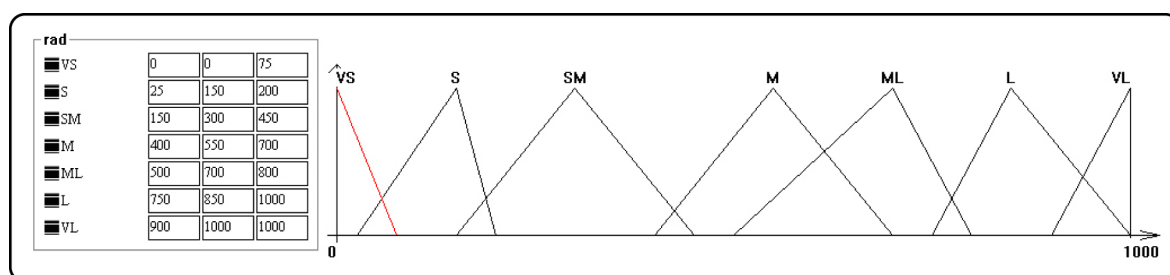
Slika 4.10: Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami **E_tem**, **rad** in **rolet** pri mehkem regulatorju temperature za zimski čas. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)

Fig. 4.10: The shell of solutions is a three-dimensional representation of all input-output relations between **E_tem**, **rad** and **rolet** for the fuzzy regulator of temperatures in the winter time. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)

4.2.1.2 Mehki regulator fuzzy_rol_S

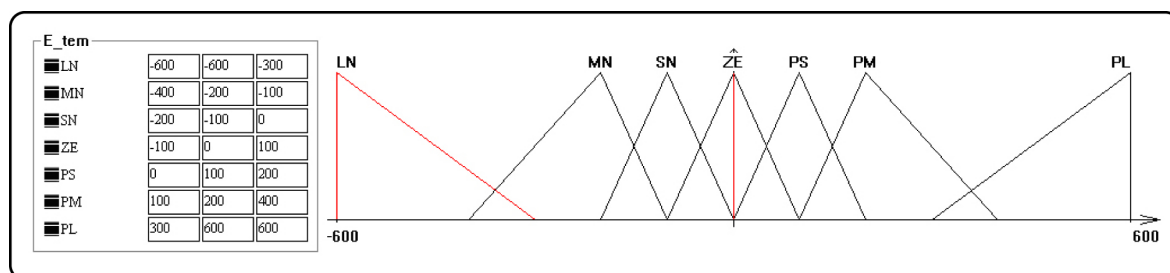
Vhodne veličine fuzzy_rol_W regulatorja:

- globalno sončno sevanje (**FL_global_rad** označeno z oznako **rad** na vmesniku mehkega regulatorja) je definirano na območju od 0 do 1000 W/m². Vhodna spremenljivka je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.11): VS – very small, S – small, SM – small medium, M – medium, ML – medium large, L – large in VL – very large. Na sliki 4.7 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice;
- razlika med dejansko notranjo (**in_temp_FL**) in želeno notranjo (**Setpoint_temp**)



Slika 4.11: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **rad**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)

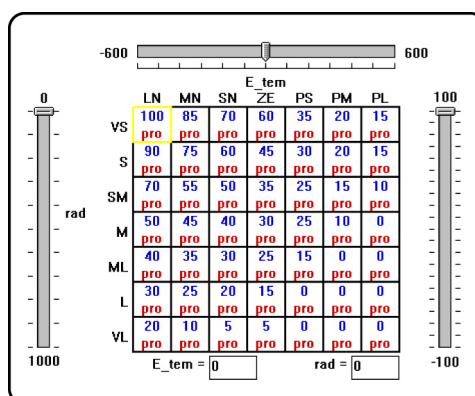
Fig. 4.11: Fuzzy space of input linguistic variable **rad**. The values of the linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)



Slika 4.12: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **E_tem**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)

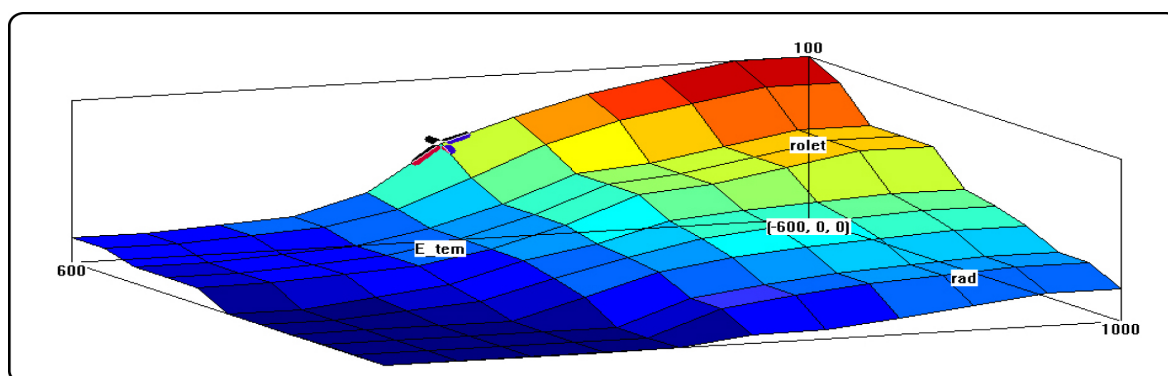
Fig. 4.12: Fuzzy space of input linguistic variable **E_tem**. The values of the linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/104)

temperaturo. Na vmesniku mehkega regulatorja je veličina označena z oznako **E_tem** (Slika 4.12): LN – large negative, MN – medium negative, SN – small negative, ZE – zero, SP – small positive, MP – medium positive, LP – large positive. Na sliki 4.8 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice.



Slika 4.13: Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju temperature za poletni režim. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih **rad** (y os) in **E_tem** (x os) in izhodni veličini **rolet** (z os). (Trobec-Lah, 2003, str.: II/105)

Fig. 4.13: Decision matrix of a fuzzy regulator for temperature in the summer time. The matrix represents IF – THEN rules for input parameters **rad** (y axis) and **E_tem** (x axis) and out put parameters **rolet** (z axis). (Trobec-Lah, 2003, str.: II/105)



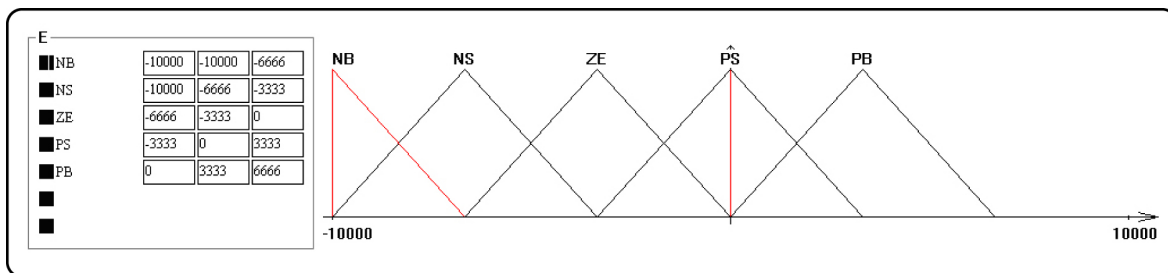
Slika 4.14: Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami **E_tem**, **rad** in **rolet** pri mehkem regulatorju temperature za poletni čas. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/106)

Fig. 4.14: Shell of solutions is a three-dimensional representation of all input-output relations between **E_tem**, **rad** and **rolet** for the fuzzy regulator of temperatures in the summer time. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/106)

Izhodna veličina fuzzy_rol_W regulatorja:

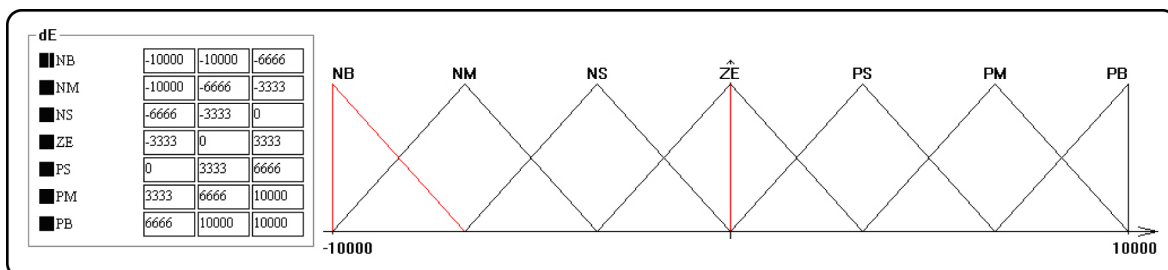
- položaj rolete z oznako **rolet** na vmesniku mehkega regulatorja in definicijskim območjem od 0 do 100 cm

Pravila odločanja v mehkem regulatorju za regulacijo temperature v času zimskega režima so definirana v obliki logične matrike, predstavljene na sliki 4.13. Izhodni signali regulatorja se nahajajo na odgovarjajočem mestu tridimenzionalne prostorske lupine rešitev (Slika 4.14).



Slika 4.15: Mehki vhodni prostor jezikovne spremenljivke **E** regulatorja **fuzzyPD_temp**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s enakostraničnimi trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/108)

Fig. 4.15: Fuzzy space of input linguistic variable **E** of the regulator **fuzzyPD_temp**. The values of the linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/108)



Slika 4.16: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **dE**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s enakostraničnimi trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/108)

Fig. 4.16: Fuzzy space of input linguistic variable **dE**. The values of the linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/108)

4.2.1.3 Mehki regulator fuzzyPD_temp

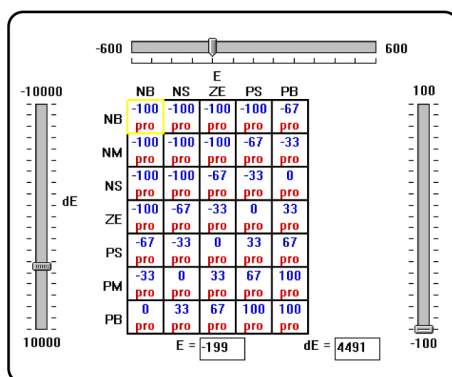
Mehki regulator grelcev v celici KAMRA je zasnovan kot klasičen razširjen PD (proporcionalno-diferencialen) regulator, pri čemer je klasičen regulacijski algoritem zamenjan z mehkim. Takšen regulator deluje klasično s tem, da je mogoče njegovo proporcionalno območje oblikovati nelinearno. Vhodni jezikovni spremenljivki, ki definirata konvencionalne parametre, sta regulacijsko odstopanje (**E**) in njegov odvod (**dE**). Vhodni veličini fuzzyPD_temp regulatorja:

- regulacijska napaka **E**, ki predstavlja razliko med **in_temp_FL** (notranja temperatura) in **Setpoint_temp** (notranja zelena temperatura) (Slika 4.15): NB – negative big, NS – negative small, ZE – zero, PS – positive small, PB – positive big. Na sliki 4.15 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice;
- časovni odvod regulacijskega odstopanja (**dE**) predstavlja časovni korak razlike med merjeno in zeleno notranjo temperaturo (Slika 4.16): NB – negative big, NM – negative medium, NS – negative small, ZE – zero, PS – positive small, PM – positive medium, PB – positive big. Na sliki 4.16 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice.

Izhodna veličina fuzzyPD_temp regulatorja:

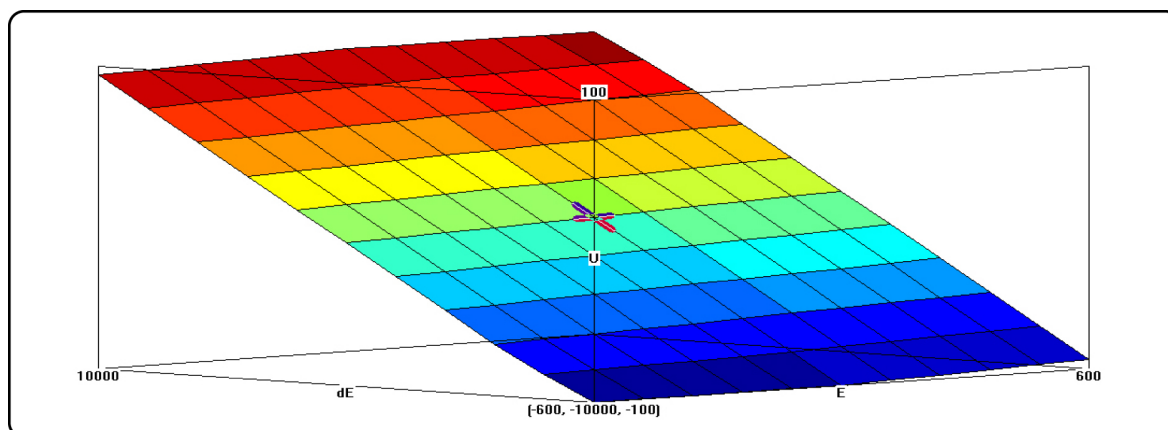
- izhodni signal je regulirna veličina (**U**) regulatorja, ki upravlja z delovanjem grelcev.

Pravila odločanja regulatorja **fuzzyPD_temp** so podana v logični matriki (Slika 4.17), izhodni signal pa je regulirna veličina **U**, ki je prostorsko predstavljena na lupini rešitev (Slika 4.18).



Slika 4.17: Logična matrika odločanja pri mehkem **fuzzyPD_temp**. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih **E** (x os) in **dE** (y os). (Trobec-Lah, 2003, str.: II/109)

Fig. 4.17: Decision matrix of a fuzzy regulator **fuzzyPD_temp**. The matrix represents IF – THEN rules for input parameters **E** (x axis) and **dE** (y axis). (Trobec-Lah, 2003, str.: II/109)



Slika 4.18: Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami **E**, **dE** in **U** pri mehkem **fuzzyPD_temp**. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/109)

Fig. 4.18: Shell of solutions is a three-dimensional representation of all input-output relations between **E**, **dE** and **U** for the **fuzzyPD_temp** regulator. (Trobec-Lah, 2003, str.: II/109)

4.2.1.4 Eksperimenti

Predstavljeni eksperimenti so reprezentativen izbor 129 analiziranih eksperimentov s toplotno regulacijsko zanko sistema KAMRA, ki so bili izvedeni v časovnem obdobju 27 mesecev. Predstavljeni primeri delovanja sistema so izbrani z namenom, da ilustrirajo vse ključne

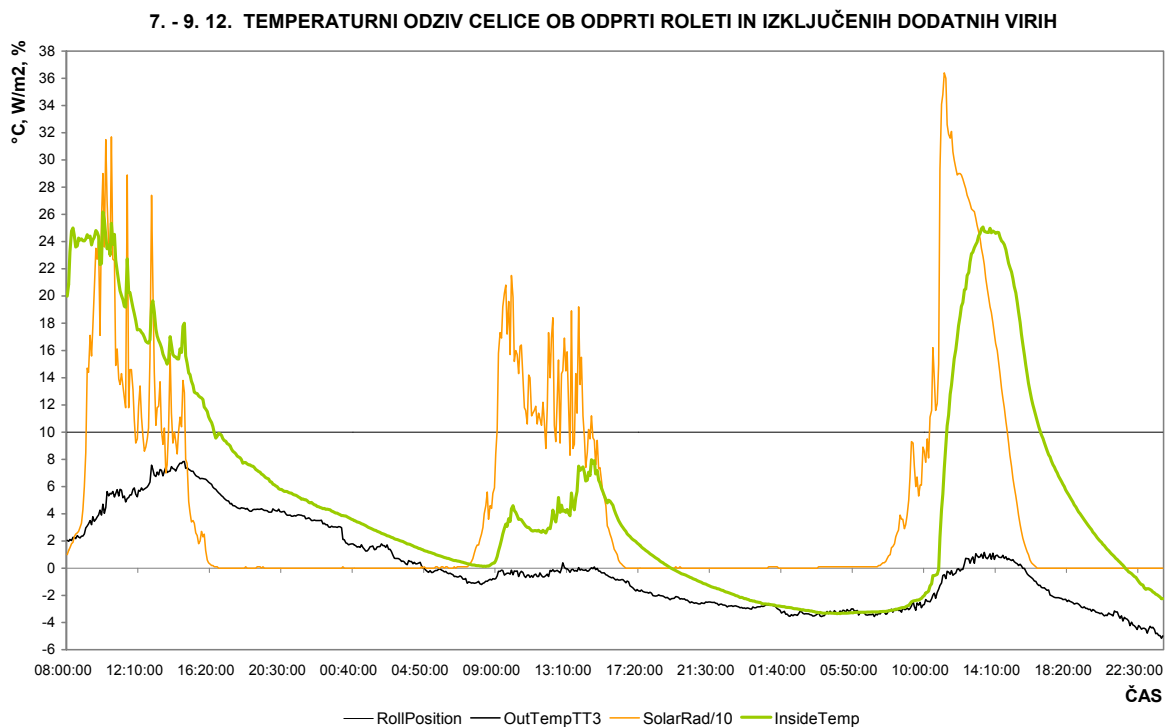
elemente delovanja uporabljenih mehkih regulatorjev ter tudi odzivanja regulacijskega sistema na realne vremenske pogoje in zastavljene notranje želene vrednosti.. Eksperimenti so predstavljeni grafično v obliki diagramov s prikazanimi trenutnimi vremenskimi pogoji ter odzivi aktuatorjev regulacijskega sistema, primer tabelaričnega zapisa eksperimenta pa se nahaja v prilogi C. Dodatne opombe ali razlage o poteku eksperimenta so podane v spremnem tekstu. V diagramih uporabljene oznake in njihov pomen so tolmačeni v preglednici 4.3.

Preglednica 4.3: Pomen na diagramih označenih in predstavljenih veličin.
Table 4.3: The meaning of abbreviations used in the diagrams.

Oznaka	Pomen
SPTemp	Želena notranja temperatura
InsideTemp	Notranja merjena temperatura
OutTempTT3	Zunanja merjena temperatura
SolarRadtRT1	Globalno merjeno sončno sevanje
RollPosition	Položaj rolete (100 % = 100 cm –odprta roleta, 0 % = 0 cm –zaprta roleta)
outRegHeat	Delovanje grelcev (izraženo v % delovne moči)
outRegVent	Delovanje ventilatorja (izraženo v % delovne moči)

EX-TEMP-097: Temperaturni odziv testne celice ob odprti roleti in izključenih dodatnih virih (7.–9. 12.)

- Roleta je konstantno popolnoma odprta (RollPosition = 100 %).
- Notranji viri (grelci in ventilator) so ves čas izključeni (outRegHeat = 0 %, outRegVent = 0 %).
- Eksperiment je potekal v času pozne jeseni (zgodnji december) in je bil namenjen spoznavanju in prikazu toplotnega odziva testne celice, če nanjo ne vpliva regulacijski sistem KAMRA.
- Zunanja temperatura zraka se je v času trajanja eksperimenta gibala v območju od 8.0 °C do -5.0 °C.
- Razpoložljivo sončno sevanje je doseglo maksimalno vrednost 360 W/m² (tretji dan).
- Vreme je bilo pretežno oblačno, kar je razvidno iz nazobčane oblike krivulje sončnega sevanja (Slika 4.19).



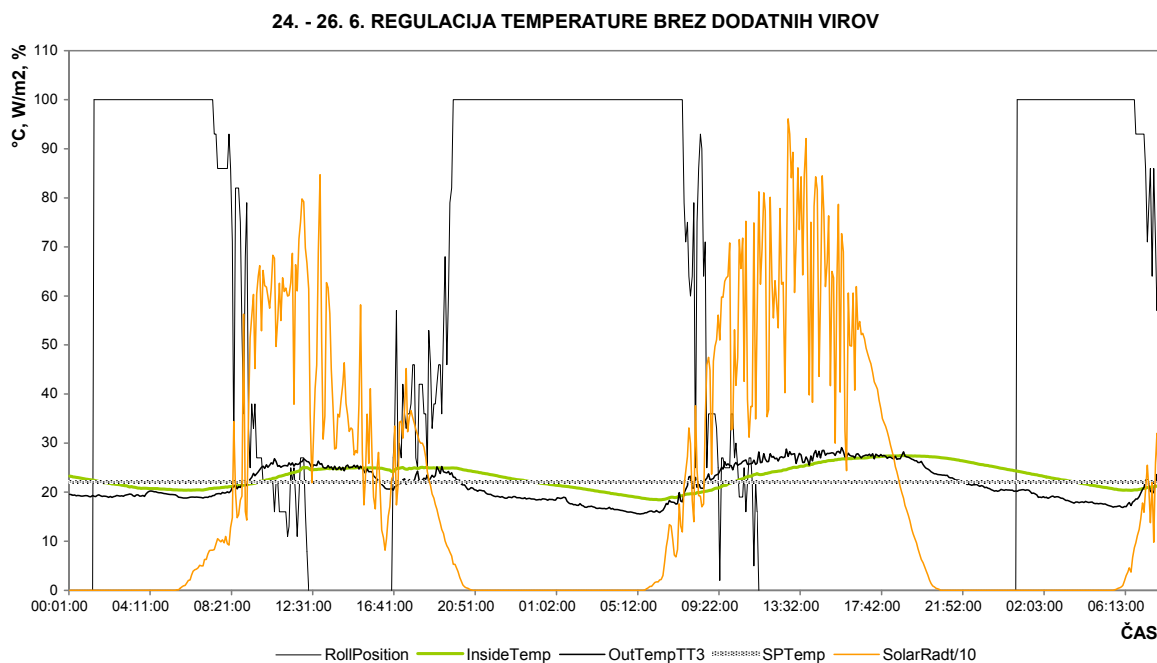
Slika 4.19: Eksperiment z odprto roletno in izključenimi notranjimi viri prikazuje temperaturni odziv notranjosti testne celice.

Fig. 4.19: The experiment with the roller blind fully open and additional internal sources turned off illustrates interior temperature response of the test cell.

- Slika 4.19, ki prikazuje zabeležene vrednosti spremljanih količin v času eksperimenta, kaže na relativno hiter temperaturni odziv testne celice, saj se notranji zrak pod vplivom neposrednega sončnega sevanja skozi nezastrito okno zelo hitro ogreje. Zaradi zelo majhne akumulacijske mase in nizke toplotne izolativnosti ovoja celice se le-ta tudi zelo hitro ohladi, ko nanjo ne vpliva neposredno sončno sevanje. Tako notranja temperatura zraka doseže v času, ko je celica obsevana s sončnim sevanjem tudi vrednosti do 25.0 °C pri zunanji temperaturi zraka 1.2 °C. V nočnem času se celica zelo hitro ohladi, kar pomeni, da se notranje temperature že v eni noči približajo ali izenačijo s temperaturo zunanjega zraka (Slika 4.19 – noč med drugim in tretjim dnevom trajanja eksperimenta).
 - Iz pričujočega eksperimenta je razvidna zelo hitra temperaturna odzivnost testne celice na zunanje pogoje (tako na temperaturo zraka kot tudi na sončno sevanje). Razviden je zelo velik vpliv neposrednega sončnega sevanja na notranjo temperaturo zraka, kar je posledica majhnega volumna in velike transparentne odprtine v ovoju. Podobno se zaradi majhne akumulacijske mase in nizke toplotne izolativnosti ovoja notranjost celice tudi zelo hitro ohladi. Takšen odziv sicer ni primerljiv z realnimi stavbami, saj akumulacijska masa in razmerje med volumnom celice ter površino zasteklitve nista primerljiva z dejanskimi stavbami. Kljub vsemu so bile takšne gradbeno-fizikalne značilnosti testne celice zelo dobrodošle pri izvajanju eksperimentov regulacije notranjih temperaturnih pogojev, saj so se vplivi zunanosti zelo hitro in sunkovito odražali v notranjosti testne celice KAMRA. Tako sta bila dosežena hitrejši termični odziv celice ter posledično hitrejše izvajanje eksperimentov
-

EX-TEMP-019: Regulacija notranje temperature zraka s pozicioniranjem roloja brez vključenih dodatnih virov (24.–26. 6.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo regulatorja temperature.
- Notranji viri (grelci in ventilator) so ves čas izključeni ($\text{outRegHeat} = 0\%$, $\text{outRegVent} = 0\%$).
- Profil referenčne vrednosti notranje temperature zraka (SPTemp) je konstanten in nastavljen na $22.0\text{ }^\circ\text{C}$.
- Eksperiment je potekal v začetku poletja in je bil namenjen spoznavanju možnosti preprečevanja pregrevanja notranjosti testne celice v času visokih zunanjih temperatur zraka in nivojev sončnega sevanja. Dodatno je bila preizkušena zmožnost regulacijskega sistema, da sledi notranjemu referenčnemu temperaturnemu profilu samo s pozicioniranjem senčila.
- Dnevna zunanja temperatura zraka je v času eksperimenta dosegla vrednosti do $29.0\text{ }^\circ\text{C}$, medtem ko so najnižje vrednosti v nočnem času segale do $15.8\text{ }^\circ\text{C}$.
- Nivo sončnega sevanja je dosegel v času trajanja eksperimenta vrednosti do 960



Slika 4.20: Regulacija notranje temperature z pozicioniranjem rolete brez vključenih dodatnih virov.

Fig. 4.20: Control of internal temperature with the positioning of the roller blind.

W/m^2 , kljub vsemu pa nazobčanost grafa sončnega sevanja kaže na zelo spremenljive vremenske pogoje z relativno hitro spreminjajočo se oblačnostjo (Slika 4.20).

- Zaradi visokih zunanjih temperatur zraka in hitre odzivnosti celice regulacijski sistem s pomočjo premikanja roloja ni uspel držati notranje temperature zraka v okviru zelenih odstopanj od referenčne vrednosti ± 2.5 °C. Temperature notranjega zraka so čez dan dosegale vrednosti do 27.0 °C kljub popolnoma zastrti odprtini, ponoči pa se je notranja temperatura zraka spustila do 18.5 °C. Zgoraj opisani pojav je bil zaradi hitre toplotne odzivnosti notranjega prostora testne celice pričakovan in zato ne predstavlja slabosti regulacije. Iz delovanja regulacijskega sistema, prikazanega na sliki 4.20, je razvidno, da sistem s pravilnim senčenjem doseže zaželen efekt temperaturnega zamika.
- Eksperiment je potrdil upravičenost ter nujnost primerne senčenja transparentnih odprtin stavbnega ovoja v času visokih temperatur zunanjega zraka in ob prisotnosti močnega sončnega sevanja. Ključnega pomena je, da se senčila zaprejo, preden se notranji prostor pregreje.

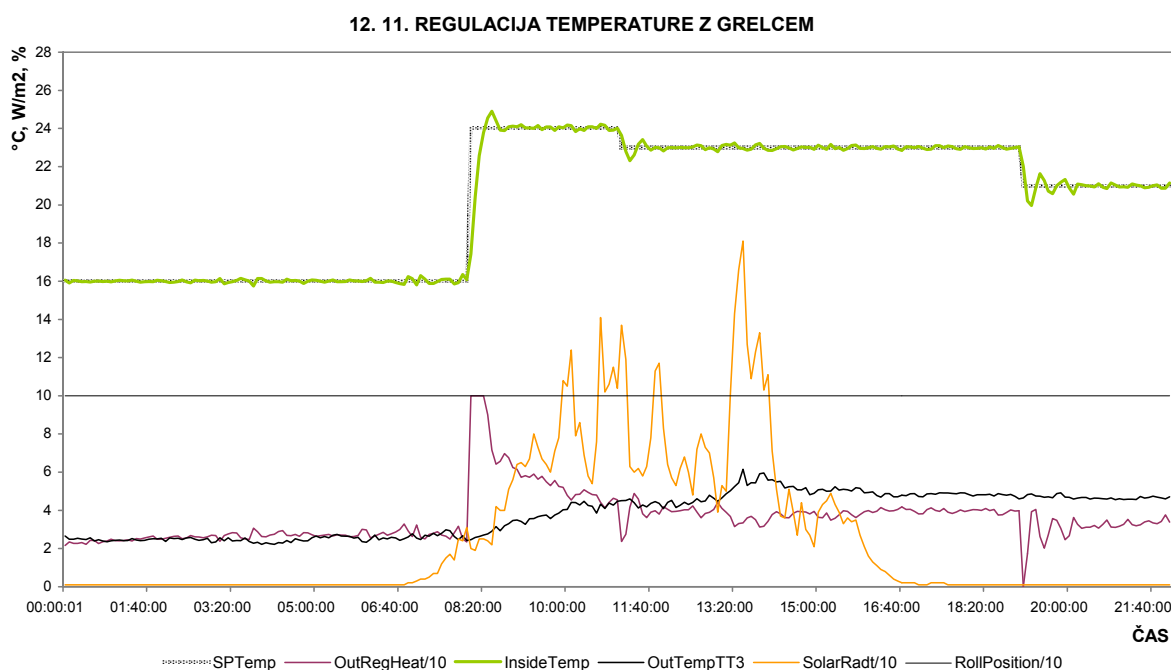
Preglednica 4.4: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-TEMP-019.

Table 4.4: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-TEMP-019.

EX-TEMP-019 - ocena delovanja regulacije	
Sledenje referenčnemu profilu	DOBRO <ul style="list-style-type: none"> • Povprečna maksimalna odstopanja $\pm 2.5K$. • Nastopanje pregrevanja je posledica zasnove celice.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	ZADOVOLJIVO <ul style="list-style-type: none"> • Relativno počasni odzivi na hipne spremembe v nivoju sončnega sevanja.
Dinamika premikov rolete	DOBRO <ul style="list-style-type: none"> • Okvirno 15 premikov na uro.
Delovanje dodatnih virov:	
Grelci	
Ventilator	
Opombe	<ul style="list-style-type: none"> • Popolna zastrtost okna v poletnih mesecih zaradi preprečevanja pregrevanja ni sprejemljiva iz gledišča uporabe prostora.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-TEMP-098: Regulacija notranje temperature zraka z uporabo grelcev pri popolnoma odprti roleti (12. 11.)

- Roleta je konstantno popolnoma odprta (RollPosition = 100 %).
- Delovanja grelca je regulirano z regulatorjem sistema KAMRA. Ventilator je izključen (outRegVent = 0 %).
- Profil referenčne vrednosti notranje temperature zraka (SPTemp) se v odvisnosti od časa stopničasto spreminja. Referenčne vrednosti so nastavljene na intervalu od 16.0 do 24.0 °C.
- Eksperiment je bil namenjen preizkusu zmožnosti uravnavanja notranje temperature zraka po poljubnem referenčnem profilu z uporabo samo notranjih grelcev. Zaradi izločitve vpliva pozicije senčila na notranjo temperaturo zraka je bila le-ta ves čas v popolnoma odprti poziciji.
- Temperatura zunanjega zraka je relativno konstantna skozi celoten dan, saj se giblje v razponu od 2.2 (noč) do 6.2 °C (dan).



Slika 4.21: Regulacija notranje temperature z notranjimi viri (grelci) ob konstantno odprti roleti.

Fig. 4.21: Control of internal temperature with the activation of internal sources (heaters) – roller blind was open.

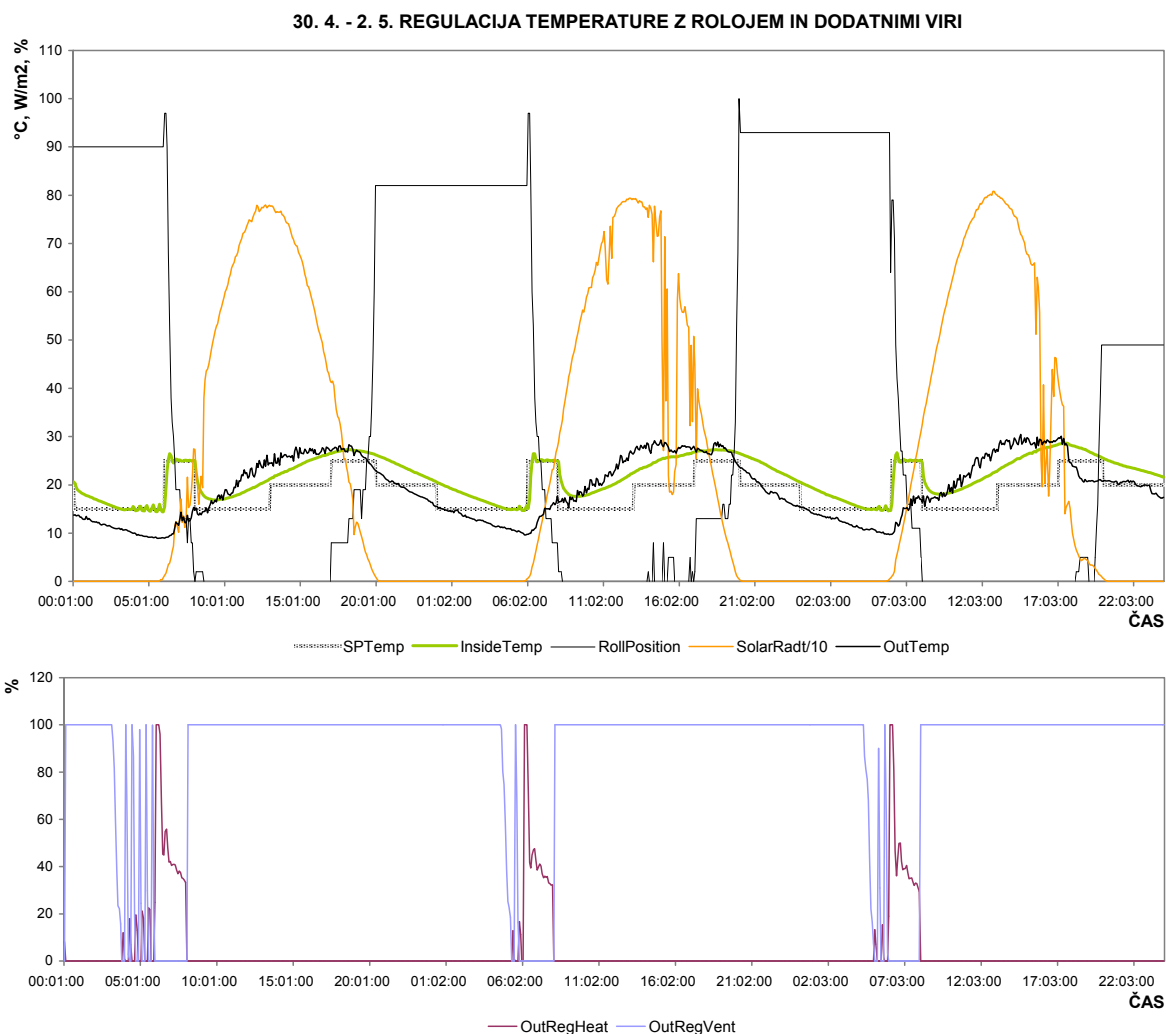
- Sončno sevanje je relativno šibko, kar kaže na oblačno vreme s spreminjajočim se nivojem oblačnosti (nazobčana krivulja intenzitete sončnega sevanja). Maksimalna vrednost sončnega sevanja (180 W/m^2) je bila dosežena zgodaj popoldne, minimalne vrednosti pa se tekom dneva spustijo tudi do 39 W/m^2 .
- Regulacija notranje temperature zraka s pomočjo grelcev je bila popolnoma uspešna, saj je regulator uspešno in zelo natančno sledil danemu referenčnemu profilu pri danih zunanjih vremenskih pogojih (relativno konstantna zunanja temperatura zraka in nizek nivo sončnega sevanja). Grelci so večino časa delovali s 40 % delovne moči, razen pri spremembah v profilu referenčne vrednosti, kjer so delovali s 100 % močjo ali pa so se za trenutek popolnoma izključili (Slika 4.21).

Preglednica 4.5: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-TEMP-098.
Table 4.5: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-TEMP-098.

EX-TEMP-098 - ocena delovanja regulacije	
Sledenje referenčnemu profilu	ODLIČNO • Skoraj popolno sledenje referenčnemu profilu.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	ODLIČNO • Zelo hiter odziv na spremembe v referenčnih vrednostih.
Dinamika premikov rolete	
Delovanje dodatnih virov:	
Grelci	ODLIČNO • Grelci zelo učinkovito uravnavajo notranje temperaturne pogoje.
Ventilator	
Opombe	• Pri predstavljenem eksperimentu ventilator oziroma hlajenje s prezračevanjem ni bilo aktivno.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-TEMP-056: Regulacija notranje temperature zraka s pozicioniranjem rolete in aktiviranjem notranjih virov (30. 4.–2. 5.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo mehkega regulatorja temperature.
- Notranji viri (grelci in ventilator) so aktivni in se vključujejo glede na ukaze regulacijskega sistema.
- Prednostna je bila regulacija notranje temperature s pozicioniranjem rolete, zato sta se grelec ali ventilator vključila šele po določenem času, ko notranja referenčna



Slika 4.22: Diagrama prikazujeta delovanje regulacijskega sistema KAMRA v času eksperimenta v poznem pomladnem času ob regulaciji notranje temperature zraka s pozicijo rolete kot tudi aktivacijo ventilatorja in grelca.

Fig. 4.22: A diagram of the KAMRA system functioning in the late spring time. Internal temperature was regulated by positioning of the roller blind and internal sources.

vrednost temperature ni bila dosežena s pomočjo senčenja transparentne odprtine.

- Sočasno delovanje ventilatorja in grelcev ni dovoljeno.
- Profil referenčne vrednosti notranje temperature zraka (SPTemp) se v odvisnosti od časa stopničasto spreminja. Referenčne vrednosti so nastavljene na intervalu od 15.0 do 25.0 °C.
- Namen eksperimenta v času pozne pomladi je bil preizkusiti možnosti delovanja regulacijskega sistema KAMRA pri sledenju notranjemu temperaturnemu referenčnem profilu in preprečevanju pregrevanja notranjosti celice s pozicioniranjem senčila in uporabo grelcev ter ventilatorja.
- Zunanje temperature zraka so v treh dneh dosegle maksimalne vrednosti do 30.0 °C ponoči pa so se temperature spustile do minimalne vrednosti 9.0 °C. Dnevni 24-urni temperaturni nihaj je tako znašal do 21.0 °C.
- Vreme je bilo v vseh treh dneh izrazito sončno z le nekaj osamele oblačnosti, ki je vidna v nekoliko nazobčani krivulji neposrednega sončnega sevanja na sliki 3.20. Maksimalne vrednosti neposrednega sončnega sevanja so segale do 800 W/m².
- Eksperiment je v vseh treh dneh pokazal, da je regulator zmožen uravnati notranjo temperaturo zraka znotraj sprejemljivih odstopanj od referenčne vrednosti, tako notranja temperatura zraka ni nikoli preseгла odstopanj, večjih od ± 2 K okoli profila

Preglednica 4.6: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-TEMP-056.
 Table 4.6: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-TEMP-056.

EX-TEMP-056 - ocena delovanja regulacije	
Sledenje referenčnemu profilu	DOBRO • Skoraj popolno sledenje referenčnemu profilu.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	DOBRO • Sprejemljiva dinamika odzivnosti sistema glede na hitrost termičnih procesov.
Dinamika premikov rolete	DOBRO • Roleta je večino časa skoraj popolnoma zaprta.
Delovanje dodatnih virov:	
Grelci	ODLIČNO • Grelci omogočajo hiter dvig notranje temperature zraka.
Ventilator	NEZADOVOLJIVO • Zaradi premajhne kapacitete ventilator ni sposoben učinkovito hladiti notranjosti testne celice.
Opombe	• Sistem je skozi vse tri dni omogočal zadovoljive notranje temperaturne pogoje.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

referenčne vrednosti. Z diagrama na sliki 4.22 je razvidno, da sledenja referenčnemu temperaturnemu profilu nikakor ne bi bilo mogoče doseči le s pozicioniranjem senčila, saj je moral ventilator delovati skoraj med celotnim obdobjem trajanja eksperimenta. Iz pričujočega eksperimenta je zelo lepo razvidno, da se testna celica KAMRA zelo hitro pregreje, kar posledično privede do potrebe po močnem in konstantnem hlajenju s prezračevanjem. Takšnega odziva notranjega bivalno-delovnega okolja v realnih stavbah sicer ni pričakovati, kaže pa možnost, da se to lahko zgodi po več dneh sončnega in vročega vremena (poletni meseci) ali pa pri stavbah z velikimi zastekljenimi površinami, ki so izpostavljene sončnemu sevanju.

4.2.1.5 Ocena uspešnosti regulacije temperaturnih pogojev

Analiza eksperimentov s toplotno regulacijsko zanko sistema KAMRA je pokazala na uspešnost regulacije temperaturnih procesov z že začetnimi nastavitvami regulatorjev, kar je bilo tudi pričakovati, saj so bile le-te osnovane na simulacijah, izvedenih v okolju Matlab/SIMULINK [Furlan 1999]. Zaradi geometrije in sestave ovoja testne celice je ta težila k hitremu ogrevanju (pregrevanju) in ohlajanju pri spreminjanju zunanjih vremenskih pogojev. Pričakovano se je pojavila nezmožnost sistema, da bi v poznih pomladnih, poletnih in zgodnjih jesenskih mesecih uspel vzdrževati notranje temperature znotraj zelenih vrednosti, saj se je celica pregrevala kljub popolnoma zasenčenemu oknu in aktivnemu ventilatorju. Tudi pri ogrevanju celice (zimski meseci) se je izkazalo, da se le-ta zelo hitro segreje če je na voljo neposredno sončno sevanje, ki ogreje notranjost celice. Oba pojava, ki sta bila v primeru testne celice zelo izrazita, bi v realni stavbi potekala veliko manj izrazito, predvsem pa bi bil potreben daljši čas za nastanek podobnih notranjih pogojev. Kljub temu lahko iz odziva testne celice sklepamo na potek ter posledično način regulacije temperaturnih pogojev bivalno-delovnega okolja v realnih stavbah s predpogojem, da se upošteva manjša izrazitost dinamike procesa, ki je zelo odvisna od značilnosti obravnavane stavbe. V preglednici 4.7 so prikazani povzetki analize eksperimentov toplotne regulacijske zanke sistema KAMRA. Ocenjeni so pristopi in posamezni elementi regulacije temperaturnih pogojev z osnovnimi spoznanji o učinkovitosti razvitih regulacijskih pravil sistema.

Pri prenosu regulacijskih nastavitvev in spoznanj o načinu vodenja notranjega okolja iz toplotne regulacije sistema KAMRA na sistem IRsNO je potrebno predvsem opozoriti, da zaradi specifik stavbe FGG oziroma kabineta KSKE III/1 neposreden prenos ni mogoč, je pa mogoče z upoštevanjem nekaj osnovnih smernic uporabiti nastavitve sistema KAMRA za izhodišče in osnovo pri optimizaciji nastavitvev sistema IRsNO.

- Vpliv sončnega sevanja na ogrevanje notranjega prostora kabineta KSKE III/1 bo manj izrazit, saj ima objekt večjo akumulacijsko maso ter velik toplotni ponor v sosednjih prostorih.

Preglednica 4.7: Ocena različnih načinov reguliranja notranjih temperaturnih pogojev v testni celici KAMRA.

Table 4.7: Evaluation of different approaches to the control of internal temperature conditions in the test cell.

REGULACIJA NOTRANJIH TEMPERATUR ZRAKA Z:			
	ROLETO	DODATNIMI VIRI	ROLETO IN DODATNIMI VIRI
Sledenje referenčnemu profilu	DOBRO • Povprečna maksimalna odstopanja $\pm 3K$. • Pojav večjih odstopanj pri izrazito visokih zunanjih temperaturah.	ODLIČNO • Sledenje referenčnemu profilu je skoraj popolno.	ODLIČNO • Dodatni viri omogočajo boljšo natančnost pri sledenju referenčnemu profilu.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	ZADOVOLJIVO • Zaradi dinamike temperaturnih procesov so odzivi na hipne spremembe relativno počasni.	ODLIČNO • Pri delovanju grelcev. ZADOVOLJIVO • Pri delovanju ventilatorja.	ODLIČNO • Dodatni viri omogočajo večjo odzivnost sistema.
Dinamika premikov rolete	DOBRO • Okvirno 10 do 15 premikov na uro.		DOBRO • Manj kot 10 premikov na uro.
Delovanje dodatnih virov:			
	Grelci	ODLIČNO	ODLIČNO
	Ventilator	NEZADOVOLJIVO • Ventilator ima premajhno kapaciteto.	NEZADOVOLJIVO • Ventilator ima premajhno kapaciteto.
Opombe	• V času zelo vročih poletnih dni se kljub popolni zastrtosti okna celica močno pregreje.	• Vgrajen ventilator ima premajhno kapaciteto. • Hlajenje s pomočjo prezračevanja deluje samo v primeru, ko so zunanje temperature nižje od notranjih.	• Uporaba dodatnih virov omogoča skrajšanje odzivnega časa sistema na hipne spremembe.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično			

- Razmerje med volumnom prostora in površino zasteklitve je v primeru testne celice 1 : 1 pri kabinetu KSKE pa je kar 14.3 : 1 kar pomeni, da bo sončno sevanje precej manj vplivalo na segrevanje prostora kot pri celici. Posledično se poveča tudi pomembnost ogrevalnega sistema ter dovajanja dodatne toplotne energije.
- Nameščen ogrevalno-hladilni sistem ni primerljiv z grelci v KAMRI, saj ima drugačno dinamiko segrevanja in ohlajanja, najpomembnejša pa je razlika v odzivnem času, ki je pri radiacijskem ogrevanju veliko daljši.
- Zaradi orientacije zasteklitve prostora kabineta KSKE je vpliv sončnega sevanja na notranjo temperaturo prostora možen le v popoldanskih urah, kar dodatno zmanjšuje pričakovan vpliv solarnih pritokov na ogrevanje prostora.
- Ker gre v primeru prostora kabineta KSKE za prostor, ki ima dokaj enostavno določljiv urnik zasedenosti, je smiselno v sistem regulacije vpeljati urnike, ki okvirno določajo delovanje sistema.

4.2.2 Eksperimenti s svetlobno regulacijsko zanko

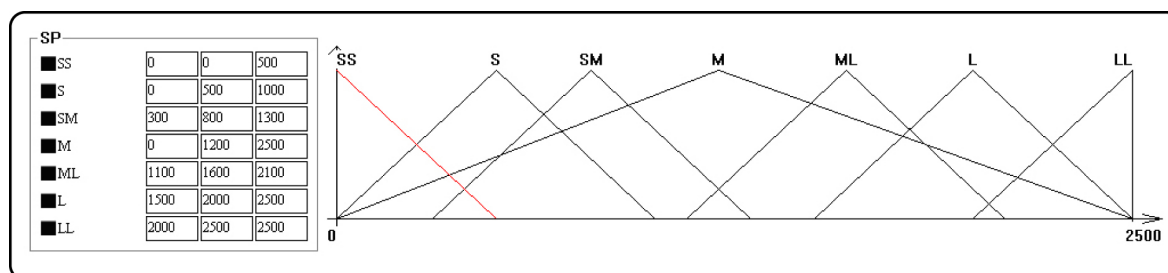
Regulacija notranje osvetljenosti v testni celici KAMRA je vzpostavljena z uravnavanjem oziroma s spreminjanjem geometrije transparentnega dela ovoja. Spreminjanje geometrije odprtine je bilo doseženo s pomikanjem rolete med dvema končnima pozicijama, ki sta definirani s popolnoma odprto (100 %) ali popolnoma zaprto (0%) roletom. Roleta je krmiljena z mehkim regulatorjem osvetljenosti glede na trenutno notranjo osvetljenost in želeno referenčno notranjo osvetljenost.

V nadaljevanju bosta predstavljena dva mehka regulatorja osvetljenosti (**fuzzy_L1_E** in **fuzzy_LP1**), ki sta se z eksperimenti izkazala kot najučinkovitejša pri regulaciji notranje osvetljenosti. Oba sta bila razvita po iteracijskem postopku in sta plod več vmesnih razvojnih faz mehkih regulatorjev osvetljenosti testne celice KAMRA [Trobec-Lah 2003]. Cilj iteracijskega postopka je bil razvoj mehkega regulatorja, ki bi bil zmožen s pomočjo premikanja rolete regulirati notranjo osvetljenost v okvirih zastavljenega tolerančnega območja (± 300 lx) okoli referenčnega profila. Kot dodaten kvalitativen kriterij pri izbiri primerne regulatorja je bila tudi želja po regulatorju, ki bi bil sposoben doseči zadan cilj s čim manj za uporabnike motečimi premiki rolete.

4.2.2.1 Mehki regulator fuzzy_L1_E

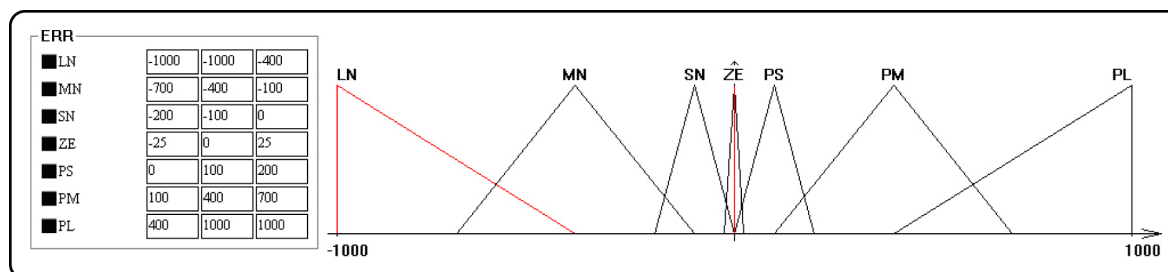
Vhodne veličine fuzzy_L1_E regulatorja:

- zelena (referenčna) notranja osvetljenost testne celice (**SP_light**) je označena z oznako **SP** na vmesniku mehkega regulatorja ter definirana na območju od 0 do 2500 lx. Vhodna jezikovna spremenljivka **SP** je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.23): SS – small small, S – small, SM – small medium, M – medium, ML – medium large, L – large in LL – large large. Na sliki 4.23 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice;
- razlika med merjeno notranjo osvetljenostjo (**FL_light**) in zeleno notranjo



Slika 4.23: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **SP**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)

Fig. 4.23: Fuzzy space of input linguistic variable **SP**. The values of linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)



Slika 4.24: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **ERR**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)

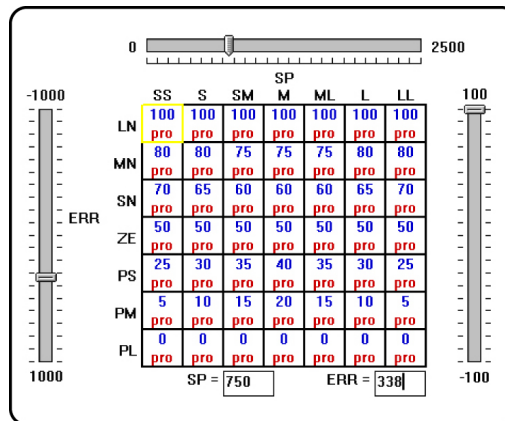
Fig. 4.24: Fuzzy space of input linguistic variable **ERR**. The values of linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)

osvetljenostjo (**SP_light**). Na vmesniku mehkega regulatorja je veličina označena z oznako **ERR** in definirana na območju od - 1000 do + 1000 lx. Spremenljivka je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.24): LN – large negative, MN – medium negative, SN – small negative, ZE – zero, SP – small positive, MP – medium positive, LP – large positive. Na sliki 4.24 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice.

Izhodna veličina fuzzy_L1_E regulatorja:

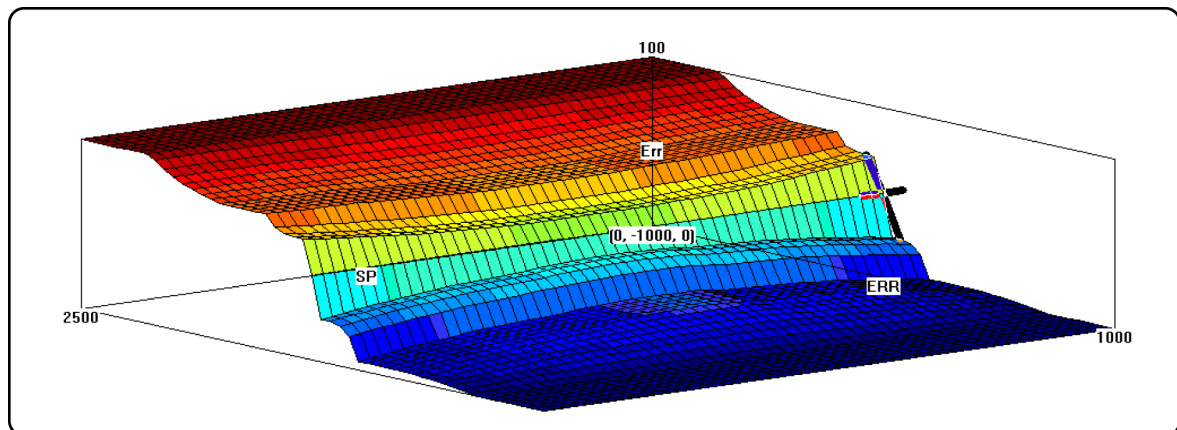
- Izhodna vrednost regulatorja je položaj rolete z oznako **Err** na vmesniku mehkega regulatorja in z definicijskim območjem od 0 do 100 cm. Vrednost spremenljivke **Err** oziroma pozicija rolete je ostra vrednost.

Pravila odločanja v mehkem regulatorju za regulacijo osvetljenosti so definirana v obliki logične matrike, ki predstavlja način zapisa ČE – POTE M pravil (Slika 4.25). Vsi izhodni signali regulatorja se potem nahajajo na odgovarjajočem mestu tridimenzionalne prostorske lupine rešitev (Slika 4.26), ki odraža celoten sistem regulacije notranje osvetljenosti v testni celici.



Slika 4.25: Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju osvetljenosti testne celice. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih **ERR** (y os) in **SP** (x os) in izhodni veličini **Err**. Primer pravila: **IF SP = SS pro** (izbran logični operater) **ERR = MN THEN Err = 80**. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/41)

Fig. 4.25: Decision matrix of fuzzy regulator of illumination. Matrix represents IF – THEN rules for input parameters **ERR** (y axis) and **SP** (x axis) and output parameters **Err** (z axis). Example of a rule: **IF SP = SS pro** (chosen logical operator) **ERR = MN THEN Err = 80**. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/41)



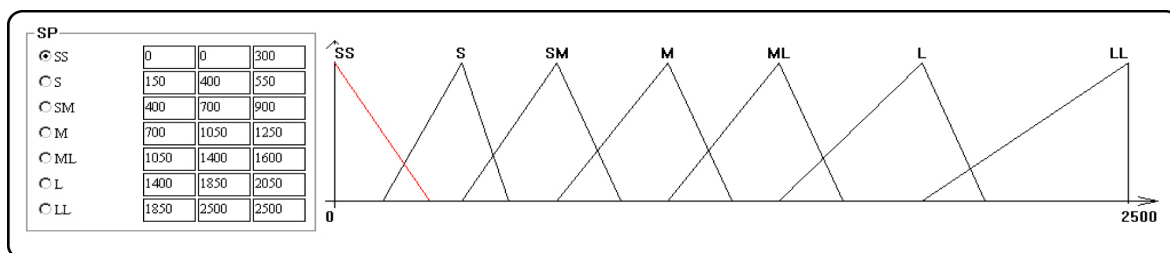
Slika 4.26: Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami **SP**, **ERR** in **Err** pri mehkem regulatorju osvetljenosti L1_E. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)

Fig. 4.26: Shell of solutions is a three-dimensional representation of all input-output relations between **SP**, **ERR** and **Err** for the fuzzy regulator of illumination L1_E. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/44)

4.2.2.2 Mehki regulator fuzzy_LP1

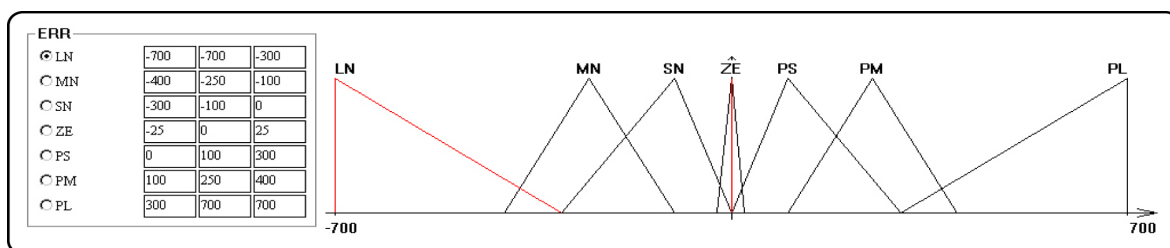
Vhodne veličine fuzzy_LP1 regulatorja:

- zelena (referenčna) notranja osvetljenost testne celice (**SP_light**) je označena z oznako **SP** na vmesniku mehkega regulatorja ter definirana na območju od 0 do 2500 lx. Vhodna jezikovna spremenljivka **SP** je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.27): SS – small small, S – small, SM – small medium, M – medium, ML – medium large, L – large in LL – large large. Na sliki 4.27 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice;



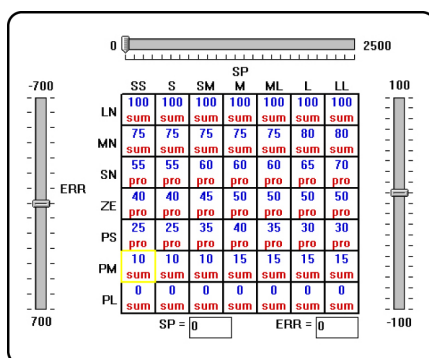
Slika 4.27: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **SP**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)

Fig. 4.27: Fuzzy space of input linguistic variable **SP**. The values of linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)



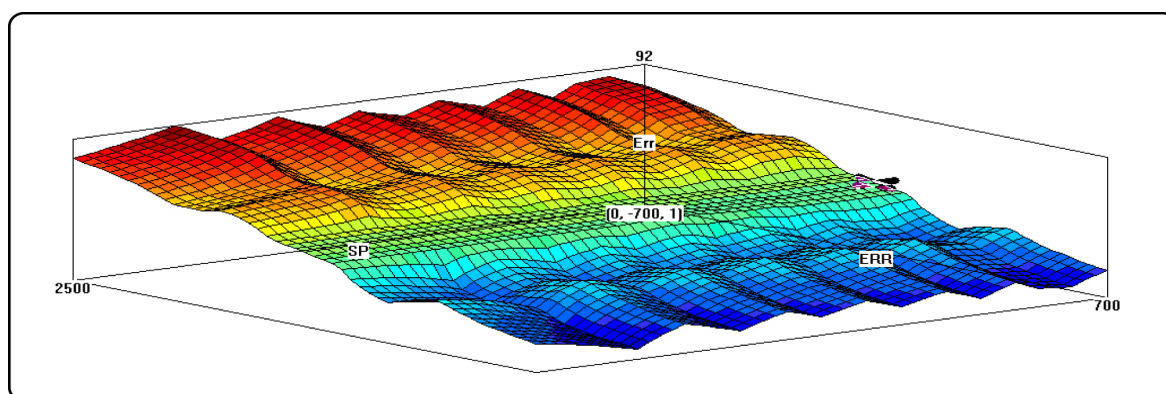
Slika 4.28: Prikaz mehkega prostora vhodne jezikovne spremenljivke **ERR**. Predikatne vrednosti jezikovne spremenljivke so podane s trikotnimi funkcijami in definirane z vrednostmi krajišč v tabeli. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)

Fig. 4.28: Fuzzy space of input linguistic variable **ERR**. The values of linguistic variable are in the form of triangular functions with defined edges. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)



Slika 4.29: Logična matrika odločanja pri mehkem regulatorju osvetljenosti. Matrika predstavlja zapis ČE – POTEM pravil (IF – THEN) pri vhodnih parametrih **ERR** (y os) in **SP** (x os) in izhodni veličini **Err**. Primer pravila: **IF SP = SS sum** (izbran logični operater) **ERR = MN THEN Err = 75**. Logični operaterji **pro** (produkt) so na robovih zamenjani z operaterjem **sum** (vsota). (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)

Fig. 4.29: Decision matrix of fuzzy regulator of illumination. Matrix represents IF – THEN rules for input parameters **ERR** (y axis) and **SP** (x axis) and output parameters **Err** (z axis). Example of a rule: **IF SP = SS sum** (chosen logical operator) **ERR = MN THEN Err = 75**. Logical operator **pro** (product) is at the edge of the matrix exchanged for the **sum** (sum) operator. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/51)



Slika 4.30: Lupina rešitev predstavlja tridimenzionalno predstavitev vseh vhodno-izhodnih povezav med količinami **SP**, **ERR** in **Err** pri mehkem regulatorju osvetljenosti testne celice. Sprememba nekaterih mehkih operaterjev **pro** v obliko **sum** se odraža v bolj razgibani površini lupine. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/52)

Fig. 4.30: Shell of solutions is a three-dimensional representation of all input-output relations etween **SP**, **ERR** and **Err** for the fuzzy regulator of illumination LP1. The switching of operator **pro** for the operator **sum** on the edges of logical matrix is exhibited in a more intensely curved shell. (Trobec-Lah, 2003, str.: III/52)

- razlika med merjeno notranjo osvetljenostjo (**FL_light**) in želeno notranjo osvetljenostjo (**SP_light**). Na vmesniku mehkega regulatorja je veličina označena z

oznako **ERR** in definirana na območju od - 700 do + 700 lx. Spremenljivka je v mehkem prostoru predstavljena s sedmimi mehкими množicami (Slika 4.28): LN – large negative, MN – medium negative, SN – small negative, ZE – zero, SP – small positive, MP – medium positive, LP – large positive. Na sliki 4.28 so mehke množice definirane s pomočjo preglednice, kjer so definirani krajišči in vrh trikotne mehke množice.

Izhodna veličina fuzzy_LP1 regulatorja:

- Izhodna veličina mehkega regulatorja je položaj rolete, označen z **Err** na vmesniku mehkega regulatorja ter definiran na območju od 0 do 100 cm. Vrednost spremenljivke **Err** oziroma pozicija rolete je ostra vrednost.

Pravila odločanja regulatorja **fuzzy_LP1** so podana v logični matriki (Slika 4.29), izhodni signal pa je regulirna veličina **Err**, ki je prostorsko predstavljena na lupini rešitev (Slika 4.30).

4.2.2.3 Eksperimenti

V nadaljevanju bo predstavljena serija izbranih reprezentativnih eksperimentov z različnimi nastavitvami mehkih regulatorjev osvetljenosti testne celice KAMRA, ki so bili razviti in preizkušeni med testiranjem regulacijskega sistema KAMRA. Izmed 151 analiziranih eksperimentov s svetlobno regulacijsko zanko je v nadaljevanju predstavljenih 7 tipičnih, ki predstavljajo odziv testne celice (prosti tek) ter razvoj najuspešnejših regulatorjev notranje osvetljenosti. Ker je oblikovanje regulacijskih pravil mehkih regulatorjev osvetljenosti potekalo s pomočjo eksperimentiranja, je bilo pričakovati, da bo za razvoj uspešnega regulatorja potrebno veliko vmesnih korakov. V času oblikovanja in testiranja regulatorjev notranje osvetljenosti testne celice so bili razviti 3 različni tipi regulatorjev vsak s svojimi izpeljankami, končno število preizkušenih tipov je bilo 12 (fuzzy_L1 z variantami od A do G, fuzzy_L2 z variantami od A do C in fuzzy_LP1 in LP2). Pri izboru predstavljenih eksperimentov je bil glavni poudarek na predstavitvi delovanja najučinkovitejših regulatorjev, kot sta v prejšnjem poglavju predstavljena regulatorja **fuzzy_L1_E** in **fuzzy_LP1** s

predstavitvijo delovanja tudi nekaj manj uspešnih vmesnih stopenj (fuzzy_L1_B in fuzzy_L2_A), ki služita kot referenci za delovanje uspešnih tipov regulatorjev. Eksperimenti so predstavljeni v grafični obliki (primer tabelarnega zapisa eksperimenta se nahaja v prilogi C) s prikazom nivoja sončnega sevanja, referenčnega profila osvetljenosti, notranje osvetljenosti in pozicije rolete. Vsak eksperiment je dodatno opisan in razložen še v tekstovni obliki z obrazložitvami osnovnih pogojev in rezultatov. Uporabljene oznake in njihov pomen

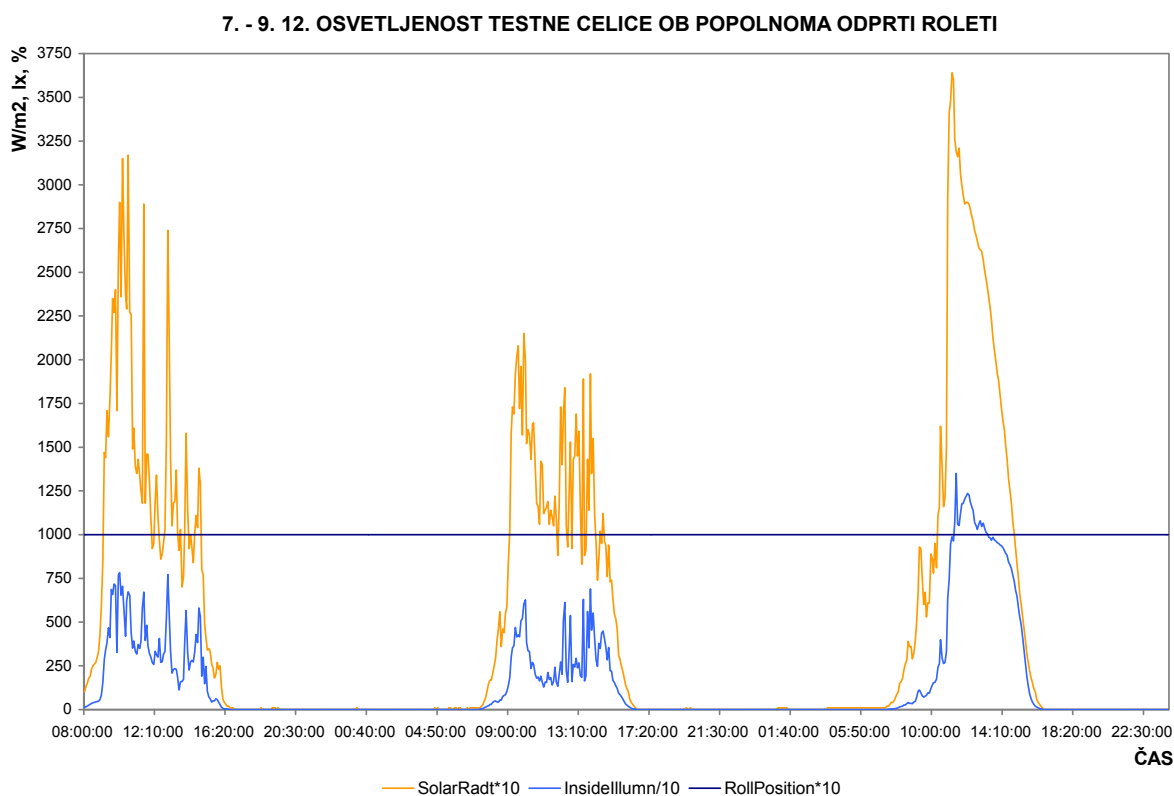
Preglednica 4.8: Pomen na diagramih označenih in predstavljenih veličin.
Table 4.8: Meaning of abbreviations used in the diagrams.

Oznaka	Pomen
SPillum	Želena notranja osvetljenost
Insideillum	Notranja merjena osvetljenost
SolarRadtRT1	Globalno merjeno sončno sevanje
RollPosition	Položaj rolete (100 % = 100 cm –odprta roleta, 0 % = 0 cm –zaprta roleta)

so tolmačeni v preglednici 4.8.

EX-SVET-104: Osvetljenost testne celice ob odprti roletih (7. – 9. 12.)

- Roleta je konstantno popolnoma odprta (RollPosition = 100 %).
- Regulacija notranje osvetljenosti je izklopljena.
- Eksperiment je potekal zgodaj decembra in je bil namenjen spoznavanju in prikazu notranje osvetljenosti testne celice v odvisnosti od spreminjanja nivoja sončnega sevanja brez vpliva regulacijskega sistema KAMRA.
- Dnevni maksimumi sončnega neposrednega sevanja so se gibali od 200 do 360 W/m².
- Vreme je bilo prva dva dni pretežno oblačno, kar je razvidno iz nazobčane oblike krivulje sončnega sevanja, zadnji dan pa se je v popoldanskih urah razjasnilo (Slika



Slika 4.31: Eksperiment z odprto roletom brez vključene regulacije osvetljenosti nazorno kaže na trenutno odražanje sprememb v zunanem vremenu na notranjih nivojih osvetljenosti.

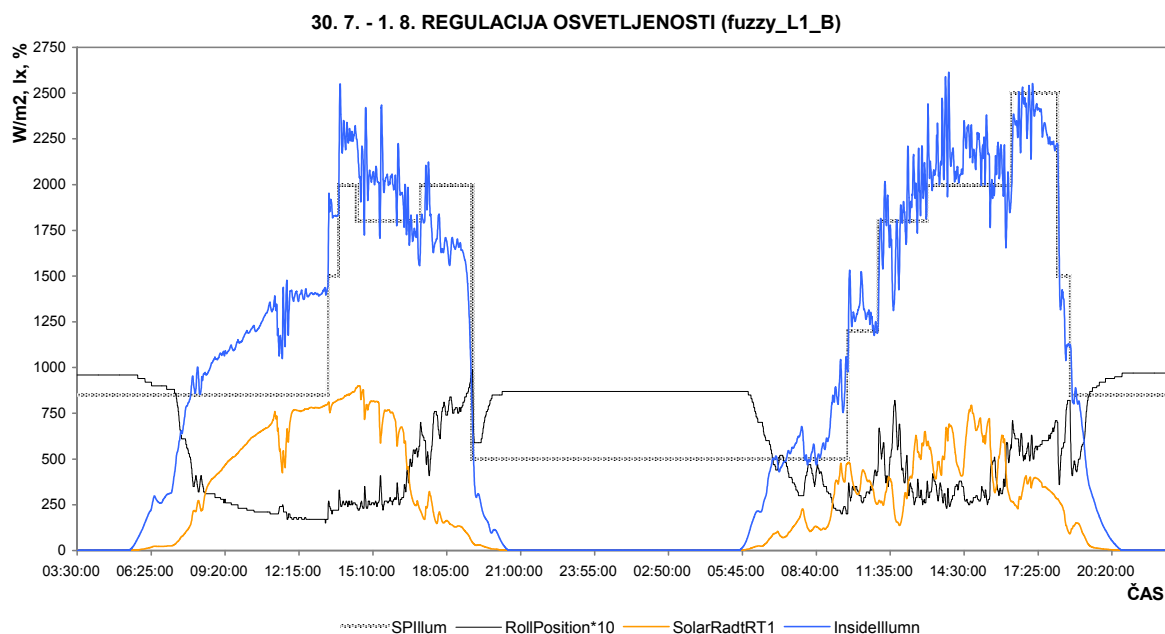
Fig. 4.31: The experiment without the regulation of internal illumination (roller blind is fully open) illustrates instantaneous manifestation of changes in weather on the internal illumination.

4.31).

- Iz diagrama zabeleženih vrednosti notranje osvetljenosti in neposrednega sončnega sevanja na sliki 4.31 je razvidno pričakovano trenutno odražanje sprememb v nivoju razpoložljivega sončnega sevanja na notranjo osvetljenost celice. Pričujoči eksperiment nazorno kaže dinamiko odzivanja notranje osvetljenosti celice na zunanje motnje (spremembe v vremenu), ki se odraža v trenutnih spremembah nivoja osvetljenosti. Za razliko od temperaturnega odziva celica pri osvetljenosti nima »zakasnitve« odziva, zato je tudi regulacija osvetljenosti veliko bolj delikatna kot regulacija temperature.
 - V času trajanja eksperimenta s popolnoma odstrtim delom transparentnega ovoja so notranji nivoji osvetljenosti dosegli maksimalne dnevne vrednosti od 690 do 1350 lx pri zunanjem sončnem sevanju od 200 do 360 W/m².
-

EX-SVET-132: Regulacija notranje osvetljenosti s pozicioniranjem rolete – tip regulatorja fuzzy_L1_B (31. 7.–1. 8.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo mehkega regulatorja osvetljenosti tipa **fuzzy_L1_B** [Trobec-Lah 2003]. Uporabljeni tip regulatorja je druga iteracija razvoja mehkega regulatorja osvetljenosti v sistemu KAMRA.
- Eksperiment je potekal poleti od 31. 7. do 1. 8. ter je bil namenjen preverjanju odziva regulatorja na notranje zahteve (SPillum) pri danih zunanjih vremenskih pogojih (SolarRadRT1).
- Neposredno sončno sevanje je doseglo maksimalno vrednost 890 W/m^2 prvi dan eksperimenta, naslednji dan pa 790 W/m^2 .
- Oblika in nazobčanost grafa intenzitete neposrednega sončnega sevanja (Slika 4.32) drugi dan kaže pretežno oblačno vreme z vmesnimi obdobji jasnega vremena. Vreme je bilo prvi dan eksperimenta bolj stanovitno, saj se je oblačnost pričela pojavljati šele v popoldanskih urah.



Slika 4.32: Poletni eksperiment z regulatorjem osvetlitve tipa fuzzy_L1_B. Regulator v času trajanja eksperimenta ni zadovoljivo sledil referenčnim vrednostim.

Fig. 4.32: Experiment conducted during summer time with the fuzzy_L1_B regulator. The regulator was not capable of following the reference values.

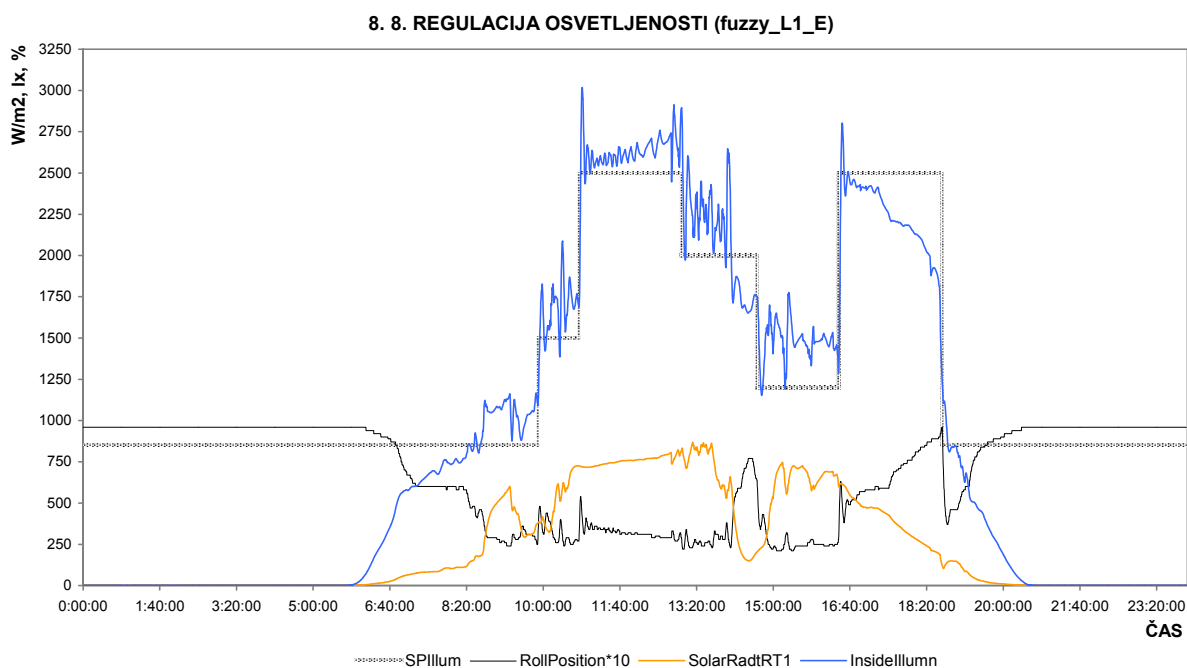
- Nastavljeni profil referenčnih vrednosti notranje osvetljenosti celice KAMRA je bil v obeh dneh definiran na zelo širokem obsegu, saj smo želeli z eksperimentom primarno preveriti zmožnost uporabljenega regulatorja pri sledenju danim vrednostim. Profil SPillumn se je v odvisnosti od časa stopničasto spreminjal v obsegu od 500 do 2500 lx z vmesnimi stopnicami pri 850, 1200, 1500, 1800 in 2000 lx.
- Delovanje mehkega regulatorja **fuzzy_L1_B** se med dva dni trajajočim eksperimentom ni izkazalo kot zadovoljivo, saj regulator ni uspel slediti referenčnemu profilu v obsegu zastavljenih tolerančnih vrednosti (± 300 lx). Največje težave pri sledenju zelenim vrednostim nastopijo ob nenadnih spremembah v nivoju sončnega sevanja, če regulator preseže referenčno vrednost tudi za 500 lx ali več. Dodatno sistem v času opoldanskega sonca ni bil zmožen (čas maksimalne intenzitete sončnega sevanja) držati notranje osvetljenosti v zahtevanem območju.
- Delovanje regulatorja lahko ocenimo kot nezadovoljivo, saj sistem ni bil sposoben zagotoviti zelenih nivojev notranje osvetljenosti niti ni uspel slediti zastavljeni obliki profila. Za doseg primernih regulacijskih nastavitvev je bilo potrebno dodatno spremeniti nastavitve regulatorja.

Preglednica 4.9: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-132.
Table 4.9: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-132.

EX-SVET-132 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu	NEZADOVOLJIVO • Odstopanja pri sledenju referenčnim vrednostim so večja tudi od ± 500 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	ZADOVOLJIVO • Trenuten odziv, vendar z velikimi prenehaji.
Dinamika premikov rolete	ZADOVOLJIVO • Relativno veliko pomikov. • Sunkovito premikanje rolete.
Opombe	• Regulator ni bil zmožen slediti notranjim zahtevanim referenčnim vrednostim.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-SVET-136: Regulacija notranje osvetljenosti s pozicioniranjem rolete – tip regulatorja fuzzy_L1_E (8. 8.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo optimiziranega mehkega regulatorja osvetljenosti tipa **fuzzy_L1_E**.
- Testiranje optimiziranega mehkega regulatorja osvetljenosti tipa **fuzzy_L1_E** je potekalo zgodnjega avgustovskega dne. Namen eksperimenta je bil preveriti zmožnost sledenja regulacijskega sistema notranje osvetljenosti želenemu referenčnemu profilu. Dodatno je bila spremljana tudi dinamika premikanja rolete ter odstopanja od želenih vrednosti osvetljenosti.
- Maksimalne dnevne vrednosti neposrednega sončnega sevanja so dosegle 850 W/m^2 iz grafa sončnega sevanja na sliki 4.33 pa je razvidno, da je bilo pričujočega dne tudi nekaj oblačnosti, saj je sončno sevanje padlo tudi do 150 W/m^2 .
- Profil referenčne vrednosti notranje osvetljenosti celice (SPillum) se v odvisnosti od



Slika 4.33: Diagram eksperimenta izvedenega v zgodnjem avgustu kaže na primerno odzivnost regulatorja osvetljenosti, ki je zmožen slediti želenim notranjim nivojem osvetljenosti v zastavljenem tolerančnem območju.

Fig. 4.33: Early August experiment points to the appropriate responsiveness of the illumination regulator, which is capable of remaining in the defined tolerance margins around the reference values.

časa stopničasto spreminja, in sicer v razponu od 850 do 2500 lx z vmesnimi stopnicami pri 1200, 1500 in 2000 lx. Nastavljene referenčne vrednosti sicer ne odražajo realnih zahtev v delovno-bivalnem prostoru, saj so bile izbrane z namenom preverjanja zmožnosti prilagajanja regulatorja širokemu razponu referenčnih vrednosti.

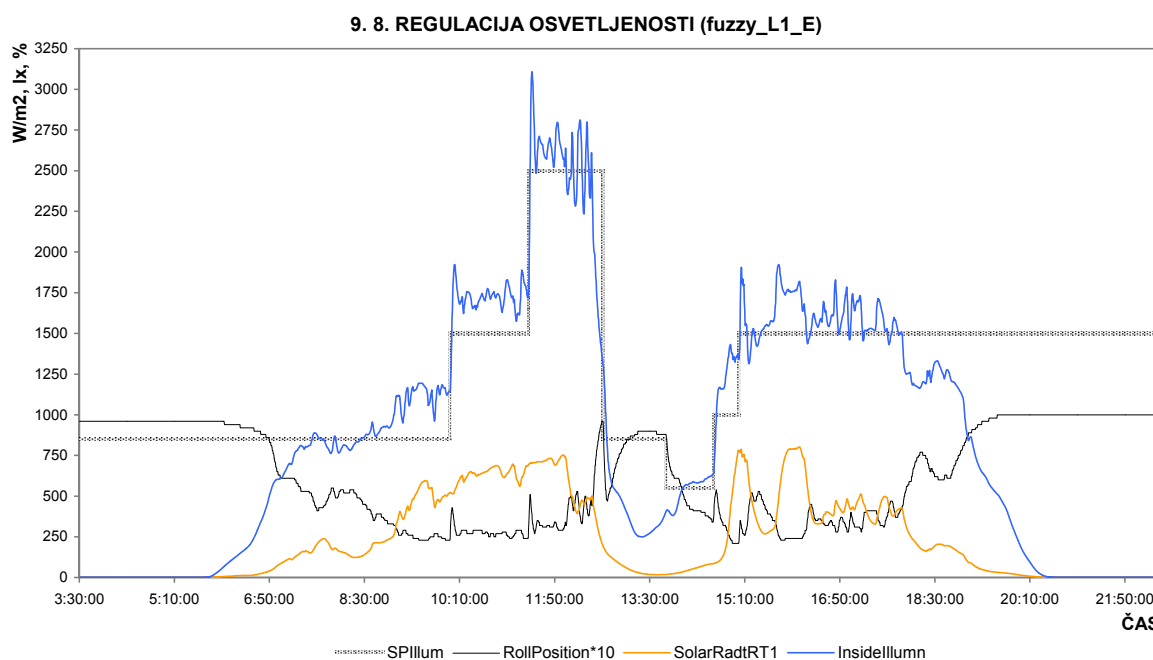
- Testiranje mehkega regulatorja **fuzzy_L1_E** je pokazalo, da je le-ta zmožen učinkovito in zanesljivo slediti zastavljenemu referenčnemu profilu notranje osvetljenosti, saj je v večini primerov sledil tem vrednostim v okviru zastavljenih sprejemljivih tolerančnih odstopanj (± 300 lx). Poleg primerno nastavljenega mehkega regulatorja so bile za učinkovito delovanje regulacije osvetljenosti ključnega pomena nastavitve sekundarnega PID-regulatorja ter predvsem nastavitve filtrov, ki so preprečile prehitre in prepogoste premike rolete. Iz pričujočega eksperimenta je lepo razvidno učinkovito delovanje sistema pri uporabi optimiziranega tipa (**fuzzy_L1_E**) mehkega regulatorja za osvetljenost.

Preglednica 4.10: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-136.
Table 4.10: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-136.

EX-SVET-136 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu	DOBRO • Odstopanja pri sledenju referenčnim vrednostim so manjša od ± 300 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	DOBRO • Hiter odziv s prenehaji tudi do ± 500 lx, kljub vsemu pa ti zelo hitro izvenijo.
Dinamika premikov rolete	DOBRO • Okoli 20 premikov na uro.
Opombe	• Regulator fuzzy_L1_E zelo dobro sledi zastavljenim želenim vrednostim notranje osvetljenosti..
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-SVET-137: Regulacija notranje osvetljenosti s pozicioniranjem rolete – tip regulatorja fuzzy_L1_E (9. 8.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo optimiziranega mehkega regulatorja osvetljenosti tipa **fuzzy_L1_E**.
- Testiranje optimiziranega mehkega regulatorja osvetljenosti tipa **fuzzy_L1_E** je potekalo tekom zgodnjega avgustovskega dne. Eksperiment je nadaljevanje eksperimenta EX-SVET-136 in predstavlja nadaljevanje preverjanja sposobnosti prilagajanja mehkega regulatorja razgibanemu referenčnemu profilu. Spremljani sta bili zmožnost sledenja referenčnim vrednostim ter dinamika premikanja rolete in odstopanja od želenih vrednosti.
- Vremenski pogoji v času trajanja eksperimenta so bili zelo podobni dnevu pred tem (glej eksperiment EX-SVET-136) z večjo pogostnostjo oblačnosti skozi celoten dan.



Slika 4.34: Podobno kot pri predhodnem eksperimentu (EX-SVET-136) je tudi na zgornjem diagramu vidna učinkovitost mehkega regulatorja fuzzy_L1_E. Med 12.00 in 15.00 je lepo viden izrazit padec direktnega sončnega sevanja, ki se je dogodil zaradi nastopa poletne nevihte.

Fig. 4.34: As in the previous experiment (EX-SVET-136) the diagram above displays the efficiency of the fuzzy_L1_E regulator. Between noon and 3pm there is an obvious drop in direct solar radiation caused by a summer storm.

Pričujočega dne se je v zgodnjem popoldnevu (med 12:00 in 15:00) pripetila močnejša poletna nevihta, kar je zelo očitno iz grafa sončnega sevanja (Slika 4.34), saj se ta v času trajanja nevihte spusti celo do 17 W/m^2 . Maksimalne dnevne dosežene vrednosti neposrednega sončnega sevanja so dosegle vrednosti do 780 W/m^2 .

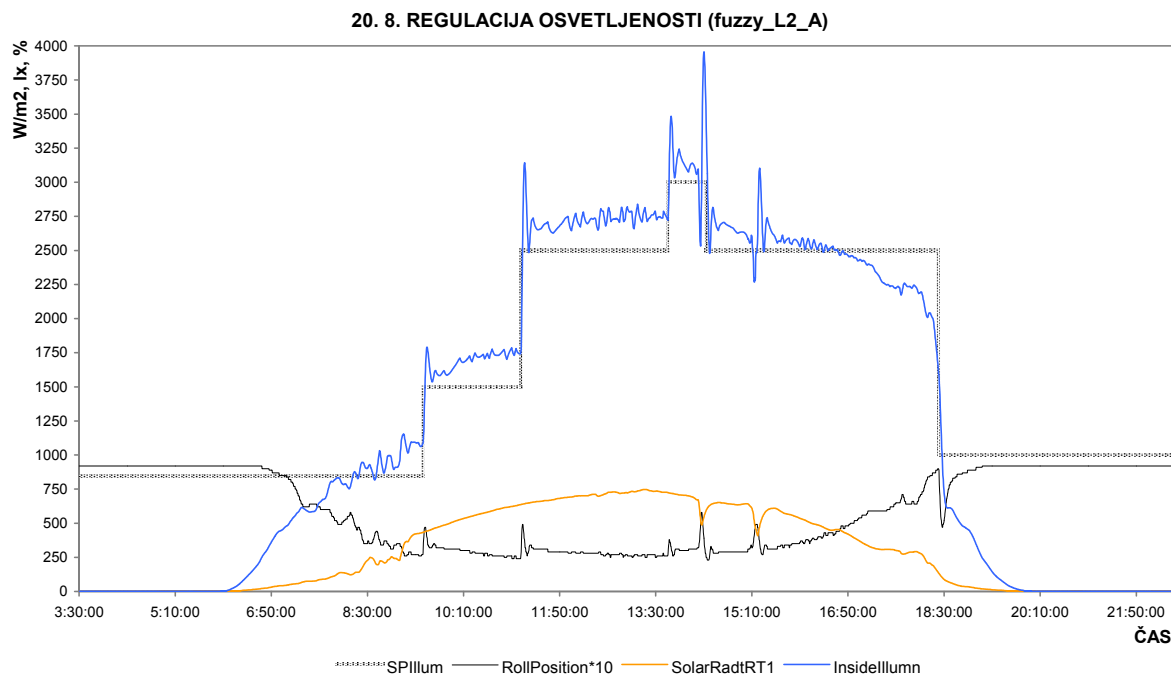
- Profil referenčne vrednosti notranje osvetljenosti celice (SPillum) je stopničasto oblikovan in se v odvisnosti od časa spreminja stopničasto po vrednostih od 550 do 2500 lx, pri čemer zavzame še naslednje vrednosti: 850, 1000 in 1500 lx. Nastavljene referenčne vrednosti sicer ne odražajo realnih zahtev v delovno-bivalnem prostoru, saj so bile izbrane z namenom preverjanja zmožnosti prilagajanja regulatorja širokemu razponu referenčnih vrednosti.
- Iz rezultatov eksperimenta je možno oblikovati podobne oziroma identične zaključke kot pri eksperimentu EX-SVET-136, saj tudi v pričujočem primeru regulator zadovoljivo sledi želenim referenčnim vrednostim, le-te pa doseže s sprejemljivo redkimi premiki senčila. Odstopanja od želenih vrednosti se gibljejo znotraj že omenjenega sprejemljivega tolerančnega območja $\pm 300 \text{ lx}$, razen v primeru nastopa nevihtnega vremena, ko razpoložljivo sončno sevanje doseže izrazito nizke vrednosti. V primerjavi z regulatorjem tipa LP1 (eksperimenti predstavljeni v nadaljevanju) je za pričujoči regulator značilno, da sledi referenčnim vrednostim v širšem razponu (še vedno sprejemljivem), vendar manj burno reagira na prehodne pojave pri spremembi referenčne vrednosti ali nihanjih v nivoju sončnega sevanja.

Preglednica 4.11: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-137.
Table 4.11: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-137.

EX-SVET-137 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu	DOBRO • Odstopanja pri sledenju referenčnim vrednostim so manjša od $\pm 300 \text{ lx}$.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	DOBRO • Hiter odziv s prenehaji tudi do $\pm 500 \text{ lx}$, kljub vsemu pa ti zelo hitro izvenijo.
Dinamika premikov rolete	DOBRO • Okoli 20 premikov na uro.
Opombe	• Regulator fuzzy_L1_E zelo dobro sledi zastavljenim želenim vrednostim notranje osvetljenosti.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-SVET-141: Regulacija notranje osvetljenosti s pozicioniranjem rolete – tip regulatorja fuzzy_L2_A (20. 8.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo mehkega regulatorja osvetljenosti z zoženim definicijskim območjem ERR, s čimer je povečana natančnost sledenja regulatorja **fuzzy_L2_A** želenim vrednostim notranje osvetljenosti.
- Pri izvajanju eksperimenta je pozornost usmerjena na opazovanje delovanja mehkega regulatorja z zoženim definicijskim območjem vhodne spremenljivke ERR, s čimer je bila povečana natančnost sledenja želenim vrednostim. Kot pri vseh eksperimentih s svetlobno regulacijsko zanko sta bili ključnega pomena za oceno primernosti delovanja zmožnost sledenja referenčnemu profilu v obsegu sprejemljivih toleranc in dinamika pomikov senčila.
- Maksimalna dosežena vrednost neposrednega sončnega sevanja v času eksperimenta je znašala 750 W/m^2 .



Slika 4.35: Zožano definicijsko območje vhodne mehke spremenljivke ERR pri regulatorju fuzzy_L2_A povzroči bolj natančno sledenje referenčnim vrednostim notranje osvetljenosti.

Fig. 4.35: Reducing the interval on which the input variable ERR is defined caused the fuzzy_L2_A regulator to follow the reference values more accurately.

- Iz diagrama sončnega sevanja na sliki 4.35 je razvidno, da je bilo vreme v času testiranja izrazito sončno, skoraj brez vmesnih padcev nivoja sevanja zaradi oblačnosti.
- Nastavljeni profil zelene notranje osvetljenosti se je gibal od 850 do 3000 lx ter s tem omogočal spremljanje prilagodljivosti delovanja regulatorja.
- Zoženo definicijsko območje vhodne spremenljivke ERR ter posledična večja natančnost pri sledenju referenčnih vrednosti sta privedla do tega, da notranja osvetljenost nikoli ne preseže tolerančnega območja ± 250 lx. Edine izjeme so prehodni pojavi (stopničasta sprememba referenčne vrednosti) ali pa nenadne hitre spremembe nivoja sončnega sevanja, takrat se pri regulaciji pojavljajo karakteristični skoki v notranji osvetljenosti ter tudi pri poziciji rolete. Pri delovanju regulatorja **fuzzy_L2_A** je ta pojav izrazitejši kot pri predhodno predstavljenih tipih regulatorjev osvetljenosti, saj lahko skoki v nivoju osvetljenosti odstopajo tudi do ± 1000 lx od referenčne vrednosti, kljub vsemu pa ti prehodni pojavi relativno hitro izzvenijo.
- Za regulator **fuzzy_L2_A** je značilno dobro in tesno sledenje referenčnim vrednostim z zelo burnimi in izrazitimi prehodnimi pojavi, ki relativno hitro izzvenijo.

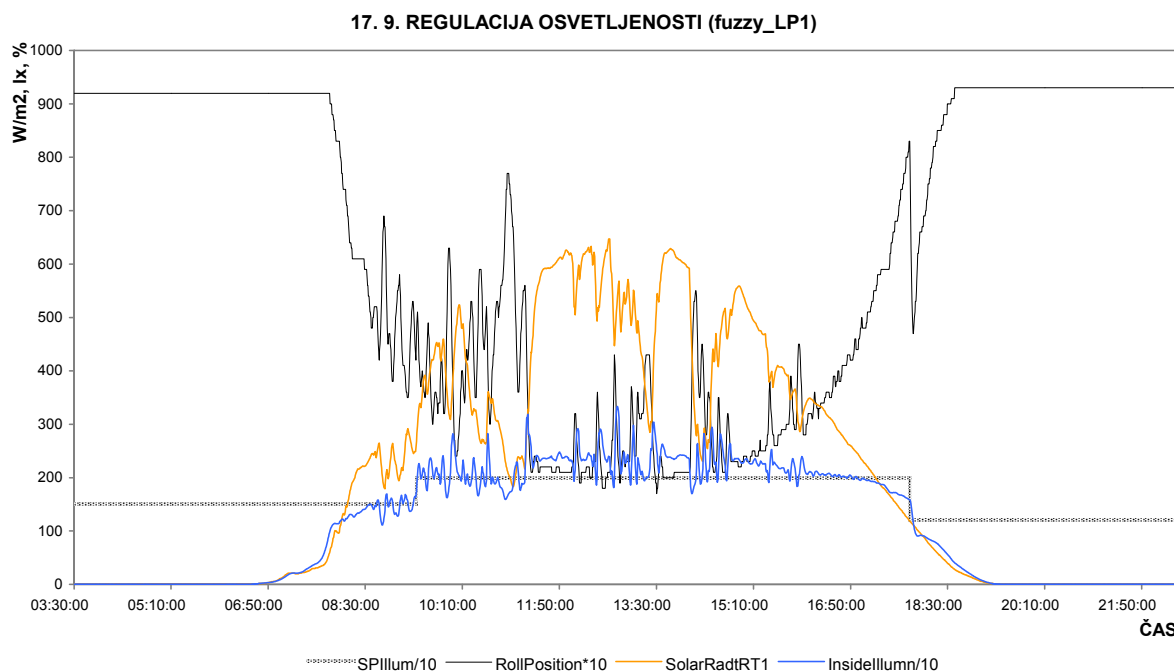
Preglednica 4.12: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-141.

Table 4.12: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-141.

EX-SVET-141 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu	DOBRO • Odstopanja pri sledenju referenčnim vrednostim so manjša od ± 300 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	ZADOVOLJIVO • Pri skokovitih spremembah se regulator zelo burno odzove, takrat so odstopanja od referenčnih vrednosti tudi do ± 1000 lx.
Dinamika premikov rolete	DOBRO • Sunkoviti premiki ob nenadnih spremembah.
Opombe	• Zelo dobro sledenje referenčnim vrednostim, vendar burni prenehaji ob nenadnih spremembah v referenčnih vrednostih ali nivoju zunanjega sončnega obsevanja.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-SVET-147: Regulacija notranje osvetljenosti s pozicioniranjem rolete – tip regulatorja fuzzy_LP1 (17. 9.)

- Pozicija rolete je določena s pomočjo optimiziranega mehkega regulatorja osvetljenosti tipa **fuzzy_LP1** s spremenjenimi logičnimi operaterji in zoženim definicijskim območjem.
- V eksperimentu nas je primarno zanimalo delovanje regulatorja **fuzzy_LP1** pri sledenju referenčnim vrednostim, pri tem pa je bila pozornost usmerjena tudi na hitrost in pogostost pomikov rolete ter na odstopanja dejanskih vrednosti notranje osvetljenosti od želenih.
- Neposredno sončno sevanje je čez dan doseglo maksimalno vrednost okoli 650 W/m^2 , občasna oblačnost pa je povzročila padce v intenziteti sevanja, ki so dosegli vrednosti do 180 W/m^2 .



Slika 4.36: Graf prikazuje delovanje regulatorja fuzzy_LP1 z zoženim definicijskim območjem ter spremenjenimi logičnimi operaterji. Razvidno je bolj tesno sledenje referenčnemu profilu ter hkrati bolj skokovito premikanje rolete.

Fig. 4.36: The diagram shows the functioning of a fuzzy_LP1 regulator which features a narrowed definition area and changed logical operators. It is apparent that the regulator is better at following the reference values and at the same time enables greater dynamics in movements of the roller blind.

- Vreme je bilo v času potekanja eksperimenta tipično jesensko z jasnim sončnim obdobjem, z občasnim krajšim pojavljanjem oblakov.
- Referenčne vrednosti notranje osvetljenosti so bile definirane tako, da so odražale možno preferenco uporabnika za notranjo osvetlitev bivalnega prostora, v katerem se ne odvijajo dejavnosti, ki bi zahtevale osvetljenost nad 200 lx. Profil je bil časovno odvisen ter se je gibal znotraj dokaj ozkega območja od 120 do 200 lx.
- Regulator fuzzy_LP1 se je izkazal za zelo učinkovitega pri sledenju referenčnemu profilu notranje osvetljenosti, saj temu sledi tesneje kot je to lahko opravljal regulator tipa fuzzy_L1_E. Maksimalna odstopanja pri izvedenem eksperimentu so bila manjša od ± 150 lx (Slika 4.36), posledica tega je bilo skokovitejše premikanje rolete v času nenadnih sprememb v nivoju razločljivega sončnega sevanja (pooblačitev) ali pri spremembi referenčnega profila. Kljub sunkovitemu premikanju rolete v času prehodnih pojavov so te motnje dokaj hitro izzvenele.

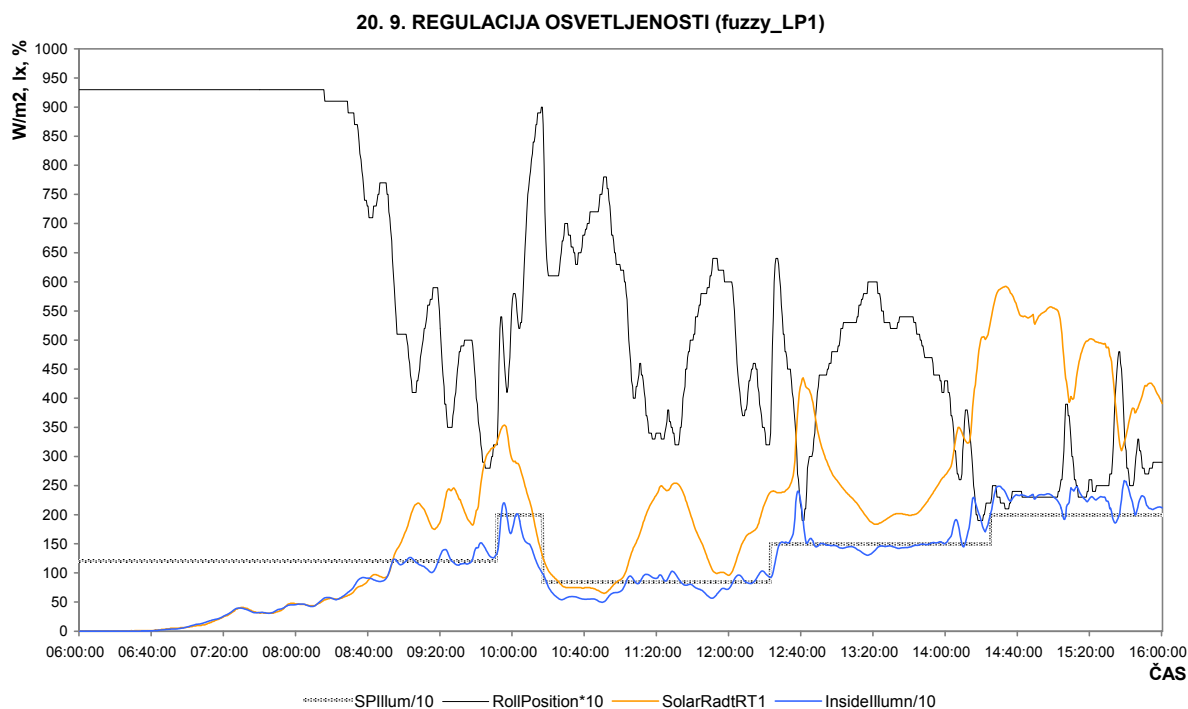
Preglednica 4.13: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-147.

Table 4.13: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-147.

EX-SVET-147 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu	ODLIČNO • Odstopanja pri sledenju referenčnim vrednostim so manjša od ± 150 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	DOBRO • Trenuten odziv rolete, vendar s skokovitim premikanjem.
Dinamika premikov rolete	ZADOVOLJIVO • Izrazita sunkovitost premikov rolete.
Opombe	• Izredna natančnost pri sledenju referenčnim vrednostim, posledično zelo izrazito sunkovito premikanje rolete..
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-SVET-148: Regulacija notranje osvetljenosti s pozicioniranjem rolete – tip regulatorja fuzzy_LP1 (20. 9.)

- Roleta je vodena s pomočjo optimiziranega mehkega regulatorja **fuzzy_LP1**, pri katerem je bilo zoženo definicijsko območje vhodne spremenljivke ERR, prav tako pa so bili zamenjani nekateri logični operaterji (glej tudi EX-SVET-147).
- Glavni namen eksperimenta je bilo spremljanje sledenja regulatorja notranjim referenčnim vrednostim osvetljenosti.
- V okviru eksperimenta sta predstavljena samo dopoldanski in zgodnjepopoltdanski del jesenskega dne, torej od 3.30 zjutraj do 16.00 popoldne. Na sliki 4.37 so prikazani: količine nivoja sončnega neposrednega sevanja, notranja osvetljenost, referenčni profil notranje osvetljenosti ter pozicija oziroma premiki rolete.



Slika 4.37: Prikaz delovanja mehkega regulatorja za osvetljenost (tip fuzzy_LP1) v času jesenskega dneva med 3.30 in 16.00. Razvidno je zelo učinkovito in tesno sledenje referenčnim vrednostim – večja odstopanja se pojavljajo le ob skokovitih spremembah direktnega sončnega sevanja.

Fig. 4.37: Functioning of fuzzy illumination regulator (type fuzzy_LP1) during an autumn day between 3:30am and 4:00pm. It is obvious that the functioning is efficient as larger deviations from reference values occur only during sudden changes in the intensity of solar radiation.

- Profil neposrednega sončnega sevanja je izrazito nazobčan z več dvigi in padci v intenziteti, kar kaže spremenljivo vreme z izmenjujočimi se trenutki oblačnega in sončnega vremena. Maksimalna dosežena vrednost sončnega sevanja je bila 590 W/m^2 , nihanja pa so zaradi spreminjajočega vremena dosegla spremembe v jakosti sevanja do 290 W/m^2 .
- Stopničasti profil referenčnih vrednosti notranje osvetljenosti (SPillumn) testne celice KAMRA je bil definiran na območju od 85 do 200 lx z vmesnimi stopnicami pri 120 in 150 lx.
- Na diagramu opazovanih količin (Slika 4.37) je lepo vidno, kako regulator fuzzy_LP1 uspešno in s sprejemljivim številom premikov rolete sledi referenčnemu profilu notranje osvetljenosti. Primerjava oblike distribucije sončnega sevanja in notranje osvetljenosti kaže zelo očitne podobne trende, pri čemer regulator zmanjša amplitudo vpliva skokovitih sprememb v sončnem sevanju. Prav te nenadne spremembe nivoja sončnega sevanja povzročajo največje motnje pri sledenju notranjim želenim vrednostim osvetljenosti, ki jih lahko optimizirani mehki regulator zelo hitro izravna. Dejanska notranja osvetljenost v pričujočem eksperimentu nikoli ne preseže odstopanj $\pm 90 \text{ lx}$ od referenčnih vrednosti, kar predstavlja zelo tesno sledenje regulatorja želenim vrednostim. Iz predstavljenih eksperimentov z mehkim regulatorjem tipa LP1 je vidno, da oblikovana regulacijska pravila omogočajo dobro sledenje z burnimi premiki v prehodnih pojavih, ki pa ne predstavljajo pretiranih motenj, saj izredno hitro izzvenijo. Na splošno lahko pričujoči regulator ocenimo kot

Preglednica 4.14: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-148.
Table 4.14: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-148.

EX-SVET-148 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu	ODLIČNO • Odstopanja pri sledenju referenčnim vrednostim so manjša od $\pm 90 \text{ lx}$.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	DOBRO • Skokovito in pogosto premikanje rolete.
Dinamika premikov rolete	ZADOVOLJIVO • Izrazita sunkovitost premikov rolete.
Opombe	• Izredna natančnost pri sledenju referenčnim vrednostim.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

izredno uspešen ter primeren za nadaljnjo uporabo pri razvoju regulatorjev osvetljenosti sistema IRsNO.

4.2.2.4 Ocena uspešnosti regulacije notranje osvetljenosti

Analiza izbranih in pregledanih 154 eksperimentov s svetlobno regulacijsko zanko sistema KAMRA je pokazala, da začetne variante regulatorjev niso uspešno regulirale notranjih nivojev osvetljenosti. Poglavitni razlog za neuspešnost začetnih variant regulatorjev (fuzzy_L1 variante A do D) so predvsem slaba nastavljena pravila mehkih regulatorjev, kar pa je bilo popolnoma pričakovano, saj za oblikovanje regulatorja osvetljenosti niso obstajala predhodno razvita pravila kot pri regulaciji toplote. Izbrani način oblikovanja regulatorjev osvetljenosti s pomočjo poizkusov in popravljanja napak je zahteval svojo ceno v obliki večjega števila potrebnih korakov za doseg uspešnih nastavitvev regulatorja.

Z izvedenimi eksperimenti in oblikovanimi regulatorji se je izkazalo, da je za učinkovit regulator, ki je sposoben slediti referenčnim vrednostim v zastavljenem območju odstopanj (± 300 lx) in pri skokovitih spremembah ne odreagira pretirano sunkovito (burni prenehaji oziroma močno premikanje rolete), ključnega pomena uravnoteženost obsega in razporeditve vhodnih spremenljivk (SP in ERR). Predstavljeni eksperimenti z najuspešnejšima mehkima regulatorjema so pokazali dve možnosti oblikovanja regulacijskih pravil, ki privedeta do primerno delujočega regulatorja, vendar z različnimi značilnostmi odziva na dejanske pogoje. Tako se je izkazalo, da zoženo definicijsko območje vhodne spremenljivke ERR (razlika med merjeno in želeno notranjo osvetljenostjo) ter enakomernejše mehke množice pri vhodni spremenljivki zelenih vrednosti (SP) privedejo do regulatorja, ki zelo dobro sledi referenčnim profilom (odstopanja manjša ± 100 lx), vendar takšen regulator izkazuje izrazito občutljivost na nenadne spremembe v nivoju sončnega sevanja ali referenčnih vrednosti (primer fuzzy_LP1). Nasprotno je pokazal regulator fuzzy_L1_E manj burne odzive na nenadne spremembe, vendar pri slabšem sledenju referenčnim vrednostim, saj so se dejanske vrednosti osvetljenosti gibale v obsegu ± 250 lx. Razlogi za takšno obnašanje so bili širši definicijski razpon vhodne spremenljivke ERR ter neenakomerne mehke množice pri vhodni spremenljivki referenčnih vrednosti (SP). Izkušnje pri obdelanih eksperimentalnih podatkih in nastavitvenih pravilih uporabljenih regulatorjev kažejo, da je potrebno za primerno nastavljen

regulator osvetljenosti uskladiti natančnost (primer fuzzy_LP1) in primerno odzivnost (fuzzy_L1_E) regulatorja. Preglednica 4.15 prikazuje povzetek dognanj in oceno primernosti delovanja regulatorjev, predstavljenih v povzetku eksperimentov. Ocenjene so osnovne značilnosti delovanja glede na natančnost sledenja referenčnim vrednostim ter glede na zmernost premikov rolete pri doseganju zelenih vrednosti.

Pri prenosu regulacijskih nastavitev in izkušenj iz oblikovanja sistema regulacije osvetljenosti celice KAMRA na sistem vodenja IRsNO je upravičeno sklepati, da je mogoče osnovne nastavitve vhodnih spremenljivk uspešnih regulatorjev relativno brez modifikacij prenesti tudi na nov sistem, čeprav upravlja z drugačnim senčilom. Modifikacije bi bile potrebne predvsem pri določevanju izhodnih ostrih vrednostih, saj za razliko od KAMRE, kjer se je premikala roleta, sistem IRsNO uporablja žaluzije, ki primarno uravnavajo osvetljenost notranjosti z

Preglednica 4.15: Ocena različnih načinov reguliranja notranje osvetljenosti pogojev v testni celici KAMRA.

Table 4.15: Evaluation of different approaches to the control of internal illumination conditions in the test cell.

REGULACIJA NOTRANJE OSVETLJENOSTI Z:			
	ROLETO (fuzzy L1 B)	ROLETO (fuzzy L1 E)	ROLETO (fuzzy LP1)
Sledenje referenčnemu profilu	NEZADOVOLJIVO • Maksimalna odstopanja večja od ± 500 lx.	DOBRO • Odstopanja manjša od sprejemljivih ± 300 lx.	ODLIČNO • Odstopanja manjša od ± 150 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«)	ZADOVOLJIVO • Hipen odziv, vendar z velikimi skoki v nivoju notranje osvetljenosti.	DOBRO • Hipen odziv s trenutnimi odstopanji do ± 500 lx, ki pa hitro izvenijo.	DOBRO • Hipen odziv z majhnimi odstopanji od zelene vrednosti, vendar s skokovitimi premiki rolete.
Dinamika premikov rolete	ZADOVOLJIVO • Okvirno med 20 in 30 premikov na uro, vendar z možnimi sunkovitimi skoki.	DOBRO • 20 do 30 premikov rolete na uro.	ZADOVOLJIVO • 20 do 30 premikov v uri, pri čemer so premiki lahko izrazito sunkoviti.
Opombe	• Regulator ni sposoben slediti notranjim referenčnim profilom. • Regulator ni sposoben zmanjševati pogreška v notranjem nivoju osvetljenosti.	• Regulator uspešno sledi definiranemu referenčnemu profilu znotraj sprejemljivih odstopanj.	• Regulator zelo tesno sledi referenčnemu profilu (tudi do 90 lx). • Zaradi tesnega sledenja zelenim vrednostim se roleta premika bolj sunkovito.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično			

naklonom lamel. Pri premikanju žaluzij sistem IRsNO operira s štirimi pozicijami lamel – od popolnoma odprtih (90°) do popolnoma zaprtih (0°) z dvema vmesnima stopnjama pri 30° in 60° . Ker je regulacija osvetljenosti na splošno manj vezana na dejanske gradbeno-fizikalne specifičnosti prostora, lahko trdimo, da je mogoče izvesti prenos regulacijskih pravil iz KAMRE na IRsNO v primeru regulacije osvetljenosti lažje oziroma bolj neposredno kot pri regulaciji toplote. Najbolj očitna razlika med prostorom testne celice ter kabinetom KSKE je njuna velikost, kar se bo odražalo tudi pri regulaciji osvetljenosti, saj je pričakovati, da bodo spremembe manj očitne ter zato tudi regulacija (premiki lamel žaluzij) manj burna.

4.2.3 Eksperimenti s harmoniziranim delovanjem

Harmonizirana regulacija notranjega optično-termičnega okolja testne celice KAMRA je vzpostavljena s hkratnim delovanjem obeh regulacijskih vej (regulacija osvetljenosti in regulacija temperature), pri čemer je prioriteta regulacija notranje osvetljenosti, saj je vpliv sprememb zunanjih vremenskih pogojev na notranjo osvetljenost trenutno, pri temperaturnem odzivu pa se vedno pojavlja zakasnitev. Sodelovanje med temperaturno in svetlobno regulacijsko zanko je izvedeno tako, da svetlobna zanka izregulira nivo notranje osvetljenosti, nakar sistem preklopi na toplotno regulacijo. Reguliranje notranje temperature celice je v tem primeru omejeno le z dopustnimi tolerančnimi odstopanji, definiranimi za svetlobno regulacijsko zanko (načeloma ± 300 lx). Če so ta presežena, usmerjanje delovanja sistema ponovno prevzame svetlobni regulator. Pri reguliranju temperaturnih notranjih pogojev je mogoče uporabiti dva načina regulacije, in sicer reguliranje s pomočjo senčenja (pozicioniranje rolete) ali pa z uporabo dodatnih virov (ventilator – hlajenje in grelci – ogrevanje), seveda je mogoče uporabiti tudi oba načina sočasno.

Pri harmonizirani regulaciji je bil glavni cilj doseči avtomatiziran regulacijski sistem, ki bi bil zmožen izkoristiti razpoložljive energetske prihranke, ki nastopajo takrat, ko je prioriteta regulacija osvetljenosti. Takšni pogoji nastopijo pri večini stavb čez dan, ko so delovni in bivalni prostori zasedeni in je uporabnikom potrebno zagotoviti predvsem primerno vizualno udobje. Regulator, ki je v takšnih razmerah zmožen uravnavati primerne parametre vizualnega ugodja in hkrati izkoristiti potencialne energetske prihranke (neposredni zajem sončnega

sevanja ali senčenje za preprečevanje pregrevanja), bi bil s stališča celostne obravnave delovno-bivalnega okolja optimalno učinkovit.

4.2.3.1 Eksperimenti

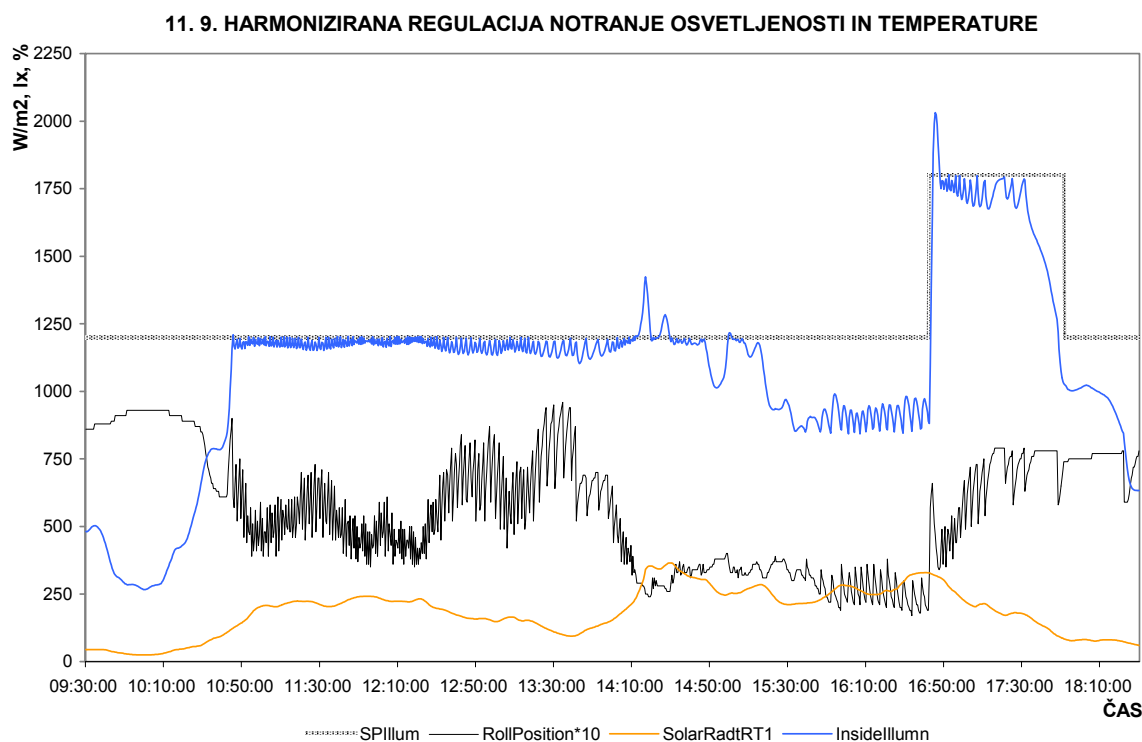
Predstavljena bo serija eksperimentov, izvedenih s harmoniziranim sodelovanjem tako regulacijske veje za osvetljenost ter tudi temperaturo notranjega prostora testne celice. Izbor obsega eksperimente, iz katerih je mogoče nazorno razbrati način delovanja harmonične regulacije s poudarkom na predstavitvi učinkovitosti takšnega pristopa. V nadaljevanju bodo predstavljeni eksperimenti z različnimi nastavitvami mehkih regulatorjev, ki so bili testirani pri različnih vremenskih pogojih in notranjih zelenih vrednostih. Uporabljene oznake in njihov pomen so tolmačeni v preglednici 4.16.

Preglednica 4.16: Pomen na diagramih označenih in predstavljenih veličin.
Table 4.16: Meaning of abbreviations used in the diagrams.

Oznaka	Pomen
SPillum	Želena notranja osvetljenost
SPTemp	Želena notranja temperatura
Insidellumn	Notranja merjena osvetljenost
InsideTemp	Notranja merjena temperatura
OutTempTT3	Zunanja merjena temperatura
SolarRadtRT1	Globalno merjeno sončno sevanje
RollPosition	Položaj rolete (100 % = 100 cm –odprta roleta, 0 % = 0 cm –zaprta roleta)
outRegHeat	Delovanje grelcev (izraženo v % delovne moči)
outRegVent	Delovanje ventilatorja (izraženo v % delovne moči)

EX-HARM-027: Harmonizirana regulacija osvetljenosti in temperature (11. 9.)

- Pozicija rolete je določena s harmoniziranim delovanjem mehkega regulatorja za osvetljenost in temperaturo v testni celici. Pozicijo rolete najprej določa regulator osvetljenosti glede na notranjo referenčno vrednost, ko je ta dosežena, se regulacija preklopi na temperaturno zanko, ki poizkuša optimizirati notranjo temperaturo glede na želeno vrednost znotraj dovoljenih odstopanj od zelene osvetljenosti celice.
- Notranja dodatna vira (grelci in ventilator) sta neaktivna.
- Eksperiment naj bi pokazal možnost sočasnega harmoniziranega delovanja obeh regulatorjev sistema KAMRA.
- Delovanje regulatorja med trajanjem eksperimenta je prikazano na slikah 4.38 in 4.39

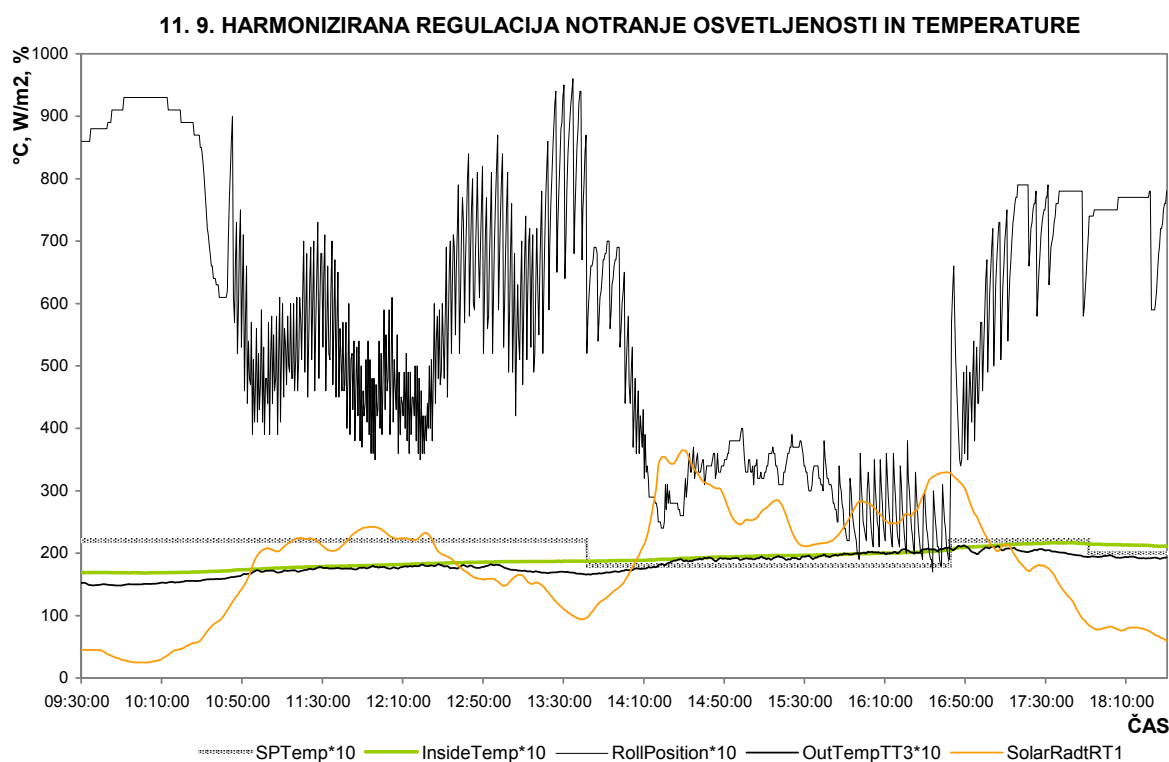


Slika 4.38: Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja osvetljenost med 9.30 in 18.30. Iz diagrama je razvidno hitro in oscilirajoče gibanje rolete, kar se odraža tudi na nivoju notranje osvetljenosti.

Fig. 4.38: Harmonization of temperature and illumination of the tests cell KAMRA. Diagram shows internal illumination between 9:30am and 6:30pm, evident are the oscillating movements of the blind, which also reflects on the levels of internal illumination.

v času od 9.30 do 18.30. Obseg prikaza celotnega dneva je bil namenoma manjši, saj je tako mogoče na diagramih natančneje opazovati dinamiko gibanja rolete.

- Pri ocenjevanju harmoniziranega delovanja regulacijskega sistema je ključnega pomena dinamika gibanja rolete. Omenjeno je že bilo, da prepogosti in sunkoviti premiki senčila povzročajo motnje v notranjem okolju, ki bi jih potencialni uporabniki zaznali kot izrazito moteče.
- Razpoložljivo neposredno sončno sevanje čez dan je doseglo maksimalno vrednost pri 370 W/m^2 , kar kaže relativno oblačno vreme.
- Zunanja temperatura zraka je bila v času prikazanega eksperimenta skoraj konstantna, saj je nihala od $15 \text{ }^\circ\text{C}$ v jutranjem času do $21 \text{ }^\circ\text{C}$ v času zgodnjega popoldneva.
- Referenčni profil za notranjo osvetljenost je bil definiran na razponu od 1200 do



Slika 4.39: Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja temperatura zraka med 9.30 in 18.30. Iz diagrama je razvidno hitro in oscilirajoče gibanje rolete, kar pa se zaradi zakasnitve temperaturnega odziva ne odraža na krivulji notranje temperature zraka.

Fig. 4.39: Harmonization of temperature and illumination of the tests cell KAMRA. The diagram shows internal air temperature between 9:30am and 6:30pm, evident are the oscillating movements of the blind, that do not reflect on the internal temperatures due to the thermal accumulation.

1800 lx (Slika 4.38), temperaturni profil pa od 18 do 22 °C (Slika 4.39).

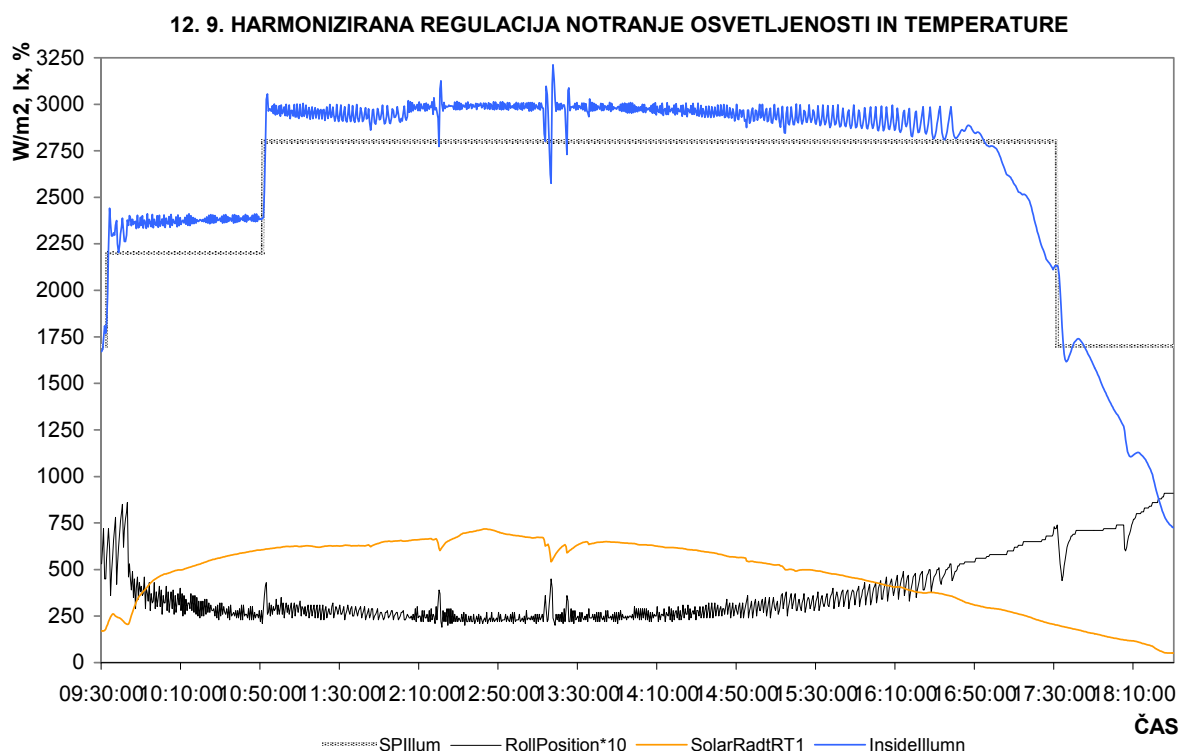
- Diagrama temperaturnega odziva celice (Slika 3.36) in notranje osvetljenosti (Slika 3.35) kažeta največjo težavo harmonizirane regulacije notranjega okolja testne celice s pomočjo premikanja pozicije rolete – oscilirajoče premikanje senčila. Kljub zadovoljivemu sledenju obema referenčnima količinama delovanja regulatorja ni mogoče oceniti kot zadovoljivo, saj so premiki rolete prepogosti ter oscilirajoče oblike, kar posledično pomeni negativen vpliv na notranje vizualno udobje uporabnikov. Ne glede na število premikov rolete pa oba regulatorja v okviru zunanjih danosti zadovoljivo sledita zastavljenim notranjim referenčnim vrednostim.
- Pri testiranju harmoniziranega delovanja regulacijskega sistema KAMRA se je pojavila pričakovana težava prehitrega in prepogostega preklapljanja med dvema regulacijskima zankama, do katerega pride zaradi kontradiktornih zahtev vsake od njih (za zagotovitev notranje osvetljenosti se senčilo zapira, hkrati pa bi temperaturna zanka želela senčilo odpreti, saj želi dvigniti notranjo temperaturo zraka). Posledica takšne situacije so prehitri in prepogosti premiki senčila, potrebno bi bilo bolj usklajeno sodelovanje ali pa omejitev števila preklapov med regulacijskima zankama.

Preglednica 4.17: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-HARM-027.
Table 4.17: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-HARM-027.

EX-HARM-027 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu:	
Temperatura	DOBRO • Odstopanja ne presegajo $\pm 3K$.
Osvetljenost	DOBRO • Regulator dobro sledi referenčnim vrednostim (± 300 lx).
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«):	
Temperatura	ZADOVOLJIVO • Glede na dinamiko toplotnih procesov zadovoljiva odzivnost sistema.
Osvetljenost	DOBRO • Trenuten odziv na spremembe.
Dinamika premikov rolete	NEZADOVOLJIVO • Osciliranje rolete.
Opombe	• Sledenje notranjim referenčnim vrednostim je uspešno in znotraj dopustnih odstopanj. • Premikanje rolete je iz gledišča uporabnika popolnoma nesprejemljivo.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-HARM-028: Harmonizirana regulacija notranje osvetljenosti in temperature (12. 9.)

- Pozicija rolete je določena s harmoniziranim delovanjem mehkega regulatorja za osvetljenost in temperaturo v testni celici. Vplivanje na pozicijo rolete se izvaja s preklapljanjem med toplotno in svetlobno regulacijsko zanko.
- Notranja dodatna vira (grelci in ventilator) sta neaktivna.
- Eksperiment, ki je nadaljevanje eksperimenta 1, naj bi pokazal možnost sočasnega harmoniziranega delovanja obeh regulatorjev sistema KAMRA. V primerjavi z eksperimentom, izvedenim 11. 9., je opisani eksperiment potekal sončnega jesenskega dne in tako v popolnoma drugačnih vremenskih pogojih kot eksperiment EX-HARM-028.
- Delovanje regulatorja med trajanjem eksperimenta je prikazano na slikah 4.40 in 4.41

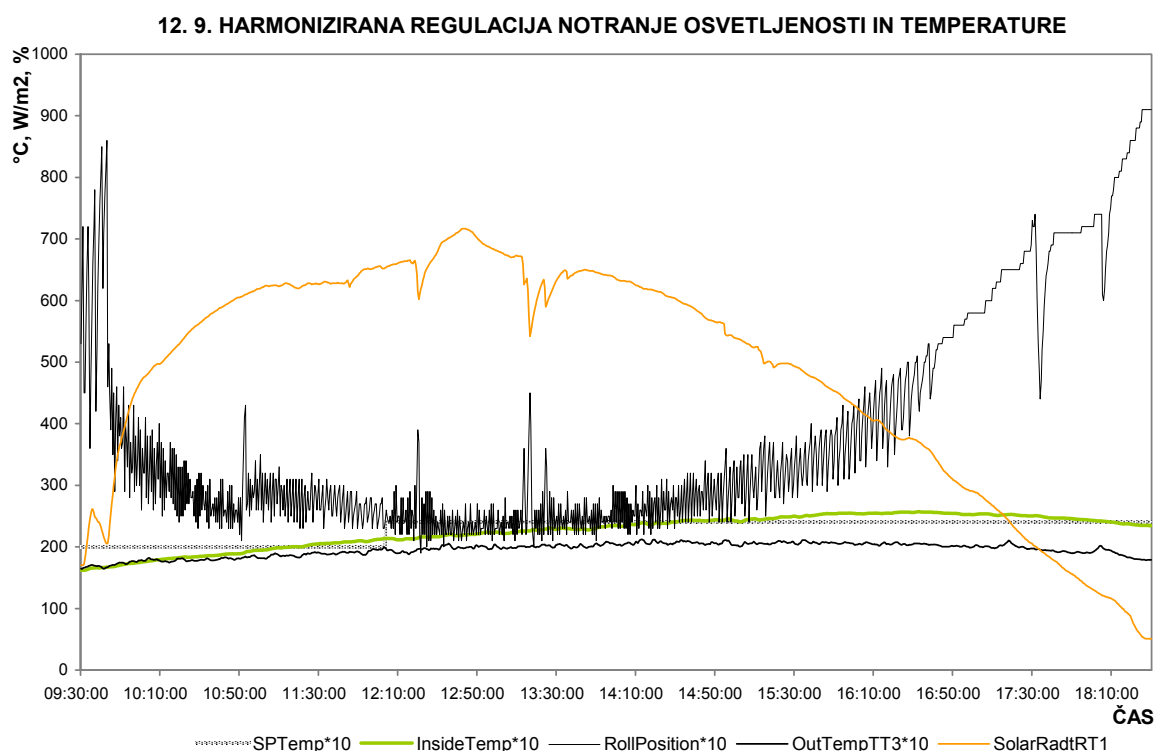


Slika 4.40: Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja osvetljenost med 9.30 in 18.30. Očitni so nezaželjeni hitri premiki rolete, kar se odraža na notranji osvetljenosti celice.

Fig. 4.40: Harmonization of temperature and illumination of the tests cell KAMRA. The diagram shows internal air temperature between 9:30am and 6:30pm, evident are the unfavorable oscillating movements of the roller blind.

v času od 9.30 do 18.30. Obseg prikaza celotnega dneva je bil namenoma manjši, saj je tako na diagramih mogoče natančneje opazovati dinamiko gibanja rolete ter tudi rezultate neposredno primerjati z izsledki, pridobljenimi v času eksperimenta 1.

- Opazovana je bila dinamika premikov rolete, saj se je pri predhodnih eksperimentih izkazalo, da je harmonizirana regulacija sposobna slediti referenčnim vrednostim, vendar z neprimernim obnašanjem senčila. V pričujočem eksperimentu smo opazovali delovanje regulatorja v sončnem vremenu.
- Vreme je bilo čez celoten dan sončno z le krajšimi prekinitvami, kar se odraža tudi na jakosti neposrednega sončnega sevanja, ki je doseglo maksimalno vrednost pri 720 W/m^2 .
- Zunanja temperatura zraka se je v času prikazanega eksperimenta gibala v zelo ozkem razponu od 17 do $21 \text{ }^\circ\text{C}$, kar je zelo podobno predhodnemu dnevu (EX-



Slika 4.41: Harmonizirana regulacija osvetljenosti in notranje temperature celice KAMRA. Prikazana je notranja temperatura zraka med 9.30 in 18.30. Vidni so hitri in zelo pogosti premiki rolete, kar pa se zaradi zakasnitve temperaturnega odziva celice ne odraža na krivulji notranje temperature zraka.

Fig. 4.41: Harmonization of temperature and illumination of the tests cell KAMRA. The diagram shows internal air temperature between 9:30am and 6:30pm, evident are the unfavorable oscillating movements of the roller blind.

HARM-027).

- Referenčni profil za notranjo osvetljenost je bil definiran na razponu od 1700 do 2800 lx (Slika 4.40), temperaturni profil pa od 20 do 24 °C (Slika 4.41).
- S slike 3.37 je razvidno zelo dobro sledenje regulatorja notranji želeni osvetljenosti, podobno ugoden rezultat je bil dosežen tudi za regulacijo notranje temperature (Slika 4.41). Z obeh slik pa je mogoče razbrati podobno obnašanje rolete, kot je bilo opisano že pri eksperimentu EX-HARM-027, kjer se pojavlja oscilirajoča oblika premikanja rolete. Zaradi sončnega vremena in posledične enakomernosti distribucije neposrednega sončnega sevanja so premiki rolete sicer bolj umirjeni kot v predhodnem eksperimentu, vendar pa se trend delovanja regulacije ni spremenil.
- Harmonizirana regulacija z nastavitvami regulatorjev pri obeh eksperimentih ni zadovoljiva, saj zaradi premikanja senčila nikakor ne bi bila uporabna v prostorih, kjer se nahajajo ljudje. Ključnega pomena za primernost harmonizirane regulacije je, da so premiki senčila dovolj redki in ne sunkoviti. Ker se testna celica KAMRA zelo hitro odziva na spremembe temperatur in sončnega sevanja, se ta občutljivost na spremembe odraža tudi v težavah, ki so nastopile pri harmonizirani regulaciji. Pri uporabi harmoniziranega reguliranja toplote in osvetljenosti v realnih bivalno-delovnih prostorih je pričakovati manjšo burnost odzivov.

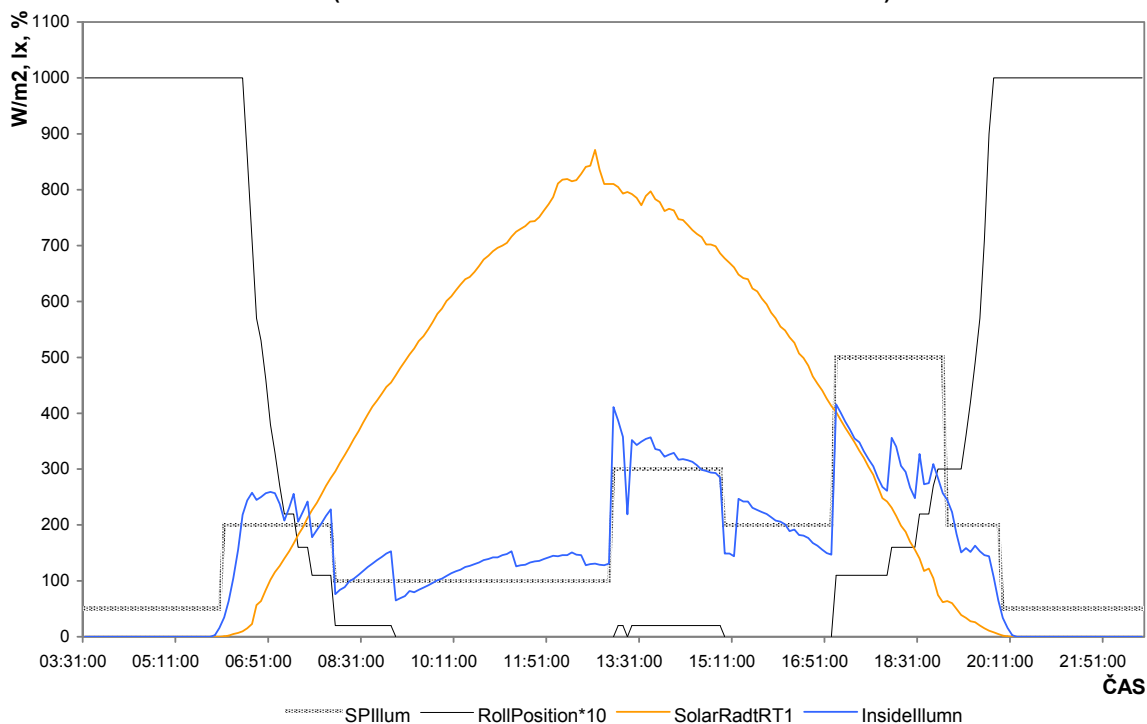
Preglednica 4.18: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-HARM-028.
Table 4.18: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-HARM-028.

EX-HARM-028 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu:	
Temperatura	DOBRO • Dobro sledenje referenčnemu profilu.
Osvetljenost	DOBRO • Regulator dobro sledi referenčnim vrednostim (± 300 lx).
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«):	
Temperatura	ZADOVOLJIVO • Glede na dinamiko toplotnih procesov zadovoljiva odzivnost sistema.
Osvetljenost	DOBRO • Sistem trenutno odreagira na spremenjene zunanje pogoje.
Dinamika premikov rolete	NEZADOVOLJIVO • Osciliranje rolete.
Opombe	• Sledenje notranjim referenčnim vrednostim je uspešno in znotraj dopustnih odstopanj. • Premikanje rolete je iz gledišča uporabnika popolnoma nesprejemljivo.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

EX-HARM-013: Harmonizirana regulacija notranje osvetljenosti in temperature – temperatura je uravnavana z dodatnimi viri (23. 4.)

- Pozicija rolete je določena z mehkega regulatorja za osvetljenost temperatura zraka, v testni celici pa je uravnavana z regulatorjem grelcev in ventilatorja. Vplivanje na pozicijo rolete se izvaja samo glede na notranjo osvetljenost.
- V opisanem eksperimentu strogo gledano ne gre za harmoniziran pristop k regulaciji notranjega okolja, saj je možnost regulacije notranje temperature s pomočjo senčila zanemarjena.
- Aktivni so vsi dodatni viri (grelci, ventilator), ki uravnavajo notranjo temperaturo zraka.

23. 4. HARMONIZIRANA REGULACIJA NOTRANJE OSVETLJENOSTI IN TEMPERATURE
 (TEMPERATURA URAVNAVANA Z DODATNIMI VIRI)

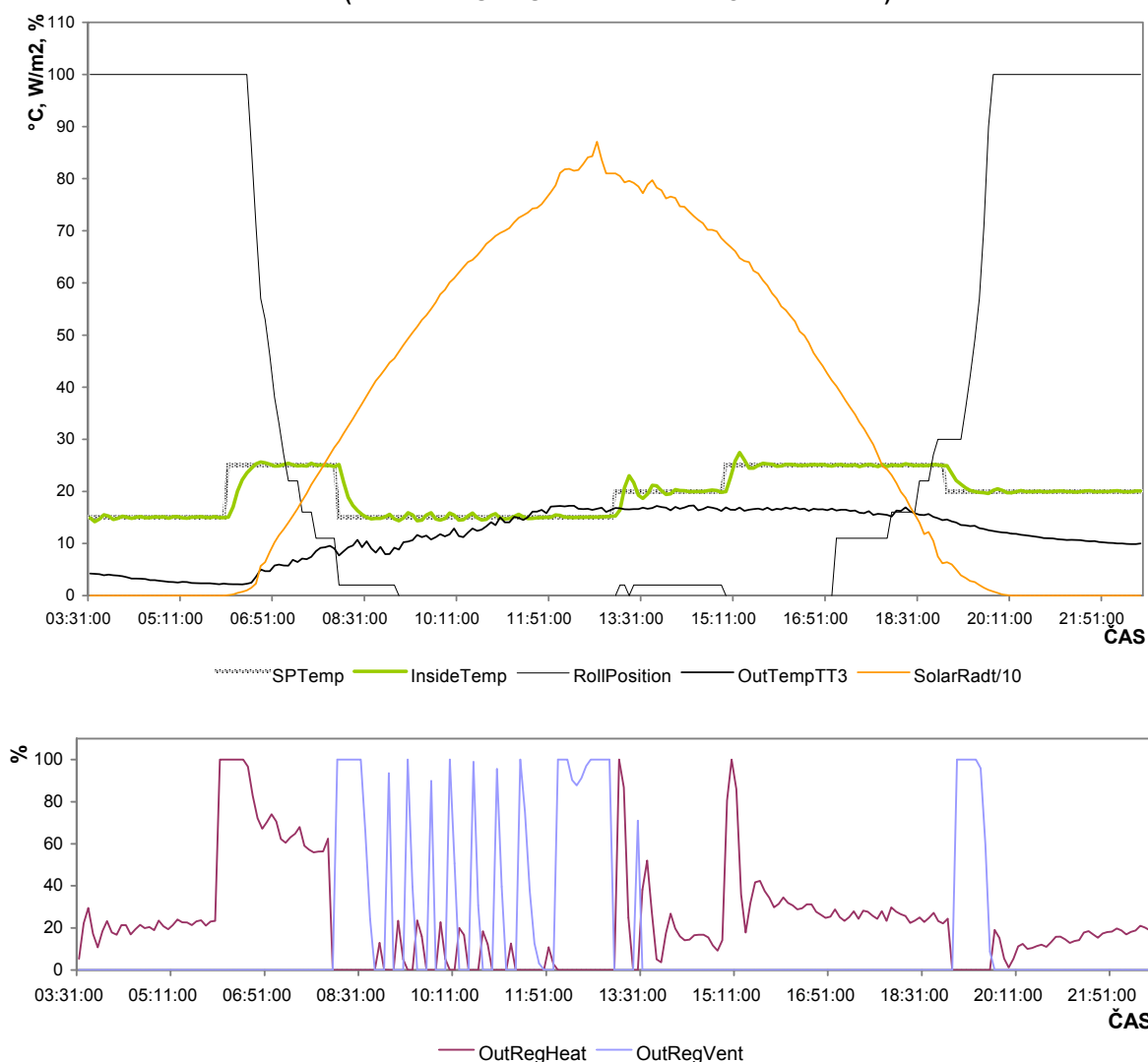


Slika 4.42: Regulacija notranje osvetljenosti testne celice s premiki rolete, temperatura notranjega zraka je uravnavana ločeno z grelci in ventilatorjem. Zaradi nizkih referenčnih vrednosti notranje osvetljenosti in visoke intenzitete sončnega sevanja je bila roleta večino dneva zaprta.

Fig. 4.42: Regulation of internal illumination of the test cell by with the positioning of the roller blind. Internal air temperature is regulated by the internal heaters and ventilator. Due to low internal illumination set point levels and high intensity of solar radiation the blind was almost completely closed for most of the day.

- Izpeljan in prikazan eksperiment prikazuje način regulacije temperature in osvetljenosti notranjega prostora s pomočjo ločene regulacije senčila in notranjih virov. Osvetljenost se v takšnem primeru uravnava s pomočjo senčenja odprtine testne celice, pri čemer je termični vpliv senčenja v sami regulaciji zanemarljiv.

23. 4. HARMONIZIRANA REGULACIJA NOTRANJE OSVETLJENOSTI IN TEMPERATURE (TEMPERATURA URAVNAVANA Z DODATNIMI VIRI)



Slika 4.43: Diagrama prikazujeta regulacijo notranje temperature z dodatnimi viri ob sočasni regulaciji osvetljenosti celic s premikanjem rolete. S pomočjo izmenične aktivacije grelcev in ventilatorja, sistem uspešno sledi referenčnemu profilu notranje temperature zraka.

Fig. 4.43: The diagrams represent the regulation of internal temperatures with internal sources (heaters & ventilator), while the internal illumination was regulated by the movements of the roller blind. The system is capable of following the internal set point profile.

Notranja temperatura zraka se regulira ločeno s pomočjo vklapljanja grelcev in s prezračevanjem prostora.

- Potek eksperimenta in s tem delovanje regulatorja sta prikazana na slikah 4.42 in 4.43, ki ločeno prikazujeta notranjo osvetljenost in temperaturno regulacijo.
- Opazovana sta bila dinamika premikov rolete in sledenje zastavljenim referenčnim profilom temperature in osvetljenosti. Za razliko od predhodnih dveh eksperimentov, ki sta prikazovala harmonizirano regulacijo osvetljenosti in temperature v celici izključno samo z roletno, v pričujočem primeru ni pričakovati težav z osciliranjem rolete.
- Vreme je bilo v času izvajanja eksperimenta popolnoma sončno brez oblačnosti, kar je razvidno tudi iz krivulje intenzitete in distribucije neposrednega sončnega sevanja na sliki 4.42. Sončno sevanje je doseglo maksimalno vrednost 870 W/m^2 opoldne.
- Zunanja temperatura zraka je dosegla minimalno vrednost $2 \text{ }^\circ\text{C}$ tik pred sončnim vzhodom ter se čez dan povzdignila do $17 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Definirani stopničasti referenčni profil notranje osvetljenosti je bil nastavljen na vrednosti od 50 do 500 lx (Slika 4.42).
- Notranja želena temperatura je bila definirana v razponu od 15 do $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 4.43).
- Temperaturna regulacija s pomočjo grelcev in ventilatorja uspešno vzdržuje merjeno notranjo temperaturo zraka blizu zelenim referenčnim vrednostim (Slika 4.43). Večja odstopanja se pojavljajo le pri skokih v referenčnem profilu. Ker je zaradi regulacije notranje osvetljenosti večino dneva roleta popolnoma zaprta, neposredno sončno sevanje ne vpliva neposredno na notranje temperaturne pogoje. Notranji nivo osvetljenosti je reguliran s pomočjo odpiranja in zapiranja rolete, kar pa pri danih visokih vrednostih neposrednega sončnega sevanja in nizkih referenčnih vrednostih pomeni, da je bil rolo večino dneva zaprt. Regulator osvetljenosti uspešno in z relativno malo premiki rolete uspe vzdrževati zelene notranje vrednosti (Slika 4.42) ter v času trajanja eksperimenta ne preseže odstopanj, večjih od $\pm 250 \text{ lx}$, kar je manj kot še sprejemljiva zastavljena maksimalna odstopanja $\pm 300 \text{ lx}$.
- Čeprav pri predstavljenem načinu regulacije termičnih in optičnih karakteristik notranjega okolja testne celice KAMRA ne gre za harmonizirano regulacijo v smislu izkoriščanja potenciala reguliranja osvetljenosti in temperature s premikanjem senčila, predstavlja uporaba senčenja za regulacijo osvetljenosti ter prezračevanja in

ogrevanja za regulacijo temperature učinkovit in zelo razširjen način prilagajanja bivalno-delovnih razmer.

4.2.3.2 Ocena harmonizirane regulacije

Harmonizirana sočasna regulacija toplotnega in optičnega procesa, izvedena s sistemom vodenja KAMRA, ni pokazala zadovoljivih rezultatov, če je sistem uravnaval osvetljenost in notranje temperature istočasno samo s pomiki rolete. V tem primeru so nastopili zelo neugodni oscilatorni premiki rolete, ki nikakor ne bi bili sprejemljivi v realnem bivalno-delovnem okolju, kljub temu da je sistem s takšnim gibanjem rolete uspešno reguliral tako osvetljenost kot tudi notranje temperature v celici. Testiranja na testni celici KAMRA niso privedla do učinkovite sočasne regulacije osvetljenosti in temperatur s premiki rolete, le pri regulaciji osvetljenosti z roletno in notranjih temperaturah z dodatnimi viri so bili doseženi ugodni rezultati. Pripomniti pa je potrebno, da v slednjem primeru ne gre za strogo gledano harmonizirano regulacijo, saj premiki rolete ne upoštevajo toplotnih aspektov regulacije.

Preglednica 4.19: Povzetek delovanja regulacije v primeru eksperimenta EX-SVET-013.
Table 4.19: Summary of system behaviour in the case of experiment EX-SVET-013.

EX-HARM-013 - ocena delovanja regulacije:	
Sledenje referenčnemu profilu:	
Temperatura	ODLIČNO • Uporaba dodatnih virov omogoča skoraj popolno sledenje referenčnemu profilu notranjih temperatur zraka.
Osvetljenost	DOBRO • Odstopanja manjša od ± 200 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«):	
Temperatura	ODLIČNO • Zaradi uporabe grelce skoraj trenutno odreagirane na spremembe v temperaturnem profilu zelenih vrednosti.
Osvetljenost	DOBRO • Hipen odziv z majhnimi odstopanji od zelene vrednosti.
Dinamika premikov rolete	DOBRO • Okoli 20 premikov v uri in brez izrazitih sunkovitih premikov.
Delovanje dodatnih virov:	
Grelci	ODLIČNO
Ventilator	NEZADOVOLJIVO • Premajhna kapaciteta ventilatorja za doseganje primerne delovanja.
Opombe	• Učinkovit način za uravnavanje notranjih pogojev v testni celici.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično	

Glavni problem pri harmoniziranem vodenju rolete je pogostost preklpov med dvema regulacijskima zankama ter posledično nastop oscilatornega preklapljanja okoli referenčnih vrednosti, ena od možnih rešitev, ki se ponuja za preprečitev ali ublažitev takšnega obnašanja sistema, je vključitev nastavljive histerezne zanke, ki omogoča poljubno določanje trenutka preklopa. Tako bi bilo mogoče definirati, da se preklop med dvema stanjema ne zgodi, dokler ni preseženo določeno odstopanje od želenih vrednosti, s tem pa bi bilo mogoče tudi kontrolirati pogostost premikov elementov senčila. Ocena delovanja sočasnega uravnavanja osvetljenosti in temperature testne celice je podana v preglednici 4.20.

Preglednica 4.20: Ocena načinov harmonizirane regulacije notranjega okolja celice KAMRA.

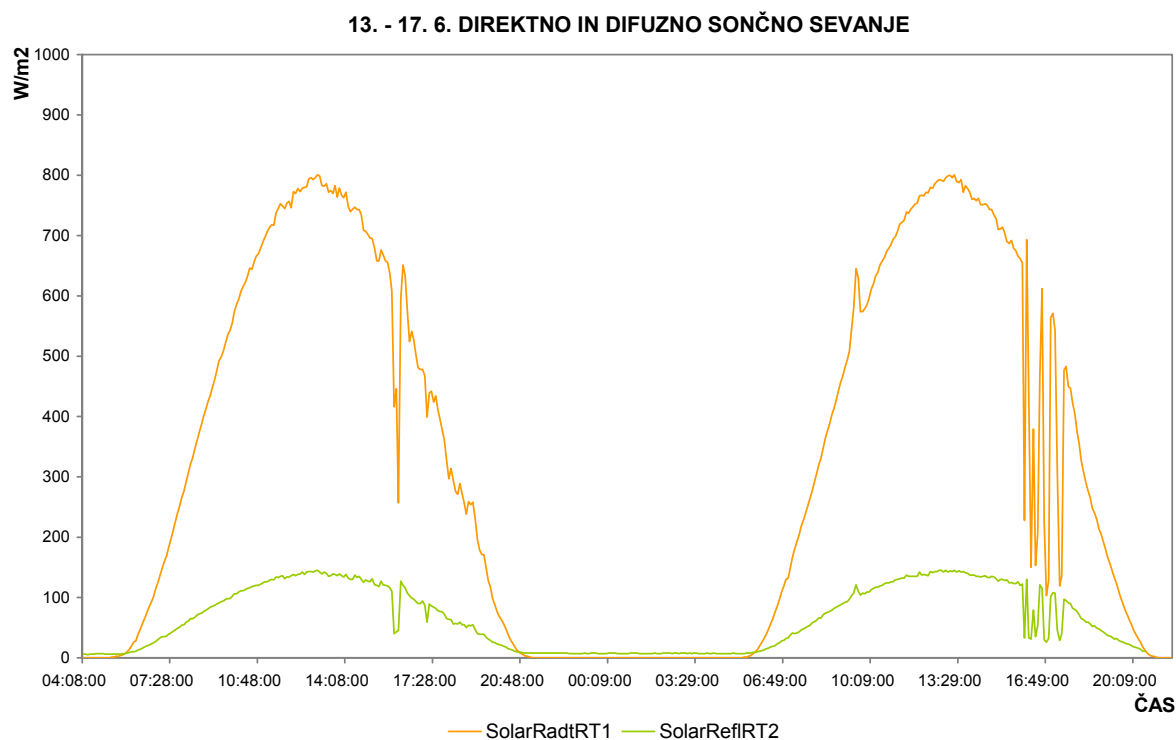
Table 4.20: Evaluation of different approaches to the harmonization regulation in the test cell KAMRA.

HARMONIZIRANA REGULACIJA IZVEDENA Z:		
	ROLETO (temperatura in osvetljenost)	ROLETO (osvetljenost) IN DODATNIMI VIRI (temperatura)
Sledenje referenčnemu profilu:		
Temperatura	DOBRO • Povprečna maksimalna odstopanja $\pm 3K$.	ODLIČNO • Dodatni viri omogočajo skoraj popolno sledenje.
Osvetljenost	DOBRO • Maksimalna odstopanja manjša od ± 250 lx.	DOBRO • Učinkovito sledenje z odstopanji manjšimi od ± 200 lx.
Odzivnost na hipne spremembe (»stopnice«):		
Temperatura	ZADOVOLJIVO • Zaradi dinamike temperaturnih procesov se notranje temperature spreminjajo zelo počasi.	ODLIČNO • Hipni odziv zaradi regulacije z dodatnimi viri.
Osvetljenost	DOBRO • Hipen odziv z majhnimi odstopanji od zelene vrednosti.	DOBRO • Hipen odziv z majhnimi odstopanji od zelene vrednosti.
Dinamika premikov rolete	NEZADOVOLJIVO • Oscilirajoče premikanje rolete.	DOBRO • Med 10 in 20 premikov rolete v uri.
Delovanje dodatnih virov:		
Grelci		ODLIČNO
Ventilator		NEZADOVOLJIVO • Ventilator ima premajhno kapaciteto.
Opombe	<ul style="list-style-type: none"> Sledenje notranjim referenčnim vrednostim je uspešno in znotraj dopustnih odstopanj. Premiki rolete so oscilirajoči, zato je regulacija iz gledišča uporabnikov neuspešna oziroma bi bila moteča. 	<ul style="list-style-type: none"> Zelo učinkovito uravnavanje notranjih pogojev v testni celici. Strogo gledano ne gre za harmonizirano istočasno regulacijo toplotno-optičnih tokov skozi stavbni ovoj.
Ocenjevalna lestvica: nezadovoljivo, zadovoljivo, dobro, odlično		

Uporaba principov in nastavitvev harmonizirane regulacije sistema KAMRA pri sistemu IRsNO je vprašljiva, saj le-ta ni primerno delovala in ne omogoča primerne platforme za nadaljnje razvijanje nastavitvev sistema. Kljub temu pa izkušnje pri eksperimentih omogočajo spoznavanje mogočih pasti pri takšni zasnovi regulacije, pri oblikovanju sistema IRsNO je potrebno predvsem omogočiti določanje oziroma omejevanje pogostosti premikov, saj je bolje, da sistem privarčuje manj energije in ga sprejmejo uporabniki, kot pa da je energetsko zelo učinkovit, a hkrati popolnoma nesprejemljiv za uporabnike .

4.2.4 Zakonitosti toplotno-optičnega procesa v stavbah

Na podlagi izvedenih eksperimentov in meritev okoljskih parametrov na dani lokaciji (Ljubljana: zemljepisna širina = 46.05° , zemljepisna dolžina = 14.30°) je mogoče formulirati osnovne parametre oziroma mejne pogoje delovanja toplotno-optičnega procesa skozi stavbni ovoj. Znanje o fizikalnih značilnostih procesa ter pričakovanih vrednostih vplivnih količin

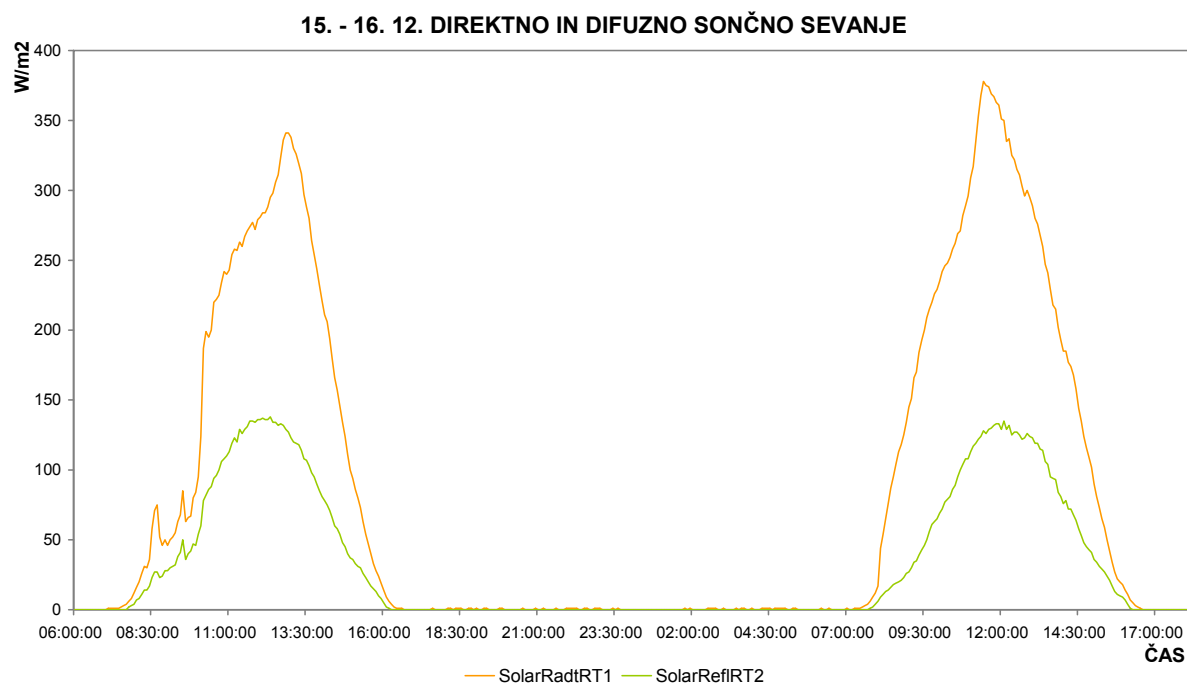


Slika 4.44: Prikaz količine in razmerja direktnega in difuznega sončnega sevanja v poletnem času.

Fig. 4.44: The diagram of diffuse and direct solar radiation in the summer time.

omogoča razumevanje procesa, predvsem pa lažje definiranje regulacijskih pravil kontrolnega sistema, saj so s tem podane pričakovane mejne vrednosti.

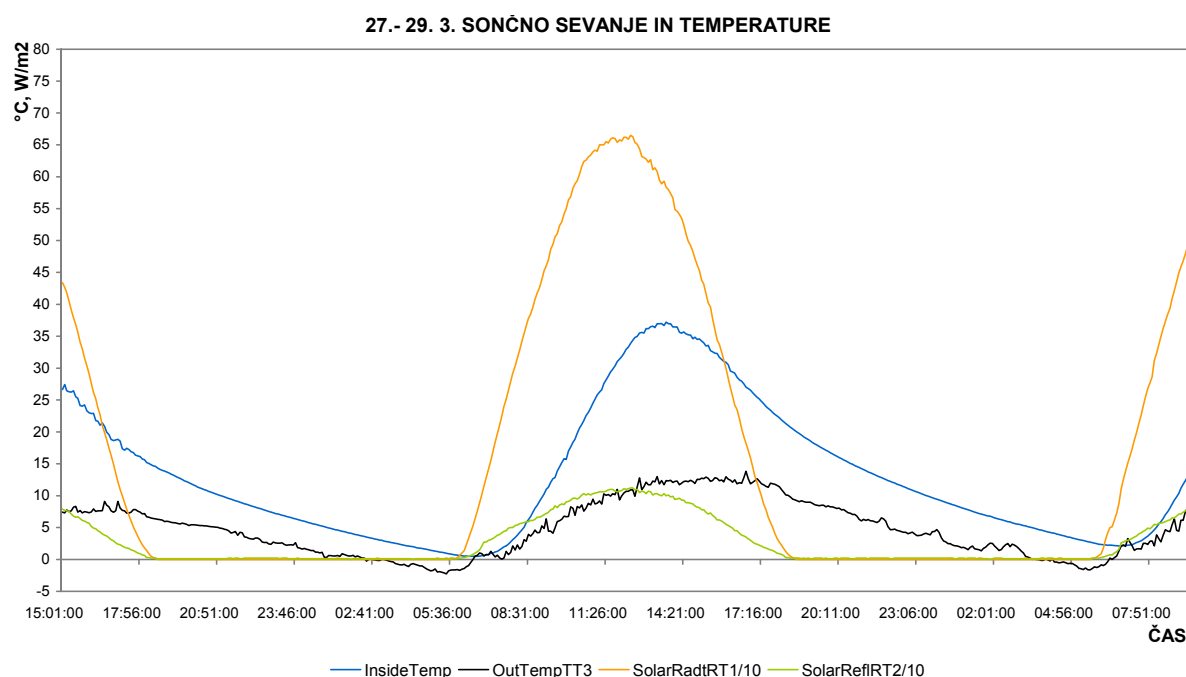
Sončno sevanje predstavlja najpomembnejši vpliv zunanjega okolja na notranje delovno-bivalne razmere saj neposredno vpliva tako na osvetljenost kot tudi temperaturne pogoje v prostorih. Z vidika notranjih bivalnih pogojev sta pomembni tako intenziteta kot tudi distribucija sončnega sevanja, saj oba parametra odločujoče vplivata na izkoriščanje zunanjih danosti pri pokrivanju notranjih potreb vizualno in toplotno udobnega bivalnega prostora. Sončno sevanje, ki preide skozi transparentne dele stavbnega ovoja v notranjost stavbe, vpliva na notranjo osvetljenost prostora in s segrevanjem obsijanih površin tudi na notranjo temperaturo zraka. Iz dvojnosti vpliva sončnega sevanja je očitno, da reguliranje geometrijskih lastnosti transparentnega ovoja stavbe vpliva istočasno tako na notranje temperaturne pojave kot tudi osvetljenost prostora z dnevno svetlobo. Za lokacijo Kabineta KSKE III/1, kjer bo vgrajen sistem IRsNO, sončno sevanje po naših meritvah [Trobec-Lah 2003] doseže maksimalne vrednosti junija ali julija, in sicer lahko tudi nad 1000 W/m^2 , kar pa



Slika 4.45: Prikaz količine in razmerja direktnega in difuznega sončnega sevanja v zimskem času.

Fig. 4.45: The diagram of diffuse and direct solar radiation in the winter time.

je kljub vsemu bolj izjema kot pravilo. V tem času je razmerje med neposredno in difuzno komponento sončnega sevanja v opoldanskem času najmanjše, saj se delež difuznega sevanja giblje od 13 do 20 % glede na neposredno sončno sevanje (Slika 4.44). Minimalne letne vrednosti sončnega sevanja so dosežene v zimskem obdobju, in sicer januarja ali decembra, ko se nivo sevanja pri lepem sončnem vremenu giblje od 300 do 400 W/m². V tem času je doseženo tudi največje razmerje med odbitim in direktnim sončnim sevanjem, saj lahko le-to v decembru preseže tudi 30 % (Slika 4.45). Razmerje med difuznim in direktnim sončnim sevanjem se močno spreminja tudi skozi dnevni cikel, saj se v opoldanskem času giblje od 15 do 20 %, v jutranjem in večernem času pa od 25 do 50 %. Izvedene meritve v okviru testiranj sistema KAMRA so pokazale, da se povprečno dnevno sončno sevanje na letni ravni giblje od 200 do 300 W/m². Izrazito oblačno in deževno vreme privede do izredno nizkih vrednosti sončnega sevanja, saj v takšnih pogojih ni nenavadno, da se maksimalna dnevna vrednost giblje od 20 do 50 W/m². Podobno lahko zelo močno vpliva na količino sončnega sevanja tudi trenutna pooblačitev (nevihtno vreme), saj se takrat pojavijo skokovite spremembe v količini sevanja, ki se lahko v nekaj minutah spremeni za od 500 do 600 W/m². Vpliv sončnega sevanja na notranje temperaturne pogoje je opisan in definiran v preglednici 4.21, vpliv sončnega sevanja na temperaturne razmere v celici KAMRA pa je prikazan na sliki 4.46.



Slika 4.46: Vpliv sončnega sevanja na notranje in zunanje temperature zraka.

Fig. 4.46: Influence of solar radiation on the internal and external air temperatures.

Preglednica 4.21: Vpliv sončnega sevanja na notranje temperaturno okolje stavbe. Prikazana je relacija med absolutnimi vrednostmi in opisnimi oziroma mehкими definicijami.

Table 4.21: Influence of solar radiation on the internal temperatures. The relation between the descriptive and absolute values is shown below.

OPISNA (MEHKA) VREDNOST SEVANJA	VREDNOST SEVANJA	OPIS VPLIVA NA NOTRANJE OKOLJE
Zelo šibko sevanje	0 -100 W/m ²	Sevanje skoraj ne vpliva na notranje temperature v objektu.
Šibko sevanje	25 – 150 W/m ²	V primerjavi z izgubami skozi ovoj so solarni pritoki manjši.
Srednje šibko sevanje	100 – 300 W/m ²	Sevanje vpliva na ogrevanje prostora, če se ta hladi skozi ovoj (zima), v nasprotnem primeru (poletje) se že lahko pojavi pregrevanje.
Srednje sevanje	250 – 500 W/m ²	Znaten vpliv na ogrevanje notranjega okolja objekta.
Srednje močno sevanje	350 – 700 W/m ²	Hitro segrevanje notranjega zraka, možnost pregrevanja.
Močno sevanje	500 – 1000 W/m ²	Zelo hitro segrevanje notranjega zraka, nevarnost pregrevanja.
Zelo močno sevanje	750 – 1500 W/m ²	Izrazito segrevanje notranjega prostora, pregrevanje.

Preglednica 4.22: Vpliv zunanjih temperatur na notranje okolje definirano s pomočjo razlike med notranjo in zunanjo temperaturo (ΔT). Prikazana relacija definira povezave med opisnimi in absolutnimi vrednostmi.

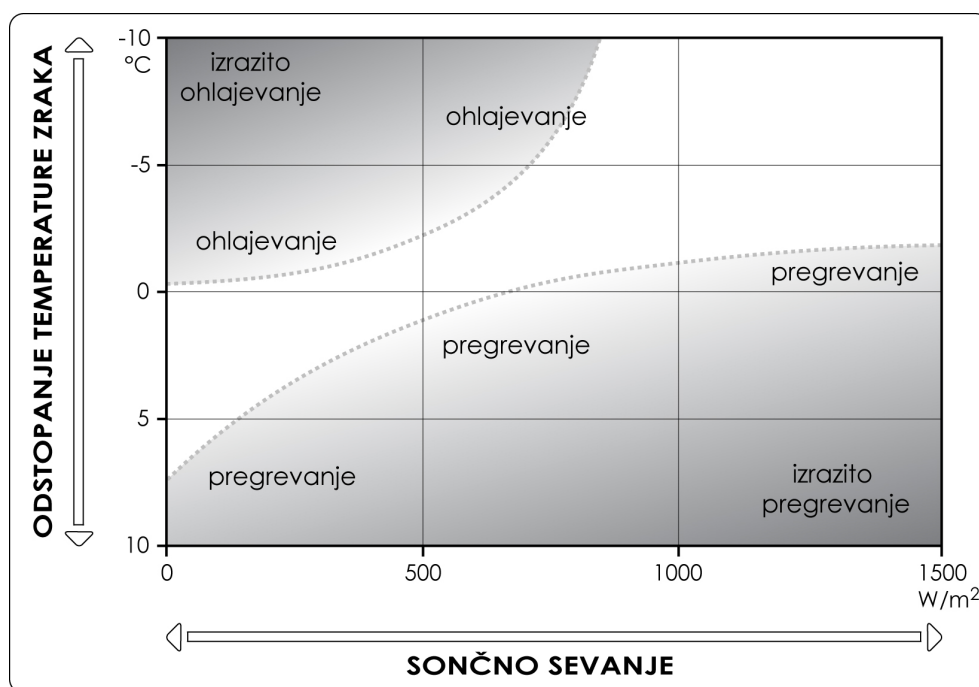
Table 4.22: Influence of external temperatures on the internal environment defined by the difference between internal and external temperatures (ΔT). The relation between the descriptive and absolute values is shown below.

OPISNA (MEHKA) VREDNOST ΔT	ΔT	OPIS VPLIVA NA NOTRANJE OKOLJE
Zelo nizke zunanje temperature	$\Delta T > -4^{\circ}\text{C}$	Objekt ima tendenco hitrega ohlajanja, ki pa je odvisna od karakteristik konstrukcijskih sklopov.
Nizke zunanje temperature	$-4^{\circ}\text{C} > \Delta T > -1^{\circ}\text{C}$	Ohlajanje objekta.
Zunanje temperature nižje od notranjih	$-2^{\circ}\text{C} > \Delta T > 0^{\circ}\text{C}$	Počasno ohlajanje objekta.
Zunanje temperature enake notranjim	$-1^{\circ}\text{C} > \Delta T > 1^{\circ}\text{C}$	Objekt se niti ne ohlaja niti ne segreva.
Zunanje temperature višje od notranjih	$0^{\circ}\text{C} > \Delta T > 2^{\circ}\text{C}$	Počasno ogrevanje objekta.
Visoke zunanje temperature	$1^{\circ}\text{C} > \Delta T > 4^{\circ}\text{C}$	Ogrevanje objekta.
Zelo visoke zunanje temperature	$\Delta T > 4^{\circ}\text{C}$	Objekt ima tendenco hitrega ogrevanja, ki pa je odvisna od karakteristik konstrukcijskih sklopov.

Poleg sončnega sevanja vplivajo na toplotni proces v notranjem okolju tudi zunanje temperaturne razmere. Njihov vpliv na notranje temperaturno ugodje je v veliki meri odvisen od gradbeno-fizikalnih karakteristik (U-faktor, temperaturna zakasnitev) stavbnega ovoja, in

sicer tako transparentnega kot tudi netransparentnega dela. Vpliv zunanjih temperatur na notranje okolje je okvirno definiran z razliko med notranjo in zunanjo temperaturo zraka v preglednici 4.22, vendar je potrebno poudariti, da so dejanski vplivi zelo odvisni od karakteristik stavbe. Iz preglednic 4.21 in 4.22 je razvidno, da je končni vpliv zunanjega okolja na notranje temperaturno okolje posledica kombiniranega vpliva sončnega sevanja in zunanjih temperatur zraka [Furlan 1999]. Dejanska povezava med vplivom sončnega sevanja in zunanjih temperatur zraka na notranjost stavbe je razvidna iz diagrama na sliki 4.47, iz katerega je možno razbrati, da je ohlajanje notranjosti mogoče le pri nizkem sončnem sevanju ter nizkih zunanjih temperaturah. Podobno se objekt pri visokem sončnem sevanju zelo hitro pregreje kljub nizkim zunanjim temperaturam.

Opisane povezave in vplivi zunanjega okolja na notranje okolje seveda ne predstavljajo popolne slike vseh vplivov, ampak samo izbor in poenostavitev, primerno za izbrano lokacijo. Pri definiranju specifičnih pravil regulatorjev je potrebno upoštevati tako značilnosti stavbe (orientacija, velikost, oblika, sestava ovoja ...) in notranjega okolja (vrsta dela, notranje



Slika 4.47: Kombiniran vpliv sončnega sevanja in odstopanj zunanjih temperatur od notranjih (želenih) temperatur. (Furlan, 1999, str.: 123)

Fig. 4.47: The combined influence of solar radiation and the difference between external and internal set point temperatures. (Furlan, 1999, str.: 123)

zahteve ...) kot tudi specifike lokacije, saj lahko lokalne klimatske razmere zelo drastično variirajo tudi na relativno ozkem geografskem področju. Odločujoč vpliv, ki ga je potrebno upoštevati pri definiciji mejnih danosti zunanjega okolja, ima predvsem orientacija transparentnega dela stavbnega ovoja, saj je s tem geometrijsko določeno, v kolikšni meri in kdaj bo potencial lokacije v obliki sončnega sevanja vplival na notranje okolje. Podobno bi bilo na določenih lokacijah (lokacije s stalnimi vetrovi ali zelo izrazito izpostavljene lokacije) smiselno upoštevati tudi vpliv vetra na notranje temperaturno okolje, saj hitrejše premikanje zraka pri zunanjih površinah stavbe pomeni tudi intenzivnejšo konvekcijo. Vpliv vetra na toplotne izgube se manjša z zniževanjem U-faktorja stavbnega ovoja ter je pri dobro toplotno izoliranih stavbah verjetno popolnoma zanemarljiv, kljub temu pa lahko veter zelo vpliva na vdor zunanjega zraka skozi stike elementov stavbe.

4.3 Parametri oblikovanja sistema IRsNO

Osnovne specifikacije sistema integralne regulacije notranjega okolja predstavljajo ogrodje za oblikovanje sistema vodenja osvetljevanja, ogrevanja in prezračevanja v prostoru kabine KSKE III/1. Platforma za izvajanje vodenja omogoča izvedbo širokega nabora nastavitvev in načinov upravljanja s sistemom, ki je osnovan na krmilniku Mitsubishi MELSEC A2SHCPU(S1) ter nadzorni aplikaciji, izvedeni v SCADA Factory Link programskem okolju. Sistem vodenja ima tri glavne vsebinske sklope, ki se delijo glede na področje aplikacije regulacije.

- **Vodenje osvetlitve prostora** (Preglednica 4.23) je omogočeno s šestimi venecijanskimi zunanjimi žaluzijami tipa »KRPAN 80« ter z vklapljanjem umetne osvetlitve. Vsaka žaluzija ima svoj motorni pogon, ki skrbi tako za spuščanje in dviganje žaluzije kot tudi določevanje nagiba lamel. Zaradi načina premikanja žaluzij se le-te spuščajo v zaprti poziciji, ko so popolnoma spuščene, jih ustavi končno stikalo, nakar je mogoče določati naklon lamel. Pri dviganju se žaluzije najprej popolnoma odprejo, šele nato se pričnejo premikati. Zaradi takšne specifike premikanja senčila se regulacija izvaja le pri popolnoma spuščeni žaluziji, in sicer s štirimi možnimi nakloni lamel (0°-popolnoma zaprta žaluzija, 30°, 60°, in 90°-

Preglednica 4.23: Oris osnovnih parametrov vodenja osvetljenosti kabineta KSKE III/1.
Table 4.23: Basic parameter of illumination regulation in the cabinet KSKE III/1.

PARAMETER	OPIS
Želena notranja osvetljenost prostora	Definiranje notranje zelene torej referenčne vrednosti osvetljenosti prostora.
Utež za osvetljenost delovnega mesta 1	Utež (k_1) za vpliv dejanske osvetljenosti delovnega mesta 1, ki določi v kolikšni meri vpliva meritev na izračun povprečne osvetljenosti prostora. Povprečna osvetljenost prostora se določi z izrazom 4.21. Utež je možno definirati na intervalu med 2.0 in 0.0.
Utež za osvetljenost delovnega mesta 2	Utež (k_2) za vpliv dejanske osvetljenosti delovnega mesta 2, ki določi v kolikšni meri vpliva meritev na izračun povprečne osvetljenosti prostora. Povprečna osvetljenost prostora se določi z izrazom 4.21. Utež je možno definirati na intervalu med 2.0 in 0.0.
Histereza osvetlitve za premike lamel	S pomočjo histereze se določi pasovno območje odstopanj, ki mora biti preseženo, da sistem izvede premik lamele.
Histereza osvetlitve za vklop umetne osvetlitve	S pomočjo histereze se določi pasovno območje odstopanj, ki mora biti preseženo, da sistem aktivira umetno osvetlitev prostora.
Nastavitve urnikov s stanji delovanja žaluzij	V urnikih je možno določiti način delovanja aktuatorjev. Urniki so lahko definirani za vsak dan posebej ali pa za celotne skupine dni, npr.: delavnik, praznik, dopust...
Resinhonizacija pozicije žaluzij	Časovni interval, v katerem sistem izvede inicializacijo začetne pozicije žaluzij. Periodična sinhronizacija pozicije je potrebna zaradi možnega seštevanja napak, ki nastanejo pri vodenju lamel.
Izbira prioritete regulacije	Izbora kateri reguliran parameter notranjega okolja je prioriteten. Izbor je možen med osvetlitvijo in toploto.
Definiranje jakosti vetra za dvig žaluzij	Varovalo proti poškodovanju žaluzij je izvršeno s spremljanjem hitrosti vetra. Če je presežena vnešena vrednost, sistem avtomatsko dvigne vse žaluzije, ne glede na način regulacije (ročno ali avtomatsko).
Konstante PID-regulatorjev	Konstante PID oziroma PI-regulatorjev sistema. Nastavlja se integrirni čas (T_i) in ojačanje proporcionalnega dela regulatorja (K).

maksimalno odprte lamele). Za fleksibilnejšo regulacijo je omogočen tudi popoln dvig vsakega posameznega segmenta žaluzij. Ker sistem ne omogoča povratne informacije o poziciji (naklonu) lamel, se lahko med delovanjem pojavi desinhronizacija delovanja, čemur se je mogoče izogniti s ciklično inicializacijo senčila v prvotni položaj (popolnoma odprta žaluzija), interval inicializacije je mogoče poljubno nastaviti znotraj nadzorne aplikacije sistema IRsNO. Reinitializacijo žaluzije v izhodiščni položaj je mogoče izvesti tudi ročno. Zaradi izvedbe regulacije s stopenjskim odpiranjem lamel je v sistemu potrebno definirati histerezo v nivoju osvetljenosti za preklon med dvema stopnjama. Definiranje histereze preprečuje nenehno preklapljanje med dvema pozicijama v primeru mejnih vrednosti osvetljenosti prostora. Algoritem vodenja osvetlitve lahko upravlja z vsako žaluzijo posebej ali pa so le-te združene v skupine. Vzporedno z avtomatsko

regulacijo je vedno omogočena tudi ročna, ki je dosegljiva z računalniško aplikacijo IRsNO ali pa s tipkama za pomik žaluzij, ki sta nameščeni pri oknu. Glede na urnike obratovanja delovanja posamezne žaluzije je lahko le-ta popolnoma odprta, popolnoma zaprta ali pa v stanju reguliranja notranje osvetljenosti prostora. Ker se osvetljenost notranjega prostora meri na dveh delovnih mestih (O_1 in O_2), se za dejansko osvetljenost prostora (O) uporablja povprečje uteženih osvetljenosti posameznih delovnih mest (k_1 in k_2). Tako je osvetlitev prostora določena z izrazom 4.22. Če razpoložljiva dnevna svetloba ne zadošča za izpolnitev želenih vrednosti notranje osvetljenosti, sistem kot dodaten vir vključi umetno osvetlitev. Za preprečitev zaporednega pogostega vklapljanja in izklapljanja luči zaradi stopenjske regulacije lamel žaluzij je na nadzornem sistemu potrebno vnesti histerezno območje za vklop luči. Če je sistem v nočnem režimu (za regulacijo osvetljenosti ni izbrana nobena žaluzija), se tudi luči ne prižgejo. Ker so žaluzije nameščene na zunanji strani oken, je ob močnem vetru možna poškodba celotne žaluzije ali pa le posameznih elementov. Sistem IRsNO spremlja s pomočjo zunanjega senzorja tako jakost kot tudi smer vetra, kar mu omogoča, da pri močnem vetru dvigne žaluzije ter s tem prepreči poškodbe.

$$O = \frac{(O_1 * k_1 + O_2 * k_2)}{2} \quad (4.22)$$

- **Regulacija notranje temperature prostora (ogrevanje in hlajenje)** (Preglednica 4.24) je dosežena s pozicioniranjem žaluzij, odpiranjem okna in aktiviranjem stropnih hladilno-grelnih radiacijskih panelov. Prioritetno se vedno izbere pasivni vir, torej vire ogrevanja, ki ne potrebujejo dotoka dodatne energije iz neobnovljivih virov (sončno sevanje in zunanji zrak), šele ko je potencial takšnih virov izčrpan, se uporabijo stropni hladilno-grelni elementi. V nadzornem sistemu IRsNO se definira način delovanja tako, da se izbira med ogrevalno ali hladilno sezono. Pri ogrevanju je potrebno nastaviti želeno (referenčno) notranjo temperaturo zraka ter vrednost oziroma količino sončnega sevanja, ki je še zadovoljivo za pokrivanje potreb po ogrevanju prostora brez dodatnih virov. Če sistem ne uspe pokriti energetskih potreb prostora za vzdrževanje zelene notranje temperature, se aktivirajo hladilno-grelni

Preglednica 4.24: Oris osnovnih parametrov vodenja temperature kabineta KSKE III/1.
Table 4.24: Basic parameter of temperature regulation in the cabinet KSKE III/1.

PARAMETER	OPIS
Režim delovanja	Z definiranjem režima delovanja se sistemu definira ali je v ogrevalni ali v hladilni sezoni.
Želena temperatura prostora	Želene temperature notranjega zraka definirajo ciljne vrednosti sistema. Možen je vnos zelene temperature za delovni režim (delovnik) in reducirni režim (noč, prazniki...)
Definiranje notranje relativne vlažnosti za izklop hlajenja	Če je definirana relativna vlažnost notranjega zraka presežena, sistem izklopi hladilne radiacijske elemente. Varovalo je namenjeno preprečevanju nastanka kondenza na hlajenih površinah seval.
Pasivno hlajenje	Če je sistem v hladilnem režimu, je hlajenje omogočeno s prezračevanjem, s pomočjo odpiranja okna.
Definiranje zunanje relativne vlažnosti za zapiranje okna	Sistem spremlja zunanjo relativno vlažnost zraka in okno avtomatsko zapre, če ta preseže definirano vrednost, s čimer se prepreči padanje dežja v prostor. Okno se zapre tudi v primeru, če je zunanja absolutna vlažnost višja od notranje zelene, pri kateri hlajenje s prezračevanjem ni več učinkovito.
Izbira prioritete regulacije	Gre za izbor prioritete reguliranega parametra notranjega okolja. Izbor je možen med osvetlitvijo in toploto.
Konstante PID-regulatorjev	Konstante PID oziroma PI-regulatorjev sistema. Nastavlja se integrirni čas (T_i) in ojačanje proporcionalnega dela (K).

stropni paneli. Ker spreminjanje pozicije žaluzij sočasno vpliva tako na notranjo osvetljenost kot tudi notranje temperature zraka, je potrebno v nadzornem sistemu pri nastavitvah za žaluzije definirati prioriteto regulacijo. Če je izbrana pri žaluzijah prioriteta regulacija »toplota«, pomeni, da bo sistem poskušal najprej z žaluzijami uravnati notranjo temperaturo zraka, šele nato notranjo osvetljenost delovnih mest. Ko je sistem v nastavitvah za ogrevanje, se možnost ogrevanja notranjega prostora z zunanjim zrakom zanemari, saj pogoji, ko je zunanji zrak toplejši od notranjega in je hkrati potrebno ogrevati delovno-bivalno okolje, nastopajo zelo redko. Nasprotno pa je mogoče notranji prostor hladiti s prezračevanjem, pri čemer sistem odpre okno ter spusti zunanji zrak v notranjost. Pri takšnem hlajenju je potrebna pozornost pri vlažnosti zraka, saj če je absolutna vsebnost vlage (izračun se izvede iz relativne vlažnosti in temperature zraka) v zunanjem zraku višja od zelene v prostoru, hlajenje ni učinkovito oziroma se notranji bivalni pogoji poslabšajo. V tem primeru sistem kljub potrebi po hlajenju ne aktivira odpiranja okna. Če prezračevanje ne zadošča za zelen učinek hlajenja prostora, IRsNO aktivira hladilno-grelne stropne panele. Seveda na notranje temperature zraka močno vpliva tudi neposredno sončno sevanje, ki povzroča možnost pregrevanja v poletnih mesecih. Podobno kot pri ogrevanju se v sistemu nastavi vrednost sončnega sevanja, ki je še sprejemljiva za uporabnike glede

toplotnega ugodja (v poletnih mesecih že relativno nizke vrednosti sončnega sevanja povzročajo pregrevanje prostorov), če je ta vrednost presežena, sistem zastre okna ter s tem prepreči vstop sevanja v prostor. Senčenje oken v obdobju hlajenja se izvaja ne glede na to, ali je prioriteta pri regulaciji žaluzij »osvetljenost« ali »toplota«, saj je uporaba umetne osvetlitve energetsko manj potratna kot hlajenje prostora z dodatnimi viri. Pri vseh operacijah avtomatskega vodenja je tako kot pri regulaciji osvetljenosti vedno možna ročna prekinitiv z računalniško aplikacijo IRsNO ali pa z gumbi za upravljanje odpiranja okna in premikanja žaluzij.

- **Zagotavljanje kvantitete notranjega zraka** (Preglednica 4.25) se izvaja z odpiranjem okna, s čimer se notranji zrak zamenja z zunanjim, svežim. Kvaliteta notranjega zraka je definirana s koncentracijo CO₂ v prostoru, ki je merjena s senzorjem, nameščenim v kabinetu KSKE III/1. Ko je presežena definirana zelena koncentracija CO₂, sistem aktivira odpiranje okna. Ker prezračevanje služi tudi za hlajenje prostora, je povezava med hlajenjem in vzdrževanjem kvalitete notranjega zraka dosežena s spremljanjem zunanjih temperatur zraka in primerjave absolutne vlažnosti zunanjega in notranjega zraka. Ker kvaliteta zraka predstavlja prioriteto pri zagotavljanju ugodnega bivalnega okolja, prezračevanje deluje prednostno pred vsemi drugimi regulacijskimi nastavitvami. Tako pri preseženi koncentraciji CO₂ sistem prezračuje prostor tudi takrat, ko takšen ukrep pomeni nižjo energetsko učinkovitost. Edini razlog za preprečitev prezračevanja kabineta so neugodni zunanji vremenski pogoji oziroma takrat, ko obstaja nevarnost padanja dežja ali snega v prostor. Sistem IRsNO pri odpiranju okna spremlja zunanje vremenske razmere ter pri nastopu visoke relativne vlažnosti zunanjega zraka (dež ali sneg) prepreči oziroma zadrži odpiranje okna, če pa je to že odprto, ga zapre.

Preglednica 4.25: Oris osnovnih parametrov vodenja kvalitete zraka kabineta KSKE III/1.
 Table 4.25: Basic parameters of air quality regulation in the cabinet KSKE III/1.

PARAMETER	OPIS
Kritična vsebnost CO₂	Nastavljena maksimalna vrednost vsebnosti CO ₂ v zraku, ki je še sprejemljiva za kvaliteten notranji zrak.
Histereza za zaprtje okna	Ko vrednost CO ₂ pade pod definirano histerezno območje od kritične meje, se okno zapre.
Definiranje zunanje relativne vlažnosti za zapiranje okna	Sistem spremlja zunanjo relativno vlažnost zraka in če ta preseže definirano vrednost, se okno avtomatsko zapre ter s tem prepreči padanje dežja v prostor.

Zbiranje podatkov sistema poteka periodično vsakih 30 s, saj zaradi dinamike obravnavanih procesov manjša perioda ni smiselna. Predvsem pri termičnih procesih manjša perioda ne bi vplivala na boljšo ali hitrejšo odzivnost sistema. Izvedba dejanskega sistema vodenja bo v kabinetu KSKE III/1 potekala v dveh fazah, pri čemer prva faza obsega izvedbo klasične regulacije s pomočjo PI-regulatorjev ter testiranje in uglašavanje tako senzorjev kot tudi izvršnih členov. V drugi fazi bodo v regulacijsko shemo vključeni tudi mehki regulatorji, ki bodo oblikovani po zasnovi, predstavljeni v pričujoči nalogi. Izvedba mehke regulacije bo vključena v sistem vodenja tako, da bo omogočen prehod z mehkega na klasičen način vodenja, če bo to potrebno ali zaželeno. Odločitev za izvedbo možnosti preklopa znotraj nadzorne aplikacije je bila sprejeta zaradi želje po možnem primerjanju delovanja obeh načinov regulacije. V trenutnem stanju je izvedena prva faza izvedbe sistema IRsNO, ki obsega postavitev sistema PI-regulatorjev ter njihovo testiranje in odpravljanje napak delovanja. Shema strukture izvedenega dela sistema IRsNO v računalniškem okolju IDR BLOK se nahaja v prilogi C.

4.4 Nadzorna aplikacija IRsNO

Nadzorna aplikacija vodenja sistema notranjega okolja v kabinetu KSKE III/1 je izvedena v okolju SCADA Factory Link in je nameščena v sosednjem prostoru na osebni računalnik z Microsoft XP operacijskim sistemom. Aplikacija uporabnikom omogoča dostop do nastavitvev in funkcij sistema vodenja ter izvaja komunikacijo med krmilnikom Mitsubihii A2SHCPU(S1) in človeškim operaterjem. Nadzorni sistem je izvedlo podjetje INEA, d. o. o., po specifikacijah in v sodelovanju s KSKE.

Pri zagonu aplikacije se odpre osnovno okno z vhodnim menijem (Slika 4.48), ki predstavlja vstopno točko v program ter omogoča dostop do različnih podmenijev s prikazom stanja sistema ter možnostmi spreminjanja nastavitvev. Pri vsakem ponovnem zagonu aplikacije je ta v načinu »obiskovalec«, ki uporabniku ne omogoča spreminjanja nastavitvev in dostopa do naprednih funkcij, ampak le ogled poteka merjenih količin in stanja aktuatorjev, torej dostop do podmenijev »Main« in »Trendi«. Za dostopanje do naprednih funkcij, kot je nastavljanje parametrov zelenih vrednosti v podmeniju »Regulator«, pa je potrebno vnesti v osnovnem

meniju geslo s skrbniškimi dovoljenjem. Po vnosu ustreznega gesla je preko glavnega menija sistema uporabniku omogoča dostop do sledečih podmenijev:

- **geslo – prijava** (F3) – prijava uporabnikov,
- **geslo – odjava** (F4) – odjava uporabnikov,
- **main** (F5) – prikaz merjenih količin, prikaz zelenih količin, prikaz stanja aktuatorjev, prikaz režima regulacije,
- **trendi** (F6) – grafični prikaz izbranih merjenih količin,
- **eksperiment** (F7) – nalaganje predhodno shranjenega eksperimenta ter obdelava eksperimentov,
- **regulator** (F8) – spreminjanje nastavitev sistema vodenja s prenavljanjem zelenih vrednosti, režimov delovanja ter načina delovanja posameznih elementov regulacije,
- **alarmi** (F9) – izpis in obdelava alarmov, ki so se dogodili med delovanjem sistema,
- **analiza alarmov** (F11) – podmeni menija alarmi, ki omogoča analizo alarmov,
- **zgodovina alarmov** (F12) – priklic zgodovine alarmov za poljubno izbrano časovno obdobje,
- **urniki** (F10) – nastavljanje, urejanje in vnos novih urnikov s specifikacijami delovanja sistema,
- **sistem** – pregled delovanja sistema ter povezav s krmilnikom,
- **nastavitev časa** – gumb za nastavitve ure in datuma,
- **zaustavitev serverja** – gumb za varno zaustavitev strežnika aplikacije,
- **izhod iz aplikacije** – gumb za izključitev programa.

Po podmenijih se je mogoče premikati s pomočjo pritiska na ustrezno ikono ali pa z bližnjicami preko funkcijskih tipk (od F3 do F12). Vsi podmeniji v aplikaciji sistema vodenja IRsNO so razdeljeni na tri osnovne dele, pri čemer so v zgornjem delu ekrana nanizane ikone za dostop do glavnega menija in ostalih podmenijev, v spodnjem delu se nahajajo prikaz trenutnega časa in datuma ter vrstica s prikazom zadnjega alarma in tipka za potrditev le-tega. Osrednji del ekrana je namenjen vsebini trenutno izbranega menija.

V podmeniju »Main« (Slika 4.49) so, kot je bilo že omenjeno, prikazana stanja vseh merjenih količin, zelenih vrednosti in pozicije ter način delovanja aktuatorjev. Med merjenimi količinami zunanjega okolja so prikazane:

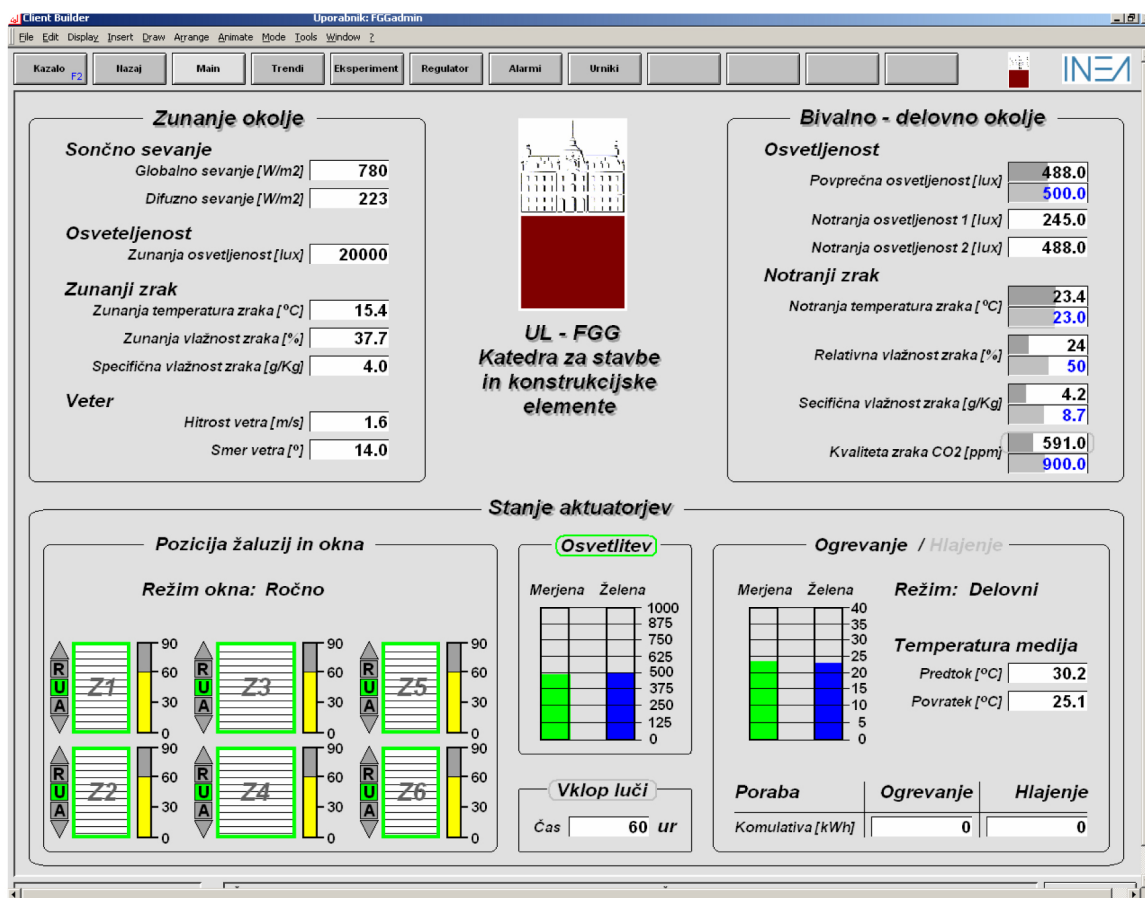
- direktno sončno sevanje (W/m^2),
- difuzno sončno sevanje (W/m^2),
- osvetljenost (lx),
- temperatura zraka ($^{\circ}C$),
- relativna vlažnost zraka (%),
- specifična vlažnost zraka (g/Kg),
- hitrost vetra (m/s),
- smer vetra ($^{\circ}$).



Slika 4.48: Vstopno okno v računalniški nadzorni aplikaciji IRsNO.
Fig. 4.48: Main menu of the computer application IRsNO.

Količine bivalno-delovnega okolja so prikazane vzporedno z želenimi vrednostmi, ki so prikazane pod merjenimi v modri barvi. Prikazane količine notranjega okolja so sledeče:

- povprečna osvetljenost prostora (lx), določena s pomočjo izraza 4.21,
- utežena vrednost osvetljenosti delovnega mesta 1 (lx),
- utežena vrednost osvetljenosti delovnega mesta 2 (lx),
- temperatura zraka ($^{\circ}\text{C}$),
- relativna vlažnost zraka (%),
- specifična vlažnost zraka (g/Kg),
- koncentracija CO_2 (ppm).



Slika 4.49: Okno »Main« je glavno okno aplikacije IRsNO, na katerem so predstavljene vse merjene in želene količine ter stanja aktuatorjev.

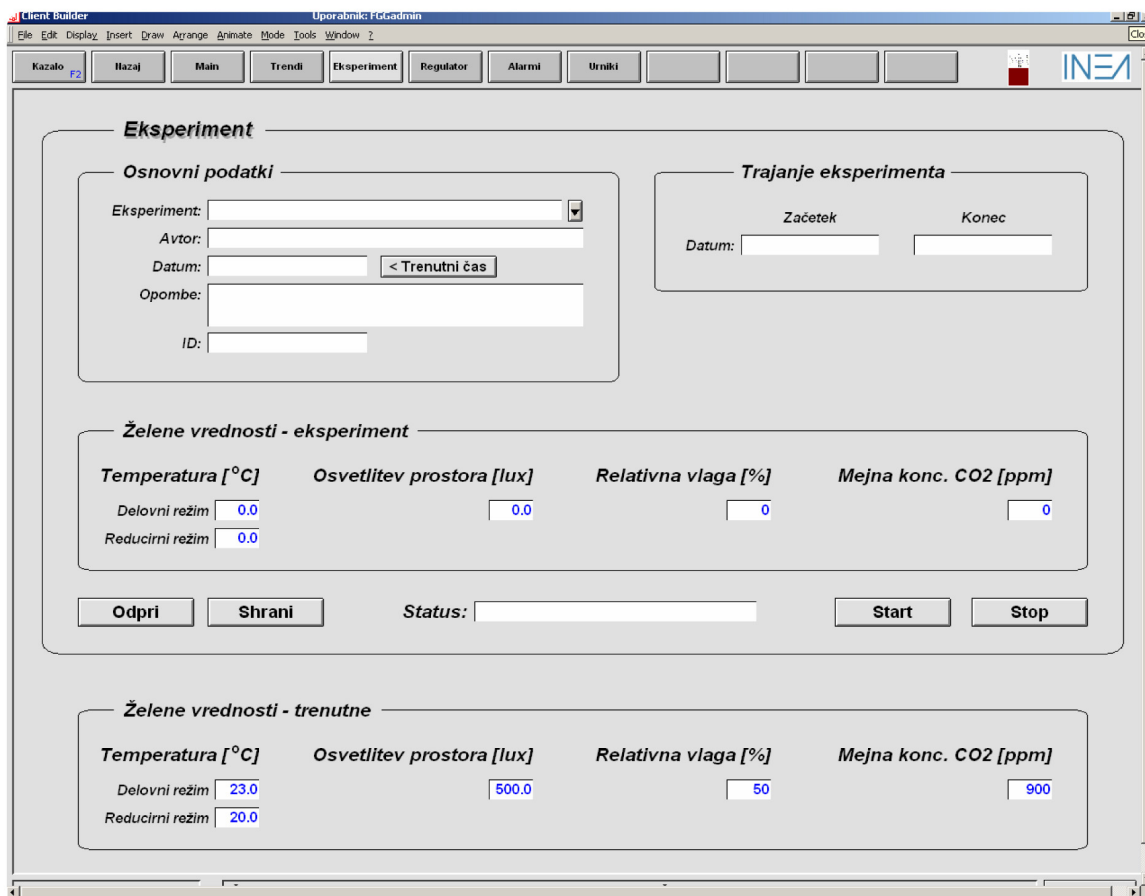
Fig. 4.49: »Main« is the main supervision window of the IRsNO application, where all set point and measured values as well as all the actuator states are displayed.

V spodnjem delu podmenija »Main« so prikazana stanja aktuatorjev s trenutnimi pozicijami in načinom delovanja. Pri žaluzijah sta tako označena način delovanja (R – ročno, A – avtomatsko, U – delovanje po urniku) ter pozicija lamel. Pri ogrevalno-hladilnih elementih so označeni: način delovanja (ogrevanje ali hlajenje), grafično prikazana merjena in želena temperatura notranjega zraka, vstopna in izstopna temperatura hladilnega ali ogrevalnega medija ter trenutna in kumulativna poraba energije. Pri osvetlitvi (luči) je grafično prikazana merjena in zelena osvetljenost prostora. Grafična predstavitev vseh spremljanih količin v obliki diagramov je omogočena v podmeniju »Trendi« (Slika 4.50), kjer se izrisujejo izbrane količine v določeni časovni skali, ki jo je mogoče definirati z ukaznimi gumbi v spodnjem delu ekrana. Vsaki od prikazanih količin je mogoče določiti ustrezno barvo, s kurzorjem in



Slika 4.50: V oknu »Trendi« so grafično prikazani trendi izbranih merjenih količin.

Fig. 4.50: Window »Trendi« is where all of the measured values can be displayed in the form of diagrams.



Slika 4.51: V oknu »Eksperiment« je omogočeno zaganjanje in shranjevanje predhodno definiranih eksperimentov, prikazane so želene vrednosti definirane v eksperimentu ter tudi trenutne vrednosti.

Fig. 4.51: In the »Eksperiment« window managing of the previously defined experiments is possible.

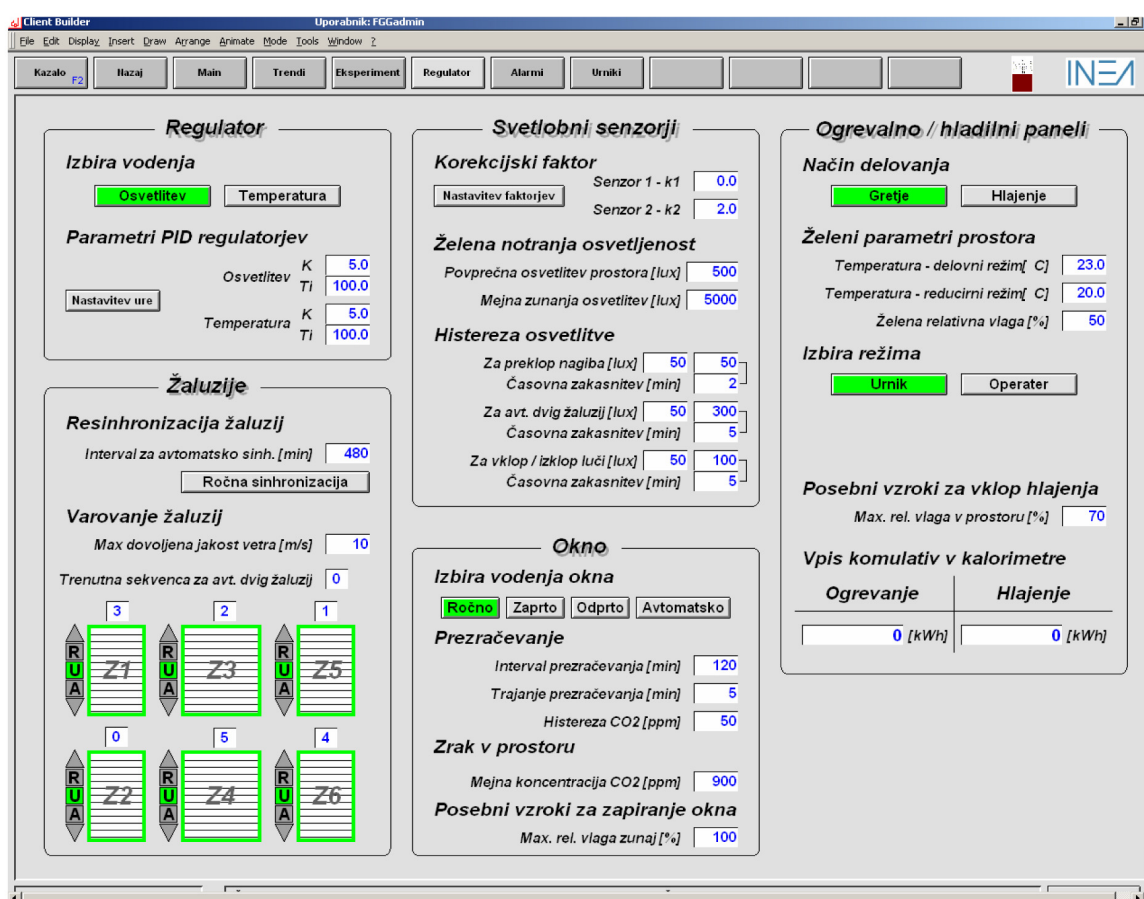
klikom na odgovarjajoče mesto grafičnega prikaza pa je mogoče odčitati stanje izrisanih količin v določenem trenutku.

Predhodno shranjene in definirane eksperimente je mogoče priklicati in zagnati v podmeniju »Eksperiment« (Slika 4.51), kjer je uporabniku omogočeno delo z zagonom zelenega eksperimenta. Mogoče je definirati začetni in končni čas, avtorja eksperimenta, ime eksperimenta, identifikacijsko oznako in poljubne opombe uporabnika.

Glavni podmeni za določanje nastavitev delovanja sistema je »Regulator« (Slika 4.52), kjer so uporabniku s skrbniškimi pravicami omogočene spremembe nastavitev sistema IRsNO. V

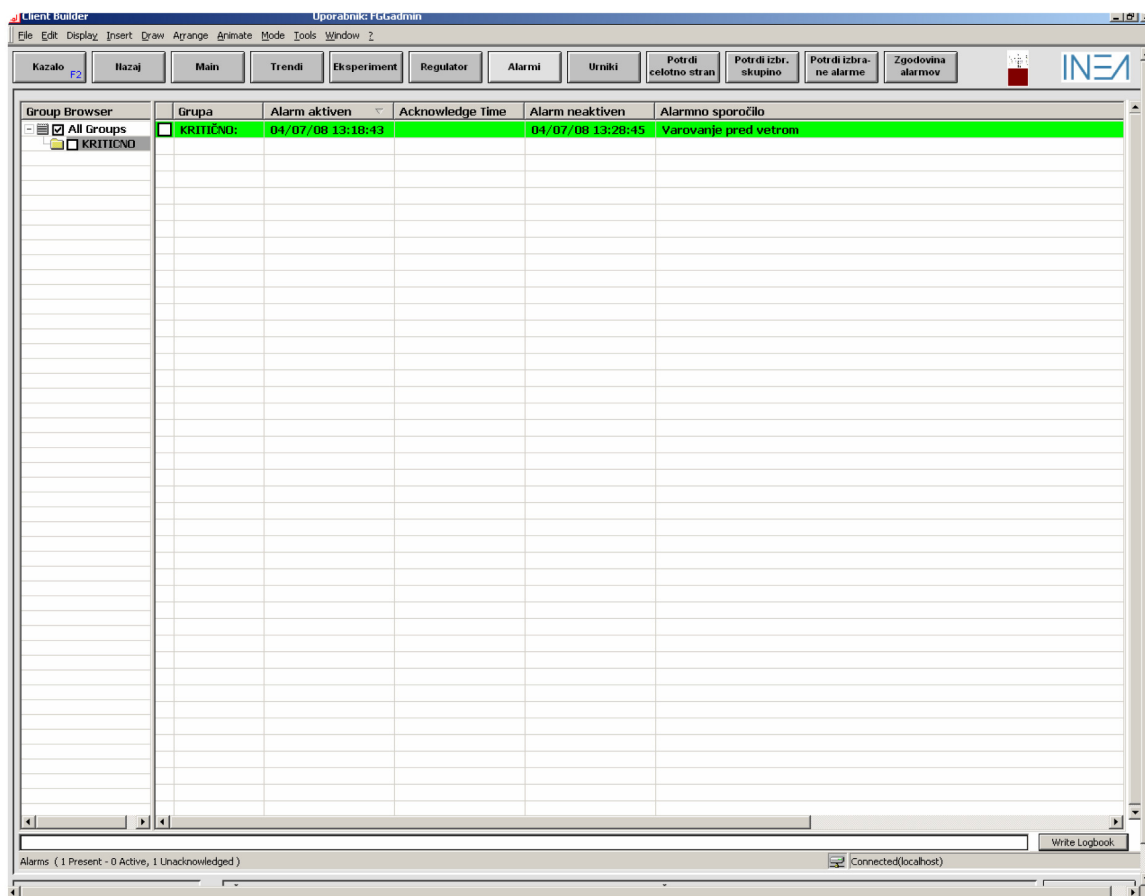
podmeniju se nahajajo skupine z nastavitvami, ki definirajo delovanje posameznih elementov regulacije:

- **žaluzije** – določiti je mogoče interval resinhronizacije pozicije žaluzij (merjeno v minutah) ali pa resinhronizacijo izvesti ročno s pritiskom na gumb. Kot varovanje pred poškodbami je potrebno vnesti ustrezno jakost vetra, pri kateri sistem avtomatsko dvigne žaluzije. Mogoče je tudi določiti način delovanja za vsako žaluzijo posebej, kar pomeni, da je lahko posamezna žaluzija v avtomatskem načinu (pozicija se regulira glede na trenutno nastavljen regulator), ročnem (ročno upravljanje) ali pa glede na urnik delovanja (v urniku je definiran način vodenja



Slika 4.52: V oknu »Regulator« je uporabniku z administratorskimi pravicami omogočeno spreminjanje režimov, referenčnih vrednosti, histerezisnih zank ter načinov vodenja (ročno, avtomatsko).

Fig. 4.52: In the »Regulator« window user with administrator privileges can change and modify operating regimes, set point values, histeresis loops and modes of regulation (manual, automatic).

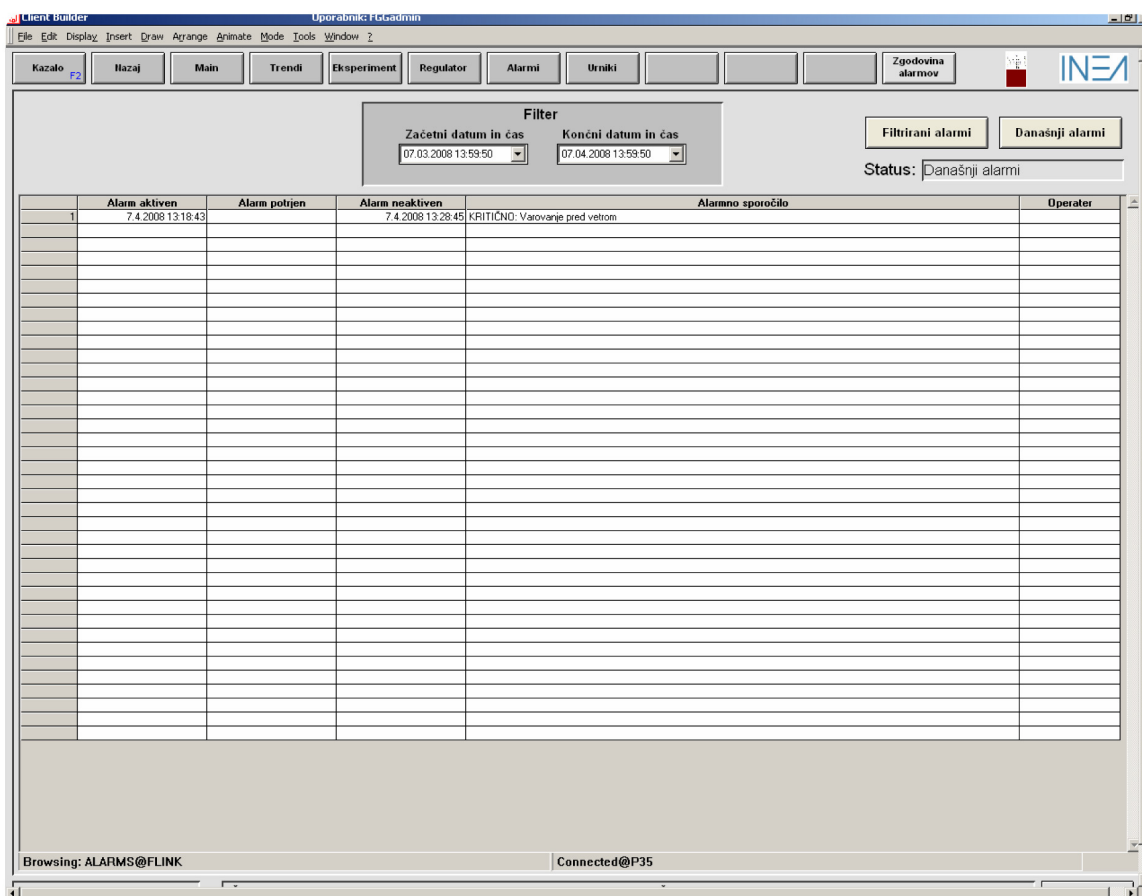


Slika 4.53: V preglednici »Alarmi« je možen pregled in potrditev vseh izbranih alarmov ali samo posameznega alarma sistema. Alarmi uporabnika opozarjajo na delovanje sistema, ki je bilo sproženo zaradi nepričakovanih dogodkov kot je dež, močan veter in podobno.

Fig. 4.53: The table »Alarmi« enables the overview and confirmation of all chosen alarms or just one single alarm of the system. Alarms are designed to notify the user of the system functioning due to abnormal weather conditions (rain, wind...).

žaluzije, ki je lahko poljuben). Omogočeno je tudi definiranje zaporedja dvigovanja žaluzij, in sicer tako, da se za vsako žaluzijo določi zaporedje prioritete popolnega dviga žaluzije (definirati je mogoče prioriteto od 0 do 6, pri čemer 0 pomeni da se žaluzije nikoli ne dvignejo);

- **okno** – parametri, ki določajo delovanje prezračevanja z odpiranjem in zapiranjem okna. Mogoče je vnesti maksimalno dovoljeno koncentracijo CO₂ (ppm), histerezo zanko za zaprtje okna (ppm) ter intervale trajanja prezračevanja. Kot varovalo pred padanjem dežja v prostor je določena relativna vlažnost zunanega zraka, ki prepreči odpiranje okna ko je dosežena;

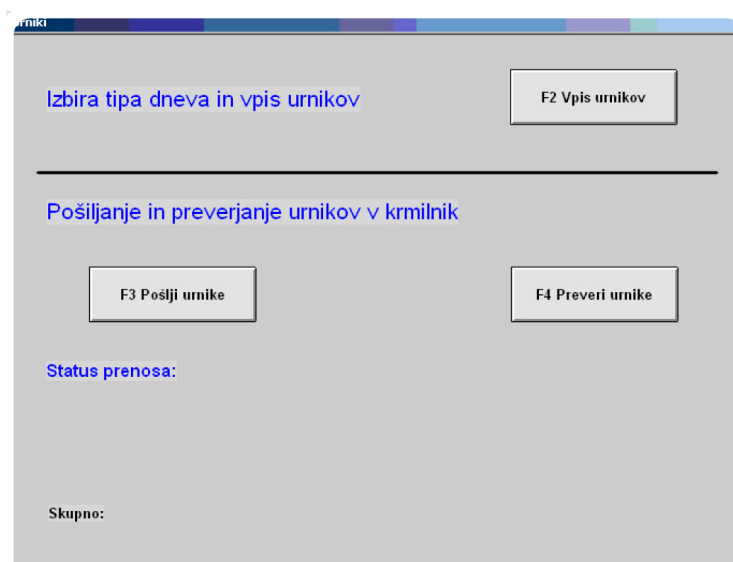


Slika 4.54: Zgodovina alarmov omogoča ogled alarmnih sporočil za poljuben razpon datumov v preteklosti.

Fig. 4.54: History of alarms enables viewing of previous alarm messages.

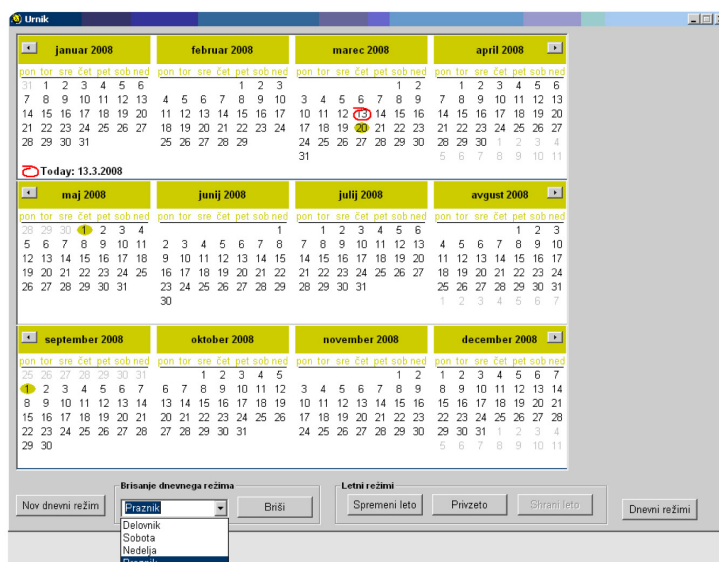
- **svetlobni senzorji** – na področju določevanja zelenih in mejnih parametrov za osvetlitev prostora se določijo notranja zelena vrednost osvetlitve ter vplivni utežni faktorji za oba merilna mesta osvetljenosti v prostoru (k_1 in k_2 – glej izraz 4.21). Določi se tudi mejna zunanja vrednost osvetljenosti, ki še dovoljuje aktivacijo umetne osvetlitve. V zadnjem delu parametrov je mogoče definirati obseg histereznih zank za premik lamel, za dvig žaluzij ter vklop umetne osvetlitve ter časovni interval za izvedbo premika, vklopa in dviga. Časovni interval omejuje pogostost premikov, saj sistem znotraj trajanja intervala ne more ponovno premakniti lamele ali vklopiti luči;
- **ogrevalno-hladilni paneli** – mogoče je izbrati način delovanja, torej ali sistem hladi ali ogreva prostor, ter referenčni temperaturi za notranjo temperaturo zraka (delovni in reducirni način delovanja) in zeleno relativno vlažnost notranjega zraka. Ali je

sistem v delovnem ali reduciranem režimu, je mogoče definirati s pomočjo urnikov ali pa ga neposredno definira operater ter takrat izbere med izklopom, delovnim ali reduciranim načinom delovanja. Kot varovalo pred nastankom kondenza na grelnohladilnih panelih v času hlajenja se vnese maksimalna dovoljena relativna vlažnost



Slika 4.55: Osnovni podmeni za dostop do urnikov sistema IRsNO.

Fig. 4.55: Sub-menu for the access to the schedules of the IRsNO system.



Slika 4.56: Meni za vnos urnikov omogoča časovno določevanje urnikov za vsak dan posebej ali pa za skupine dni z istimi značilnostimi (npr.: delavniki, prazniki).

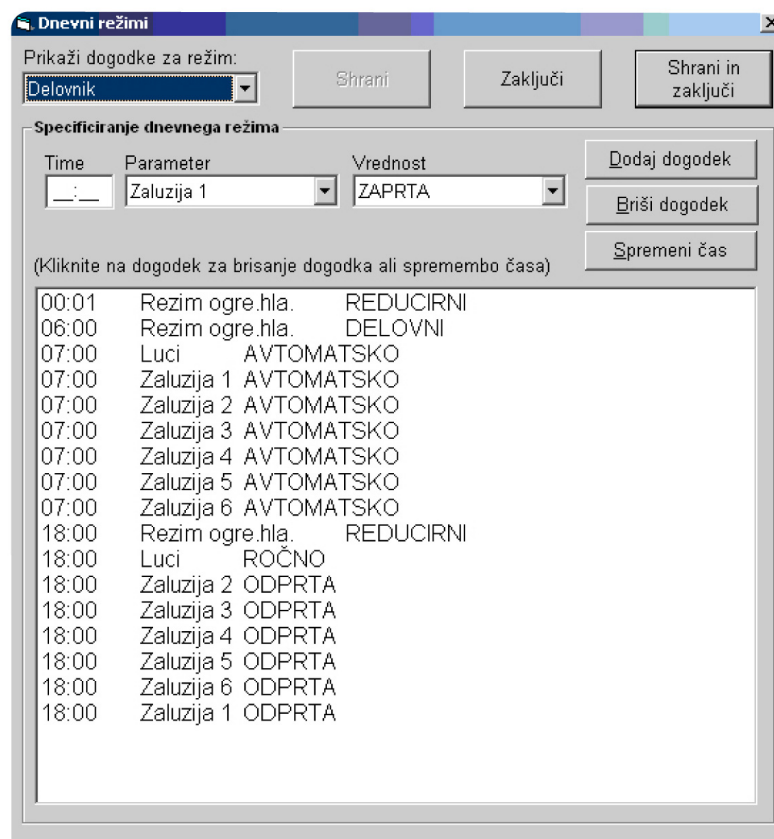
Fig. 4.55: Menu for the schedule input enables definition of different schedules for different days or the same schedule to a group of days with the same common characteristics (work day, weekend...).

prostora;

- **regulator** – na tem področju je mogoče spreminjati ojačanje (K) in integrirni čas (Ti) za PI pomožne regulatorje regulacijske zanke osvetljenosti in ogrevanja.

V podmeniju »Alarmi« (Slika 4.53) so zbrani vsi alarmi, ki jih uporabnik še ni pregledal in potrdil. S potrditvijo alarma le-ta preide iz seznama aktualnih alarmov v podmeni »Zgodovina alarmov« (Slika 4.54), ki predstavlja bazo podatkov, v kateri so zbrani vsi alarmi, ki so se sprožili v času delovanja sistema. Skozi zgodovino je mogoče navigirati s pomočjo časovnega filtra.

Način delovanja sistema vodenja je mogoče vnaprej določiti s pomočjo vnosa urnikov, ki časovno definirajo začetek, konec in načina delovanja. Urnik je mogoče določiti poljubno za vsak dan v letu ali pa se definirajo splošni urniki za delovnike, sobote, nedelje, praznike ... Do



Slika 4.57: Urejevalnik urnikov, v katerem je možno definirati časovno način delovanja sistema.

Fig. 4.57: Schedule editor enables time dependant definitions of system actions.

podmenija za upravljanje z urniki je mogoče dostopati iz glavnega menija s pritiskom na tipko »Urniki« ali pa preko bližnjice s pritiskom funkcijske tipke F10. Pri vstopu v podmeni »Urniki« (Slika 4.55) je mogoče nadalje dostopati do funkcij, ki omogočajo delo z urejanjem in definiranjem urnikov, ter nove urnike naložiti v sistem vodenja. Omogočena je izbira med vpisom urnikov (F2), pošiljanjem slednjih v sistem (F3) in njihovim preverjanjem (F4). Z izbiro vpisa urnikov uporabnik dostopa do mesečnega koledarja, kjer je mogoče vsakemu dnevu predpisati odgovarjajoči zeleni način delovanja z definiranjem odgovarjajočega urnika (Slika 4.56). Vsebina izbranega urnika pa se lahko spreminja z ukazom »Dnevni režim«, ki odpre okno za urejanje trenutno izbranega urnika (Slika 4.57). Nov urnik se vnese s pomočjo ukaza »Nov dnevni režim«, ki zažene urejevalnik urnikov (Slika 4.57). Ko je delo z urniki zaključeno, je potrebno vse spremembe poslati v sistem vodenja, kar se izvede z ukazom »Pošlji urnike«.

4.5 Zagon sistema IRsNO

Sistem IRsNO je bil dokončno nameščen in prvič zagnan v testno uporabo 12. 3. 2008. Začetno delovanje sistema je bilo namenjeno predvsem izvajanju testiranj za določitev odzivnosti sistema ter odpravljanju napak izvedbe s posebnim poudarkom na določanju potrebnih izboljšav vmesnika nadzornega sistema vodenja (računalniška aplikacija). V prvi fazi je bila nameščena le klasična regulacija brez vgrajenih mehkih regulatorjev, ki bodo dodani po začetnih testiranjih in izboljšavah sistema. Sistem vodenja in njegove nastavitve bodo oblikovani s pomočjo eksperimentalnega pristopa, saj dejanskih referenc, razen odziva testne celice KAMRA, ni. Na začetku obratovanja sistema IRsNO je bila izvedena serija eksperimentalnih tekov, s katerimi se je spoznal odziv prostora ter so se definirale pomanjkljivosti delovanja sistema. Teh eksperimentov sicer ni mogoče okarakterizirati kot prosti tek sistema, saj je le-tega pri trenutnih pogojih, kjer je kabinet KSKE III/1 neprestano v uporabi, nemogoče izvesti. Prav vpliv uporabnikov se bo verjetno z začetnimi eksperimenti izkazal kot ključen za izoblikovanje primerne delovanja IRsNO, saj s svojimi željami ter predstavo o tem, kakšno mora biti njihovo delovno okolje, odločujoče vplivajo na oceno ustreznosti delovanja ter posledično s spreminjanjem nastavitvev tudi na dejansko delovanje sistema.

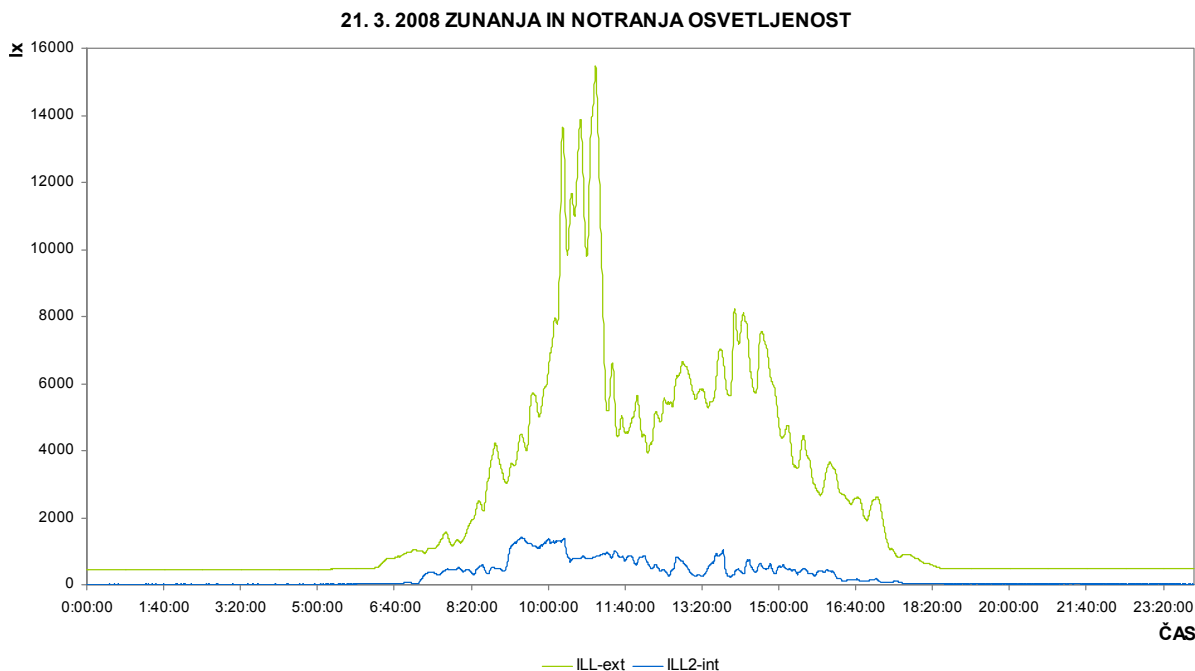
Konfiguracija sistema pri zagonu prvih testiranj ni bila popolna, ker v prvi fazi še nista bila nameščena kalorimetra na grelno-hladilnih panelih, ki bosta merila in spremljala porabo energije za ogrevanje in hlajenje prostora (glej poglavje 3.4.1, slika 3.7). Pri začetnem testiranju sistema se je pokazalo, da sistem ogrevalno-hladilnih panelov v načinu ogrevanja z zaustavitvijo črpalke ni sposoben zaustaviti pretoka skozi panele, saj je pritisk v razvodu centralnega ogrevanja stavbe FGG na Jamovi cesti 2 premočan. Rešitev za pričujočo težavo bo vgraditev avtomatsko vodenega ventila, ki bo pri zaustavitvi črpalke tudi zaprl dotok ogrevalnega medija v sistem panelov. Ventil bo vgrajen pri naslednji posodobitvi IRsNO-ja, torej sočasno s priključitvijo kalorimetrov. Opisana težava s pretokom ogrevalnega medija skozi panele se pri preklopu sistema na hlajenje ne pojavlja.

Pri vodenju osvetljenosti so se pri prvih testnih zagonih sistema pokazale težave z namestitvijo in tipom senzorjev za merjenje notranje osvetljenosti (LI06 LRA proizvajalec Thermokon). Pri teh se je izkazalo, da dejansko merijo zelo ozek kot vpadne svetlobe, ter zaradi te značilnosti meritev, ki jih podajo, v večini primerov ne kažejo realne osvetljenosti delovnih površin prostora. Senzorja lahko v primerjavi z ročnim luksmetrom izmerita tudi do 200 lx nižjo osvetljenost, pač odvisno od njune pozicije. Takšno delovanje senzorjev za merjenje svetlobe za uporabo pri določanju nivoja notranje osvetljenosti ni uporabno in bi jih bilo potrebno zamenjati s senzorji, ki imajo večji vidni kot kakor uporabljena senzorja LI06. Kljub vsemu pa zaradi praktičnih razlogov zamenjava v prvi fazi ni bila izvedena, saj bi to pomenilo nepotrebno zamudo pri testiranju zagona sistema IRsNO. Rešitvi za nastali problem sra bila iskanje pozicije senzorjev, ki da ustrezen približek meritve, ter kompenziranje izmerjene osvetljenosti z določitvijo utežnostnih faktorjev (k_1 in k_2). potrebno je opozoriti, da opisana rešitev glede merjene dejanske notranje osvetljenosti delovnih mest v prostoru kabineta predstavlja le začasno rešitev za čas izvajanja prvega dela testiranja sistema.

V naslednjih poglavjih bodo predstavljene prve meritve, pridobljene med eksperimentalnimi teki sistema IRsNO, ki so bili izvedeni pri nastavljanju njegovih parametrov regulacije. Komentirani bodo predvsem odzivnost sistema ter značilnosti prostora in načina uporabe, ki se odražajo pri kontaminaciji notranje atmosfere z ogljikovim dioksidom.

4.5.1 Osvetljenost prostora

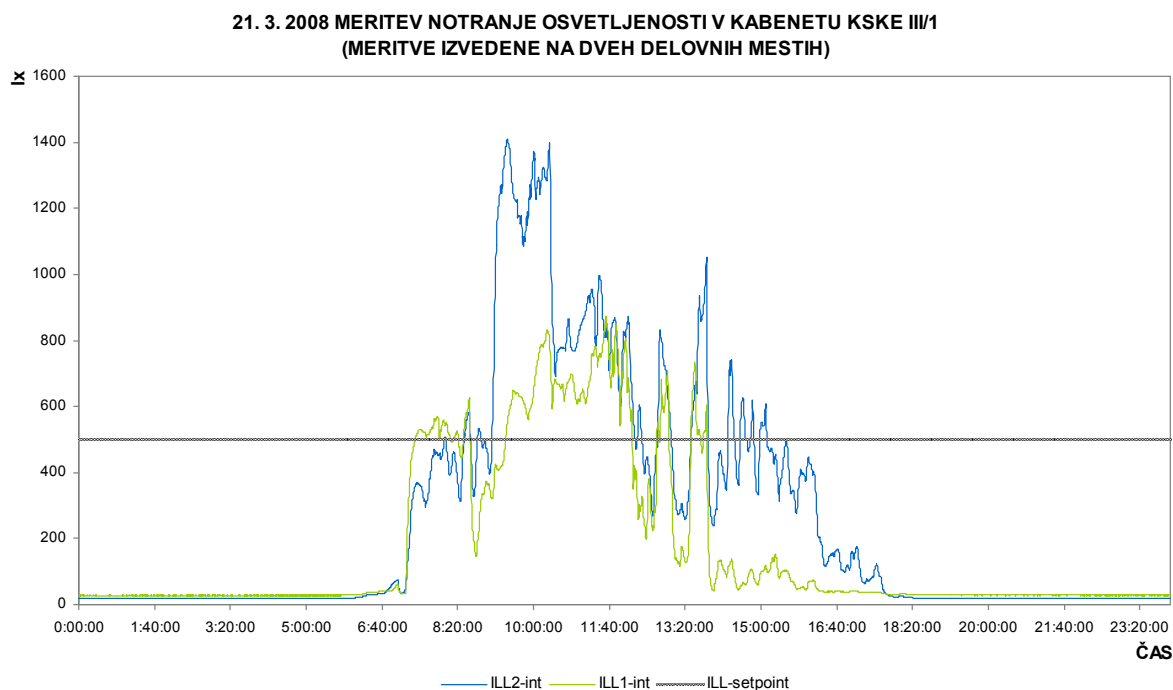
Prvi eksperimenti z regulacijo osvetljenosti kabineta KSKE so potrdili predvidevanja simulacijskih izračunov, izvedenih v računalniški aplikaciji SPOT. Podobno kot pri simulacijah osvetljenosti se je tudi v začetnih poizkusih pokazala relativno problematična osvetljenost obeh delovnih mest v kabinetu. Kritične so predvsem dopoldanske in jutranje ure, saj je takrat severozahodna stran stavbe FGG (tam se nahaja kabinet KSKE) v senci ter tako nanjo ne vpliva neposredno sončno sevanje. Težava s prenizko osvetljenostjo se potencira v času oblačnega vremena. Po začetnih težavah z nameščenimi senzorji osvetljenosti sta bila senzorja pozicionirana tako, da je bil senzor na delovnem mestu 2 obrnjen proti zasteklitvi, medtem ko je bil senzor na delovnem mestu 1 v horizontalnem položaju (za položaja delovnih mest glej sliko 3.4). Takšna konfiguracija merjenja se je s preizkusi pokazala kot dokaj kredibilna glede podajanja realnih meritev notranje osvetljenosti prostora.



Slika 4.58: Primerjava med notranjo osvetljenostjo delovnega prostora 2 in zunanjo osvetljenostjo. Pričujoči dan je bil izredno oblačen z občasnimi snežnimi padavinami.

Fig. 4.58: Comparison of internal illumination of the workspace 2 and the external illumination. The weather on the day in question was heavily overcast with occasional snow showers.

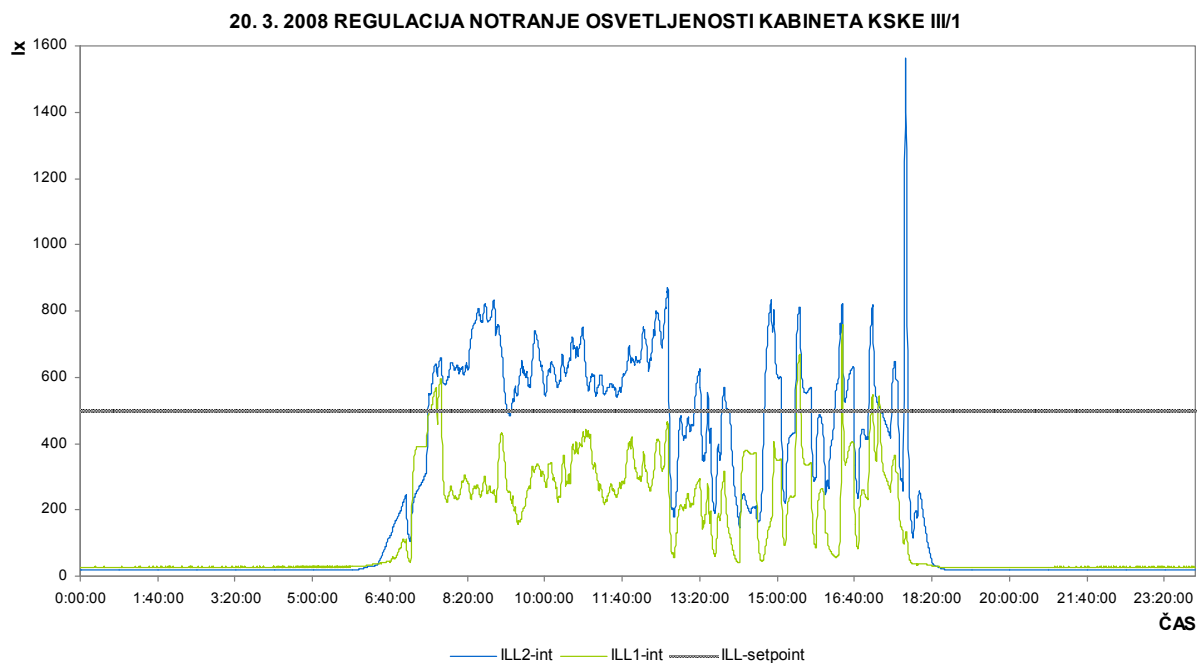
Eksperiment, izveden s popolnoma odprtimi vsemi žaluzijami, je bil izveden z namenom, da je bila pridobljena korelacija med zunanjo in notranjo osvetljenostjo prostora, kadar okna niso senčena ter je sistem regulacije osvetljenosti izključen. Podobno nas je v tem eksperimentu zanimala tudi povezava med meritvama notranje osvetljenosti na različnih mestih ter pod nekoliko drugačnimi pogoji. Na sliki 4.58 je prikazan diagram merjene zunanje osvetljenosti ter meritve notranje osvetljenosti na delovnem mestu 2. Prikazani dan je bil izrazito oblačen z mnogimi snežnimi plohami, zato tudi zunanja osvetljenost nikoli ni preseгла vrednosti, višje od 16000 lx, kar pri dnevih z lepšim vremenom ni nič nenavadnega. Maksimalna dnevna vrednost zunanje osvetljenosti je segla do 15384 lx in je bila dosežena v poznem dopoldnevu. Sledilo je močno poslabšanje vremena, kar se odraža tudi pri zunanji osvetljenosti, saj se je leta v času 15 minut zmanjšala kar za 10000 lx. Opazovanje notranje osvetljenosti kaže, da se zunanje spremembe v nivoju osvetljenosti zelo hitro odražajo tudi na notranjih vrednostih. Primerjava diagramov zunanje in notranje osvetljenosti na delovnem mestu 2 kaže skoraj identično obliko z nekoliko zamaknjenimi maksimalnimi in minimalnimi vrednostmi. Maksimalna vrednost notranje osvetljenosti je dosegla vrednost 1409 lx, ki pa časovno ne sovпада z maksimumom, doseženim pri zunanji osvetljenosti. Primerjava med dvema



Slika 4.59: Notranja osvetljenost na obeh delovnih mestih.
Fig. 4.59: Internal illumination of workplace 1 and 2.

različnima meritvama osvetljenosti v prostoru kabineta KSKE III/1 (delovno mesto 1 in 2), predstavljena na sliki 4.59, nazorno kaže različne pogoje, ki nastanejo v različnih delih prostora. Prav tako pa se v prikazanih meritvah odraža razlika v poziciji senzorja, saj je horizontalno pozicioniran senzor veliko manj občutljiv na zunanje spremembe, kar je bilo tudi pričakovati, saj ni obrnjen proti odprtini, ampak proti stropu prostora.

Slika 4.60 prikazuje zgodnje testiranje regulacije notranje osvetljenosti prostora s klasičnimi regulatorji za pozicioniranje žaluzij na oknu kabineta KSKE. Avtomatska regulacija osvetljenosti je bila aktivna od 7.00 do 18.00 ter je vodila pet žaluzij, šesta, skrajno desna in zgornja žaluzija, pa je bila ves čas odprta. Sistem je dokaj ugodno reguliral notranjo osvetljenost, saj so največja odstopanja od želene vrednosti 500 lx znašala ± 350 lx. V popoldanskem času je vidno problematično nihanje oziroma »žaganje« nivoja notranje osvetljenosti prostora zaradi neposrednega vpada sončnega sevanja v prostor. Sistem je bil v tem času očitno nesposoben primerno odreagirati, saj so bile žaluzije preveč odprte ali pa preveč zaprte. Delovanje sistema v začetnih testiranjih je pokazalo na manjšo dinamiko



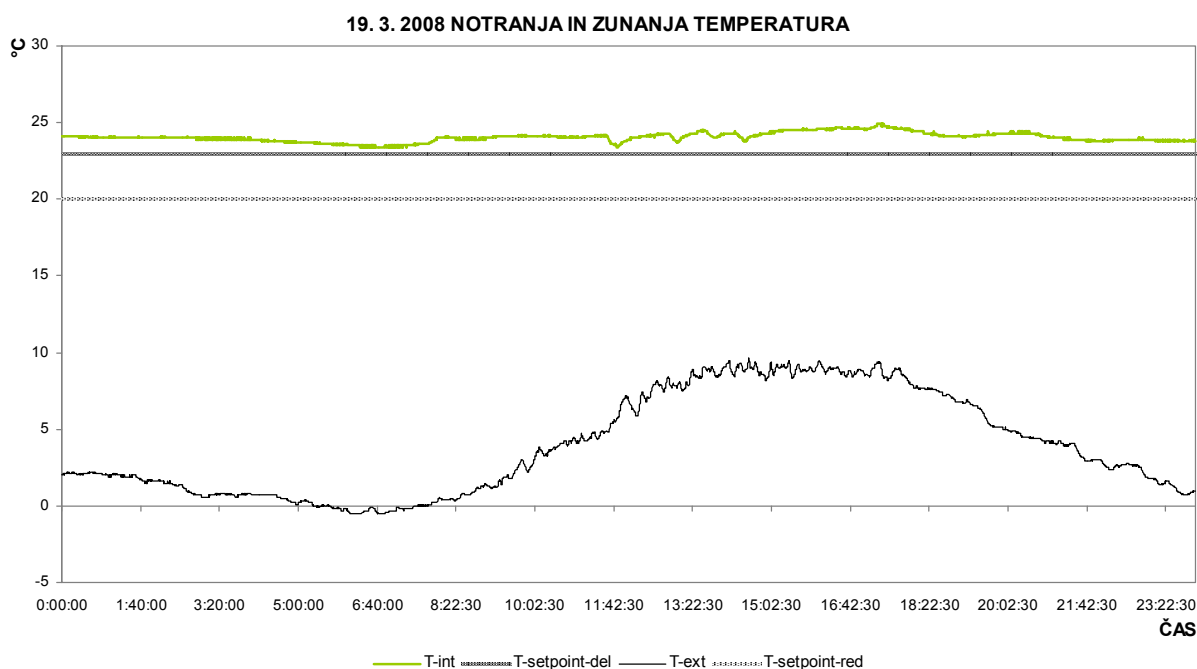
Slika 4.60: Notranja osvetljenost na obeh delovnih mestih ob vključeni avtomatski regulaciji notranje osvetljenosti prostora kabineta KSKE.

Fig. 4.59: Internal illumination of workplace 1 and 2 when the automatic system IRsNO was active.

sprememb v nivoju notranje osvetljenosti v odvisnosti od zunanjih sprememb, kot se je ta odražala v sistemu KAMRA.

4.5.2 Temperaturni odziv prostora

Med prvo fazo testiranja in delovanja sistema ter merjenja notranjih parametrov okolja sistem grelno-hladilnih panelov ni deloval pravilno oziroma zaradi visokih tlakov v sistemu razvoda centralnega ogrevanja ni bilo mogoče zaustaviti pretoka tople vode v panele. Ta težava se bo razrešila pri naslednji posodobitvi sistema, ko bo vgrajen dodatni avtomatsko vodeni ventil za zapiranje pretoka. Meritve temperatur tako odražajo le ogrevanje prostora, pri čemer notranja temperatura ni bila regulirana s pomočjo sevalnih panelov, saj regulacija pretoka ogrevalnega medija ni bila mogoča. Slika 4.61 prikazuje temperaturni potek v trenutnem stanju regulacije sistema. Z nje je razvidna dejanska temperaturna stabilnost prostora z minimalnimi spremembami, ki so nastopile zaradi prezračevanja ter odsotnosti dodatnih virov (ljudje, računalniki) v prostoru. Žaluzije v kabinetu so bile regulirane avtomatsko tako da so v

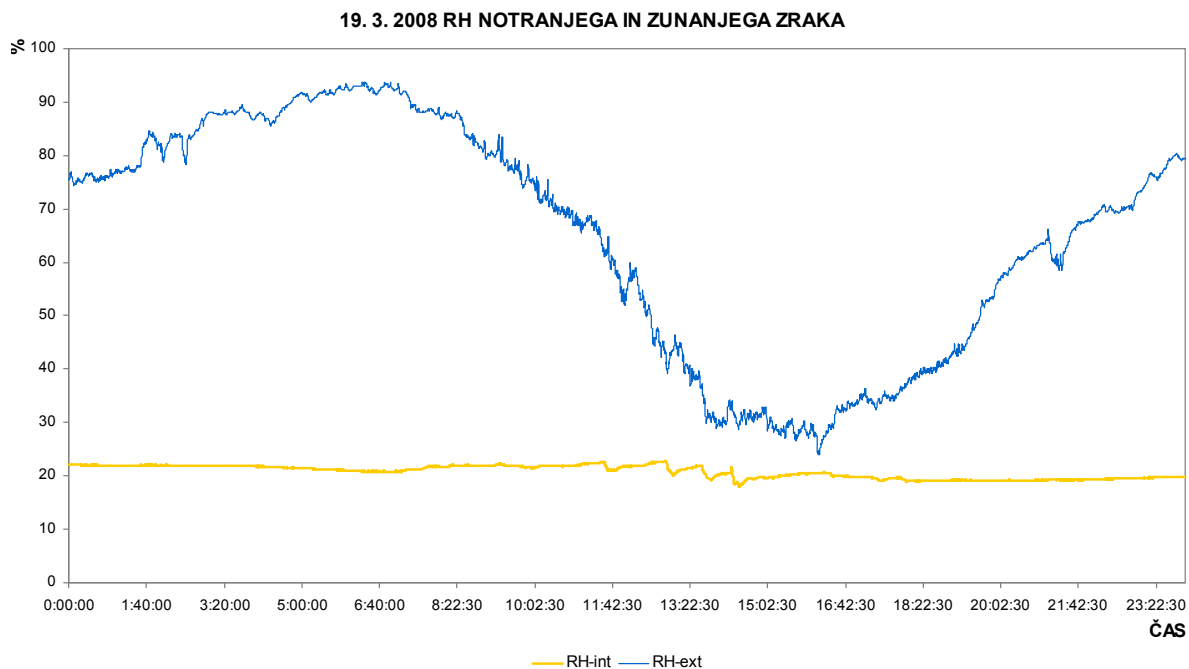


Slika 4.61: Notranja in zunanja temperatura s prikazanima zelenima vrednostima v delovnem času (T-setpoint-del) in nočnem času (T-setpoint-red).

Fig. 4.61: Internal and external air temperature with set point values shown for the daily (T-setpoint-del) and nightly (T-setpoint-red) regime.

popoldanskih urah preprečile pregrevanje kabineta, do katerega bi prišlo, če ne bi bila okna senčena, saj je bil predstavljeni dan (Slika 4.61) izrazito sončen. Ker ogrevalni elementi v prostoru niso bili regulirani, se kaže neprimernost notranjega toplotnega okolja, saj trenutno stanje kaže velik potencial za prihranke pri ogrevanju, če bi bil ogrevalni sistem ustrezno voden. Upravičenost avtomatskega sistema, kot je IRsNO, se pokaže že pri tako trivialnem prikazu, kot je pretirano ogrevanje stavbe FGG brez kakršne koli ustrezne kontrole ter smiselnega načina odzivanja na zunanje pogoje.

V sklopu merjenja notranjega temperaturnega okolja kabineta KSKE je bila spremljana tudi relativna vlažnost zraka, saj le-ta vpliva tudi na dojetje temperature oziroma zmožnost telesa, da se hladi z odvajanjem vlage s površine kože (znojenje). Izvedene meritve so potrdile že predhodno znano dejstvo, da ima stavba FGG na Jamovi cesti 2 zelo nizko raven relativne zračne vlage. Iz meritev na sliki 4.62 je vidna skoraj konstantna vrednost notranje relativne zračne vlage od 19 do 22 % kljub izrazitemu nihanju zunanje vlažnosti (od 25 do 92 %).



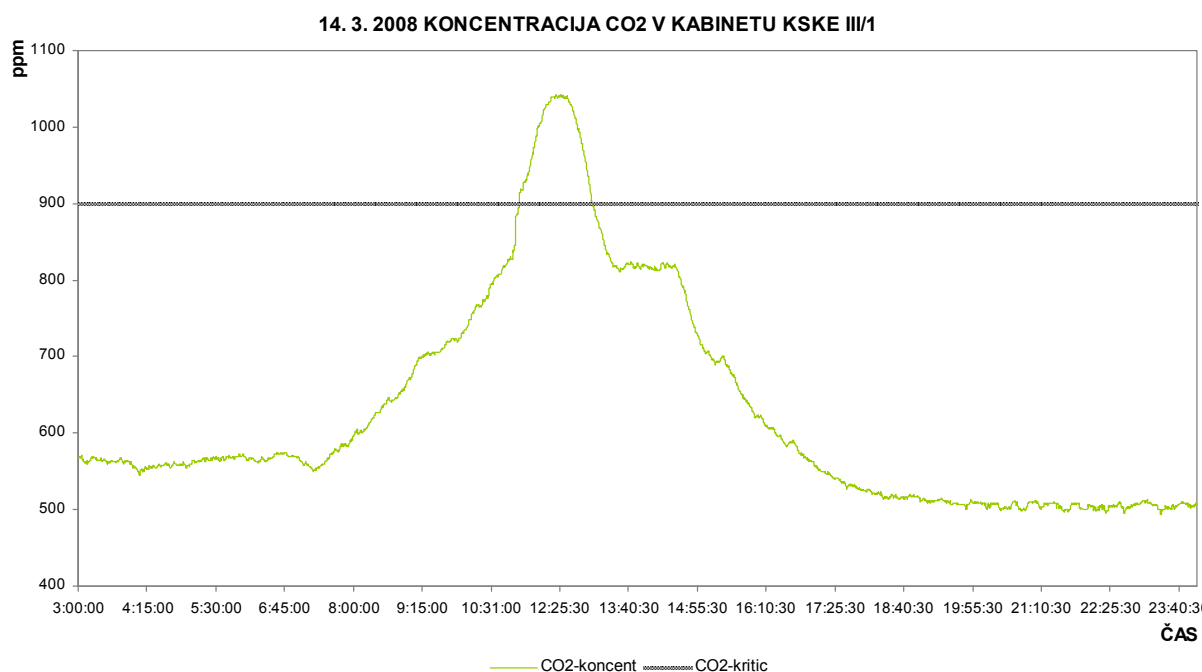
Slika 4.62: Korelacija med notranjo in zunanjo relativno vlažnostjo zraka. Manjši skoki v drugače konstantnem nivoju notranje vlažnosti zraka so posledica prezračevanja.

Fig. 4.62: Correlation between the internal and external relative humidity. Fluctuations seen in the otherwise constant value of internal air humidity are the result of ventilation.

Spremembe v nivoju notranje relativne zračne vlage so nastopile le pri prezračevanju, kar je vidno na sliki 4.62 od 11.30 do 14.40, vendar so bila tudi ta nihanja le trenutna. Tako nizka vrednost relativne zračne vlage v prostoru kabineta KSKE je s stališča kvalitetnega delovno-bivalnega okolja nesprijemljiva, saj pri ljudeh povzroča izsuševanje kože in nosne sluznice. Rešitev takšne situacije bi bila mogoča le z uvedbo aktivnega navlaževanja prostora.

4.5.3 Kvaliteta zraka

Pri spremljanju notranjih nivojev koncentracije CO₂ se je izkazalo, da so mejne nastavljene vrednosti maksimalne koncentracije (900 ppm) pri polno zasedenem prostoru zelo hitro dosežene. Ker je prostor kabineta KSKE III/1 sestavljen iz dveh prostorov, ki sta večino časa povezana z odprtimi vrati, vplivajo na količino prisotnega CO₂ vsi uporabniki v obeh sobah. Pri polni zasedenosti kabineta sta v prvi sobi, kjer je nameščen merilec CO₂, prisotni dve osebi ter tri v sosednji sobi. Na sliki 4.63 je prikazan tipičen dan, ko prostor ni konstantno zaseden, saj so uporabniki odhajali in prihajali. Iz diagrama je lepo viden vpliv uporabnikov,

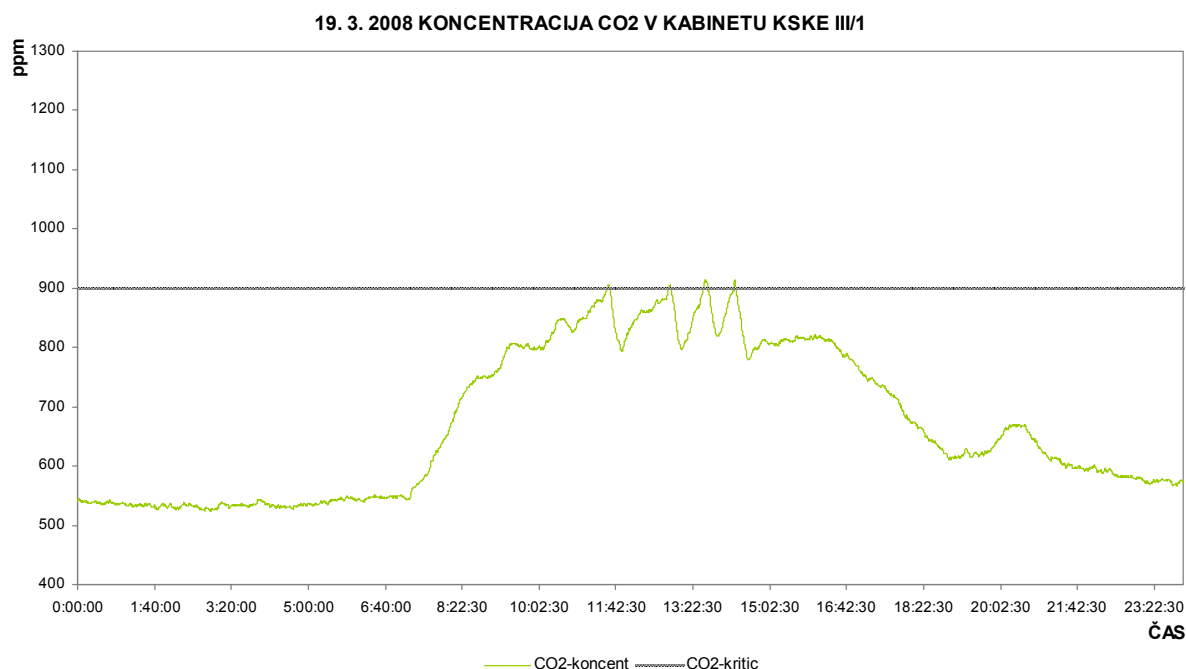


Slika 4.63: Prikaz vsebnosti CO₂ v kabinetu KSKE III/1 prikazuje vpliv uporabnikov, prezračevanja in nezrakotesnosti ovoja stavbe.

Fig. 4.63: CO₂ concentration in the cabinet KSKE III/1 during one day shows the impact of the users, of the ventilation and air permeability of buildings envelope.

saj se prične koncentracija CO₂ dvigati zjutraj ob 7.15, ko se je prostor začel uporabljati, ter je naraščala vse do 12.30, ko koncentracija doseže 1040 ppm in so uporabniki ročno prezračili prostor, saj je bila avtomatska regulacija odpiranja okna izključena. Prostor je potreboval približno 30 minut, da so se notranje vrednosti koncentracije CO₂ spustile pod mejno določenih 900 ppm. Izmenjava zraka ter s tem tudi CO₂ med notranjo atmosfero in zunanostjo se izvaja tudi v času, ko okna niso odprta, saj ovoj stavbe ni popolnoma zrakotesen. Pojav nezrakotesnosti ovoja stavbe FGG je lepo viden iz padajočega trenda koncentracije CO₂ v kabinetu KSKE III/1, saj ta pada z okvirno hitrostjo 80 ppm/h. Tako se vrednosti CO₂ v prostoru kabineta, potem ko so uporabniki zapustili prostor, ustalijo na okoli 500 ppm ter na tej stopnji ostanejo do začetka naslednjega delovnika (Slika 4.63).

Večjo obremenjenost prostora z uporabniki kaže diagram na sliki 4.64, kjer je bil prostor skoraj neprestano popolnoma zaseden. Avtomatsko odpiranje okna je bilo vključeno ter nastavljeno na maksimalno mejno vrednost CO₂ 900 ppm. Ko je bila ta vrednost dosežena, je sistem IRsNO avtomatsko odprl okno ter pričel prezračevati. Okno je bilo odprto do takrat, ko



Slika 4.64: Z uporabniki močno obremenjen prostor, viden je učinek avtomatskega prezračevanja prostora s sistemom IRsNO.

Fig. 4.64: Fully occupied space – the effect of automatic ventilation is clearly distinguishable from the shape of the CO₂ concentration graph.

je senzor zaznal, da se je koncentracija CO₂ v prostoru spustila za 100 ppm pod maksimalno dovoljeno vrednostjo. Zaradi zakasnitve meritve ter mešanja zraka v prostoru se vsebnost CO₂ v notranji atmosferi spušča še kar nekaj časa po zaključku prezračevanja. Nazobčana oblika grafa v območju od 11.30 do 14.30 priča o zelo močni obremenjenosti prostora z izdihanim CO₂. V tem času se je moral prostor prezračiti štirikrat. Podobno kot je bilo že vidno s slike 4.64, se v popoldanskih urah koncentracija zmanjšuje, vse dokler se ne ustali na vrednostih okoli 500 ppm, ki očitno predstavljajo koncentracijo CO₂ v zunanjem zraku na področju Ljubljane. Dvig vsebnosti ogljikovega dioksida, viden na sliki 4.64, od 20.00 do 21.00 je odraz zasedenosti prostora, saj je bil v tem času v prostoru prisoten uporabnik.

Začetne meritve koncentracije CO₂ v prostoru kabineta KSKE so pokazale izrazit vpliv uporabnikov, saj se, če je prostor polno zaseden, koncentracija CO₂ zelo hitro približa mejni dovoljeni vrednosti. Prezračevanje z avtomatskim odpiranjem okna deluje učinkovito, saj v okvirno 10 minutah prezračí prostor do te meje, da vrednosti CO₂ padejo 100 – 150 ppm, pač odvisno od zasedenosti prostora. Po odhodu uporabnikov se prostor brez prezračevanja z izmenjavo zraka z zunanostjo skozi netesen ovoj stavbe vrne na izhodiščno količino CO₂ (vsebnost v zunanjem zraku) po približno 5 ali 5.5 urah oziroma s hitrostjo cca 80 ppm/h.

4.6 Nastavitve mehkih regulatorjev IRsNO

V drugi fazi izvedbe sistema IRsNO bo po zaključitvi optimizacije ter odpravljanja napak sistema vodenja le-ta nadgrajen z mehкими regulatorji. Ti bodo v sistem vključeni tako, da bo ves čas delovanja avtomatskega vodenja možen preklop med klasično in mehko regulacijo. Razloga za takšno odločitev sta možnost primerjanja med obema načinoma regulacije ter varovanje pred pretirano neugodnim delovanjem sistema med nastavljanjem pravil mehkih regulatorjev. Mehki regulatorji bodo na začetku oblikovani po smernicah, ki so se izkazale kot učinkovite in primerne za nadaljnji razvoj z analizo eksperimentalnih podatkov, pridobljenih s sistemom KAMRA, ki je bila izvedena in predstavljena v pričujočem delu. Nadaljnja optimizacija delovanja bo izvršena neposredno s pomočjo eksperimentov in preučevanja odziva sistema.

Sistem IRsNO in s tem mehki regulatorji bodo v končni fazi optimizirani glede na dve osnovni skupini kriterijev. Prvo skupino bodo tvorili kvantitativni kriteriji tako imenovanih ugodnih vrednosti parametrov notranjega okolja (operativna temperatura, osvetljenost delovne površine, maksimalna koncentracija CO₂ ...). Slednje definirajo splošno sprejete vrednosti, za katere se je izkazalo, da pri veliki večini uporabnikov zadovoljijo njihove potrebe. Prav tu pa nastopi druga skupina kriterijev, ki je definirana z dejanskimi uporabniki in ne z abstrahiranimi, povprečnimi, statistično določenimi vrednostmi. Torej če pridejo dejanske želje ljudi, ki bodo uporabljali avtomatsko vodeno okolje sistema IRsNO, v navzkrižje z učinkovitostjo delovanja sistema, mora avtomatska regulacija upoštevati želje uporabnikov ter s tem omogočati personalizacijo delovno-bivalnega okolja. Zaradi zgornjih razlogov bo zato sistem IRsNO pri optimizaciji pravil mehkih regulatorjev upošteval tako objektivne kriterije učinkovitega delovanja kot tudi subjektivne kriterije prijetnega delovnega okolja uporabnikov.

Nastavitve mehkih regulatorjev bodo definirane s pomočjo dveh področij pridobljenega znanja in izkušenj. Prvo področje predstavljajo izkušnje ter delujoči modeli in primeri iz sistema KAMRA, ki nam pri oblikovanju mehkih regulatorjev predstavljajo osnovne smernice in vodilo na katerega se je mogoče opreti ter graditi nadaljnje regulatorje sistema IRsNO. Glavna pomanjkljivost regulatorjev ter sistema KAMRA je bila izvedba v testni celici. Kljub temu da je predstavljala eksperimentalno okolje, postavljeno v realne pogoje, nikakor ne odraža realnosti, ampak še vedno samo idealiziran približek realne stavbe, zato tudi ni pričakovati, da bi bilo mogoče nastavitve regulatorjev KAMRE neposredno prenesti v sistem IRsNO. Tako se vključi drugo področje znanja, ki ga predstavljajo izkušnje z uporabo prostora KSKE, ter spoznanja, pridobljena s testiranjem, ki so bila in se še vedno izvajajo s pomočjo sistema IRsNO v prvi fazi delovanja. Ti eksperimenti predstavljajo osnovo za potrditev simulacij glede odziva prostora ter kot taki orodje za definiranje mejnih pričakovanih vrednosti v danem okolju. Eksperimenti in izkušnje iz prve faze delovanja sistema IRsNO in izkušenj iz KAMRE bodo omogočali oblikovanje ter tudi optimiziranje mehkih regulatorjev sistema IRsNO.

Za oblikovanje in izvedbo mehkih regulatorjev v sistemu IRsNO bo uporabljeno računalniško orodje za načrtovanje sistemov vodenja IDR BLOK s predpripravljenimi bloki za oblikovanje

mehkih regulatorjev, imenovanimi FUZZY bloki. Ti vsebujejo vse elemente za oblikovanje poljubnega mehkega regulatorja z dvema vhodoma ter enim izhodom. Pri oblikovanju mehkega algoritma je uporabnik omejen z izbiro dveh logičnih operaterjev, hkrati so lahko oblike definiranih mehkih množic le trikotne oblike. Vgrajena logična operaterja omogočata osnovne operacije mehkih množic s pogojem:

- Izvrednotenje mehke logične operacije IN (AND) poteka z vgrajenima posplošenima operatorjema min in pro:

$$\text{min: } r = \min (E, dE)$$

$$\text{pro: } r = E \times dE$$

- Izvrednotenje mehke logične operacije ALI (OR) poteka z vgrajenima posplošenima operatorjema sum in max:

$$\text{sum: } r = E + dE - E \times dE$$

$$\text{max: } r = \max (E, dE)$$

- E – prva mehka spremenljivka,
- dE – druga mehka spremenljivka,
- r – rezultat na pogojni strani po izvrednotenju procesa.

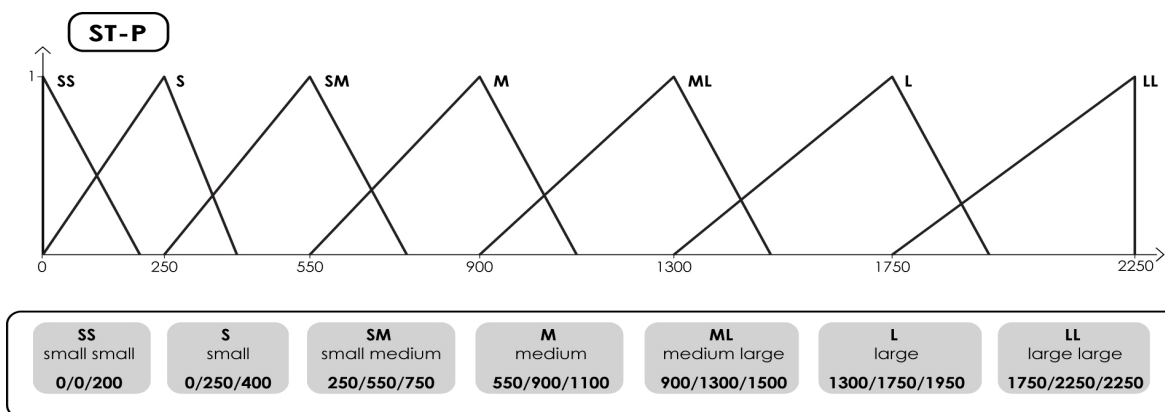
Predpripravljen blok za izvedbo mehkih regulatorjev v okolju IDR BLOK je tipa Sugeno in Takagi [Trobec-Lah 2003], za katerega je značilno, da sta postopka inference in ostrenja neločljivo združena, zato je izhodna vrednost takšnega regulatorja vedno ostra vrednost.

4.6.1 Mehki regulator osvetljenosti

Pri sistemu KAMRA sta se kot najučinkovitejša mehka regulatorja osvetljenosti izkazala fuzzy_L1_E in fuzzy_LP1. Predvsem fuzzy_LP1 se je pokazal kot izredno natančen in učinkovit pri regulaciji notranje osvetljenosti testne celice KAMRA, kot takšen je bil tudi izhodišče za oblikovanje prvih nastavitev mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO (IRsNO_ill_1). Vhodni veličini v mehki regulator IRsNO_ill_1 predstavljata zelena veličina (SP-T) ter razlika med zeleno in dejansko osvetljenostjo (ER) prostora kabineta KSKE. Vhodni veličini sta jezikovni spremenljivki, predstavljeni s sedmimi mehкими množicami. Slika 4.65 prikazuje vhodno spremenljivko SP-T, ki je definirana na intervalu od 0 do 2250

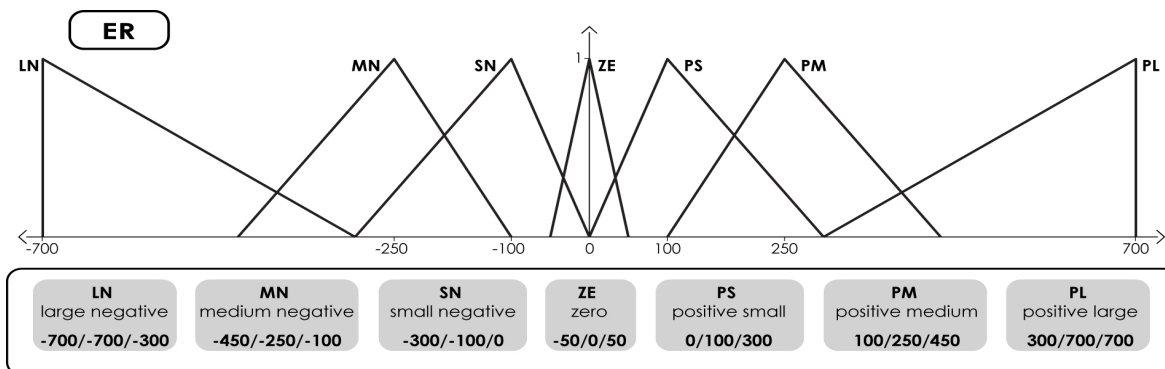
lx. Slika 4.66 prikazuje vhodno spremenljivko ER, ki je definirana na intervalu od -700 do 700 lx.

Povezave med vhodnimi in izhodnimi vrednostmi regulatorja so zapisane v obliki logične matrike odločitev (Slika 4.67), ki je način zapisa ČE – POTEM pravil mehkega regulatorja. Številčne vrednosti, navedene v matriki, predstavljajo izhodne ostre oziroma konsekvenčne vrednosti regulatorja in so določene na osnovi poznavanja procesa ter regulatorja fuzzy_LP1. Regulator ima lahko pet izhodnih vrednosti, pri čemer vrednosti 0, 30, 60 in 90 odgovarjajo naklonom lamel žaluzij. Vrednost 100 pomeni popoln dvig žaluzij, ki so v sistemu definirane, da jim je dovoljen popoln dvig. Vrstni red dvigovanja žaluzij je mogoče poljubno nastaviti, in sicer v vrstnem redu od 1 do 6, kar pomeni, da se bo žaluzija, označena z 1, dvignila najprej, tista z oznako 6 pa zadnja. Matrika mehkega regulatorja IRsNO_ill_1 je sestavljena na



Slika 4.65: Vhodna spremenljivka SP-T mehkega regulatorja IRsNO_ill_1.

Fig. 4.65: Input variable SP-T of fuzzy regulator IRsNO_ill_1.

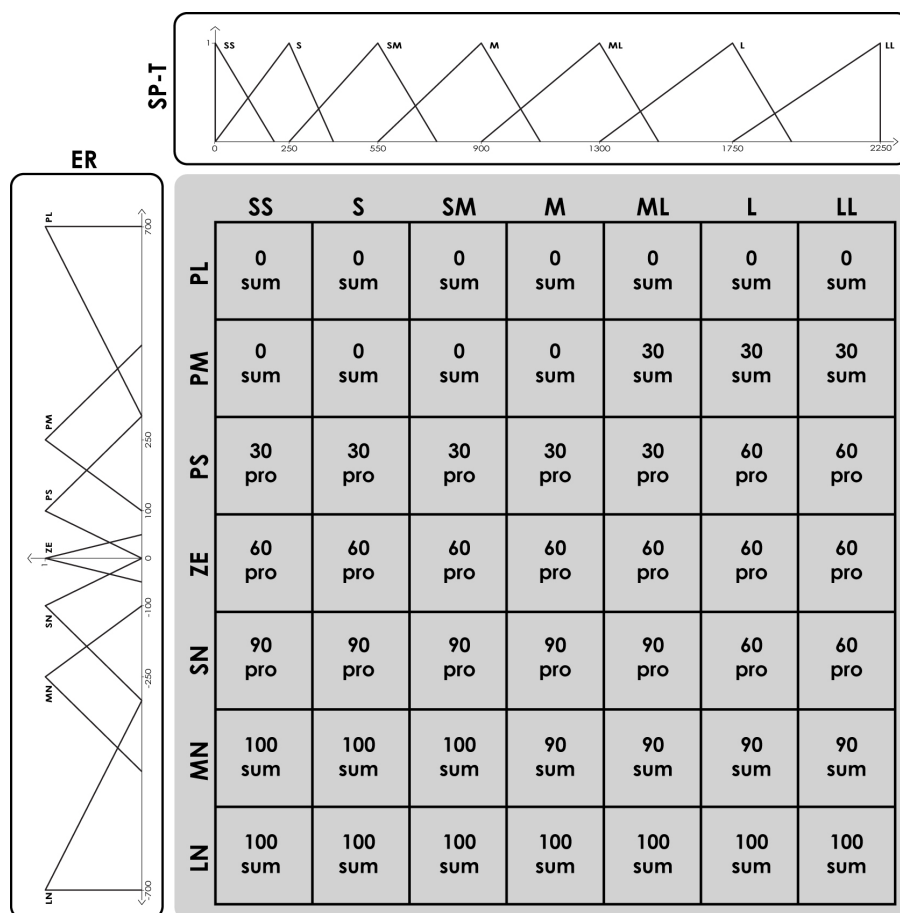


Slika 4.66: Vhodna spremenljivka ER mehkega regulatorja IRsNO_ill_1.

Fig. 4.66: Input variable ER of fuzzy regulator IRsNO_ill_1.

podlagi 7 x 7 vhodnih mehkih množic, kar pomeni največ 49 logičnih pravil odločanja v obliki ČE – POTEM stavkov. Stavki so lahko prikazani v obliki matrike (Slika 4.67) ali pa zapisani v nizu zaporednih pravil:

- 1.) IF SP-T = SS sum ER = LN THEN Z = 100
- 2.) IF SP-T = SS sum ER = MN THEN Z = 100
-
-
- 11.) IF SP-T = S pro ER = ZE THEN Z = 60
-
- 49.) IF SP-T = LL sum ER = PL THEN Z = 0

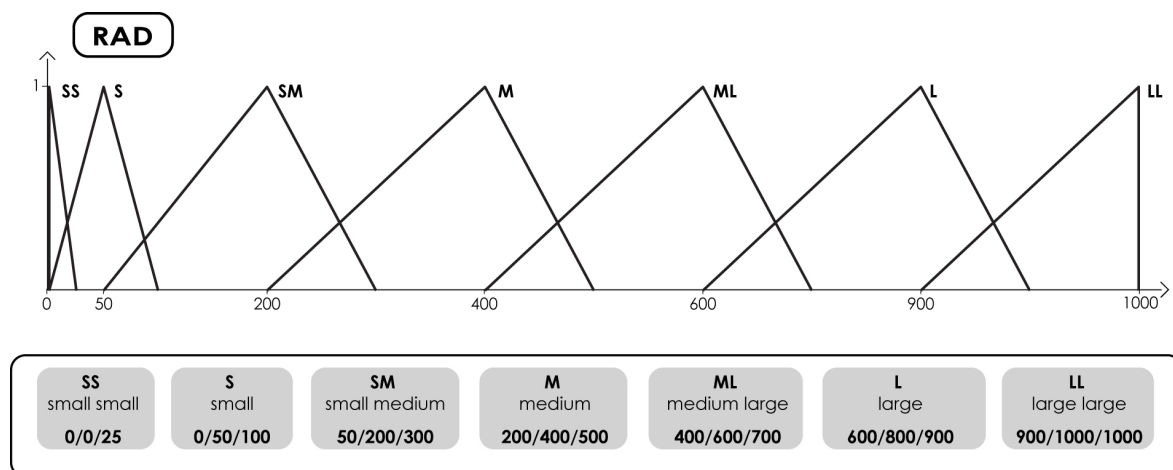


Slika 4.67: Matrika odločitve mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO_ill_1.
 Fig. 4.67: Decision matrix of illumination fuzzy regulator IRsNO ill 1.

4.6.2 Mehki regulator temperature – režim ogrevanja

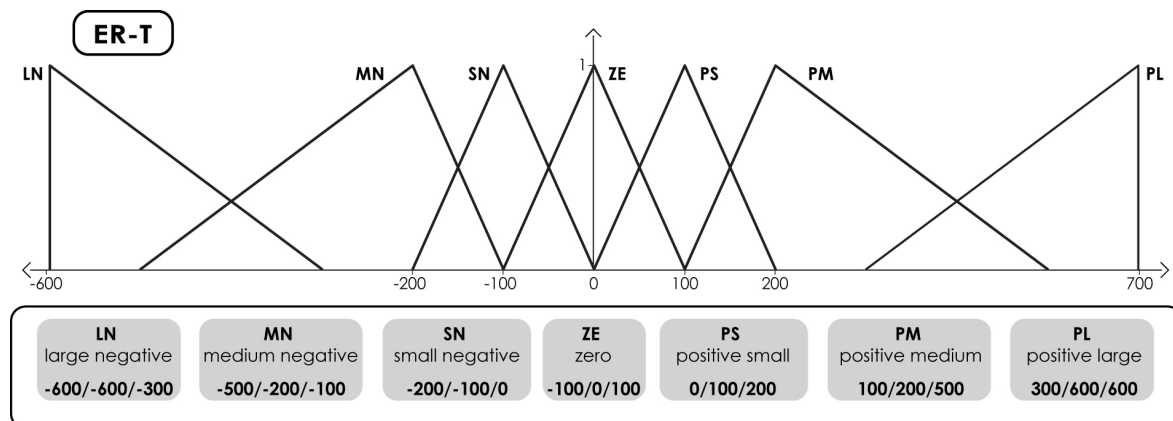
Regulacija notranjih temperatur oziroma solarnih dotokov skozi transparentni del stavbnega ovoja FGG v prostor kabineta KSKE bo temeljila podobno kot regulator osvetljenosti na mehkem regulatorju notranjih temperatur sistema KAMRA. Prav tako kot toplotni regulator KAMRE bo tudi toplotni regulator sistema IRsNO deljen na dva, in sicer na mehki regulator za ogrevalno sezono (IRsNO_temp_o) in hladilno sezono (IRsNO_temp_h). Njuna medsebojna povezava bo določena s pomočjo izraza, ki je bil definiran že v sistemu KAMRA:

položaj žaluzije = ((IRsNO_temp_h/100*Ter/2) + (IRsNO_temp_o/100*(100-Ter/2)), kjer sta »IRsNO_temp_h« in »IRsNO_temp_o« izhodna signala temperaturnega regulatorja



Slika 4.68: Vhodna spremenljivka RAD mehkega regulatorja IRsNO_temp_o.

Fig. 4.68: Input variable RAD of fuzzy regulator IRsNO_temp_o.



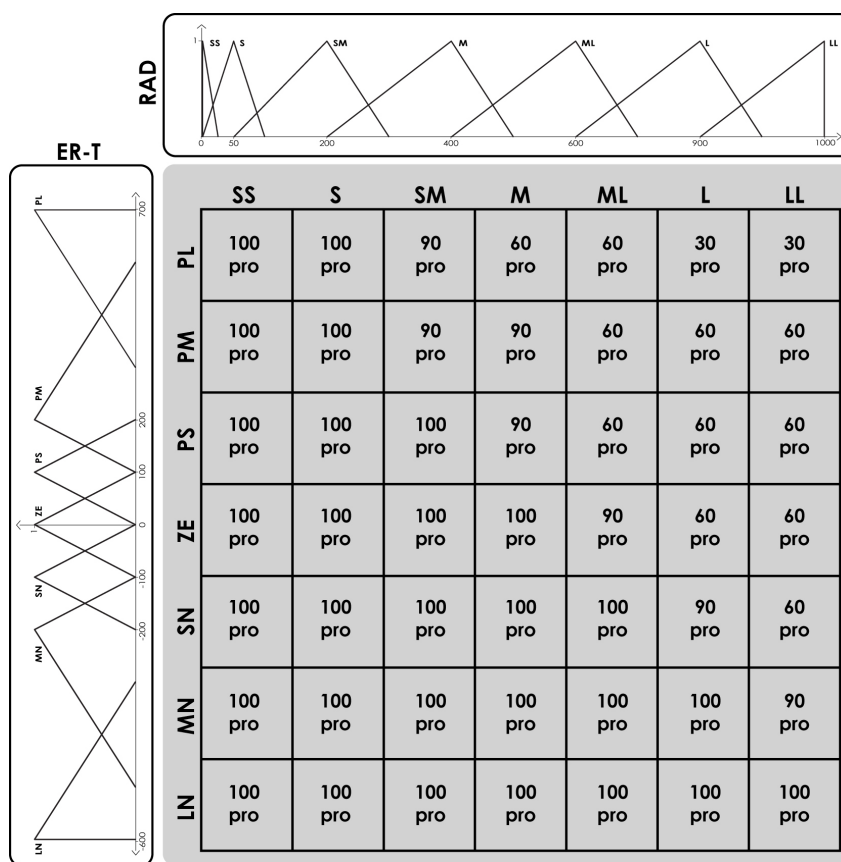
Slika 4.69: Vhodna spremenljivka ER-T mehkega regulatorja IRsNO_temp_o.

Fig. 4.69: Input variable ER-T of fuzzy regulator IRsNO_temp_o.

IRsNO za ogrevalni režim (o) in hladilni režim (h). Ter je razlika med zunanjo temperaturo in notranjo želeno temperaturo zraka.

Vhodni veličini v mehki regulator IRsNO_temp_o predstavljata razlika med želeno in merjeno notranjo temperaturo zraka (ER-T) ter merjeno globalno sončno sevanje (RAD). Vhodni veličini sta jezikovni spremenljivki, predstavljeni s sedmimi mehкими množicami. Slika 4.69 prikazuje vhodno spremenljivko ER-T, ki je definirana na intervalu od -600 (-6 °C) do 600 (6°C). Slika 4.68 prikazuje vhodno spremenljivko ER-T, ki je definirana na intervalu od 0 do 1000 W/m².

Povezave med vhodnimi in izhodnimi vrednostmi regulatorja so predstavljene na sliki 4.70 v obliki logične matrike odločitev, ki je predstavitev ČE – POTEM pravil mehkega regulatorja IRsNO_temp_o. Regulator ima lahko pet izhodnih vrednosti, pri čemer vrednosti 0, 30, 60 in



Slika 4.70: Matrika odločitev mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO_temp_o.
 Fig. 4.70: Decision matrix of illumination fuzzy regulator IRsNO_temp_o.

90 odgovarjajo naklonom lamel žaluzij. Vrednost 100 pomeni popoln dvig žaluzij. Pravila odločitev mehkega regulatorja IRsNO_temp_o je mogoče zapisati tudi v obliki ČE – POTEM stavkov:

- 1.) IF RAD = SS pro ER-T = LN THEN Z = 100
- 2.) IF RAD = SS pro ER-T = MN THEN Z = 100
-
-
- 11.) IF RAD = S pro ER-T = ZE THEN Z = 100
-
- 49.) IF RAD = LL pro ER-T = PL THEN Z = 30

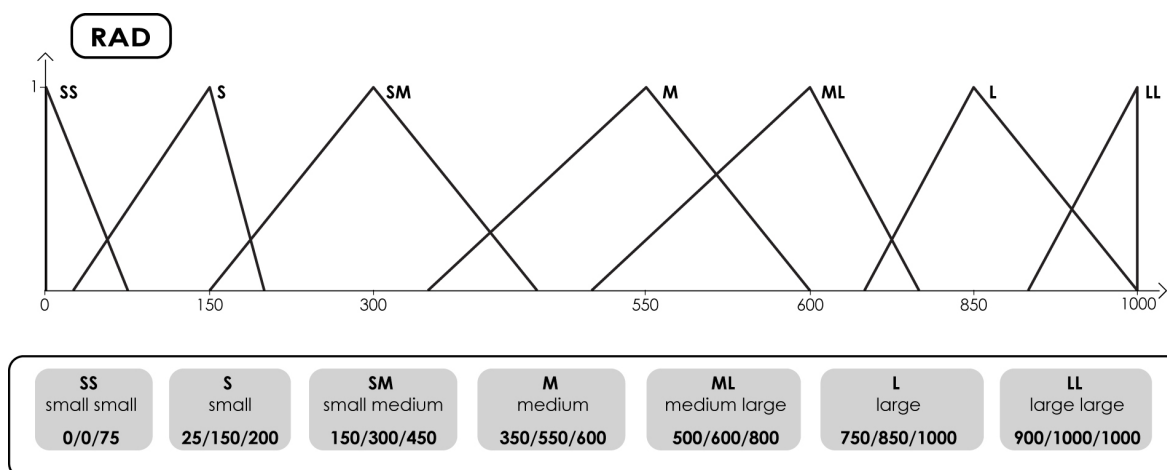
4.6.3 Mehki regulator temperature – režim hlajenja

Vhodni veličini v mehki regulator temperature za režim hlajenja (IRsNO_temp_h) predstavljata razlika med želeno in merjeno notranjo temperaturo zraka (ER-T) ter merjeno globalno sončno sevanje (RAD). Vhodni veličini sta jezikovni spremenljivki, predstavljeni s sedmimi mehкими množicami. Slika 4.72 prikazuje vhodno spremenljivko ER-T, ki je definirana na intervalu od -600 (-6 °C) do 600 (6°C) in je enaka kot pri regulatorju IRsNO_temp_o. Slika 4.72 prikazuje vhodno spremenljivko ER-T, ki je definirana na intervalu od 0 do 1000 W/m².

Povezava med vhodnimi in izhodnimi vrednostmi regulatorja so predstavljene na sliki 4.73 v obliki logične matrike odločitev, ki je predstavitev ČE – POTEM pravil mehkega regulatorja IRsNO_temp_h. Tako kot pri regulatorju IRsNO_temp_o ima tudi regulator IRsNO_temp_h izhodne vrednosti 0, 30, 60 in 90, ki definirajo naklon lamel žaluzij ter vrednost 100, ki predstavlja popolnoma dvignjeno žaluzijo. Če – POTEM stavki mehkega regulatorja IRsNO_temp_h:

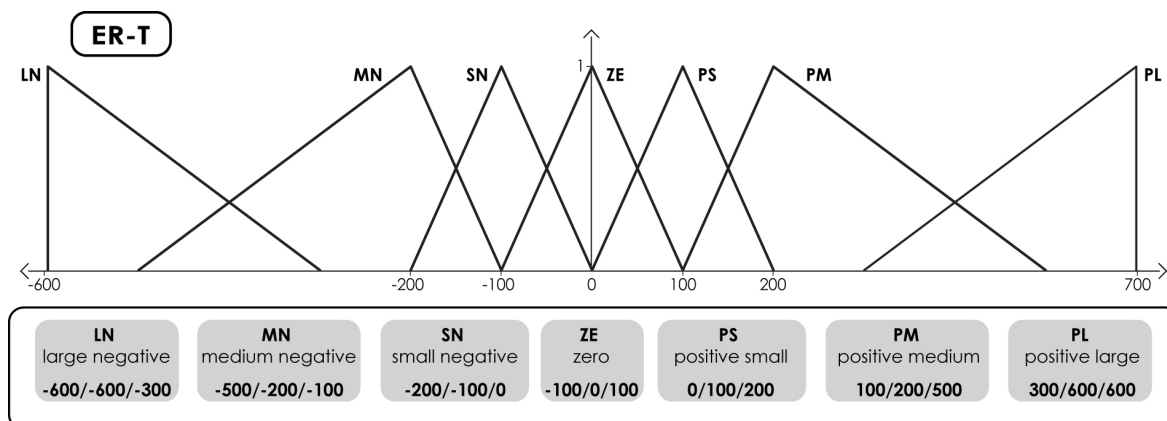
- 1.) IF RAD = SS pro ER-T = LN THEN Z = 100
 - 2.) IF RAD = SS pro ER-T = MN THEN Z = 100
 -
-

-
- 11.) IF RAD = S pro ER-T = ZE THEN Z = 90
-
- 49.) IF RAD = LL pro ER-T= PL THEN Z = 0



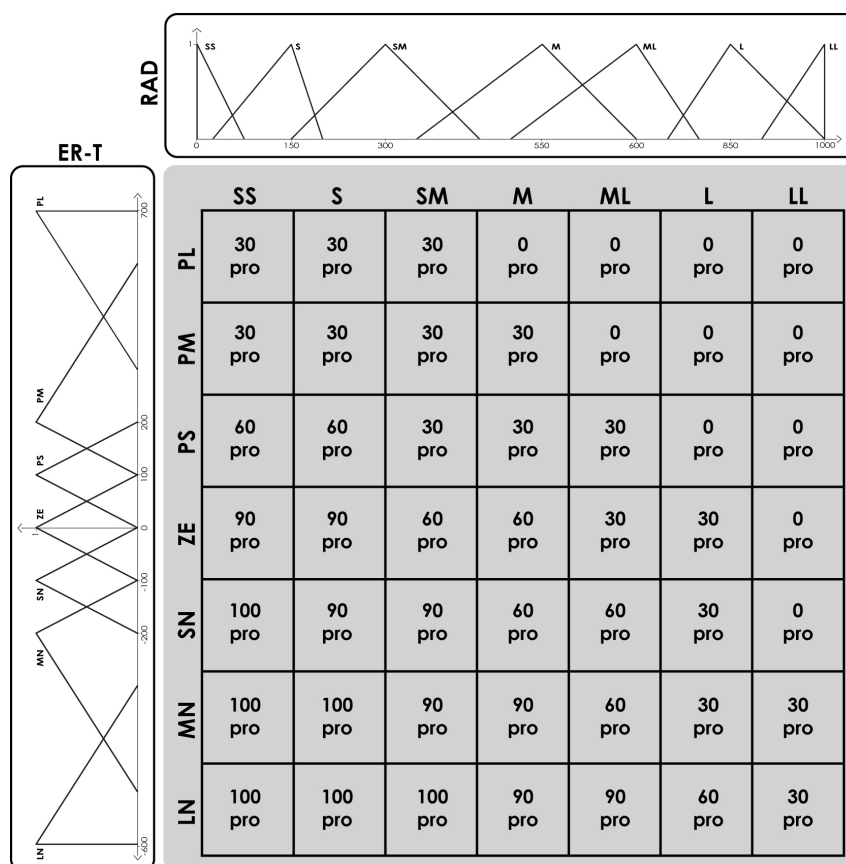
Slika 4.71: Vhodna spremenljivka RAD mehkega regulatorja IRsNO_temp_h.

Fig. 4.71: Input variable RAD of fuzzy regulator IRsNO_temp_h.



Slika 4.72: Vhodna spremenljivka ER-T mehkega regulatorja IRsNO_temp_h.

Fig. 4.72: Input variable ER-T of fuzzy regulator IRsNO_temp_h.



Slika 4.73: Matrika odločitev mehkega regulatorja osvetljenosti IRsNO_temp_h.
 Fig. 4.73: Decision matrix of illumination fuzzy regulator IRsNO_temp_h.

4.7 Komentarji k sistemu IRsNO

Sistem avtomatskega vodenja notranjega okolja kabine KSKE II/1 oziroma IRsNO predstavlja način regulacije notranjega vizualnega, toplotnega in olifaktoričnega udobja. Pri zasnovi in izvedbi sistema smo se opirali na znanje pridobljeno s sistemom KAMRA, ki je bilo sistematično analizirano in je bilo ter še bo uporabljeno pri oblikovanju in optimizaciji sistema. Zaradi praktičnih razlogov lažje obravnave ter izločanja napak pri postavitvi IRsNA je bil le-ta oziroma bo vzpostavljen v dveh fazah:

- **prva faza** je obsegala sistematično analizo podatkov, pridobljenih s sistemom KAMRA, ter uporabo tega znanja za oblikovanje sistema IRsNO. Postavitev senzorske mreže ter oblikovanje regulacijskega sistema sta sestavljena iz krmilnika

ter računalniške aplikacije za nadzor in vodenje. Sistem v prvi fazi ne vsebuje mehkih regulatorjev. Eksperimenti, izvedeni v času testiranja IRsNO prve faze, so bili namenjeni odkrivanju napak in težav pri senzorjih, aktuatorjih ter sistemu vodenja, prav tako pa so služili za določanje oziroma spoznavanje odziva prostora;

- **druga faza** bo obsegala vključitev mehkih regulatorjev za pozicioniranje žaluzij v sistem vodenja. Vključitev bo izvedena tako, da bo ves čas omogočen preklon med mehki in klasičnimi regulatorji. Eksperimenti, ki se bodo izvajali, bodo namenjeni optimizaciji sistema ter preučevanju različnih možnih načinov za določitev nastavitvev regulatorja, ki omogočajo ugodne bivalne razmere ter energetski prihranek.

Ob zaključku pisanja pričujoče doktorske naloge druga faza sistema IRsNO še ni bila vgrajena v sistem vodenja, saj odpravljanje težav z delovanjem sistema še ni bilo zaključeno. V zaključku naloge so predstavljene vhodne spremenljivke in matrika odločitev za mehke regulatorje osvetljenosti in temperature prostora kabineta KSKE. Ti mehki regulatorji bodo uporabljeni kot izhodiščni regulatorji sistema pri nadaljnjem delu bodo glede na njihovo učinkovitost ali neučinkovitost delovanja modificirani in optimizirani. Proces prezračevanja prostora regulacijsko ne predstavlja kompleksnega problema, zato bodo pri kontroli prezračevanja uporabljeni klasični PI-regulatorji. Podobno kot pri prezračevanju bo tudi pri vodenju delovanja grelno-hladilnih panelov v začetku uporabljena klasična regulacija s PI-regulatorji. Če se bo klasičen način vodenja izkazal za nepraktičnega ali premalo fleksibilnega, bo pri nadaljnjem delu vpeljana mehka regulacija tudi teh elementov.

5 ZAKLJUČEK

5.1 Sklep

Jedro pričujoče doktorske naloge je bilo oblikovanje smernic ter osnovnih pravil sistema vodenja parametrov notranjega okolja v stavbah, z žariščem na aktivnih dejavnikih vpliva. Pozornost je bila usmerjena predvsem na preučitev in določitev vplivov in načinov uravnavanja toplotnega in vizualnega ugodja ter kvalitete notranje atmosfere stavb. Seveda na bivalno-delovno okolje odločujoče vplivata tudi faktorja prostorske akustike in ergonomije prostora, vendar sta oba vpliva izrazito diskretne narave v primerjavi s faktorji toplotnega ali svetlobnega udobja uporabnikov. Razlog za takšno delitev leži predvsem v tem, da je ergonomija prostora definirana z arhitekturno rešitvijo stavbe in notranje opreme. Podobno je prostorska akustika vezana na notranjo opremo ter le delno na zunanje dejavnike hrupa in s tem posredno na delovanje ovoja stavbe. Nasprotno velja za toplotno ugodje, vizualno udobje in kvaliteto zraka v bivalnih prostorih, saj se ti dejavniki oblikovanja notranjega okolja neprestano dinamično spreminjajo pod vplivom zunanjih klimatskih danosti in želja, zahtev in dejavnosti uporabnikov. Dodatno na način in dinamiko prenosa zunanjih vplivov v notranjost stavbe vpliva tudi oblika in zasnova stavbnega ovoja, in sicer predvsem njegovi transparentni deli. Iz naštetih razlogov je razvidno, da je delitev na aktivne (toplotno ugodje, vizualno udobje, kvaliteta zraka) in pasivne (prostorska akustika, ergonomija prostora) dejavnike vpliva oblikovanja notranjega bivalno-delovnega okolja upravičena in smiselna v kontekstu regulacije in oblikovanja optimalnih razmer bivanja. Pri zasnovi integralnega regulacijskega sistema notranjega okolja (IRsNO), ki ga obravnava pričujoča naloga, so tako bili upoštevani samo aktivni faktorji. To pa nikakor ne pomeni, da so s tem ostali elementi vpliva na oblikovanje bivalno-delovnega okolja v kakršnikoli meri manj pomembni, saj lahko le celovito oblikovano grajeno okolje uporabnikom ponudi prijetno in udobno bivanje.

Zasnova sistema IRsNO temelji in izhaja iz bioklimatsko oblikovane stavbe, ki v sistemu človek-stavba-okolje ne predstavlja inštrumenta za izločevanje uporabnikov od danosti naravnega okolja, ampak vmesnik, ki omogoča pretok in regulacijo energije, snovi in informacij. Bioklimatska stavba s svojim ovojem in notranjo organizacijo tvori sistem, ki s

primernim oblikovanjem in s prilagajanjem mikro, mezo in makro klimatskim danostim okolja omogoča udobne bivalne pogoje ter maksimalno interakcijo z zunanostjo. Bistvo takšnega oblikovanja grajenega okolja je maksimalen izkoristek danih pogojev in tehnologij gradnje na nivoju oblikovanja stavbnega ovoja, in šele, ko je potencial »pasivnih« ukrepov izkoriščen, poseganje po tehnoloških rešitvah z vgradnjo naprednih sistemov napeljav. V tem kontekstu predstavlja IRsNO nadgradnjo pravilno bioklimatsko oblikovanega stavbnega ovoja, ki omogoča boljšo odzivnost na zunanje pogoje in uporabnikove želje s spreminjanjem karakteristik transparentnega dela stavbnega ovoja, s čimer zagotavlja učinkovitejše delovanje sistema. Transparentni del ovoja stavb omogoča dinamičen odziv na zunanje danosti in notranje zahteve ter zato tudi zahteva zadovoljiv nivo kontrole za doseg ustreznih rezultatov regulacije.

Transparentni del stavbnega ovoja, kot ciljno področje uporabe avtomatskega sistema vodenja izmenjav, energije informacij in snovi, je bil sistematično analiziran glede na njegove karakteristike, funkcije ter trenutne zmožnosti izvedbe. Pregled je obsegal dva sklopa, in sicer obravnavo oblikovanja transparentnega dela stavbnega ovoja iz gledišča interaktivnosti povezav med zunanostjo in notranostjo, ter pregled že izvedenih sistemov kontrole spreminjanja geometrije elementov zasteklitve ovoja stavbe, z namenom oblikovanja čim bolj ugodnega in energetsko varčnega notranjega okolja. Osnova prvega dela je bila analiza vpliva karakteristik zasteklitev na notranje okolje ter s tem primernost izbora tehnoloških rešitev, s katerimi se omogoča aktivno delovanje transparentnih elementov. Pozornost je bila usmerjena predvsem na gradbeno-fizikalne značilnosti stekel (U , τ_v , g) ter način delovanja in vpliv elementov senčenja. V drugem delu je bil izveden pregled in analiza pristopov k regulaciji toplotno-optičnih tokov skozi stavbni ovoj, posebna pozornost pa tokrat namenjena predvsem sistemom, ki bazirajo na uporabi mehke logike. Pregledani, opisani in primerjani so bili trije primeri, in sicer delo na FGG v okviru Katedre za stavbe in konstrukcijske elemente (sistem KAMRA), sistem razvit na LESO-PB (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) in sistem vodenja, ki so ga izdelali v laboratoriju za elektroniko tehnične univerze na Kreti.

Pregled načina delovanja transparentnega dela stavbnega ovoja ter sistemov za avtomatsko prilagajanje njegovih karakteristik je bil uporabljen kot osnova za snovanje in oblikovanje novega sistema regulacije notranjega okolja. IRsNO je nameščen v realnem delovnem okolju

kabineta KSKE III/1 v stavbi FGG na Jamovi cesti 2. Prostor kabineta je bil predhodno analiziran s pomočjo simulacijskih orodij za izračun osvetljenosti, s čimer je bilo pridobljeno osnovno znanje glede karakteristik oz. odziva prostora na zunanje danosti. Pozornost je bila usmerjena k notranji osvetljenosti predvsem zato, ker se je že s sistemom KAMRA izkazalo, da je osvetljenost prostora karakteristika, ki jo je zelo težavno nadzorovati.

Kot izhodišče pri oblikovanju sistema IRsNO so bili sistematično pregledani vsi eksperimenti izvedeni s sistemom KAMRA, ki je bil izveden na KSKE kot testna aplikacija za študijo regulacij toplotnih in svetlobnih pojavov v stavbah [Trobec-Lah 2003]. Dodatno oporo so nudile tudi numerične simulacije vodenja temperaturnega odziva notranjega okolja stavbe, ki so bile izvedene v okviru literature [Furlan 1999]. Množica eksperimentalnih podatkov pridobljenih s testno celico KAMRA, ki predhodno še niso bili analitično in sistematično obdelani, je nudila izdatno pomoč ter omogočila lažje odločitve pri izboru načina in smeri zasnove sistema vodenja IRsNO. Skupaj je bilo pregledanih in analiziranih 308 eksperimentov, izvršenih v časovnem obdobju treh let ter razdeljenih v tri skupine delovanja: regulacija temperature, regulacija osvetljenosti in harmonizirana regulacija.

Sistem IRsNO je osnovan na ugotovitvah in spoznanjih predhodno izvedenih analiz ter se v veliki meri opira na izsledke in delovanje sistema KAMRA, ki tako predstavlja neke vrste prototip za oblikovanje sistema IRsNO. Opis vseh gradnikov in elementov sistema osvetljuje strukturo, kompleksnost in način delovanja IRsNO, ki je bil v prvi fazi izvedbe apliciran brez uporabe mehkih regulatorjev. Ti bodo vključeni v drugi fazi ter integrirani na takšen način, da bo preklap med mehko ali klasično regulacijo možen v vsakem trenutku. S tem bo na voljo možnost primerjanja delovanja oziroma učinkovitosti obeh tipov reguliranja, hkrati pa bo obstajal zasilni izhod v primeru nezaželenega odziva pri nepravilno oblikovanih mehkih regulatorjih. Predstavljena struktura in oblika sistema IRsNO, opisana v pričujočem delu, je ogrodje okoli katerega se bo v nadaljevanju oblikovanja, predvsem pa optimiziranja, delovanja in nastavitve sistema, gradilo celovito vodenje notranjega bivalno-delovnega okolja.

5.1.1 Stavbni ovoj

Pri obravnavanju lastnosti stavbnega ovoja se je kot pomembno pokazalo vprašanje upravičenosti obravnavanja transparentnih delov ovoja kot dinamičnih elementov izmenjav med zunanjim in notranjim okoljem. Problematika sama po sebi ni trivialnega pomena, saj se v zadnjih dvajsetih letih na področju arhitekture in graditeljstva pojavlja tendenca k ustvarjanju bivalnih okolij, ki stremijo k popolni izločitvi izmenjav in povezav med zunanostjo in notranostjo. Ne glede na to, da takšno dojemanje grajenega okolja ni v skladu z osnovno hipotezo bioklimatskega načrtovanja bivalno-delovnega okolja, nas je v kontekstu preučevanja delovanja stavbnega ovoja zanimala upravičenost ali neupravičenost ukrepov, ki elementom transparentnega dela stavbnega ovoja zmanjšujejo toplotno prehodnost. Ukrep sam predstavlja dobrodošel napredek pri zmanjševanju transmisijskih toplotnih izgub stavbe, vendar skupaj s pozitivnimi posledicami povzroči tudi nezaželen vpliv na zmanjšanje transmisivnosti zasteklitev za vidni (τ_v) in celotni sončni spekter (g). Izvedeni sta bili dve paralelno izvajani analizi vpliva zmanjšanja U-faktorja zasteklitve, pri čemer je bilo v analizo vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje vključenih 27 naključno izbranih realnih objektov (Priloga B) [Krainer et al. 2007]. Kontrola rezultatov omenjene analize je bila izvedena s primerjalno analizo vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetsko bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta (Priloga A) [Krainer, Košir 2007]. Namen obeh analiz je bil preveriti upravičenost oziroma neupravičenost ukrepa zmanjševanja U-faktorja zasteklitev, ki poslabša dinamičnost in interaktivnost transparentnih delov stavbe.

Rezultati obeh analiz so pričakovano pokazali na zmanjšanje porabe energije za ogrevanje stavbe pri zamenjavi dvojne zasteklitve ($U = 1.12 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.61$, $\tau_v = 0.76$) s trojno ($U = 0.74 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.50$, $\tau_v = 0.66$), pričakovano pa je tudi bilo sočasno zmanjšanje notranje osvetljenosti. Pri analizah so bila zanimiva predvsem razmerja med porabo ogrevalne energije pri dvojni in trojni zasteklitvi ob enaki površini transparentnih delov ovoja. Izkazalo se je da so prihranki pri ogrevalni energiji v večini primerov zanemarljivi v primerjavi z zmanjšanjem nivoja osvetljenosti notranjih prostorov. Tako se je izkazalo, da povprečen prihranek ogrevalne energije v primeru 27-tih primerjanih stavb znaša 14.4 %, sočasno pa se osvetljenost notranjih prostorov poslabša za 25.3 %. Zelo podoben rezultat je dala tudi analiza

hipotetičnega enoprostornega objekta, kjer se je poraba ogrevalne energije pri zasteklitvi južnega zidu z 20 % tlorisne površine zmanjšala le za 1.7 %, notranja osvetljenost pa se je poslabšala kar za 18.0 %. Opisana situacija z zasteklitvijo v velikosti 20 % tlorisne površine prostora predstavlja tipičen primer bivalnih prostorov v stanovanjskih stavbah. Tudi pri povečanju zasteklitve na celotno površino južnega zidu je zmanjšanje porabe energije (7 %) majhno v primerjavi z zmanjšanjem nivoja osvetljenosti prostora (18 %). Izsledki obeh analiz so pokazali na neupravičenost ukrepa zmanjševanja transmisivnosti zasteklitev oken za vidni ter tudi celotni del sončnega spektra. Zmanjševanje količine dnevne svetlobe v bivalnih in delovnih prostorih ima neposreden vpliv na človekovo fizio-biološko delovanje in dobro počutje, zaradi česar je nujno za normalno delovanje ljudi. Seveda pa znižanje prepustnosti zasteklitve za celoten sončni spekter (g) neposredno zmanjšuje tudi solarne dotoke ter tako zmanjšuje možnost izkoriščanja razpoložljivih obnovljivih virov energije za ogrevanje stavb. Obe analizi sta potrdili začetno hipotezo o neupravičenosti zamenjave dvojne zasteklitve s trojno zasteklitvijo pri trenutnem tehnološkem stanju dostopnih komercialnih tipov zasteklitev. Vse naštetu pa seveda ne pomeni, da prihodnji razvoj ne bo prinesel zasteklitev, ki bodo omogočale nizko toplotno prehodnost ter hkrati visoko transparentnost za sončno sevanje.

Zasteklitve kot del transparentnega stavbnega ovoja za učinkovito delovanje potrebujejo zaščito pred sončnim sevanjem. Funkcija sončne zaščite oz. senčila je omogočanje senčenja zasteklitve ter s tem uravnavanje solarnih dotokov ter notranje osvetljenosti prostorov. Pregled nabora tipov senčil, ki je bil izveden v okviru študije delovanja stavbnega ovoja, je pokazal širok spekter razpoložljivih načinov senčenja. V okviru reguliranja notranjega okolja stavbe se je izkazalo, da je smiselno uporabiti tip senčil, ki omogočajo maksimalno prilagodljivost danim zunanjim pogojem ter notranjim zahtevam. Takšna so na primer vsa premična (roloji, rolete, žaluzije, ...) ter delno tudi fiksna senčila z rotirajočimi elementi (lamelle). Predvsem žaluzije kot najbolj napredno senčilo omogočajo tako senčenje kot tudi komunikacijo z zunanostjo ter, kar je najpomembnejše, nudijo izredno prilagodljivost pri uporabi oz. regulaciji notranjega okolja. V primeru sistema IRsNO so bile tako izbrane na zunanost objekta nameščene žaluzije in nato vgrajene na okno kabineta KSKE. Uporabljene žaluzije so izdelane iz aluminija in motorizirane z motorjem za spuščanje in dviganje ter rotiranje lamel. Zaradi mehanske izvedbe žaluzij je možna avtomatska regulacija naklona

lamel le v popolnoma spuščeni stanju. Ker ta lastnost močno vpliva na prilagodljivost regulacije notranje osvetljenosti, je bil način premikanja lamel pri sistemu IRsNO zasnovan tako, da se vse lamele vseh senčil premikajo sočasno in sicer v koraku po 30°. V primeru, da popolnoma horizontalno pozicionirane lamele ne zadoščajo za zagotovitev osvetljenosti prostora, sistem prične z dvigovanjem posameznih segmentov žaluzij. S tem je omogočena večja fleksibilnost regulacije kot bi jo bilo mogoče doseči le z uravnavanjem naklona ob popolnoma spuščeni žaluzijah.

Senčenje zasteklitev na stavbnem ovoju pa predstavlja izgubo potencialno izkoristljivih solarnih dotokov, ki s sončnim sevanjem padajo na zunanji del stavbe. Izkoriščanje tega potenciala tudi v času, ko neposrednega sončnega sevanja v prostor ni mogoče zagotoviti (v zimskem času je zaradi vizualnega udobja potrebno senčiti transparentne elemente stavbnega ovoja), ali pa je le-to nezaželeno (poletni čas zaradi nastanka pregrevanja), bi bilo omogočeno z integracijo senčil in aktivnih elementov izkoriščanja sončne energije. V okviru naloge je bila predstavljena zasnova senčila-kolektorja, ki predstavlja element zaščite notranjosti stavbe pred sončnim sevanjem hkrati pa tudi napravo, ki omogoča ogrevanje vode s pomočjo uporabe sončne energije. Takšen sistem za učinkovito delovanje potrebuje sistem vodenja, ki bi uravnaval notranje okolje ter tudi usmerjal sončni kolektor tako, da bi zagotovil optimalen izkoristek pri danih vremenskih pogojih. Senčilo-kolektor bi še dodatno povečalo aktivno vlogo transparentnega dela stavbnega ovoja ter s tem izboljšalo učinkovitost delovanja bioklimatske stavbe.

5.1.2 Regulacija toplotno-optičnih procesov

Pri razvoju sistema IRsNO je kot opora in izhodišče služil sistem KAMRA [Kristl et al. 2007] [Trobec-Lah 2003] ter analiza in primerjava značilnosti še dveh podobnih (LESO-PB [Guillemin, Morel 2001] in laboratorij za elektrotehniko TU Krete [Kolokotsa et al. 2000, 2002, 2005]), a kljub vsemu v podrobnostih drugačnih sistemov regulacije notranjega okolja. Namen takšne analize oz. primerjave je bilo izluščenje pristopov k regulaciji optično-termičnih procesov ter identificiranje potencialnih pasti pri koncipiranju novega sistema. Primerjava sistema KAMRA z drugima sistemoma je bila izredno dragocena v smislu določanja najprimernejših poti do hitre in učinkovite zasnove sistema avtomatskega vodenja

notranjega okolja [Košir et al. 2006]. Vsi trije sistemi so skozi eksperimente ter primerjave pokazali smiselnost uporabe avtomatske regulacije pri uravnavanju parametrov notranjega okolja, ki vodi k velikim prihrankom pri porabi energije za ogrevanje in hlajenje. Energetski prihranki pa nikakor niso edini pozitivni učinki, saj je bilo dokazano, da avtomatska regulacija omogoča boljše notranje bivalne pogoje. To se še posebej odraža pri vizualnem udobju ter kvaliteti zraka.

Opisani sistemi so s pomočjo spreminjanja geometrije zasteklitve poskušali uravnavati notranje temperaturne in vizualne pogoje bivalnega okolja. Regulacija je bila pri vseh sistemih izpeljana s pomočjo mehkih regulatorjev oz. s kombinacijo mehkih in klasičnih PID-regulatorjev. Uporaba mehke logike se je izkazala kot primerna, saj so bili pri vseh sistemih doseženi rezultati zelo ugodni tako iz gledišča prihrankov energije, kakor tudi zagotavljanja uporabnikovih želja. Med primerjanimi sistemi je bilo zelo veliko stičiščnih točk, saj so si v določenih aspektih sistemi zelo podobni. Najpomembnejša razlika je bila predvsem pri usklajevanju med temperaturnimi in osvetljenostnimi aspekti regulacije; sistem LESO-PB in sistem laboratorija za elektrotehniko TU iz Krete sta namreč uporabila princip preklopa med regulacijskima zankama. Slednje pomeni, da v primeru uporabnikove prisotnosti sistem vodi senčila le glede na želeno osvetljenost, v uporabnikovi odsotnosti pa aplikacija preklopi na vodenje glede na referenčni temperaturni profil. Nasprotno pa se je sistem KAMRA poskušal odzvati na dejansko stanje sočasnega vpliva tako toplotnih kot tudi svetlobnih procesov v notranjem okolju. Takšen pristop bi omogočil maksimalno izkoriščenost energetskega potenciala sončnega sevanja pri zelenih notranjih pogojih osvetljenosti. Žal pa uporabljen način vodenja senčila na testni celici KAMRA ni zadovoljil kvalitativnim kriterijem, saj je, ob sicer uspešnemu sledenju zelenim notranjim vrednostim, uporabljal nesprejemljivo dinamiko premikov rolete.

5.1.3 Sistem IRsNO

Sistem avtomatske regulacije notranjega bivalno-delovnega okolja predstavlja nadaljevanje dela opravljenega s testnim sistemom regulacije spremenljive geometrije ovoja stavbe – KAMRA. Ta sistem in eksperimenti izvedeni z njim so predstavljali podlago, na kateri se je razvil in izgradil sistem IRsNO. KAMRA je tako prestavljala eksperimentalno osnovo, kjer so

bili preizkušeni osnovni principi regulacije notranjega vizualnega ter toplotnega okolja s pomočjo modificiranja geometrije stavbnega ovoja. Jedro pričujoče naloge je bil razvoj in izvedba regulacijskega sistema IRsNO, ki predstavlja razširitev in nadgradnjo že opravljenega dela v okviru sistema KAMRA ter predvsem prenos v dejansko delovno-bivalno okolje. V specifičnem primeru gre za postavitev sistema v delovno okolje kabineta KSKE III/1 v stavbi FGG na Jamovi cesti 2 v Ljubljani. Prenos izkušenj in postopkov regulacije, razvitih na testni celici KAMRA, v realno delovno okolje pa ni predstavljalo le tehničnih, temveč zaradi specifik prostora in zahtev uporabnikov tudi mnogo konceptualnih težav.

Kot osnova za snovanje nastavitve sistema IRSNO je bila izvedena sistematična pregledna analiza 308 eksperimentov, izvedenih v treh letih izvajanja testiranj s testno celico KAMRA. V tem času so bili izpeljani in izvedeni eksperimenti za definiranje nastavitve mehkih regulatorjev toplotnih in svetlobnih procesov v testni celici. Med analiziranimi eksperimenti je bilo 129 eksperimentov s toplotno regulacijsko zanko, 151 eksperimentov s svetlobnimi regulacijskimi zankami ter 28 eksperimentov s harmoniziranim delovanjem regulacije notranjih termičnih in svetlobnih pogojev celice. Največja pozornost je bila posvečena analizi rezultatov pridobljenih pri testiranju svetlobnih regulacijskih zank, saj je zaradi dinamike optičnega procesa osvetljevanja prostora največ težav pričakovati ravno pri regulaciji notranje osvetljenosti. Pri analizi rezultatov eksperimentov s svetlobnimi regulacijskimi zankami sistema KAMRA je bila glavna pozornost posvečena najuspešnejšim regulatorjem: fuzzy_L1_E, fuzzy_L1_F in fuzzy_LP1, ti pa bodo predstavljali tudi izhodišče za oblikovanje mehkih regulatorjev sistema IRsNO.

IRsNO je bil zastavljen kot sistem avtomatskega vodenja notranjega okolja, ki bo s pomočjo senzorske mreže in aktuatorjev uravnaval aspekte vizualnega in toplotnega ugodja ter kvaliteto zraka v delovnem okolju kabineta KSKE III/1. Razvoj sistema je bil zastavljen v dveh fazah, kjer je prva faza obsegala formulacijo področja delovanja, analizo in oceno predhodno opravljenega dela ter vzpostavitev dejanskega regulacijskega sistema. V prvi fazi v sistem še niso bili vključeni mehki regulatorji, ampak je ta deloval le s pomočjo klasične PID-regulacije. Mehka regulacija bo integrirana v regulacijski sistem šele po zaključku testiranja delovanja izvršnih členov, senzorjev ter klasičnih regulatorjev. Takšna delitev v dve fazi omogoča lažji nadzor nad izvedbo in delovanjem tako kompleksnega regulacijskega sistema

kot je IRsNO, predvsem pa preprečuje možnost nastanka situacij v katerih je težavno ali skoraj nemogoče odkriti vzrok težav delovanja sistema, saj sistem vsebuje preveč neznank. Takšnim situacijam smo se želeli izogniti s postopno izvedbo sistema, ki se mu dodajo nove komponente šele po tem, ko se težave v delovanju predhodno nameščenih delov odpravijo.

Sistem regulacije notranjega okolja IRsNO se trenutno izvaja brez vključenih mehkih regulatorjev, saj se na sistemu še odpravljajo težave v delovanju oz. v določevanju primernih nastavitvev za delovanje klasične regulacije. V tem času je bilo izvedeno s pomočjo sistema tudi spoznavanje odziva prostora, ki bo uporabnikom olajšalo izvedbo primernih nastavitvev delovanja sistema. Po odpravljenih pomankljivostih sistema v trenutni konfiguraciji bodo dodani v vodenje mehki regulatorji, ki bodo oblikovani na osnovi mehkih regulatorjev osvetlitve in notranjih temperatur sistema KAMRA (predvsem fuzzy_LP1). Začetne nastavitve mehkih regulatorjev bodo v začetnih poizkusih minimalno spremenjene, saj bodo izhajale iz najučinkovitejših nastavitvev regulatorjev sistema KAMRA. Glavne spremembe so bile izvedene pri končnih izhodnih vrednostih, saj so le-te bile prirejene na možna stanja žaluzij, ki obsegajo štiri stopnje naklona lamel (0°, 30°, 60° in 90°) ter popoln dvig žaluzije (100). Ta sprememba sicer ne bi bila nujna, izvedena je bila zaradi večje preglednosti in nazornosti matrike odločitev mehkih regulatorjev. Modifikacije izhodiščnih nastavitvev regulatorjev so bile izvedene tudi pri vhodnih mehkih množicah. Spremembe obsegajo določitev novih definicijskih območij ter definicije posameznih vhodnih množic. Mehka regulacija bo uporabljena le pri regulaciji notranje osvetljenosti ter pri pozicioniranju žaluzij za omogočanje (prioriteta ogrevanje) oziroma preprečevanje (prioriteta hlajenje) solarnih dotokov. Pri regulaciji koncentracije ogljikovega dioksida s prezračevanjem bodo zaradi enostavnosti problema uporabljeni le klasični regulatorji, saj omogočajo zadostno fleksibilnost kontrole. Podobno bo tudi v primeru aktivacije grelno-hladilnih elementov uporabljena klasična regulacija, če pa se bo skozi izvedene eksperimente izkazalo, da je pri grelno-hladilnih panelih potrebna večja fleksibilnost, ki jo ponujajo mehki regulatorji, bo tudi za slednje izvedena mehka regulacija.

Začetne meritve izvedene s pomočjo sistema IRsNO so potrdile rezultate, pridobljene s simulacijami osvetljenosti kabineta KSKE III/1, ki so pokazale, da bo največji vpliv sončnega sevanja na notranjo osvetljenost v popoldanskih urah, ko je okno kabineta izpostavljeno

neposrednemu sončnemu sevanju. Delovanje sistema je pokazalo, da je tudi v relativno oblačnem vremenu dinamika premikov senčil v primerjavi z dopoldanskim časom v popoldnevu izrazitejša. Pojav pa se še potencira v jasnem vremenu, saj takrat neposredno osončenje povzroča visoko osvetljenost že pri priprtih lamelah žaluzij, posledično sistem takrat skoraj popolnoma zastre žaluzije. Pri takšnem delovanju sistema se je v začetnih eksperimentih pojavila težava, kjer je regulacija vseh žaluzij istočasno privedla do preosvetljenosti ali podosvetljenosti prostora. Posledično so se lamele izmenično odpirale in zapirale, notranja osvetljenost pa je »žagala« okrog želene vrednosti z dokaj velikim odstopanjem. Nastala težava je bila odpravljena z omogočanjem postopnega odpiranja posameznih segmentov žaluzij. Na tak način je lahko sistem postopoma dvigoval posamezne segmente žaluzij, hkrati pa vsem preostalim spuščnim žaluzijam uravnaval naklon lamel. Posledično je bila s tem dosežena večja prilagodljivost in natančnost regulacije notranje osvetljenosti prostora. Pri opazovanju odziva osvetljenosti prostora kabineta KSKE na zunanje spremembe se je pokazalo, da ima v primerjavi s testno celico KAMRA manj izrazito dinamiko odziva, saj se skoki v nivoju zunanje osvetljenosti ne odražajo tako izrazito. Med opazovanimi parametri notranjega okolja pa je najbolj presenetila količina oz. koncentracija CO₂ v prostoru ter hitrost njegovega naraščanja. Meritve v prostoru kabineta so namreč pokazale, da je bila določena mejna kritična vrednost (900 ppm) zelo hitro dosežena, čeprav je prostor relativno velik (163.40 m³) in ni pretirano zaseden (0.05 oseb/m²). Prezračevanje prostora učinkovito odpravi težavo, vendar je pri polno zasedenem prostoru kabineta KSKE (soba 1 in 2) za vzdrževanje koncentracije CO₂ pod določeno maksimalno vrednostjo potrebno redno prezračevanje na približno vsakih 120 minut. Zanimivo pa je spremljanje koncentracije CO₂ v prostoru kabineta KSKE, ki je pokazalo tudi na nezrakotesnost ovoja stavbe FGG, saj sta se notranja in zunanja koncentracija CO₂ izenačili v približno 5 urah po tem, ko so uporabniki zapustili prostor.

5.2 Nadaljnje delo

V nadaljevanju dela na področju vodenja notranjega bivalno-delovnega okolja v stavbah, bo v kontekstu razvoja sistema IRsNO potrebno opraviti še veliko dela na vzpostavitvi, predvsem pa na optimizaciji delovanja sistema, saj trenutno stanje nikakor ne predstavlja konfiguracije,

ki bi bila zmožna zadovoljiti potrebam vsakodnevne uporabe v realnem okolju. Vključitev in optimiziranje mehkih regulatorjev v sistem, ki predstavlja kombinacijo klasične in mehke regulacije bo omogočilo večjo fleksibilnost delovanja sistema ter s tem tudi boljše zadovoljevanje uporabnikovih želja. Vzporedno izvajanje eksperimentov bo omogočilo določevanje in izboljševanje nastavitvenih parametrov, kar bo pripeljalo do zadovoljivo optimiziranih nastavitvev regulatorjev.

Končni cilj ter želja načrtovalcev in oblikovalcev IRsNO je vzpostavitev sistema, ki bo zmožen delovati v realnem okolju brez konstantnega poseganja izučenega operaterja v njegovo delovanje. Ta bo zadovoljil uporabnikovim željam po udobnem delovnem ali bivalnem okolju, vendar se je potrebno zavedati, da udobno in prijetno delovno ali bivalno okolje ni mogoče definirati s standardiziranimi vrednostmi parametrov notranjega okolja, ta lahko namreč služijo le kot pomoč pri oblikovanju začetnih vrednosti. Tako je nujno omogočiti uporabnikom, da si delovno-bivalno okolje prikrojijo in prilagodijo svojim željam in potrebam brez odvečnega vsiljevanja povprečnih standardiziranih vrednosti ali omejevanja načina uporabe (npr. preprečevanje prezračevanja) zaradi energetske učinkovitosti. Energetska učinkovitost sistema notranjega okolja je sicer prioriteta pri delovanju, vendar le dokler ne poseže v kvaliteto bivanja. Uporabniki bodo pripravljene sprejeti le takšen avtomatiziran regulacijski sistem notranjega okolja, ki jih ne bo omejeval, ampak jim bo omogočal boljše in kvalitetnejše bivanje. Čeprav sistem IRsNO regulira le nekaj aspektov notranjega okolja se je potrebno zavedati, da uporabniki doživljajo in zaznavajo svojo okolico, kamor spada tudi notranji prostor, skozi kompleksen sistem medsebojno povezanih čutnih zaznav, spominov, sanj in domišljije. Doživljanje notranje osvetljenosti prostora tako ni odvisno samo od vidne percepcije, temveč je neločljivo vezano tudi na vse ostale človeške čute [Pallasmaa 2007]. Na pomen te povezave je opozoril John Dewey v svoji knjigi *Umetnost kot izkustvo*: »Čuti, tip in okus pa tudi vid in sluh, imajo estetske lastnosti. Nimajo jih pa sami, ampak povezani; kot interaktivne in ne kot enostavne in ločene entitete. Poleg tega povezave niso omejene na isto vrsto, barve z barvami, zvok z zvoki [...]. Oko, uho ali karkoli so le kanali, po katerem poteka odziv. [...]. Pri gledanju slike ni res, da so vizualne lastnosti [...]. v središču in so druge lastnosti razporejene okoli njih kot dodatek ali povezava. Nič ne bi moglo biti dlje od resnice [...]. Ko z očmi zaznamo kavzalna pomagala, bistrost vode, mrzlost ledu, trdnost skale, golost drevesa pozimi, je jasno, da so pri zaznavanju zraven

in ga nadzorujejo druge lastnosti in ne le očesne. In povsem gotovo je, da optične lastnosti niso samostojne in taktilne in emotivne lastnosti niso le prilepljene nanje [...]. Čutne lastnosti se zaradi svoje organske povezanosti rade širijo in zlivajo.» - povzeto po [Pallasmaa 2007]. Pri razvoju sistema IRsNO tako ni bil namen ustvarjalcev ustvariti sistem, ki bi onemogočal uporabnikom prikrojevanje notranjega okolja njihovim željam in predstavam, temveč kvečjemu ravno nasprotno. Stremeli smo k sistemu, ki bi omogočal oblikovanje raznovrstnih pogojev notranjega okolja ter ne bi zanemarjal pomembnosti celostnega obravnavanja doživljanja bivalno-delovnega okolja.

Cilj nadaljnjega dela v kontekstu sistema IRsNO je pripeljati delovanje sistema do te stopnje, da bo sposoben zadovoljiti željam uporabnikom prostora in istočasno omogočati energetske prihranke. Sistem naj s svojim delovanjem seveda ne bi smel biti moteč, hkrati pa naj bi bil čimbolj intuitiven za uporabo. Le takšen avtomatski sistem vodenja ima na koncu možnost, da bo sprejet iz strani ljudi, ki uporabljajo stavbe, v katerih je nameščeno avtomatsko vodenje. Ključ do izvedbe sistema, ki bi lahko izpolnil vse navedene zahteve, pa je celostno (bioklimatsko) obravnavanje tako stavbe ter tudi notranjega okolja in načina vodenja njegovih parametrov. IRsNO kot sistem vodenja notranjega okolja v stavbah se bo s svojimi značilnostmi celostnega pristopa k problematiki avtomatizacije notranjega okolja poskušal približati zgoraj opisanemu idealu.

LITERATURA

- Ander, D. G. 2003. Daylighting: Performance and design. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc.: 296 str.
- Asada, H., Boelman, E. C. 2004. Exergy analysis of a low temperature radiant heating system. *Building Service Engineering Research and Technology* 25: str. 197-209.
- Bauer, M., Geiginger, J., Hegetschweiler, W., Morel, N., Sejkora, G., Wurmsdobler, P. 1996. DELTA: A blind controller using fuzzy logic – Final report – OFEN/BEW funding No. 50 943. Lusanna, Ecole Polytechnique Federale de Lusanne: 134 str.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., Rollag, M. D. 2001. Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of Neuroscience* 21, 16: str. 6405-6412.
- Calvino, F., La Gennusa, M., Rizzo, G., Scaccianoce, G. 2004. The control of indoor thermal comfort conditions: introducing a fuzzy adaptive controller. *Energy and Buildings* 36, 2: str. 97-102
- CR 1752. 1998. Ventilation for buildings – Design criteria for the indoor environment. Brussels, European Committee for Standardization: 73 str.
- Donlaić, D., Jurkovič, F., Tovornik, B., Lampič, S. 1995. Osnove snovanja mehkih (fuzzy) regulacij. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko: 168 str.
- EN 410. 1998. Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing. Brussels, European Committee for Standardization: 38 str.
- EN 675. 1997. Glass in building – Determination of thermal transmittance (U value) – Calculation method. Brussels, European Committee for Standardization: 12 str.
- EN 832. 1998. Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for heating – Residential buildings. Brussels, European Committee for Standardization: 46 str.
- Furlan B. 1999. Izdelava simulacijskega modela toplotnega odziva stavbe s spremenljivimi lastnostmi ovoja in aplikacija mehkega vodenja. Magistersko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 164 f.
-

- Gouda, M. M., Danaher, S., Underwood, C. P. 2001. Thermal Comfort based fuzzy logic controller. *Building Service Engineering Research and Technology* 22: str. 237-253
- Guillemin, A., Morel, N. 2001. An Innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system. *Energy and Building* 33, 5: str. 477-487
- Heschong, L. 2003a. Daylight and Retail Sales. Heschong Mahone Group. Fair Oaks, California Energy Commission: 86 f.
- Heschong, L. 2003b. Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment. Fair Oaks, Heschong Mahone Group. California Energy Commission: 131 f.
- Heschong, L. 2003c. Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment. Heschong Mahone Group. Fair Oaks, California Energy Commission: 159 f.
- Imanari, T., Omori, T., Bogaki, K. 1999. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system. *Energy and Building* 30, 2: str. 167-175
- ISO 8995. 1989. Principles of visual ergonomics – The Lighting of indoor work systems. Brussels, International Organization for Standardization: 27 str.
- Jeong, J-W., Mumma, A. S. 2007. Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel. *Building and Environment* 42, 9: str. 3176-3185
- Kaltenbach, F. (ur.) 2004. Translucent Materials – Glass, Plastics, Metals. Basel, Birkhäuser: 110 str.
- Kladnik, R., Krainer, A., Perdan, R. 1997. 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 1997 Japan Committee: str. 59-64
- Kladnik, R., 1987. Teorija KAMRE. Interna publikacija KSKE št.16. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente: 60 str.
- Kokol, P., Hleb-Babič, Š., Pogorelec, V., Zorman, M. 2001. Inteligentni sistemi. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko: 211 str.
-

- Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. S., Santamouris, M. 2005. Implementation of an integrated indoor environment and energy management system. *Energy and Buildings* 37, 1: str. 93-99
- Kolokotsa, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., Agoris, D. 2002. Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks. *Artificial Intelligence* 15, 5: str. 417-428
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Kalaitzakis, K., Antonidakis, E. 2000. Advanced fuzzy logic controllers designed and evaluated for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and Buildings* 33, 6: str. 531-543
- Košir, M., Kristl, Ž., Krainer, A. 2006. Parametrical study of fuzzy control approaches for regulating thermal and optical flows. EuroSun 2006: Conference Proceedings, Glasgow, UK, 27.-30. June, 2006. Abingdon, International Solar Energy Society: str. 1-9
- Krainer, A. 1993. Building Science and Environment-Conscious, Design Module 1: Design Principles, 7 Toward Smart Buildings. European Commission TEMPUS Joint European Project JEP-1802.
- Krainer, A., Košir, M. 2007. Primerjalna analiza vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno svetlobo in energetska bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta – interna raziskava. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer, KSKE.
- Krainer, A., Košir, M., Kristl, Ž. 2007. Analiza vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje 27-tih naključno izbranih objektov – izvedeno delno v okviru seminarja študentov predmeta Zgradba, Okolje, Energija (UL FGG UNI – konstrukcijska smer, 4. letnik) in Bioklimatske zgradbe (UL FGG VŠŠ – konstrukcijska smer, 3. letnik). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer, KSKE.
- Krainer, A., Košir, M., Kristl, Ž., Dovjak, M. 2008. Pasivna hiša proti bioklimatski hiši. *Gradbeni vestnik* letnik 57, 3: str. 58-68
- Kristl, Ž., Košir, M., Trobec-Lah, M., Krainer, A. 2007. Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building. *Renewable Energy* 33, 4: str.694-702
-

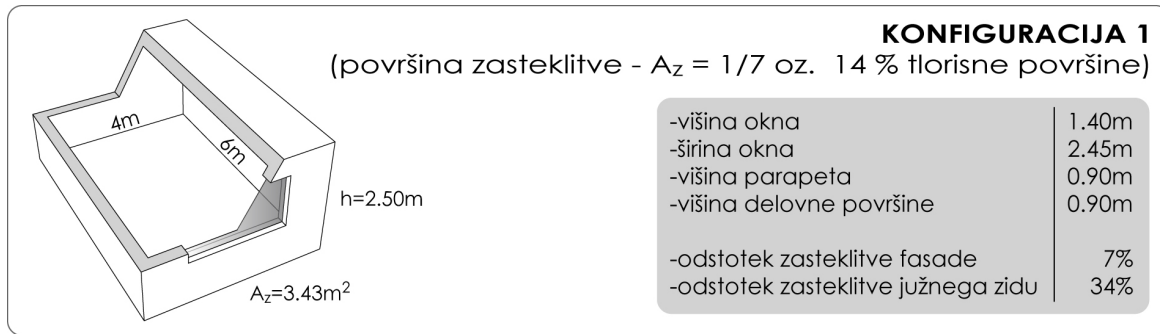
- Lee, S. E., DiBartolomeo, L. D., Selkowitz, E. S. 1998. Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office. *Energy and Buildings* 29, 1: str. 47-63
- Miriél, J., Serres, L., Trombe, A. 2002. Radiant ceiling panel heating-cooling system: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumption. *Applied Thermal Engineering* 22, 16: str. 1861-1873
- Munakata, T. 1998. *Fundamentals of the New Artificial Intelligence: Beyond Traditional Paradigms*. New York, Springer-Verlag: 231 str.
- Olgay, A., Olgay, V. 1957. *Solar control & shading devices*. Princeton, Princeton University Press: 201 str.
- Orel, B., Spreizer, H., Slemenik Perše, L., Fir, M., Šurca Vuk, A., Merlini, D., Vodlan, M., Köhl, M. 2007. Silicone-based thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints as selective paint coatings for coloured solar absorbers (Part I). *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91, 2-3: str. 93-107
- Orel, B., Spreizer, H., Šurca Vuk, A., Fir, M., Merlini, D., Vodlan, M., Köhl, M. 2007. Selective paint coatings for coloured solar absorbers: Polyurethane thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints (Part II). *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91, 2-3: str. 108-119
- Pallasmaa, J. 2007. *Oči kože: arhitektura in čuti*. Ljubljana, Studia humanitatis: 119 str.
- Paić, Z. 2002. *Sustavi površinskog grijanja i hlađenja*. Zagreb, Energetika marketing: 560 str.
- Palaniappan, N. 2005. *Fuzzy Topology – second edition*. Harrow, Alpha Science International Ltd.: 193 str.
- Pilkington Spectrum™ v02.01.01. 2007. *The Pilkington Glazing Calculator*. St Helens Merseyside, Pilkington Group Limited.
- Roulet, C-A., Rossy, J-P., Roulet, Y. 1999. Using large radiant panels for indoor climate conditioning. *Energy and Buildings* 30, 2: str. 121-126
- Rubinstein, F., Jennings, J., Avery, D. Blanc, S. 1999. Preliminary results from an advanced lighting controls testbed. IESNA 1998 Annual Conference, SanAntonio, TX, 10.-12. August, 1998, *Journal of the IES*.
- 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. 2000. *Daylight in Buildings A source book on daylighting systems and*
-

- components. Paris, International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems: 228 str.
- Shaw, I. S. 1998. Fuzzy Control of Industrial Systems – Theory and Applications. Boston, Dordrecht, London, Kluwer Academic Publishers: 192 str.
- SPOT v3.0. 2006. Sensor Placement + Optimization Tool, Users manual. Boulder, Architectural Energy Corporation.
- Škrjanc, I., Zupančič, B., Furlan, B., Krainer, A. 2001. Theoretical and experimental FUZZY modelling of building thermal dynamic response. *Building and Environment* 36, 9: str. 1023-1038
- Trobec-Lah, M. 2003. Harmonizacija toplotnih in svetlobnih tokov z uporabo mehke logike. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 384 str.
- Trobec-Lah, M., Zupančič, B., Krainer, A. 2005. Fuzzy control of illumination and temperature comfort in a test chamber. *Building and Environment* 40, 12: str. 1626-1637
- Trobec-Lah, M., Zupančič, B., Peternelj, J., Krainer, A. 2006. Daylight illuminance control with fuzzy logic. *Solar Energy* 80, 3: str. 307-321
- Vangtook, P., Chirarattananon, S. 2006. An experimental investigation of application of radiant cooling in hot humid climate. *Energy and Buildings* 38, 2: str. 273-285
- Vitruvius. 2002. Ten Books on Architecture. Cambridge, Cambridge University Press: 333 str.
- Zupančič, B., 1996. Zvezni regulacijski sistemi – I. Del. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za elektrotehniko: 322 str.
- Xenophon. 1997. Memorabilia and Oeconomicus. Symposium and Apology. Harvard, Harvard University Press: 704 str.
-

PRILOGA A

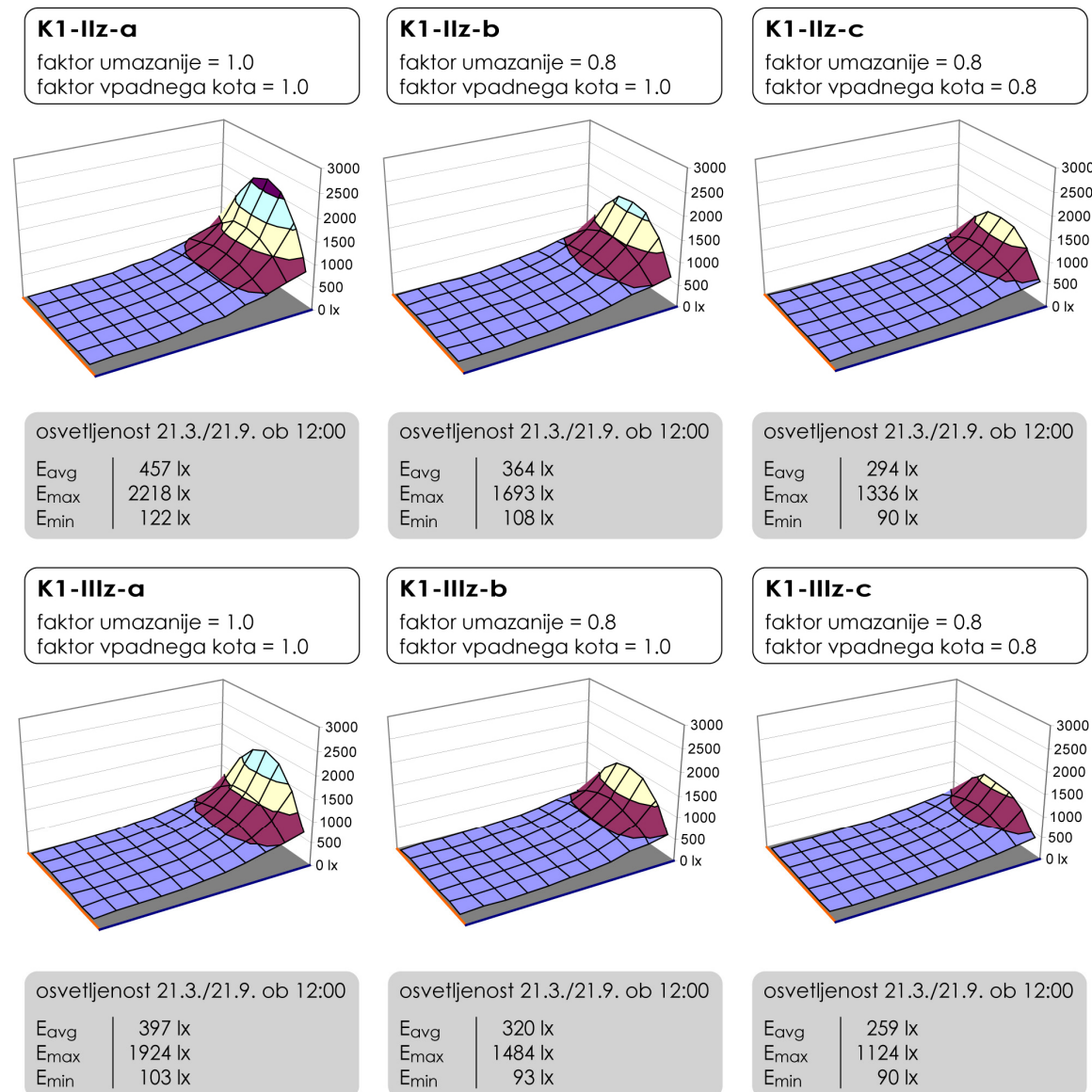
Primerjalna analiza vpliva U-faktorja zasteklitve na dnevno osvetljenost in energetska bilanco hipotetičnega enoprostornega objekta

Namen pričujoče primerjalne analize je bilo preveriti kolikšen in kakšen vpliv ima na parametre notranjega okolja spreminjanje tipa zasteklitve. Pozornost je bila posvečena predvsem osvetljenosti notranjega prostora z dnevno svetlobo in porabi energije za ogrevanje. Izračuni so bili izvedeni za dva tipa zasteklitve (dvojna in trojna zasteklitev) ter tri različne geometrijske konfiguracije transparentnih elementov. Rezultati analize so bili predstavljeni kot sprememba povprečne osvetljenosti prostora na standardni delovni površini (0.9 m) ob enakonočju (21.3. in 21.9.) ter sprememba porabe energije za ogrevanje pri izbrani konfiguraciji geometrije zasteklitve ob variiranju tipa zasteklitve. Analiza je bila izvedena na hipotetičnem enoprostornem objektu, ki je s transparentnim delom ovoja stavbe orientiran proti jugu. Stavba je pritlična z notranjimi dimenzijami 4.00 m x 6.00 m x 2.50 m, vsi konstrukcijski sklopi so debeli 30 cm s predpostavljenim U-faktorjem $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Slika 7.1: Geometrijske značilnosti objekta.

Fig. 7.1: Buildings geometric characteristics.



Slika 7.2: Diagrami osvetljenosti za konfiguracijo 1.

Fig. 7.2: Diagrams of illumination for the configuration 1.

Preglednica 7.1: Izkaz toplotnih karakteristik stavbe; primer K1-IIz.

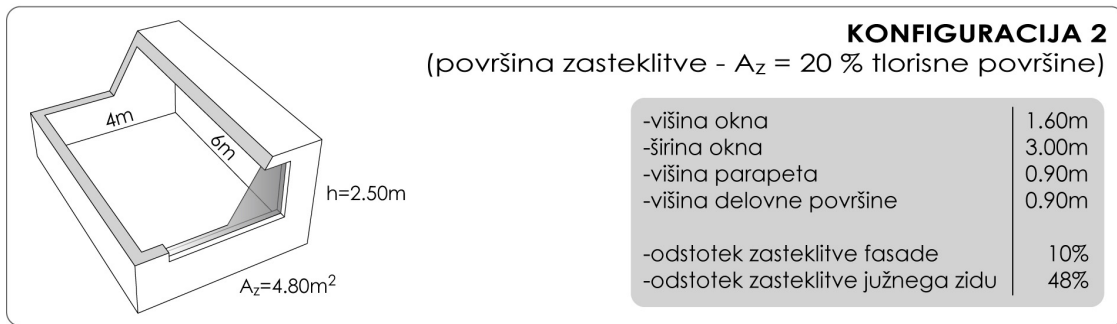
Table 7.1: Buildings thermal characteristics; example K1-IIz

KARAKTERISTIKE STAVBE	
V_e - ogrevana prostornina stavbe (m^3)	60.00
A_u - neto uporabna površina stavbe (m^2)	24.00
f_o - oblikovni faktor (m^{-1})	1.04
n - število izmenjav zraka	1/h
KARAKTERISTIKE TRANSPARENTNIH ELEMENTOV	
A - površina zasteklitve (m^2)	3.43
Orientacija zasteklitve	J
U (W/m^2K)	1.12
g	0.61
τ_v	0.76
TOPLOTNE KARAKTERISTIKE STAVBE	
Q_s - izkoriščeni solarni pritoki (kWh)	384.98
Q_i - izkoriščeni notranji pritoki (kWh)	752.93
Q_t - transmisijske izgube (kWh)	1302.60
Q_v - prezračevalne izgube (kWh)	1720.44
Q_n - letna poraba toplote za ogrevanje (kWh)	1639.90
Q_n/A_u - specifična letna poraba toplote za ogrevanje (kWh/m^2a)	68.33

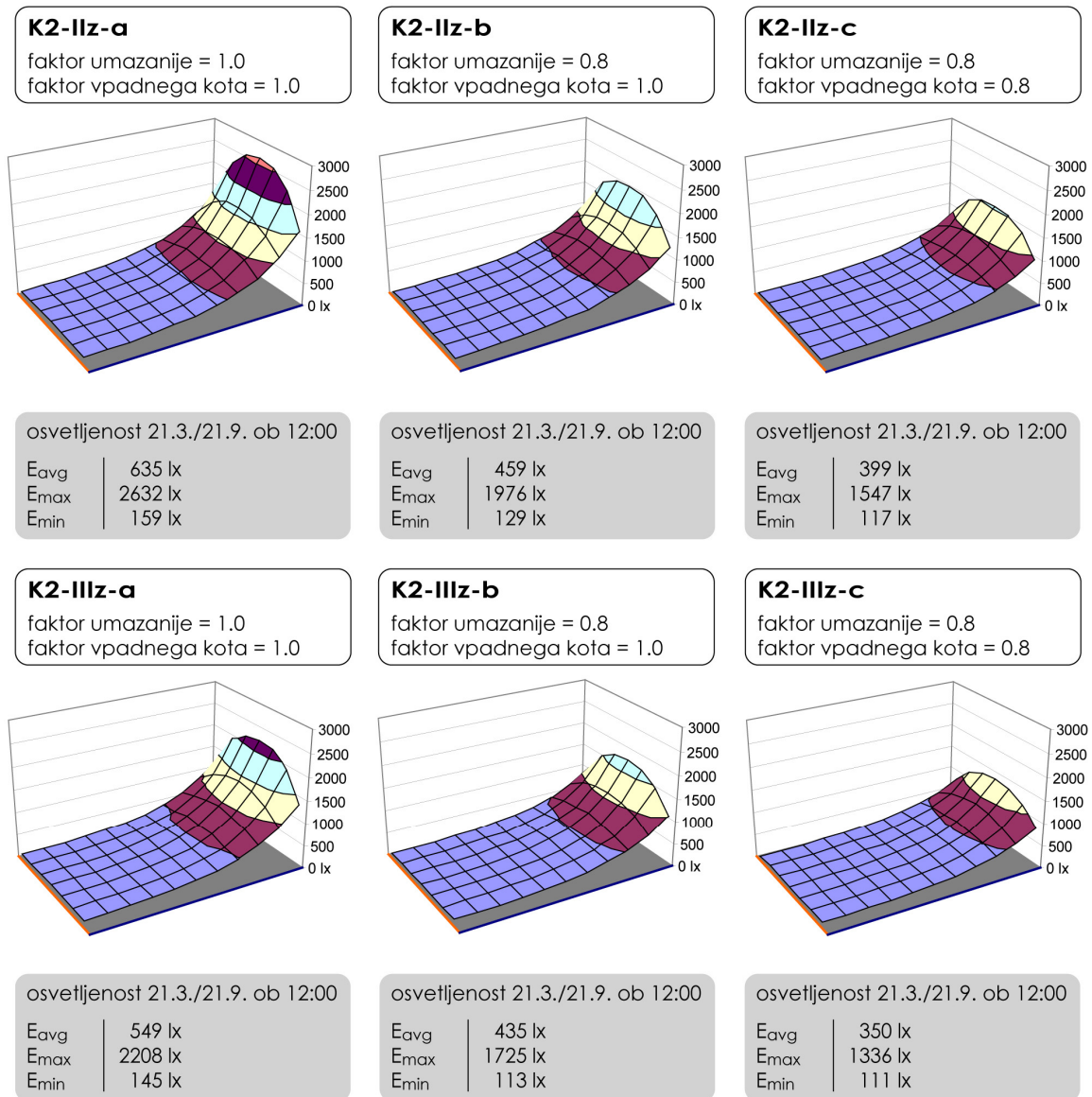
Preglednica 7.2: Izkaz toplotnih karakteristik stavbe; primer K1-IIIz.

Table 7.2: Buildings thermal characteristics; example K1-IIIz

KARAKTERISTIKE STAVBE	
V_e - ogrevana prostornina stavbe (m^3)	60.00
A_u - neto uporabna površina stavbe (m^2)	24.00
f_o - oblikovni faktor (m^{-1})	1.04
n - število izmenjav zraka	1/h
KARAKTERISTIKE TRANSPARENTNIH ELEMENTOV	
A - površina zasteklitve (m^2)	3.43
Orientacija zasteklitve	J
U (W/m^2K)	0.74
g	0.50
τ_v	0.66
TOPLOTNE KARAKTERISTIKE STAVBE	
Q_s - izkoriščeni solarni pritoki (kWh)	315.56
Q_i - izkoriščeni notranji pritoki (kWh)	752.93
Q_t - transmisijske izgube (kWh)	1193.11
Q_v - prezračevalne izgube (kWh)	1720.44
Q_n - letna poraba toplote za ogrevanje (kWh)	1627.20
Q_n/A_u - specifična letna poraba toplote za ogrevanje (kWh/m^2a)	67.80



Slika 7.3: Geometrijske značilnosti objekta.
Fig. 7.3: Buildings geometric characteristics.



Slika 7.4: Diagrami osvetljenosti za konfiguracijo 2.
Fig. 7.4: Diagrams of illumination for the configuration 2.

Preglednica 7.3: Izkaz toplotnih karakteristik stavbe; primer K2-IIz.

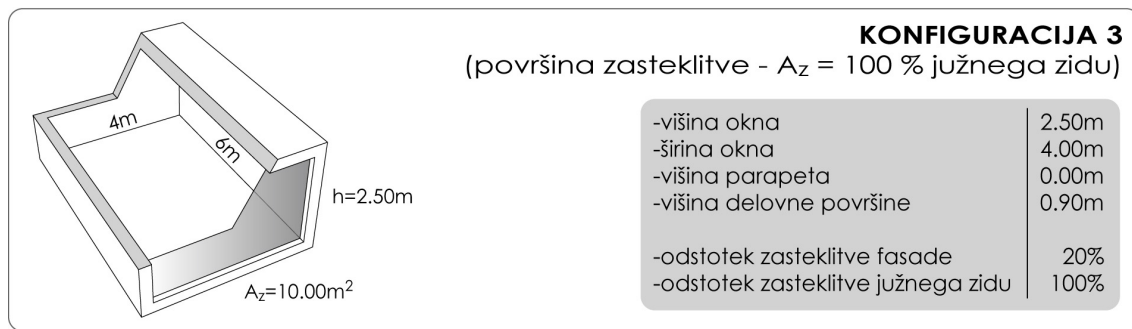
Table 7.3: Buildings thermal characteristics; example K2-IIz

KARAKTERISTIKE STAVBE	
V_e - ogrevana prostornina stavbe (m^3)	60.00
A_u - neto uporabna površina stavbe (m^2)	24.00
f_o - oblikovni faktor (m^{-1})	1.04
n - število izmenjav zraka	1/h
KARAKTERISTIKE TRANSPARENTNIH ELEMENTOV	
A - površina zasteklitve (m^2)	4.80
Orientacija zasteklitve	J
U (W/m^2K)	1.12
g	0.61
τ_v	0.76
TOPLOTNE KARAKTERISTIKE STAVBE	
Q_s - izkoriščeni solarni pritoki (kWh)	538.75
Q_i - izkoriščeni notranji pritoki (kWh)	752.93
Q_t - transmissijske izgube (kWh)	1414.22
Q_v - prezračevalne izgube (kWh)	1720.44
Q_n - letna poraba toplote za ogrevanje (kWh)	1568.40
Q_n/A_u - specifična letna poraba toplote za ogrevanje (kWh/m^2a)	65.35

Preglednica 7.4: Izkaz toplotnih karakteristik stavbe; primer K2-IIIz.

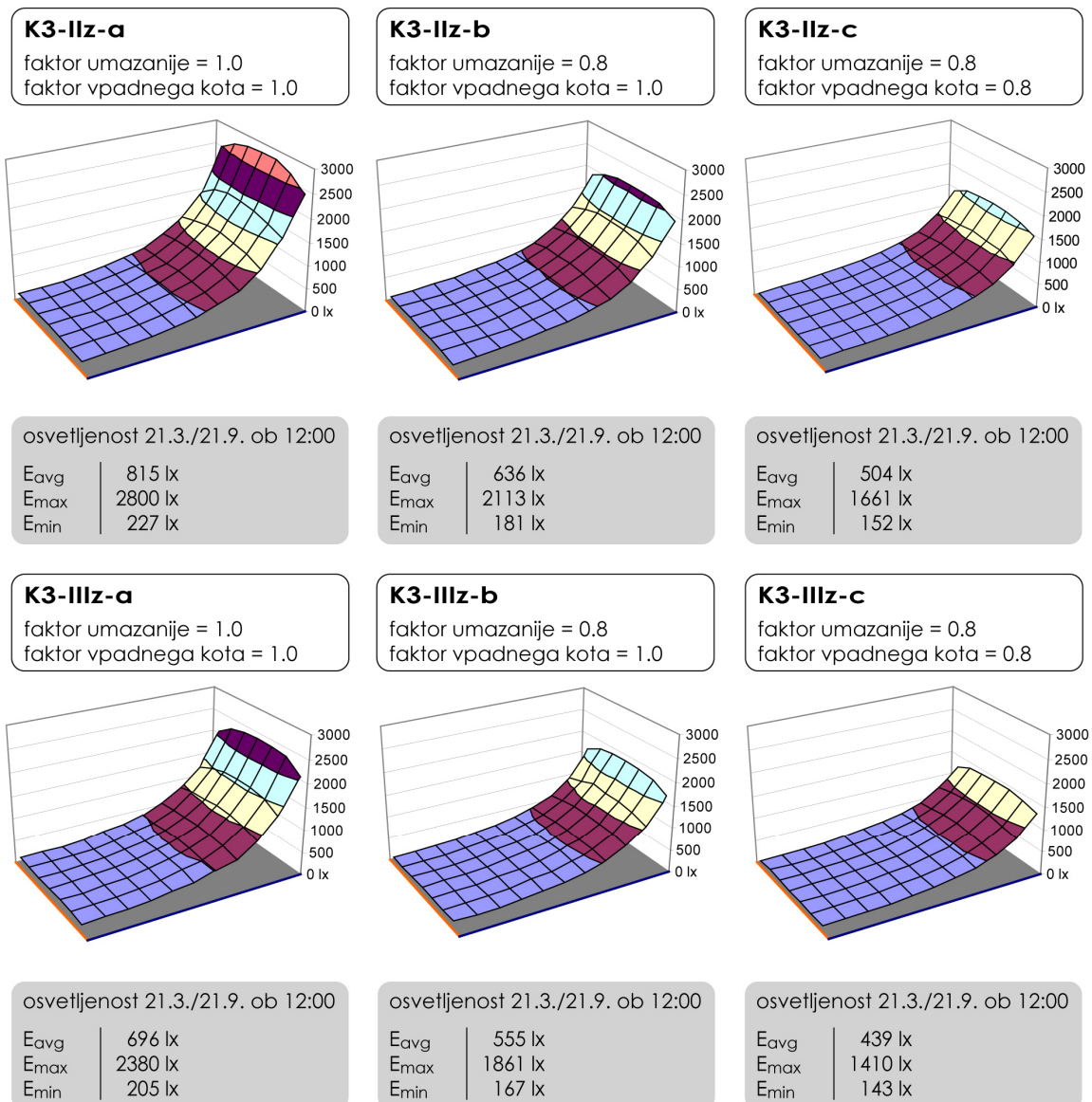
Table 7.4: Buildings thermal characteristics; example K2-IIIz

KARAKTERISTIKE STAVBE	
V_e - ogrevana prostornina stavbe (m^3)	60.00
A_u - neto uporabna površina stavbe (m^2)	24.00
f_o - oblikovni faktor (m^{-1})	1.04
n - število izmenjav zraka	1/h
KARAKTERISTIKE TRANSPARENTNIH ELEMENTOV	
A - površina zasteklitve (m^2)	4.80
Orientacija zasteklitve	J
U (W/m^2K)	0.74
g	0.50
τ_v	0.66
TOPLOTNE KARAKTERISTIKE STAVBE	
Q_s - izkoriščeni solarni pritoki (kWh)	441.60
Q_i - izkoriščeni notranji pritoki (kWh)	752.93
Q_t - transmissijske izgube (kWh)	1261.01
Q_v - prezračevalne izgube (kWh)	1720.44
Q_n - letna poraba toplote za ogrevanje (kWh)	1541.20
Q_n/A_u - specifična letna poraba toplote za ogrevanje (kWh/m^2a)	64.22



Slika 7.5: Geometrijske značilnosti objekta.

Fig. 7.5: Buildings geometric characteristics.



Slika 7.6: Diagrami osvetljenosti za konfiguracijo 3.

Fig. 7.6: Diagrams of illumination for the configuration 3.

Preglednica 7.5: Izkaz toplotnih karakteristik stavbe; primer K3-IIz.

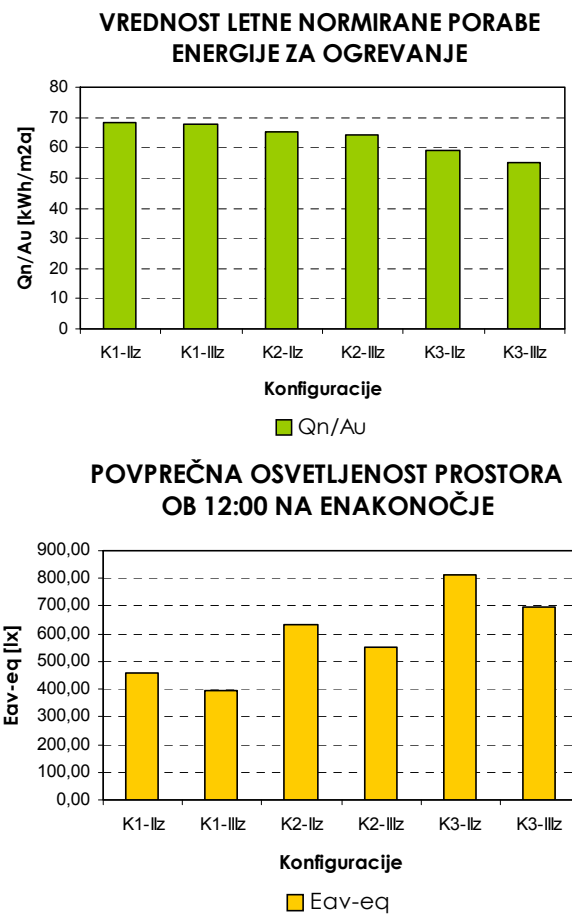
Table 7.5: Buildings thermal characteristics; example K3-IIz

KARAKTERISTIKE STAVBE	
V_e - ogrevana prostornina stavbe (m^3)	60.00
A_u - neto uporabna površina stavbe (m^2)	24.00
f_o - oblikovni faktor (m^{-1})	1.04
n - število izmenjav zraka	1/h
KARAKTERISTIKE TRANSPARENTNIH ELEMENTOV	
A - površina zasteklitve (m^2)	10.00
Orientacija zasteklitve	J
U (W/m^2K)	1.12
g	0.61
τ_v	0.76
TOPLOTNE KARAKTERISTIKE STAVBE	
Q_s - izkoriščeni solarni pritoki (kWh)	748.27
Q_i - izkoriščeni notranji pritoki (kWh)	752.93
Q_t - transmisijske izgube (kWh)	1837.92
Q_v - prezračevalne izgube (kWh)	1720.44
Q_n - letna poraba toplote za ogrevanje (kWh)	1423.80
Q_n/A_u - specifična letna poraba toplote za ogrevanje (kWh/m^2a)	59.33

Preglednica 7.6: Izkaz toplotnih karakteristik stavbe; primer K3-IIIz.

Table 7.6: Buildings thermal characteristics; example K3-IIIz

KARAKTERISTIKE STAVBE	
V_e - ogrevana prostornina stavbe (m^3)	60.00
A_u - neto uporabna površina stavbe (m^2)	24.00
f_o - oblikovni faktor (m^{-1})	1.04
n - število izmenjav zraka	1/h
KARAKTERISTIKE TRANSPARENTNIH ELEMENTOV	
A - površina zasteklitve (m^2)	10.00
Orientacija zasteklitve	J
U (W/m^2K)	0.74
g	0.50
τ_v	0.66
TOPLOTNE KARAKTERISTIKE STAVBE	
Q_s - izkoriščeni solarni pritoki (kWh)	613.33
Q_i - izkoriščeni notranji pritoki (kWh)	752.93
Q_t - transmisijske izgube (kWh)	1518.72
Q_v - prezračevalne izgube (kWh)	1720.44
Q_n - letna poraba toplote za ogrevanje (kWh)	1324.60
Q_n/A_u - specifična letna poraba toplote za ogrevanje (kWh/m^2a)	55.19



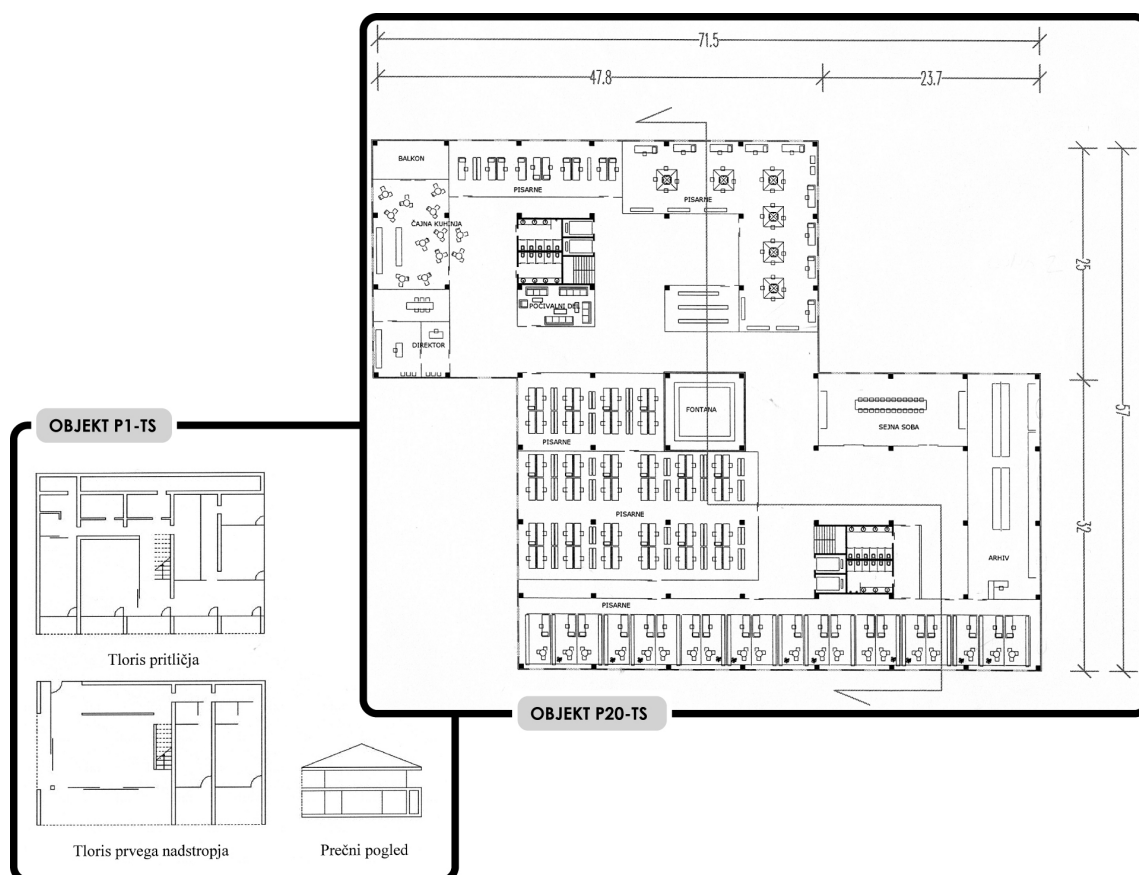
Slika 7.7: Primerjava zmanjšanja specifične letne porabe toplote za ogrevanje (Q_n/A_u) ter povprečne osvetljenosti (E_{av-eq}). Rezultati veljajo za čista stekla brez upoštevanja korekcijskega faktorja za vpadni kot.

Fig. 7.7: Comparison of yearly reduction in specific heating energy demand (Q_n/A_u) and in average illumination levels (E_{av-eq}). Presented results are valid for clear glass without the incidence angle correction factor.

PRILOGA B

Analiza vpliva spreminjanja karakteristik zasteklitve na notranje okolje 27-tih naključno izbranih objektov

Pričujoča analiza je bila izvedena z namenom določitve vpliva zamenjave tipa zasteklitve (spreminjanje U-faktorja ter posledično prepustnosti za dnevno svetlobo) na nivo notranje osvetljenosti prostorov in porabo energije za ogrevanje celotne stavbe. Ker je bil cilj raziskave določiti razmerje med zmanjšanjem nivoja osvetljenosti (negativna posledica znižanja U-faktorja zasteklitve) in zmanjšanjem porabe energije za ogrevanje (pozitivna posledica znižanja U-faktorja zasteklitve), je bil namen kvantificirati razmerje med pozitivnimi in negativnimi vplivi znižanja U-faktorja zasteklitve. Stavbe vključene v analizo so bile izbrane iz zelo širokega spektra različnih oblik namembnosti in velikosti (Slika 8.8), s čimer je bilo



Slika 7.8: Primera dveh objektov vključenih v primejalno analizo.

Fig. 7.8: Examples of two buildings incorporated into the comparative analysis.

zagotovljeno, da bodo končni rezultati predstavljali trenutno realno stanje arhitekturne prakse. Analiza je bila delno izvedena v okviru seminarskega dela študentov pri predmetoma Zgradba, Okolje, Energija (UL FGG UNI - Konstrukcijska smer, 4. letnik) ter Bioklimatske zgradbe (UL FGG VSS - Konstrukcijska smer, 3. letnik).

V končno primerjalno analizo je bilo vključenih 27 objektov, pri katerih so bili faktorji oblike stavbe (f_o) v razponu med 0.1 in 1.0. Izvedeni izračuni osvetljenosti in porabe energije so bili opravljeni pri nespremenjenih geometrijskih karakteristikah objektov za dva različna tipa zasteklitve. Kvantifikacija interakcijskih vplivov med porabo energije in osvetljenosti notranjih prostorov je bila izvedena ob zamenjavi dvojne zasteklitve ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.65$, $\tau_v = 0.70$) s trojno zasteklitvijo ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.50$, $\tau_v = 0.50$) ter kaže na neugoden vpliv takšnega ukrepa na notranjo osvetljenost prostorov ob hkratnih, večinoma zanemarljivih, prihrankih pri energiji za ogrevanje.

Preglednica 7.7: Sprememba nivoja osvetljenosti izbranega prostora pri zamenjavi tipa zasteklitve v času zimskega solsticija (21.12.) ob 12.00.

Table 7.7: Change in the levels of illumination of the chosen space when the type of the glazing has varied - winter solstice (21.12.) at 12:00.

PRIMER	a:b	$E_{avg, w}$ (lx) (U = 1.40 W/m ² K)	$E_{avg, w}$ (lx) (U = 0.60 W/m ² K)	$\Delta E_{avg, w}$ (lx)	$\Delta E_{avg, w}$ (%)
OKNA NA 1 STRANI a:b < 1:2					
P14-S	0.48	245	175	70	28.6
P28-S	0.24	306	218	88	28.8
P24-S	0.41	280	198	82	29.3
OKNA NA 2 STRANEH a:b < 1:2					
P32-S	0.4	192	139	53	27.6
OKNA NA 3 STRANEH a:b < 1:2					
P33-S	1.03	684	490	194	28.4
P34-S	0.49	328	270	58	17.7
POVPREČJE		339.2	248.3	90.8	26.7
OKNA NA 1 STRANI a:b > 1:2					
P16-S	0.6	359	326	33	9.2
P12-S	1.33	294	233	61	20.7
P9-S	1.33	390	280	110	28.2
P29-S	1	322	335	/	/
P30-S	1.66	105	67	38	36.2
P23-S	1	108	88	20	18.5
P10-S	0.77	319	226	93	29.2
P31-S	1	62	49	13	21.0
OKNA NA 2 STRANEH a:b > 1:2					
P26-S	0.82	236	149	87	36.9
P6-S	1.12	37	27	10	27.0
P22-S	0.57	239	169	70	29.3
P17-S	0.65	433	306	127	29.3
P3-S	0.99	376	273	103	27.4
P4-S	1.02	213	150	63	29.6
P20-S	0.69	258	244	14	5.4
P18-S	0.85	278	201	77	27.7
OKNA NA 3 STRANEH a:b > 1:2					
P27-S	1.16	431	301	130	30.2
P35-S	0.67	309	223	86	27.8
P1-S	0.89	361	306	55	15.2
P21-S	1.2	1108	778	330	29.8
P19-S	0.93	422	301	121	28.7
POVPREČJE		317.1	239.6	82.1	25.4

Preglednica 7.8: Sprememba nivoja osvetljenosti izbranega prostora pri zamenjavi tipa zasteklitve v času ekvinokcija (21.3. in 21.9.) ob 12.00.

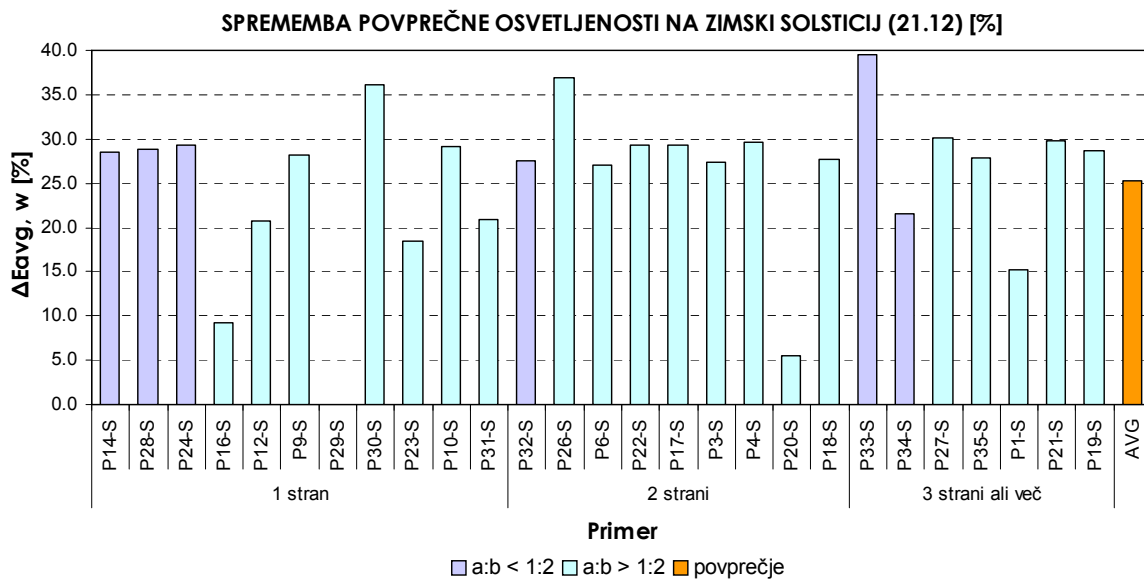
Table 7.8: Change in the levels of illumination of the chosen space when the type of the glazing has varied – equinox (21.3. and 21.9.) at 12:00.

PRIMER	a:b	$E_{\text{avg, eq}} \text{ (lx)}$ ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$)	$E_{\text{avg, eq}} \text{ (lx)}$ ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$)	$\Delta E_{\text{avg, eq}} \text{ (lx)}$	$\Delta E_{\text{avg, eq}} \text{ (\%)}$
OKNA NA 1 STRANI a:b < 1:2					
P14-S	0.48	471	338	133	28.2
P28-S	0.24	590	420	170	28.8
P24-S	0.41	541	383	158	29.2
OKNA NA 2 STRANEH a:b < 1:2					
P32-S	0.4	371	268	103	27.8
OKNA NA 3 STRANEH a:b < 1:2					
P33-S	1.03	1316	943	373	28.3
P34-S	0.49	631	520	111	17.6
POVPREČJE		606.8	450.5	156.3	25.8
OKNA NA 1 STRANI a:b > 1:2					
P16-S	0.6	691	627	64	9.3
P12-S	1.33	566	449	117	20.7
P9-S	1.33	752	539	213	28.3
P29-S	1	620	507	113	18.2
P30-S	1.66	201	130	71	35.3
P23-S	1	209	169	40	19.1
P10-S	0.77	613	436	177	28.9
P31-S	1	120	95	25	20.8
OKNA NA 2 STRANEH a:b > 1:2					
P26-S	0.82	455	288	167	36.7
In P6-S	1.12	56	42	14	25.0
P22-S	0.57	463	328	135	29.2
P17-S	0.65	837	593	244	29.2
P3-S	0.99	725	525	200	27.6
P4-S	1.02	411	288	123	29.9
P20-S	0.69	496	470	26	5.2
P18-S	0.85	535	387	148	27.7
OKNA NA 3 STRANEH a:b > 1:2					
P27-S	1.16	808	564	244	30.2
P35-S	0.67	529	381	148	28.0
P1-S	0.89	694	589	105	15.1
P21-S	1.2	2133	1497	636	29.8
P19-S	0.93	812	579	233	28.7
POVPREČJE		606.0	451.6	154.4	24.9

Preglednica 7.9: Sprememba nivoja osvetljenosti izbranega prostora pri zamenjavi tipa zasteklitve v času poletnega solsticija (21.6.) ob 12.00.

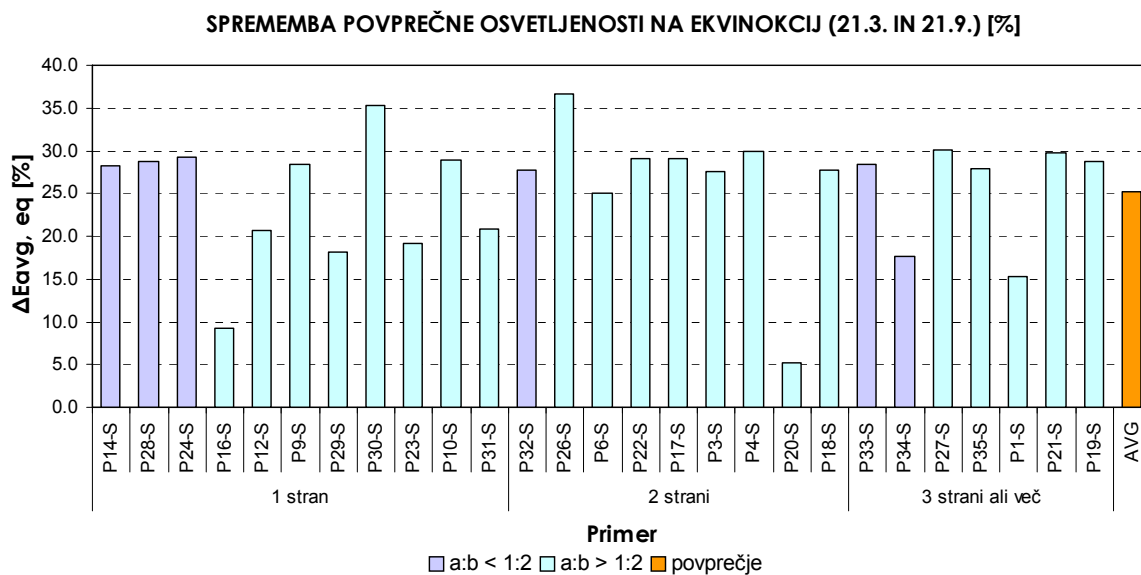
Table 7.9: Change in the levels of illumination of the chosen space when the type of the glazing has varied - summer solstice (21.6.) at 12:00.

PRIMER	a:b	$E_{avg,s}$ (lx) (U = 1.40 W/m ² K)	$E_{avg,s}$ (lx) (U = 0.60 W/m ² K)	$\Delta E_{avg,s}$ (lx)	$\Delta E_{avg,s}$ (%)
OKNA NA 1 STRANI a:b < 1:2					
P14-S	0.48	629	450	179	28.5
P28-S	0.24	786	560	226	28.8
P24-S	0.41	723	512	211	29.2
OKNA NA 2 STRANEH a:b < 1:2					
P32-S	0.4	494	358	136	27.5
OKNA NA 3 STRANEH a:b < 1:2					
P33-S	1.03	1755	1257	498	28.4
P34-S	0.49	841	693	148	17.6
POVPREČJE		809.1	600.9	208.2	25.8
OKNA NA 1 STRANI a:b > 1:2					
P16-S	0.6	921	836	85	9.2
P12-S	1.33	755	598	157	20.8
P9-S	1.33	1002	719	283	28.2
P29-S	1	827	600	227	27.4
P30-S	1.66	268	173	95	35.4
P23-S	1	278	226	52	18.7
P10-S	0.77	817	581	236	28.9
P31-S	1	160	127	33	20.6
OKNA NA 2 STRANEH a:b > 1:2					
P26-S	0.82	606	384	222	36.6
In P6-S	1.12	67	49	18	26.9
P22-S	0.57	618	438	180	29.1
P17-S	0.65	1119	792	327	29.2
P3-S	0.99	966	700	266	27.5
P4-S	1.02	360	384	/	/
P20-S	0.69	661	627	34	5.1
P18-S	0.85	714	515	199	27.9
OKNA NA 3 STRANEH a:b > 1:2					
P27-S	1.16	1066	743	323	30.3
P35-S	0.67	672	484	188	28.0
P1-S	0.89	926	785	141	15.2
P21-S	1.2	2844	1996	848	29.8
P19-S	0.93	1082	772	310	28.7
POVPREČJE		796.6	596.6	211.2	25.2



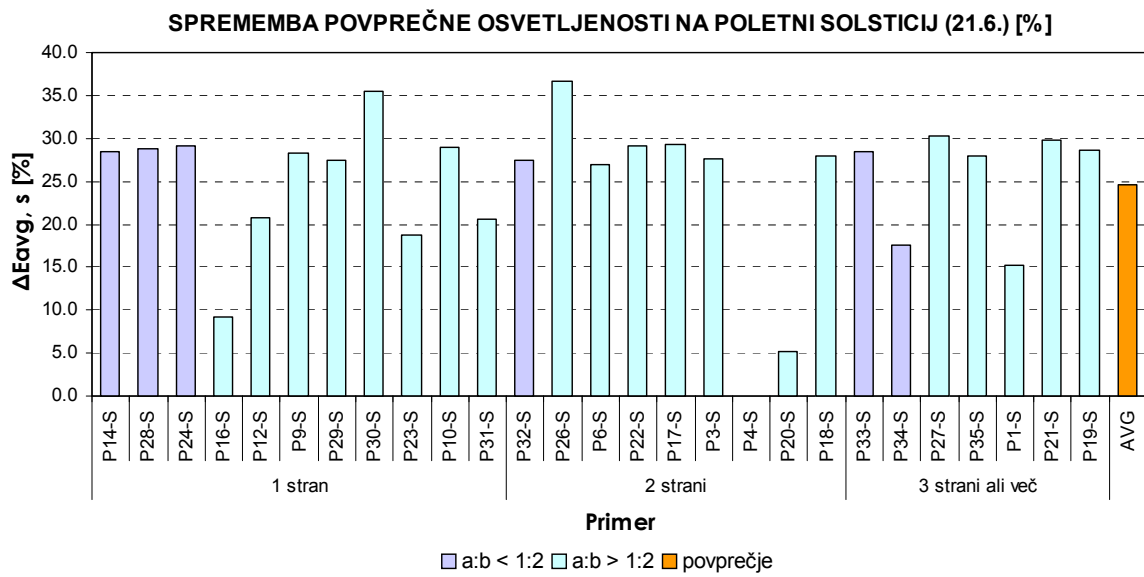
Slika 7.9: Znižanje nivoja notranje osvetljenosti v času zimskega solsticija ob 12.00.

Fig. 7.9: Reduction of internal illumination levels on winter solstice at 12:00.



Slika 7.10: Znižanje nivoja notranje osvetljenosti v času jesenskega in spomladanskega ekvinokcija ob 12.00.

Fig. 7.10: Reduction of internal illumination levels on equinox at 12:00.



Slika 7.11: Znižanje nivoja notranje osvetljenosti v času poletnega solsticija ob 12.00.

Fig. 7.11: Reduction of internal illumination levels on summer solstice at 12:00.

Preglednica 7.10: Sprememba letnih transmisijskih (Q_t) toplotnih izgub objekta ob zamenjavi tipa zasteklitve.

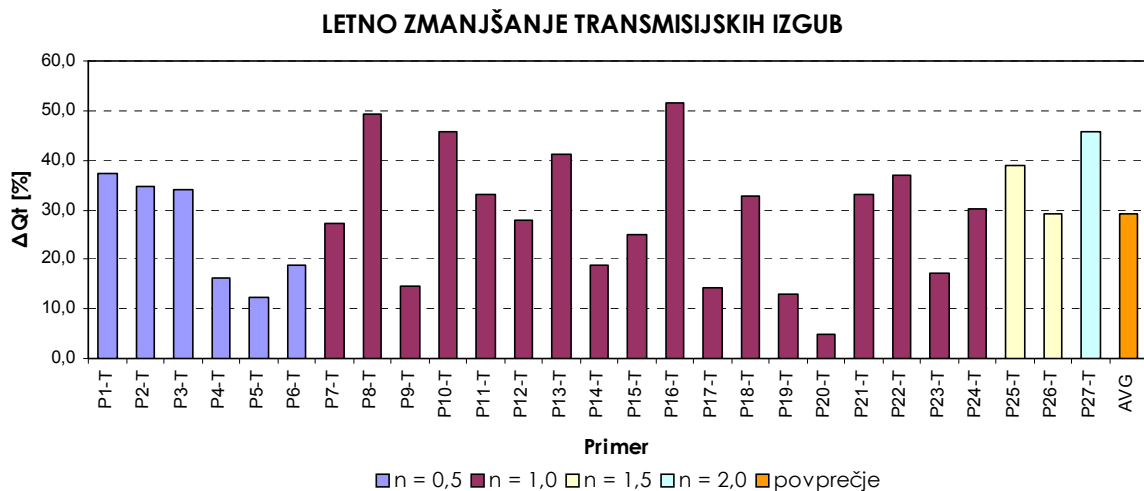
Table 7.10: Change in the yearly transmission (Q_t) losses of a building when the type of the glazing has varied.

PRIMER	f_0	Q_t (kWh/a) ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$)	Q_t (kWh/a) ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$)	ΔQ_t (kWh/a)	ΔQ_t (%)
n = 0.5/h					
P1-T	0.61	30877.9	19410.9	11467.0	37.1
P2-T	0.29	94529.0	61635.0	32894.0	34.8
P3-T	0.67	19876.8	13119.2	6757.6	34.0
P4-T	0.45	32637.0	27395.4	5241.6	16.1
P5-T	0.47	58128.0	50923.0	7205.0	12.4
P6-T	0.33	10759.7	8730.3	2029.4	18.9
POVPREČJE		339.2	248.3	90.8	26.7
n = 1.0/h					
P7-T	0.41	101990.0	74200.0	27790.0	27.2
P8-T	0.59	32100.0	16320.0	15780.0	49.2
P9-T	0.27	148150.0	126410.0	21740.0	14.7
P10-T	0.16	449320.0	243880.0	205440.0	45.7
P11-T	0.53	250451.8	167419.4	83032.4	33.2
P12-T	0.192	135144.0	97512.0	37632.0	27.8
P13-T	0.23	75294.0	44181.0	31113.0	41.3
P14-T	0.38	138639.8	112734.0	25905.8	18.7
P15-T	0.58	67420.0	50540.0	16880.0	25.0
P16-T	0.21	349439.8	168900.3	180539.5	51.7
P17-T	1	10376.7	8882.8	1493.9	14.4
P18-T	0.53	31301.7	21046.2	10255.5	32.8
P19-T	0.4	63389.0	55063.0	8326.0	13.1
P20-T	0.18	207517.0	197578.0	9939.0	4.8
P21-T	0.41	57452.5	38500.1	18952.4	33.0
P22-T	0.156	239326.0	150622.0	88704.0	37.1
P23-T	0.67	12333.9	10226.5	2107.4	17.1
P24-T	0.38	93168.4	65213.2	27955.2	30.0
POVPREČJE		136823.0	91623.8	45199.2	28.7
n = 1.5/h					
P25-T	0.19	102250.0	62542.0	39708.0	38.8
P26-T	0.41	34501.4	24438.2	10063.2	29.2
POVPREČJE		68375.7	43490.1	24885.6	34.0
n = 2.0/h					
P27-T	0.29	51517.6	27891.8	23625.8	45.9
POVPREČJE		51517.6	27891.8	23625.8	45.9

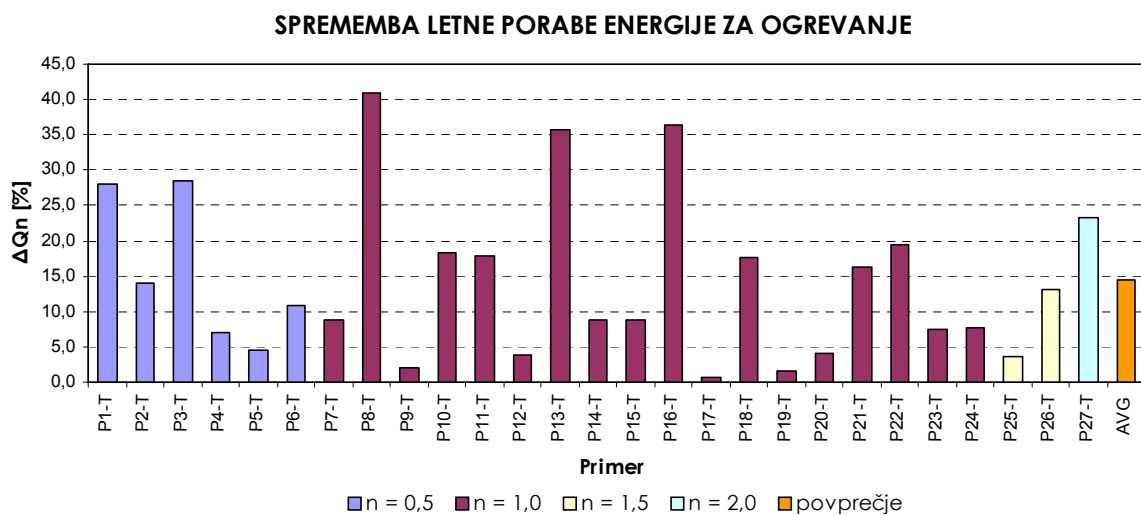
Preglednica 7.11: Sprememba celotne letne porabe energije za ogrevanje (Q_n) objekta ob zamenjavi tipa zasteklitve.

Table 7.11: Change in the yearly total heating demand (Q_n) of a building when the type of the glazing has varied.

PRIMER	f_0	Q_n (kWh/a) ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$)	Q_n (kWh/a) ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$)	ΔQ_n (kWh/a)	$\Delta Q_n(\%)$
n = 0.5/h					
P1-T	0.61	26420.1	19012.6	7407.5	28.0
P2-T	0.29	132238.0	113635.0	18603.0	14.1
P3-T	0.67	19878.8	14223.6	5655.2	28.4
P4-T	0.45	47471.9	44151.7	3320.2	7.0
P5-T	0.47	99059.0	94622.0	4437.0	4.5
P6-T	0.33	10400.3	9265.9	1134.4	10.9
POVPREČJE		55911.3	49151.8	6759.6	15.5
n = 1.0/h					
P7-T	0.41	240840.0	219820.0	21020.0	8.7
P8-T	0.59	30900.0	18230.0	12670.0	41.0
P9-T	0.27	720640.0	706520.0	14120.0	2.0
P10-T	0.16	682440.0	557210.0	125230.0	18.4
P11-T	0.53	287691.5	236363.6	51327.9	17.8
P12-T	0.192	739755.0	711303.0	28452.0	3.8
P13-T	0.23	73319.0	47150.0	26169.0	35.7
P14-T	0.38	178290.8	162598.9	15691.9	8.8
P15-T	0.58	137450.0	125250.0	12200.0	8.9
P16-T	0.21	445451.2	282960.6	162490.6	36.5
P17-T	1	6767.8	6717.1	50.7	0.7
P18-T	0.53	31745.5	26117.3	5628.2	17.7
P19-T	0.4	236888.0	233218.0	3670.0	1.5
P20-T	0.18	826135.2	792892.8	33242.4	4.0
P21-T	0.41	74376.6	62191.4	12185.2	16.4
P22-T	0.156	290325.0	233925.4	56399.6	19.4
P23-T	0.67	17112.8	15816.6	1296.2	7.6
P24-T	0.38	317975.2	293518.6	24456.6	7.7
POVPREČJE		296561.3	262878.0	33683.3	14.3
n = 1.5/h					
P25-T	0.19	390589.0	376358.0	14231.0	3.6
P26-T	0.41	49858.8	43295.0	6563.8	13.2
POVPREČJE		220223.9	209826.5	10397.4	8.4
n = 2.0/h					
P27-T	0.29	145247.9	111302.9	33945.0	23.4
POVPREČJE		145247.9	111302.9	33945.0	23.4



Slika 7.12: Prikaz zmanjšanja transmisijskih izgub analiziranih objektov ob zamenjavi dvojne zasteklitve ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$) s trojno ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$) zasteklitvijo.
 Fig. 7.12: Reduction of transmission losses of a building when double ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$) glazing is switched for triple ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$).



Slika 7.13: Zmanjšanja celotne letne potrebe po ogrevalni energiji analiziranih objektov ob zamenjavi dvojne zasteklitve ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$) s trojno ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$) zasteklitvijo.

Fig. 7.13: Reduction of total yearly heating energy demand of analyzed buildings when double ($U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$) glazing is switched for triple ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$).

PRILOGA C

Analizirani eksperimenti sistema KAMRA

ANALIZIRANI EKSPERIMENTI IZVEDENI S SISTEMOM KAMRA (toplotna regulacija, skupno število eksperimentov: 129):

1.mesec

- EX-TEMP-001 (trajanje 4 dni; 23.2. do 25.2.)
- EX-TEMP-002 (trajanje 3 dni; 28.2. do 1.3.)

2.mesec

- EX-TEMP-003 (trajanje 3 dni; 1.3. do 3.3.)
- EX-TEMP-004 (trajanje 7 dni; 13.3. do 19.3.)
- EX-TEMP-005 (trajanje 7 dni; 20.3. do 26.3.)
- EX-TEMP-006 (trajanje 5 dni; 27.3. do 31.3.)

3.mesec

- EX-TEMP-007 (trajanje 1 dan; 3.4.)
- EX-TEMP-008 (trajanje 1 dan; 10.4.)
- EX-TEMP-009 (trajanje 4 dni; 13.4. do 16.4.)
- EX-TEMP-010 (trajanje 1 dan; 17.4.)
- EX-TEMP-011 (trajanje 5 dni; 25.4. do 30.4.)

4.mesec

- EX-TEMP-012 (trajanje 5 dni; 3.5. do 7.5.)
- EX-TEMP-013 (trajanje 7 dni; 8.5. do 14.5.)
- EX-TEMP-014 (trajanje 6 dni; 15.5. do 21.5.)
- EX-TEMP-015 (trajanje 7 dni; 22.5. do 28.5.)
- EX-TEMP-016 (trajanje 7 dni; 29.5. do 4.6.)

5.mesec

- EX-TEMP-017 (trajanje 7 dni; 5.6. do 11.6.)
- EX-TEMP-018 (trajanje 7 dni; 12.6. do 18.6.)
- EX-TEMP-019 (trajanje 1 dan; 24.6. do 26.6.)
- EX-TEMP-020 (trajanje 2 dneva; 27.6. do 28.6.)
- EX-TEMP-021 (trajanje 5 dni; 28.6. do 2.7.)

6.mesec

- EX-TEMP-022 (trajanje 1 dan; 3.7.)
 - EX-TEMP-023 (trajanje 6 dni; 4.7. do 9.7.)
 - EX-TEMP-024 (trajanje 7 dni; 10.7. do 16.7.)
 - EX-TEMP-025 (trajanje 3 dni; 24.7. do 26.7.)
 - EX-TEMP-026 (trajanje 5 dni; 26.7. do 30.7.)
-

7.mesec

- EX-TEMP-027 (trajanje 7 dni; 7.8. do 13.8.)
- EX-TEMP-028 (trajanje 5 dni; 16.8. do 20.8.)
- EX-TEMP-029 (trajanje 7 dni; 21.8. do 27.8.)
- EX-TEMP-030 (trajanje 7 dni; 28.8. do 3.9.)

8.mesec

- EX-TEMP-031 (trajanje 7 dni; 4.9. do 10.9.)
- EX-TEMP-032 (trajanje 7 dni; 11.9. do 17.9.)
- EX-TEMP-033 (trajanje 7 dni; 18.9. do 24.9.)
- EX-TEMP-034 (trajanje 7 dni; 25.9. do 1.10.)

9.mesec

- EX-TEMP-035 (trajanje 6 dni; 3.10. do 8.10.)
- EX-TEMP-036 (trajanje 7 dni; 9.10 do 15.10.)
- EX-TEMP-037 (trajanje 7 dni; 16.10. do 22.10.)

10.mesec

- EX-TEMP-038 (trajanje 7 dni; 13.11. do 19.11.)
- EX-TEMP-039 (trajanje 7 dni; 20.11. do 26. 11.)
- EX-TEMP-040 (trajanje 7 dni; 27.11. do 3.12.)

11.mesec

- EX-TEMP-041 (trajanje 7 dni; 4.12. do 10.12.)
- EX-TEMP-042 (trajanje 5 dni; 13.12. do 17.12.)
- EX-TEMP-043 (trajanje 7 dni; 18.12. do 24.12.)

12.mesec

- EX-TEMP-044 (trajanje 3 dni; 5.1. do 7.1.)
- EX-TEMP-045 (trajanje 7 dni; 8.1. do 14.1.)
- EX-TEMP-046 (trajanje 7 dni; 15.1. do 21.1.)
- EX-TEMP-047 (trajanje 7 dni; 22.1. do 28.1.)
- EX-TEMP-048 (trajanje 7 dni; 29.1. do 4.2.)

13.mesec

- EX-TEMP-049 (trajanje 7 dni; 12.2. do 18.2.)
- EX-TEMP-050 (trajanje 7 dni; 19.2. do 25.2.)
- EX-TEMP-051 (trajanje 7 dni; 26.2. do 4.3.)

14.mesec

- EX-TEMP-052 (trajanje 6 dni; 6.3. do 11.3.)

15.mesec

- EX-TEMP-053 (trajanje 5 dni; 9.4. do 13.4.)
 - EX-TEMP-054 (trajanje 2 dneva; 23.4. do 24.4.)
 - EX-TEMP-055 (trajanje 2 dneva; 25.4. do 26.4.)
 - EX-TEMP-056 (trajanje 8 dni; 30.4. do 7.5.)
-

16.mesec

- EX-TEMP-057 (trajanje 3 dni; 7.5. do 9.5.)
- EX-TEMP-058 (trajanje 1 dan; 10.5.)
- EX-TEMP-059 (trajanje 1 dan; 11.5.)
- EX-TEMP-060 (trajanje 2 dneva; 15.5. do 16.5.)
- EX-TEMP-061 (trajanje 2 dneva; 16.5. do 17.5.)
- EX-TEMP-062 (trajanje 1 dan; 18.5.)
- EX-TEMP-063 (trajanje 2 dneva; 21.5. do 22.5.)
- EX-TEMP-064 (trajanje 2 dneva; 22.5. do 23.5.)
- EX-TEMP-065 (trajanje 1 dan; 24.5.)
- EX-TEMP-066 (trajanje 13 dni; 25.5. do 6.6.)

17.mesec

- EX-TEMP-067 (trajanje 1 dan; 7.6.)
- EX-TEMP-068 (trajanje 1 dan; 8.6.)
- EX-TEMP-069 (trajanje 2 dneva; 12.6. do 13.6.)
- EX-TEMP-070 (trajanje 1 dan; 14.6.)
- EX-TEMP-071 (trajanje 2 dneva; 20.6. do 21.6.)
- EX-TEMP-072 (trajanje 2 dneva; 26.6. do 27.6.)
- EX-TEMP-073 (trajanje 1 dan; 28.6.)
- EX-TEMP-074 (trajanje 1 dan; 29.6.)

18.mesec

- EX-TEMP-075 (trajanje 2 dneva; 2.7. do 3.7.)
- EX-TEMP-076 (trajanje 1 dan; 4.7.)
- EX-TEMP-077 (trajanje 1 dan; 5.7.)
- EX-TEMP-078 (trajanje 1 dan; 6.7.)
- EX-TEMP-079 (trajanje 4 dni; 7.7. do 10.7.)
- EX-TEMP-080 (trajanje 1 dan; 11.7.)
- EX-TEMP-081 (trajanje 2 dneva; 12.7. do 13.7.)
- EX-TEMP-082 (trajanje 5 dni; 14.7. do 17.7.)

19.mesec

- EX-TEMP-083 (trajanje 3 dni; 20.8. do 22.8.)
- EX-TEMP-084 (trajanje 5 dni; 27.8. do 31.8.)

20.mesec

- EX-TEMP-085 (trajanje 1 dan; 10.9.)
- EX-TEMP-086 (trajanje 4 dni; 11.9. do 14.9.)
- EX-TEMP-087 (trajanje 3 dni; 17.9. do 19.9.)
- EX-TEMP-088 (trajanje 5 dni; 24.9. do 28.9.)

21.mesec

- EX-TEMP-089 (trajanje 6 dni; 1.10. do 5.10.)
 - EX-TEMP-090 (trajanje 2 dneva; 8.10. do 9.10.)
 - EX-TEMP-091 (trajanje 3 dni; 10.10. do 12.10.)
 - EX-TEMP-092 (trajanje 2 dneva; 15.10. do 16.10.)
-

EX-TEMP-093 (trajanje 2 dneva; 17.10. do 18.10.)
EX-TEMP-094 (trajanje 5 dni; 22.10. do 26.10.)
EX-TEMP-095 (trajanje 2 dneva; 29.10. do 30. 10.)

22.mesec

EX-TEMP-096 (trajanje 2 dneva; 5.11. do 6.11.)
EX-TEMP-097 (trajanje 3 dni; 7.11. do 9.11.)
EX-TEMP-098 (trajanje 1 dan; 12.11.)
EX-TEMP-099 (trajanje 4 dni; 13.11. do 16.11.)
EX-TEMP-100 (trajanje 5 dni; 19.11. do 23.11.)
EX-TEMP-101 (trajanje 3 dni; 24.11. do 26.11.)
EX-TEMP-102 (trajanje 4 dni; 27.11. do 30.11.)

23.mesec

EX-TEMP-103 (trajanje 5 dni; 3.12. do 7.12.)
EX-TEMP-104 (trajanje 2 dneva; 8.12. do 9.12.)
EX-TEMP-105 (trajanje 5 dni; 10.12. do 14.12.)
EX-TEMP-106 (trajanje 2 dneva; 15.12. do 16.12.)
EX-TEMP-107 (trajanje 5 dni; 17.12. do 21.12.)
EX-TEMP-108 (trajanje 2 dneva; 22.12. do 23.12.)
EX-TEMP-109 (trajanje 5 dni; 24.12. do 28.12.)
EX-TEMP-110 (trajanje 2 dneva; 29.12. do 30.12.)
EX-TEMP-111 (trajanje 5 dni; 31.12. do 4.1.)

24.mesec

EX-TEMP-112 (trajanje 2 dneva; 5.1. do 6.1.)
EX-TEMP-113 (trajanje 5 dni; 7.1. do 11.1.)
EX-TEMP-114 (trajanje 2 dneva; 12.1. do 13.1.)
EX-TEMP-115 (trajanje 5 dni; 14.1. do 18.1.)
EX-TEMP-116 (trajanje 2 dneva; 19.1. do 20.1.)
EX-TEMP-117 (trajanje 5 dni; 21.1. do 25.1.)
EX-TEMP-118 (trajanje 2 dneva; 26.1. do 27.1.)

25.mesec

EX-TEMP-119 (trajanje 4 dni; 1.3. do 4.3.)
EX-TEMP-120 (trajanje 1 dan; 5.3.)
EX-TEMP-121 (trajanje 7 dni; 6.3. do 12.3.)
EX-TEMP-122 (trajanje 7 dni; 14.3. do 20.3.)
EX-TEMP-123 (trajanje 6 dni; 21.3. do 26.3.)
EX-TEMP-124 (trajanje 3 dni; 27.3. do 29.3.)
EX-TEMP-125 (trajanje 1 dan; 31.3.)

26.mesec

EX-TEMP-126 (trajanje 7 dni; 2.4. do 8.4.)
EX-TEMP-127 (trajanje 7 dni; 9.4. do 15.4.)
EX-TEMP-128 (trajanje 12 dni; 18.4. do 29.4.)
EX-TEMP-129 (trajanje 1 dan; 30.4.)

ANALIZIRANI EKSPERIMENTI IZVEDENI S SISTEMOM KAMRA (svetlobna regulacija, skupno število eksperimentov: 151):

1.mesec

EX-SVET-001 (trajanje 4 dni; 23.2. do 25.2.)

EX-SVET-002 (trajanje 3 dni; 28.2. do 1.3.)

2.mesec

EX-SVET-003 (trajanje 3 dni; 1.3. do 3.3.)

EX-SVET-004 (trajanje 7 dni; 13.3. do 19.3.)

EX-SVET-005 (trajanje 7 dni; 20.3. do 26.3.)

EX-SVET-006 (trajanje 5 dni; 27.3. do 31.3.)

3.mesec

EX-SVET-007 (trajanje 1 dan; 3.4.)

EX-SVET-008 (trajanje 1 dan; 10.4.)

EX-SVET-009 (trajanje 4 dni; 13.4. do 16.4.)

EX-SVET-010 (trajanje 1 dan; 17.4.)

EX-SVET-011 (trajanje 5 dni; 25.4. do 30.4.)

4.mesec

EX-SVET-012 (trajanje 5 dni; 3.5. do 7.5.)

EX-SVET-013 (trajanje 7 dni; 8.5. do 14.5.)

EX-SVET-014 (trajanje 6 dni; 15.5. do 21.5.)

EX-SVET-015 (trajanje 7 dni; 22.5. do 28.5.)

EX-SVET-016 (trajanje 7 dni; 29.5. do 4.6.)

5.mesec

EX-SVET-017 (trajanje 7 dni; 5.6. do 11.6.)

EX-SVET-018 (trajanje 7 dni; 12.6. do 18.6.)

EX-SVET-019 (trajanje 1 dan; 24.6. do 26.6.)

EX-SVET-020 (trajanje 2 dneva; 27.6. do 28.6.)

EX-SVET-021 (trajanje 5 dni; 28.6. do 2.7.)

6.mesec

EX-SVET-022 (trajanje 1 dan; 3.7.)

EX-SVET-023 (trajanje 6 dni; 4.7. do 9.7.)

EX-SVET-024 (trajanje 7 dni; 10.7. do 16.7.)

EX-SVET-025 (trajanje 3 dni; 24.7. do 26.7.)

EX-SVET-026 (trajanje 5 dni; 26.7. do 30.7.)

7.mesec

EX-SVET-027 (trajanje 7 dni; 7.8. do 13.8.)

EX-SVET-028 (trajanje 5 dni; 16.8. do 20.8.)

EX-SVET-029 (trajanje 7 dni; 21.8. do 27.8.)

EX-SVET-030 (trajanje 7 dni; 28.8. do 3.9.)

8.mesec

EX-SVET-031 (trajanje 7 dni; 4.9. do 10.9.)
EX-SVET-032 (trajanje 7 dni; 11.9. do 17.9.)
EX-SVET-033 (trajanje 7 dni; 18.9. do 24.9.)
EX-SVET-034 (trajanje 7 dni; 25.9. do 1.10.)

9.mesec

EX-SVET-035 (trajanje 6 dni; 3.10. do 8.10.)
EX-SVET-036 (trajanje 7 dni; 9.10. do 15.10.)
EX-SVET-037 (trajanje 7 dni; 16.10. do 22.10.)

10.mesec

EX-SVET-038 (trajanje 7 dni; 13.11. do 19.11.)
EX-SVET-039 (trajanje 7 dni; 20.11. do 26. 11.)
EX-SVET-040 (trajanje 7 dni; 27.11. do 3.12.)

11.mesec

EX-SVET-041 (trajanje 7 dni; 4.12. do 10.12.)
EX-SVET-042 (trajanje 5 dni; 13.12. do 17.12.)
EX-SVET-043 (trajanje 7 dni; 18.12. do 24.12.)

12.mesec

EX-SVET-044 (trajanje 3 dni; 5.1. do 7.1.)
EX-SVET-045 (trajanje 7 dni; 8.1. do 14.1.)
EX-SVET-046 (trajanje 7 dni; 15.1. do 21.1.)
EX-SVET-047 (trajanje 7 dni; 22.1. do 28.1.)
EX-SVET-048 (trajanje 7 dni; 29.1. do 4.2.)

13.mesec

EX-SVET-049 (trajanje 7 dni; 12.2. do 18.2.)
EX-SVET-050 (trajanje 7 dni; 19.2. do 25.2.)
EX-SVET-051 (trajanje 7 dni; 26.2. do 4.3.)

14.mesec

EX-SVET-052 (trajanje 6 dni; 6.3. do 11.3.)

15.mesec

EX-SVET-053 (trajanje 5 dni; 9.4. do 13.4.)
EX-SVET-054 (trajanje 2 dneva; 23.4. do 24.4.)
EX-SVET-055 (trajanje 2 dneva; 25.4. do 26.4.)
EX-SVET-056 (trajanje 8 dni; 30.4. do 7.5.)

16.mesec

EX-SVET-057 (trajanje 3 dni; 7.5. do 9.5.)
EX-SVET-058 (trajanje 1 dan; 10.5.)
EX-SVET-059 (trajanje 1 dan; 11.5.)
EX-SVET-060 (trajanje 2 dneva; 15.5. do 16.5.)

EX-SVET-061 (trajanje 2 dneva; 16.5. do 17.5.)
EX-SVET-062 (trajanje 1 dan; 18.5.)
EX-SVET-063 (trajanje 2 dneva; 21.5. do 22.5.)
EX-SVET-064 (trajanje 2 dneva; 22.5. do 23.5.)
EX-SVET-065 (trajanje 1 dan; 24.5.)
EX-SVET-066 (trajanje 13 dni; 25.5. do 6.6.)

17.mesec

EX-SVET-067 (trajanje 1 dan; 7.6.)
EX-SVET-068 (trajanje 1 dan; 8.6.)
EX-SVET-069 (trajanje 2 dneva; 12.6. do 13.6.)
EX-SVET-070 (trajanje 1 dan; 14.6.)
EX-SVET-071 (trajanje 2 dneva; 20.6. do 21.6.)
EX-SVET-072 (trajanje 2 dneva; 26.6. do 27.6.)
EX-SVET-073 (trajanje 1 dan; 28.6.)
EX-SVET-074 (trajanje 1 dan; 29.6.)

18.mesec

EX-SVET-075 (trajanje 2 dneva; 2.7. do 3.7.)
EX-SVET-076 (trajanje 1 dan; 4.7.)
EX-SVET-077 (trajanje 1 dan; 5.7.)
EX-SVET-078 (trajanje 1 dan; 6.7.)
EX-SVET-079 (trajanje 4 dni; 7.7. do 10.7.)
EX-SVET-080 (trajanje 1 dan; 11.7.)
EX-SVET-081 (trajanje 2 dneva; 12.7. do 13.7.)
EX-SVET-082 (trajanje 5 dni; 14.7. do 17.7.)

19.mesec

EX-SVET-083 (trajanje 3 dni; 20.8. do 22.8.)
EX-SVET-084 (trajanje 5 dni; 27.8. do 31.8.)

20.mesec

EX-SVET-085 (trajanje 1 dan; 10.9.)
EX-SVET-086 (trajanje 4 dni; 11.9. do 14.9.)
EX-SVET-087 (trajanje 3 dni; 17.9. do 19.9.)
EX-SVET-088 (trajanje 5 dni; 24.9. do 28.9.)

21.mesec

EX-SVET-089 (trajanje 6 dni; 1.10. do 5.10.)
EX-SVET-090 (trajanje 2 dneva; 8.10. do 9.10.)
EX-SVET-091 (trajanje 3 dni; 10.10. do 12.10.)
EX-SVET-092 (trajanje 2 dneva; 15.10. do 16.10.)
EX-SVET-093 (trajanje 2 dneva; 17.10. do 18.10.)
EX-SVET-094 (trajanje 5 dni; 22.10. do 26.10.)
EX-SVET-095 (trajanje 2 dneva; 29.10. do 30.10.)

22.mesec

- EX-SVET-096 (trajanje 2 dneva; 5.11. do 6.11.)
- EX-SVET-097 (trajanje 3 dni; 7.11. do 9.11.)
- EX-SVET-098 (trajanje 1 dan; 12.11.)
- EX-SVET-099 (trajanje 4 dni; 13.11. do 16.11.)
- EX-SVET-100 (trajanje 5 dni; 19.11. do 23.11.)
- EX-SVET-101 (trajanje 3 dni; 24.11. do 26.11.)
- EX-SVET-102 (trajanje 4 dni; 27.11. do 30.11.)

23.mesec

- EX-SVET-103 (trajanje 5 dni; 3.12. do 7.12.)
- EX-SVET-104 (trajanje 2 dneva; 8.12. do 9.12.)
- EX-SVET-105 (trajanje 5 dni; 10.12. do 14.12.)
- EX-SVET-106 (trajanje 2 dneva; 15.12. do 16.12.)
- EX-SVET-107 (trajanje 5 dni; 17.12. do 21.12.)
- EX-SVET-108 (trajanje 2 dneva; 22.12. do 23.12.)
- EX-SVET-109 (trajanje 5 dni; 24.12. do 28.12.)
- EX-SVET-110 (trajanje 2 dneva; 29.12. do 30.12.)
- EX-SVET-111 (trajanje 5 dni; 31.12. do 4.1.)

24.mesec

- EX-SVET-112 (trajanje 2 dneva; 5.1. do 6.1.)
- EX-SVET-113 (trajanje 5 dni; 7.1. do 11.1.)
- EX-SVET-114 (trajanje 2 dneva; 12.1. do 13.1.)
- EX-SVET-115 (trajanje 5 dni; 14.1. do 18.1.)
- EX-SVET-116 (trajanje 2 dneva; 19.1. do 20.1.)
- EX-SVET-117 (trajanje 5 dni; 21.1. do 25.1.)
- EX-SVET-118 (trajanje 2 dneva; 26.1. do 27.1.)

25.mesec

- EX-SVET-119 (trajanje 4 dni; 1.3. do 4.3.)
- EX-SVET-120 (trajanje 1 dan; 5.3.)
- EX-SVET-121 (trajanje 7 dni; 6.3. do 12.3.)
- EX-SVET-122 (trajanje 7 dni; 14.3. do 20.3.)
- EX-SVET-123 (trajanje 6 dni; 21.3. do 26.3.)
- EX-SVET-124 (trajanje 3 dni; 27.3. do 29.3.)
- EX-SVET-125 (trajanje 1 dan; 31.3.)

26.mesec

- EX-SVET-126 (trajanje 7 dni; 2.4. do 8.4.)
- EX-SVET-127 (trajanje 7 dni; 9.4. do 15.4.)
- EX-SVET-128 (trajanje 12 dni; 18.4. do 29.4.)
- EX-SVET-129 (trajanje 1 dan; 30.4.)

27.mesec

- EX-SVET-130 (trajanje 7 dni; 8.5. do 14.5.)
-

28.mesec

EX-SVET-131 (trajanje 5 dni; 26.7. do 30.7.)
EX-SVET-132 (trajanje 3 dni; 31.7 do 2.8.)

29.mesec

EX-SVET-133 (trajanje 2 dneva; 3.8. do 4.8.)
EX-SVET-134 (trajanje 2 dneva; 5.8. do 6.8.)
EX-SVET-135 (trajanje 1 dan; 7.8.)
EX-SVET-136 (trajanje 1 dan; 8.8.)
EX-SVET-137 (trajanje 1 dan; 9.8.)
EX-SVET-138 (trajanje 1 dan; 10.8.)
EX-SVET-139 (trajanje 4 dni; 11.8. do 14.8.)
EX-SVET-140 (trajanje 5 dni; 15.8. do 19.8.)
EX-SVET-141 (trajanje 3 dni; 20.8. do 22.8.)
EX-SVET-142 (trajanje 5 dni; 23.8. do 27.8.)
EX-SVET-143 (trajanje 6 dni; 28.8. do 2.9.)

30.mesec

EX-SVET-144 (trajanje 2 dneva; 3.9. do 4.9.)
EX-SVET-145 (trajanje 6 dni; 6.9. do 11.9.)
EX-SVET-146 (trajanje 2 dneva; 12.9. do 13.9.)
EX-SVET-147 (trajanje 3 dni; 17.9. do 19.9.)
EX-SVET-138 (trajanje 1 dan; 20.9.)
EX-SVET-149 (trajanje 3 dni; 21.9. do 23.9.)
EX-SVET-150 (trajanje 4 dni; 26.9. do 29.9.)
EX-SVET-151 (trajanje 5 dni; 30.9. do 4.10.)

ANALIZIRANI EKSPERIMENTI IZVEDENI S SISTEMOM KAMRA (sočasna regulacija toplote in svetlobe, skupno število eksperimentov: 28):

1.mesec

EX-HARM-001 (trajanje 6 dni; 3.10. do 8.10.)
EX-HARM-002 (trajanje 7 dni; 16.10. do 22.10.)

2.mesec

EX-HARM-003 (trajanje 7 dni; 13.11. do 19.11.)
EX-HARM-004 (trajanje 7 dni; 20.11 do 26.11.)

3.mesec

EX-HARM-005 (trajanje 5 dni; 13.12. do 17.12.)
EX-HARM-006 (trajanje 7 dni; 18.12. do 24. 12.)

4.mesec

EX-HARM-007 (trajanje 5 dni; 14.1. do 18.1.)
EX-HARM-008 (trajanje 7 dni; 29.1. do 4.2.)

5.mesec

EX-HARM-009 (trajanje 5 dni; 19.2. do 24.2.)

EX-HARM-010 (trajanje 7 dni; 26.2. do 4.3.)

6.mesec

EX-HARM-011 (trajanje 6 dni; 6.3. do 11.3.)

7.mesec

EX-HARM-012 (trajanje 5 dni; 9.4. do 13.4.)

EX-HARM-013 (trajanje 2 dneva; 23.4. do 24.4.)

EX-HARM-014 (trajanje 3 dni; 24.4. do 26.4.)

EX-HARM-015 (trajanje 8 dni; 30.4. do 7.5.)

8.mesec

EX-HARM-016 (trajanje 2 dneva; 8.5. do 9.5.)

EX-HARM-017 (trajanje 13 dni; 25.5. do 6.6.)

9.mesec

EX-HARM-018 (trajanje 2 dneva; 13.6. do 14.6.)

EX-HARM-019 (trajanje 2 dneva; 20.6. do 21.6.)

10.mesec

EX-HARM-020 (trajanje 5 dni; 6.7. do 10.7.)

EX-HARM-021 (trajanje 5 dni; 13.7. do 17.7.)

11.mesec

EX-HARM-022 (trajanje 2 dneva; 20.8. do 21.8.)

EX-HARM-023 (trajanje 5 dni; 27.8. do 31.8.)

12.mesec

EX-HARM-024 (trajanje 3 dni; 17.9. do 19.9.)

EX-HARM-025 (trajanje 5 dni; 24.9. do 28.9.)

13.mesec

EX-HARM-026 (trajanje 5 dni; 1.10. do 5.10.)

14.mesec

EX-HARM-027 (trajanje 1 dan; 11.9.)

EX-HARM-028 (trajanje 1 dan; 12.9.)

Preglednica 7.12: Primer tabelarnega zapisa eksperimenta (EX-HARM-013) izvedenega s sistemom KAMRA.

Table 7.12: Example of a tabulated notation of an experiment (EX-HARM-013) conducted in a test cell KAMRA.

Dan	Čas	SPTemp	OutRegHeat	OutRegVent	InsideTemp	RollPosition	InsideTempTT1	OutTempTT3	InsideIllumn	SolarRadIrrT1
Pon. 23.04.	00:01:00	20	26.11	0	19.9	100	19.9	6.53	0	0
	00:06:00	15	0	100	18.54	100	18.54	6.44	1	0
	00:11:00	15	0	100	16.77	100	16.77	6.4	2	0
	00:16:00	15	0	100	15.78	100	15.78	6.42	2	0
	00:21:00	15	0	100	15.11	100	15.11	6.34	1	0
	00:26:00	15	0	71.5	14.72	100	14.72	6.21	1	0
	00:31:00	15	0	27.2	14.79	100	14.79	6.11	1	0
	00:36:00	15	0	0	14.65	100	14.65	6.06	0	0
	00:41:00	15	15.6	0	15.13	100	15.13	6.08	0	0
	00:46:00	15	1.46	0	15.66	100	15.66	6	0	0
	00:51:00	15	0	99.89	14.99	100	14.99	5.88	2	0
	00:56:00	15	0	0	14.3	100	14.3	5.82	0	0
	01:01:00	15	30.73	0	14.35	100	14.35	5.67	0	0
	01:06:00	15	15.37	0	15.82	100	15.82	5.57	0	0
	01:11:00	15	0	0	15.93	100	15.93	5.63	0	0
	01:16:00	15	0	63.66	14.36	100	14.36	5.51	0	0
	01:21:00	15	28.05	0	14.15	100	14.15	5.34	0	0
	01:26:00	15	30.19	0	15.04	100	15.04	5.4	0	0
	01:31:00	15	2.46	0	16.25	100	16.25	5.29	0	0
	01:36:00	15	0	99.53	14.96	100	14.96	5.14	4	0
	01:41:00	15	0	0	14.09	100	14.09	5.23	0	0
	01:46:00	15	40.39	0	14.25	100	14.25	5.03	0	0
	01:51:00	15	17.05	0	16.15	100	16.15	5.02	0	0
	01:56:00	15	0	0	15.9	100	15.9	4.93	0	0
	02:01:00	15	0	49.06	14.12	100	14.12	4.79	0	0
	02:06:00	15	37.91	0	13.81	100	13.81	4.86	0	0
	02:11:00	15	31.69	0	15.47	100	15.47	5.02	0	0
	02:16:00	15	4.37	0	16.29	100	16.29	4.93	0	0
	02:21:00	15	0	99.89	14.99	100	14.99	4.82	0	0
	02:26:00	15	0	0	13.85	100	13.85	4.9	0	0
	02:31:00	15	43.26	0	14.53	100	14.53	5.05	0	0
	02:36:00	15	18.16	0	16.21	100	16.21	5.04	0	0
	02:41:00	15	0	0	15.94	100	15.94	5.05	0	0
	02:46:00	15	0	52.6	14.09	100	14.09	5.12	0	0
	02:51:00	15	42.89	0	13.58	100	13.58	4.77	0	0
	02:56:00	15	38.69	0	15.36	100	15.36	4.77	0	0
	03:01:00	15	7.54	0	16.45	100	16.45	4.84	0	0
	03:06:00	15	0	100	15.34	100	15.34	4.63	0	0

se nadaljuje...

... nadaljevanje

03:11:00	15	0	0	13.79	100	13.79	4.64	0	0
03:16:00	15	51.93	0	13.92	100	13.92	4.41	0	0
03:21:00	15	27.01	0	16.09	100	16.09	4.35	0	0
03:26:00	15	3.1	0	16.12	100	16.12	4.35	0	0
03:31:00	15	5.33	0	14.91	100	14.91	4.21	0	0
03:36:00	15	22.19	0	14.18	100	14.18	4.19	0	0
03:41:00	15	29.51	0	14.67	100	14.67	4.09	0	0
03:46:00	15	17.22	0	15.53	100	15.53	3.88	0	0
03:51:00	15	10.77	0	15.28	100	15.28	4.02	0	0
03:56:00	15	18.45	0	14.6	100	14.6	3.91	0	0
04:01:00	15	23.26	0	14.82	100	14.82	3.86	0	0
04:06:00	15	17.9	0	15.23	100	15.23	3.72	0	0
04:11:00	15	16.84	0	15	100	15	3.5	0	0
04:16:00	15	21.36	0	14.81	100	14.81	3.28	0	0
04:21:00	15	21.3	0	15.05	100	15.05	3.27	0	0
04:26:00	15	16.91	0	15.16	100	15.16	3.21	0	0
04:31:00	15	19.4	0	14.92	100	14.92	3.17	0	0
04:36:00	15	21.47	0	14.99	100	14.99	2.99	0	0
04:41:00	15	19.92	0	15.09	100	15.09	2.95	0	0
04:46:00	15	20.43	0	15.05	100	15.05	2.86	0	0
04:51:00	15	18.87	0	15.1	100	15.1	2.78	0	0
04:56:00	15	23.51	0	14.84	100	14.84	2.64	0	0
05:01:00	15	20.82	0	15.13	100	15.13	2.59	0	0
05:06:00	15	19.3	0	15.13	100	15.13	2.53	0	0
05:11:00	15	21.37	0	14.95	100	14.95	2.64	0	0
05:16:00	15	24.04	0	14.86	100	14.86	2.61	0	0
05:21:00	15	22.68	0	15.04	100	15.04	2.43	0	0
05:26:00	15	22.6	0	15.05	100	15.05	2.38	0	0
05:31:00	15	21.37	0	15.12	100	15.12	2.34	0	0
05:36:00	15	23.12	0	15.01	100	15.01	2.33	0	0
05:41:00	15	23.72	0	14.97	100	14.97	2.35	0	0
05:46:00	15	21.09	0	15.13	100	15.13	2.26	0	0
05:51:00	15	23.03	0	14.98	100	14.98	2.19	3	0
05:56:00	15	23.38	0	14.96	100	14.96	2.31	16	0
06:01:00	25	100	0	15.05	100	15.05	2.22	35	1
06:06:00	25	100	0	17.03	100	17.03	2.18	64	2
06:11:00	25	100	0	20.05	100	20.05	2.19	105	5
06:16:00	25	100	0	22.23	100	22.23	2.15	156	7
06:21:00	25	100	0	23.51	100	23.51	2.27	218	10
06:26:00	25	100	0	24.42	86	24.42	2.48	244	15
06:31:00	25	96.6	0	25.27	71	25.27	3.61	258	23
06:36:00	25	83.01	0	25.65	57	25.65	5.02	245	57
06:41:00	25	72.2	0	25.48	53	25.48	4.67	250	64
06:46:00	25	67.18	0	25.21	46	25.21	4.67	257	84
06:51:00	25	70.28	0	24.84	38	24.84	5.76	259	102
06:56:00	25	74.06	0	24.89	33	24.89	5.93	257	116
07:01:00	25	70.58	0	25.15	27	25.15	5.79	238	127

se nadaljuje...

... nadaljevanje

07:06:00	25	62.3	0	25.37	22	25.37	5.72	208	140
07:11:00	25	60.54	0	25.09	22	25.09	6.88	231	153
07:16:00	25	63.07	0	24.87	22	24.87	6.43	256	167
07:21:00	25	64.77	0	24.98	16	24.98	7.09	206	182
07:26:00	25	67.92	0	24.85	16	24.85	6.97	224	196
07:31:00	25	59.11	0	25.4	16	25.4	7.43	242	213
07:36:00	25	57.17	0	25.03	11	25.03	8.54	178	227
07:41:00	25	55.92	0	25.04	11	25.04	9.14	191	240
07:46:00	25	56.33	0	24.95	11	24.95	9.28	203	255
07:51:00	25	56.44	0	24.95	11	24.95	9.55	216	270
07:56:00	25	62.42	0	24.77	11	24.77	9.04	228	284
08:01:00	15	0	0	25.14	2	25.14	7.71	76	296
08:06:00	15	0	100	21.79	2	21.79	8.47	84	311
08:11:00	15	0	100	18.85	2	18.85	9.23	89	325
08:16:00	15	0	100	17.29	2	17.29	9.61	99	339
08:21:00	15	0	100	16.32	2	16.32	10.7	104	354
08:26:00	15	0	100	15.57	2	15.57	9.29	111	368
08:31:00	15	0	99.99	15	2	15	10.4	118	383
08:36:00	15	0	65.6	14.72	2	14.72	9.02	125	398
08:41:00	15	0	24.36	14.81	2	14.81	8.26	131	412
08:46:00	15	0	0	14.79	2	14.79	9.34	137	423
08:51:00	15	12.91	0	15.11	2	15.11	7.96	143	435
08:56:00	15	0.27	0	15.6	2	15.6	7.99	149	447
09:01:00	15	0	93.51	14.72	2	14.72	9.2	153	455
09:06:00	15	0	0	14.36	0	14.36	8.82	65	468
09:11:00	15	23.37	0	14.87	0	14.87	10.2	69	481
09:16:00	15	5.15	0	15.89	0	15.89	10.4	73	493
09:21:00	15	0	100	15.47	0	15.47	10.6	82	505
09:26:00	15	0	39.57	14.35	0	14.35	11.6	80	516
09:31:00	15	23.42	0	14.46	0	14.46	11.2	84	529
09:36:00	15	16.01	0	15.42	0	15.42	11.5	88	538
09:41:00	15	0	0	15.91	0	15.91	10.7	92	550
09:46:00	15	0	89.83	14.69	0	14.69	11.2	96	563
09:51:00	15	0	0	14.47	0	14.47	11.8	101	578
09:56:00	15	22.74	0	14.78	0	14.78	11.4	104	587
10:01:00	15	5.36	0	15.84	0	15.84	11.7	109	601
10:06:00	15	0	100	15.44	0	15.44	12.9	114	609
10:11:00	15	0	50.71	14.49	0	14.49	11.4	117	620
10:16:00	15	19.94	0	14.54	0	14.54	11.2	120	630
10:21:00	15	16.73	0	15.25	0	15.25	12.1	125	640
10:26:00	15	0	0	15.86	0	15.86	12.9	127	644
10:31:00	15	0	98.84	14.93	0	14.93	12.4	130	653
10:36:00	15	0	30.68	14.53	0	14.53	12.7	133	663
10:41:00	15	18.3	0	14.65	0	14.65	13.3	137	675
10:46:00	15	12.31	0	15.41	0	15.41	14.1	139	682
10:51:00	15	0	0	15.72	0	15.72	13.5	142	690
10:56:00	15	0	95.52	14.85	0	14.85	15	142	696

se nadaljuje...

... nadaljevanje

11:01:00	15	0	39.54	14.67	0	14.67	14.1	146	700
11:06:00	15	0	0	14.76	0	14.76	14.1	148	705
11:11:00	15	12.61	0	15.17	0	15.17	15.1	153	716
11:16:00	15	0	0	15.59	0	15.59	14.9	126	725
11:21:00	15	0	100	15.1	0	15.1	14.5	128	730
11:26:00	15	0	74.85	14.75	0	14.75	15	129	735
11:31:00	15	0	37.65	14.82	0	14.82	16.1	133	743
11:36:00	15	0	12.73	14.92	0	14.92	16.1	135	744
11:41:00	15	0	3.14	14.97	0	14.97	16.4	136	751
11:46:00	15	0	0.1	15	0	15	15.8	139	763
11:51:00	15	10.83	0	15	0	15	17.1	142	774
11:56:00	15	2.86	0	15.46	0	15.46	17.1	145	787
12:01:00	15	0	100	15.39	0	15.39	17.2	144	811
12:06:00	15	0	100	15.07	0	15.07	17.1	146	818
12:11:00	15	0	100	15.01	0	15.01	17.3	146	819
12:16:00	15	0	90.27	14.99	0	14.99	17.2	151	815
12:21:00	15	0	87.76	15.02	0	15.02	16.7	147	817
12:26:00	15	0	91.19	15.01	0	15.01	16.6	146	828
12:31:00	15	0	97.03	15.04	0	15.04	16.7	128	841
12:36:00	15	0	100	15.05	0	15.05	16.4	130	843
12:41:00	15	0	100	15.07	0	15.07	16.6	131	871
12:46:00	15	0	100	15.11	0	15.11	16.8	129	836
12:51:00	15	0	100	15.14	0	15.14	16.1	128	810
12:56:00	15	0	100	15.24	0	15.24	16.4	131	810
13:01:00	20	0	0	15.25	0	15.25	16.8	411	810
13:06:00	20	100	0	16.42	2	16.42	16.7	387	805
13:11:00	20	86.73	0	20.74	2	20.74	16.6	358	793
13:16:00	20	24.93	0	22.99	0	22.99	16.5	219	796
13:21:00	20	0	0	21.66	2	21.66	16.6	352	792
13:26:00	20	0	70.99	19.26	2	19.26	16.6	343	785
13:31:00	20	38.15	0	18.66	2	18.66	16.8	349	772
13:36:00	20	52.1	0	19.48	2	19.48	16.6	354	789
13:41:00	20	27.2	0	21.16	2	21.16	16.8	357	797
13:46:00	20	5.13	0	21.06	2	21.06	17.2	336	783
13:51:00	20	3.65	0	20.12	2	20.12	17	334	778
13:56:00	20	17.47	0	19.41	2	19.41	16.9	322	762
14:01:00	20	26.78	0	19.53	2	19.53	16.4	326	766
14:06:00	20	19.85	0	20.33	2	20.33	17	329	763
14:11:00	20	15.99	0	20.14	2	20.14	16.7	317	747
14:16:00	20	14.15	0	20.11	2	20.11	16.9	318	746
14:21:00	20	14.41	0	19.97	2	19.97	17.2	316	737
14:26:00	20	16.55	0	19.93	2	19.93	17.3	313	728
14:31:00	20	16.78	0	19.99	2	19.99	16.3	307	721
14:36:00	20	16.82	0	19.93	2	19.93	16.6	299	715
14:41:00	20	15.46	0	20.13	2	20.13	17	297	702
14:46:00	20	11.69	0	20.23	2	20.23	16.9	294	702
14:51:00	20	9.28	0	20.17	2	20.17	16.7	293	699

se nadaljuje...

... nadaljevanje

14:56:00	20	14.11	0	19.84	2	19.84	16.2	285	686
15:01:00	25	80.59	0	19.94	0	19.94	16.9	149	677
15:06:00	25	100	0	22.66	0	22.66	16.5	149	669
15:11:00	25	85.97	0	25.84	0	25.84	16.5	144	661
15:16:00	25	36.09	0	27.43	0	27.43	16.9	247	648
15:21:00	25	17.78	0	26.02	0	26.02	16.3	242	642
15:26:00	25	31.83	0	24.48	0	24.48	16.5	242	640
15:31:00	25	41.66	0	24.46	0	24.46	16.6	231	623
15:36:00	25	42.39	0	24.95	0	24.95	16.7	227	618
15:41:00	25	37.44	0	25.38	0	25.38	16.5	223	605
15:46:00	25	34.37	0	25.26	0	25.26	16.9	220	595
15:51:00	25	29.83	0	25.22	0	25.22	16.4	214	580
15:56:00	25	31.45	0	24.81	0	24.81	16.7	208	570
16:01:00	25	34.45	0	24.9	0	24.9	16.5	206	555
16:06:00	25	31.93	0	25.18	0	25.18	16.9	201	548
16:11:00	25	30.74	0	25.17	0	25.17	16.6	189	536
16:16:00	25	28.84	0	25.08	0	25.08	16.9	192	526
16:21:00	25	29.33	0	24.97	0	24.97	16.6	182	507
16:26:00	25	31.26	0	25.01	0	25.01	16.7	181	499
16:31:00	25	31.3	0	25.04	0	25.04	16.3	177	485
16:36:00	25	27.71	0	25.12	0	25.12	16.6	168	466
16:41:00	25	26.21	0	25.08	0	25.08	16.5	163	453
16:46:00	25	24.83	0	25.12	0	25.12	16.6	156	441
16:51:00	25	25.4	0	25.02	0	25.02	16.4	150	426
16:56:00	25	28.81	0	24.84	0	24.84	16.7	147	413
17:01:00	25	25.17	0	25.1	11	25.1	16.3	416	402
17:06:00	25	23.33	0	25.13	11	25.13	16.5	401	388
17:11:00	25	25.15	0	24.94	11	24.94	16.5	385	374
17:16:00	25	27.94	0	24.95	11	24.95	16.2	371	361
17:21:00	25	24.37	0	25.11	11	25.11	16.3	355	348
17:26:00	25	28.24	0	24.77	11	24.77	15.9	348	333
17:31:00	25	27.64	0	25.02	11	25.02	15.8	332	320
17:36:00	25	25.85	0	25.19	11	25.19	16.2	318	304
17:41:00	25	24.39	0	25.01	11	25.01	15.5	305	290
17:46:00	25	27.98	0	24.75	11	24.75	15.7	285	269
17:51:00	25	23.34	0	25.15	11	25.15	15.6	268	248
17:56:00	25	29.8	0	24.77	11	24.77	15.5	261	242
18:01:00	25	27.78	0	25.07	16	25.07	15.2	356	231
18:06:00	25	26.57	0	24.98	16	24.98	16.3	340	216
18:11:00	25	25.74	0	24.94	16	24.94	16.2	306	199
18:16:00	25	22.34	0	25.29	16	25.29	16.9	295	188
18:21:00	25	23.43	0	25.09	16	25.09	16.1	267	170
18:26:00	25	25	0	24.93	16	24.93	15.8	248	156
18:31:00	25	22.8	0	25.01	22	25.01	15.5	327	140
18:36:00	25	24.76	0	24.91	22	24.91	15.4	273	118
18:41:00	25	27.14	0	24.95	22	24.95	15.7	275	122
18:46:00	25	23.27	0	25.14	27	25.14	15.1	309	105

se nadaljuje...

... nadaljevanje

18:51:00	25	22.17	0	25.09	30	25.09	14.9	284	75
18:56:00	25	24.32	0	24.93	30	24.93	14.5	257	62
19:01:00	20	0	0	24.91	30	24.91	14.6	245	64
19:06:00	20	0	100	23.48	30	23.48	14.2	223	60
19:11:00	20	0	100	22.1	30	22.1	14	184	50
19:16:00	20	0	100	21.37	30	21.37	13.6	151	39
19:21:00	20	0	100	20.68	36	20.68	13.5	159	34
19:26:00	20	0	100	20.22	42	20.22	13.4	152	28
19:31:00	20	0	95.88	19.93	49	19.93	13.4	163	26
19:36:00	20	0	59.69	19.79	57	19.79	12.9	153	20
19:41:00	20	0	8.78	19.76	71	19.76	12.8	146	15
19:46:00	20	19	0	19.58	90	19.58	12.5	144	11
19:51:00	20	15.23	0	20.2	100	20.2	12.4	107	8
19:56:00	20	5.48	0	20.48	100	20.48	12.3	65	5
20:01:00	20	1.27	0	20.22	100	20.22	12.1	34	2
20:06:00	20	5.31	0	19.76	100	19.76	12	16	1
20:11:00	20	11.24	0	19.73	100	19.73	11.9	3	0
20:16:00	20	12.5	0	19.91	100	19.91	11.8	0	0
20:21:00	20	9.97	0	20.15	100	20.15	11.7	0	0
20:26:00	20	10.4	0	19.96	100	19.96	11.6	0	0
20:31:00	20	11.34	0	19.93	100	19.93	11.5	0	0
20:36:00	20	12.03	0	19.97	100	19.97	11.3	0	0
20:41:00	20	11.05	0	20.04	100	20.04	11.2	0	0
20:46:00	20	13.22	0	19.92	100	19.92	11	0	0
20:51:00	20	15.77	0	19.92	100	19.92	11	0	0
20:56:00	20	15.86	0	20	100	20	11	0	0
21:01:00	20	14.59	0	20.02	100	20.02	10.8	0	0
21:06:00	20	12.91	0	20.06	100	20.06	10.8	0	0
21:11:00	20	13.76	0	19.93	100	19.93	10.7	0	0
21:16:00	20	14.22	0	19.94	100	19.94	10.7	0	0
21:21:00	20	17.83	0	19.87	100	19.87	10.7	0	0
21:26:00	20	18.43	0	19.94	100	19.94	10.6	0	0
21:31:00	20	16.9	0	20.07	100	20.07	10.5	0	0
21:36:00	20	15.38	0	20.1	100	20.1	10.4	0	0
21:41:00	20	17.38	0	19.91	100	19.91	10.5	0	0
21:46:00	20	18.02	0	19.97	100	19.97	10.3	0	0
21:51:00	20	18.19	0	20.01	100	20.01	10.2	0	0
21:56:00	20	19.82	0	19.94	100	19.94	10.1	0	0
22:01:00	20	18.77	0	20.06	100	20.06	10.1	0	0
22:06:00	20	16.9	0	20.11	100	20.11	9.99	0	0
22:11:00	20	18.18	0	19.94	100	19.94	9.98	0	0
22:16:00	20	18.78	0	19.91	100	19.91	9.92	0	0
22:21:00	20	20.98	0	19.91	100	19.91	9.86	0	0
22:26:00	20	20.2	0	20.07	100	20.07	9.88	0	0
22:31:00	20	18.95	0	20.07	100	20.07	10	0	0
22:36:00	20	18.83	0	20.01	100	20.01	9.82	0	0
22:41:00	20	18.95	0	20.05	100	20.05	9.83	0	0

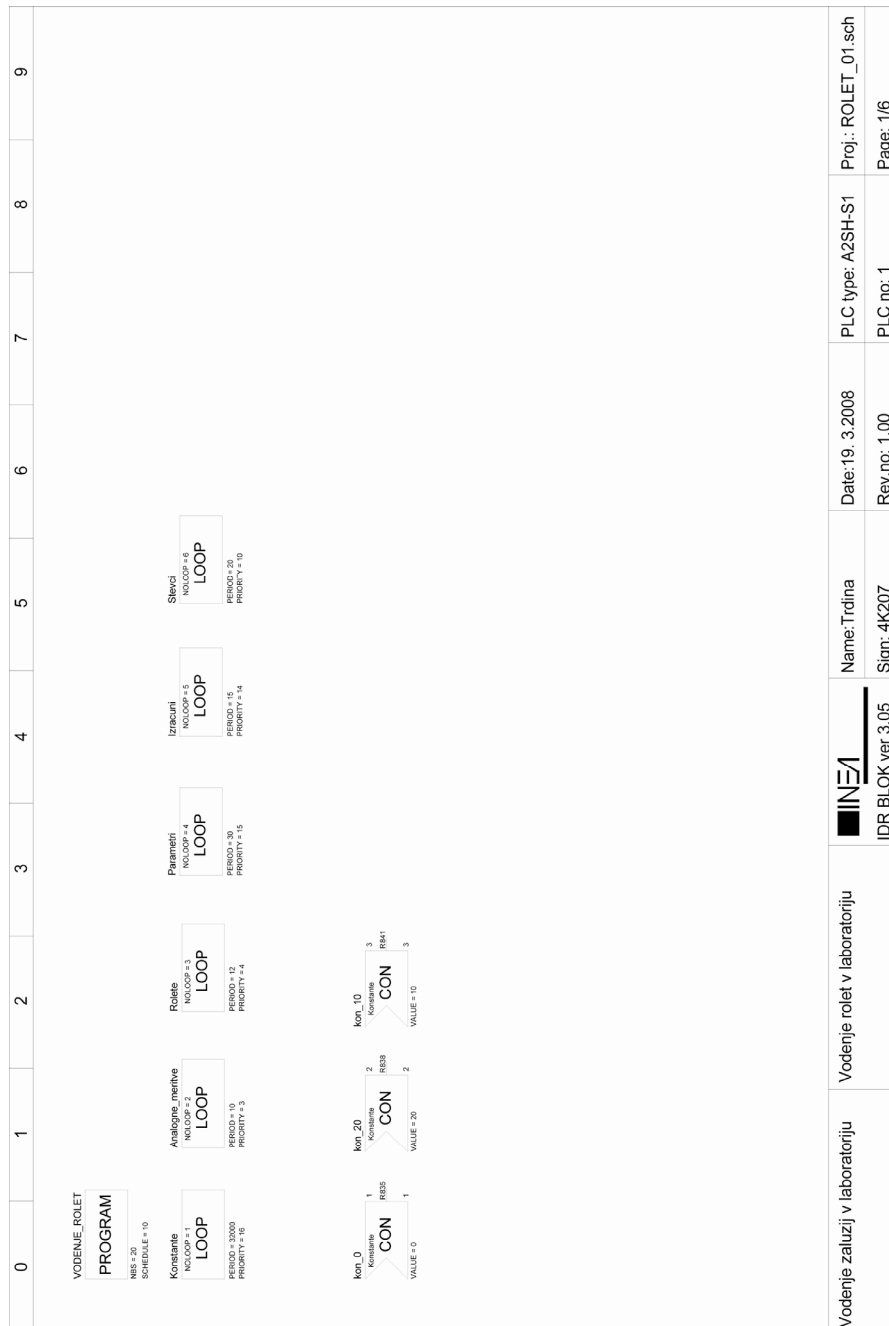
se nadaljuje...

... nadaljevanje

	22:46:00	20	19.4	0	19.99	100	19.99	9.81	0	0
	22:51:00	20	21.79	0	19.91	100	19.91	9.78	0	0
	22:56:00	20	21.85	0	19.99	100	19.99	9.81	0	0
	23:01:00	20	21.45	0	20.03	100	20.03	9.91	0	0
	23:06:00	20	18.7	0	20.03	100	20.03	9.85	0	0
	23:11:00	20	21.58	0	19.9	100	19.9	9.96	0	0
	23:16:00	20	23.14	0	19.98	100	19.98	9.83	0	0
	23:21:00	20	21.01	0	20.12	100	20.12	9.88	0	0
	23:26:00	20	20.66	0	20.05	100	20.05	9.79	0	0
	23:31:00	20	21.88	0	19.92	100	19.92	9.8	0	0
	23:36:00	20	23.54	0	19.94	100	19.94	9.72	0	0
	23:41:00	20	23.33	0	19.95	100	19.95	9.73	0	0
	23:46:00	20	20.5	0	20.14	100	20.14	9.69	0	0
	23:51:00	20	20.9	0	20	100	20	9.6	0	0
	23:56:00	20	21.76	0	19.92	100	19.92	9.62	0	0
Tor. 24.04.	00:02:00	20	22.16	0	19.98	100	19.98	9.47	0	0

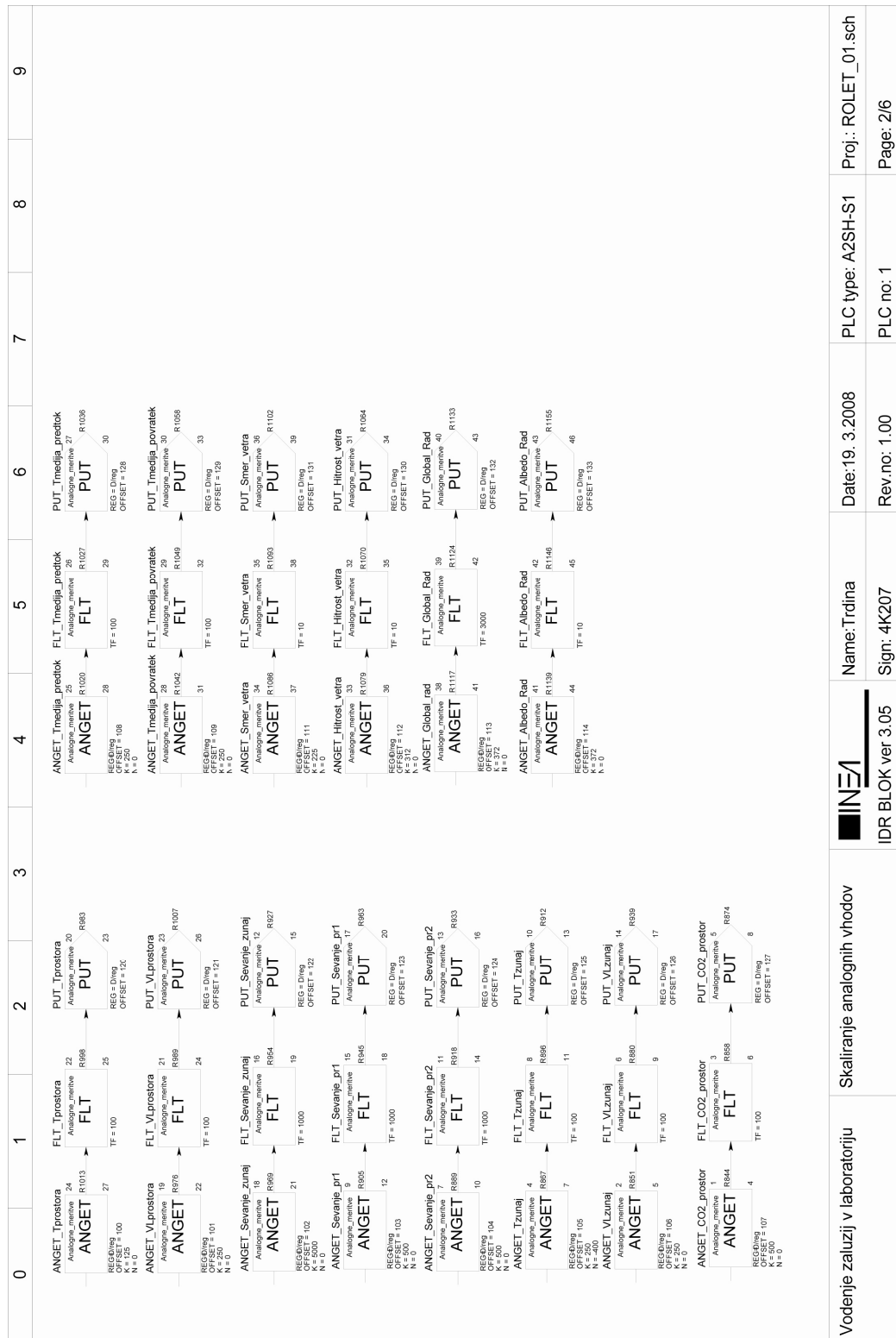
PRILOGA D

IDR shema zasnove vodenja sistema IRsNO



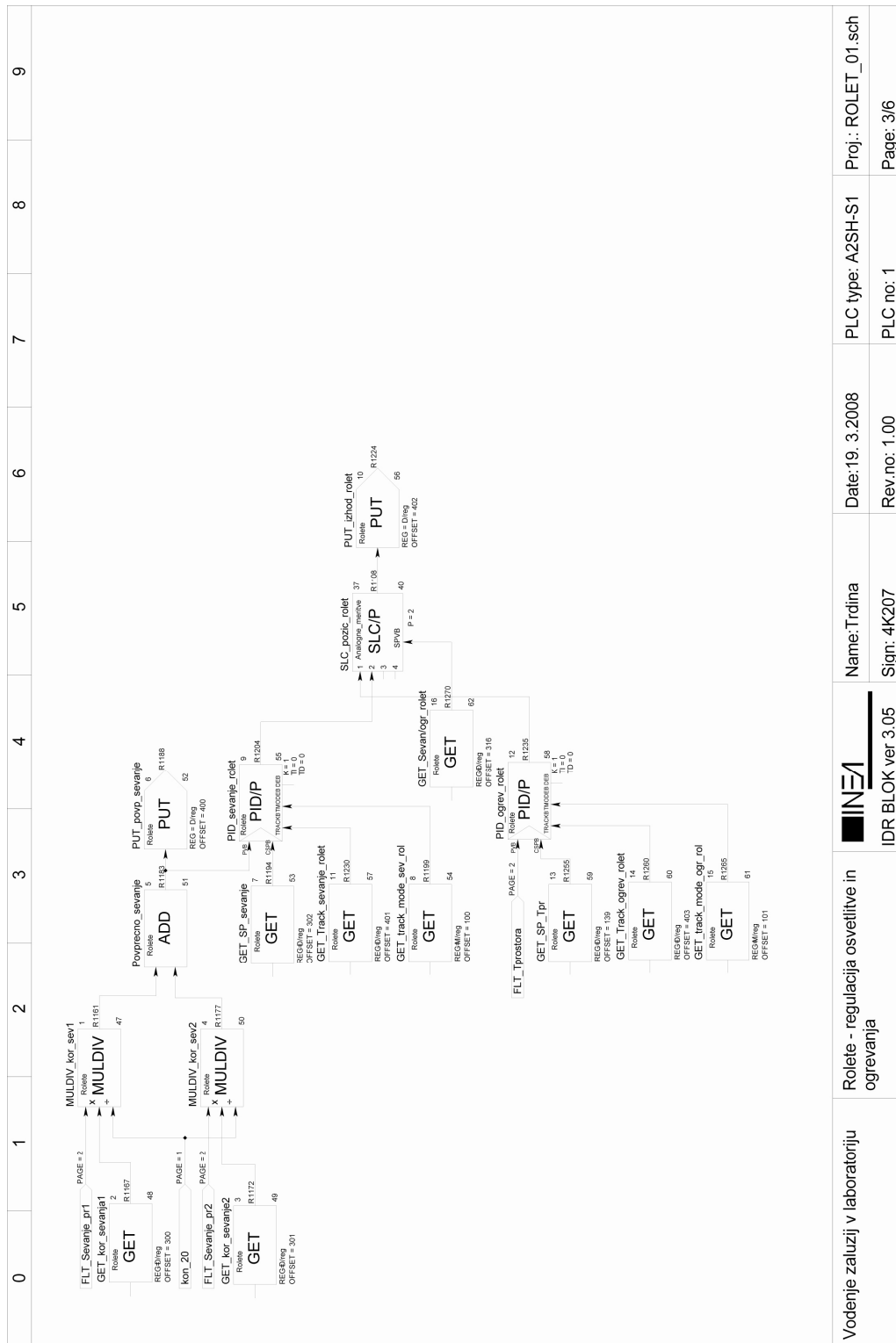
Slika 7.15: Shema izvedenega regulacijskega algoritma IRsNO v okolju IDR BLOK (1/6). (Trdina, 2008, str.: 1)

Fig. 7.15: Diagram of regulating algorithm of IRsNO executed in the IDR BLOK application (1/6). (Trdina, 2008, str.: 1)



Slika 7.16: Shema izvedenega regulacijskega algoritma IRsNO v okolju IDR BLOK (2/6).
 (Trdina, 2008, str.: 2)

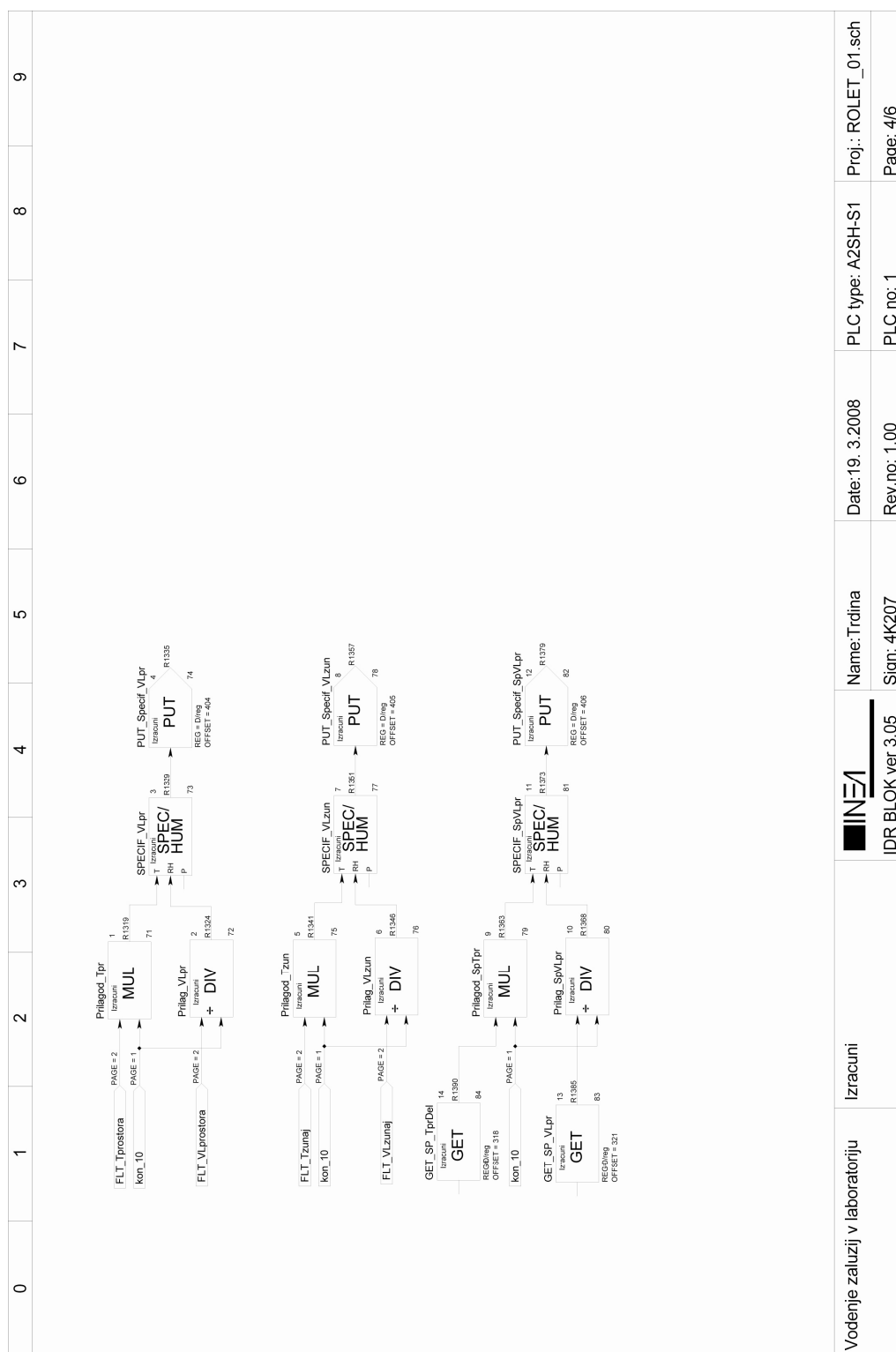
Fig. 7.16: Diagram of regulating algorithm of IRsNO executed in the IDR BLOK application (2/6). (Trdina, 2008, str.: 2)



Vodenje zaluzij v laboratoriju	 IDR BLOK ver 3.05	Name: Trdina Sign: 4K207	Date: 19. 3.2008 Rev.no: 1,00	PLC type: A2SH-S1 PLC no: 1	Proj.: ROLET_01.sch Page: 3/6
--------------------------------	--	-----------------------------	----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------

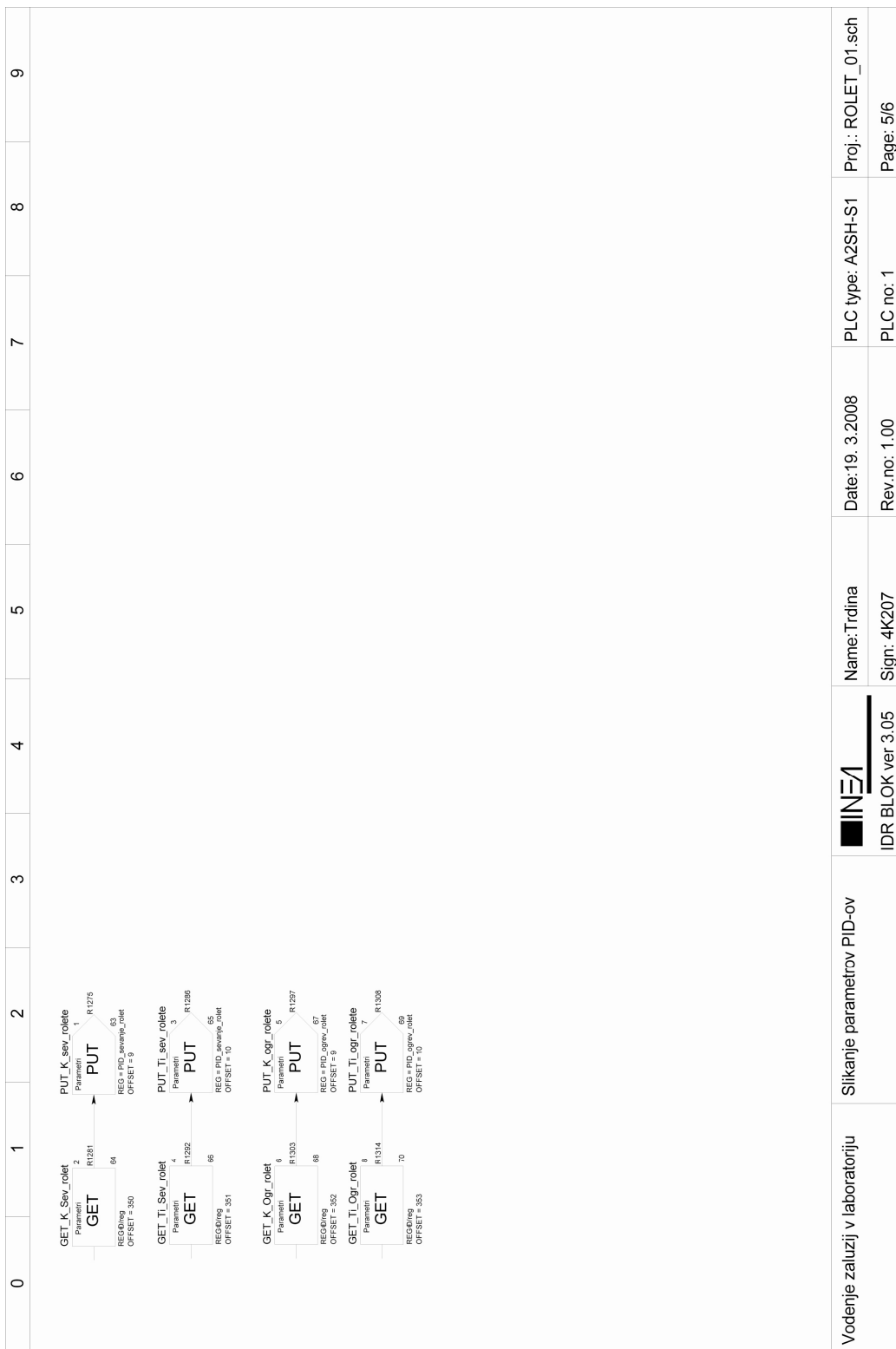
Slika 7.17: Shema izvedenega regulacijskega algoritma IRsNO v okolju IDR BLOK (3/6). (Trdina, 2008, str.: 3)

Fig. 7.17: Diagram of regulating algorithm of IRsNO executed in the IDR BLOK application (3/6). (Trdina, 2008, str.: 3)



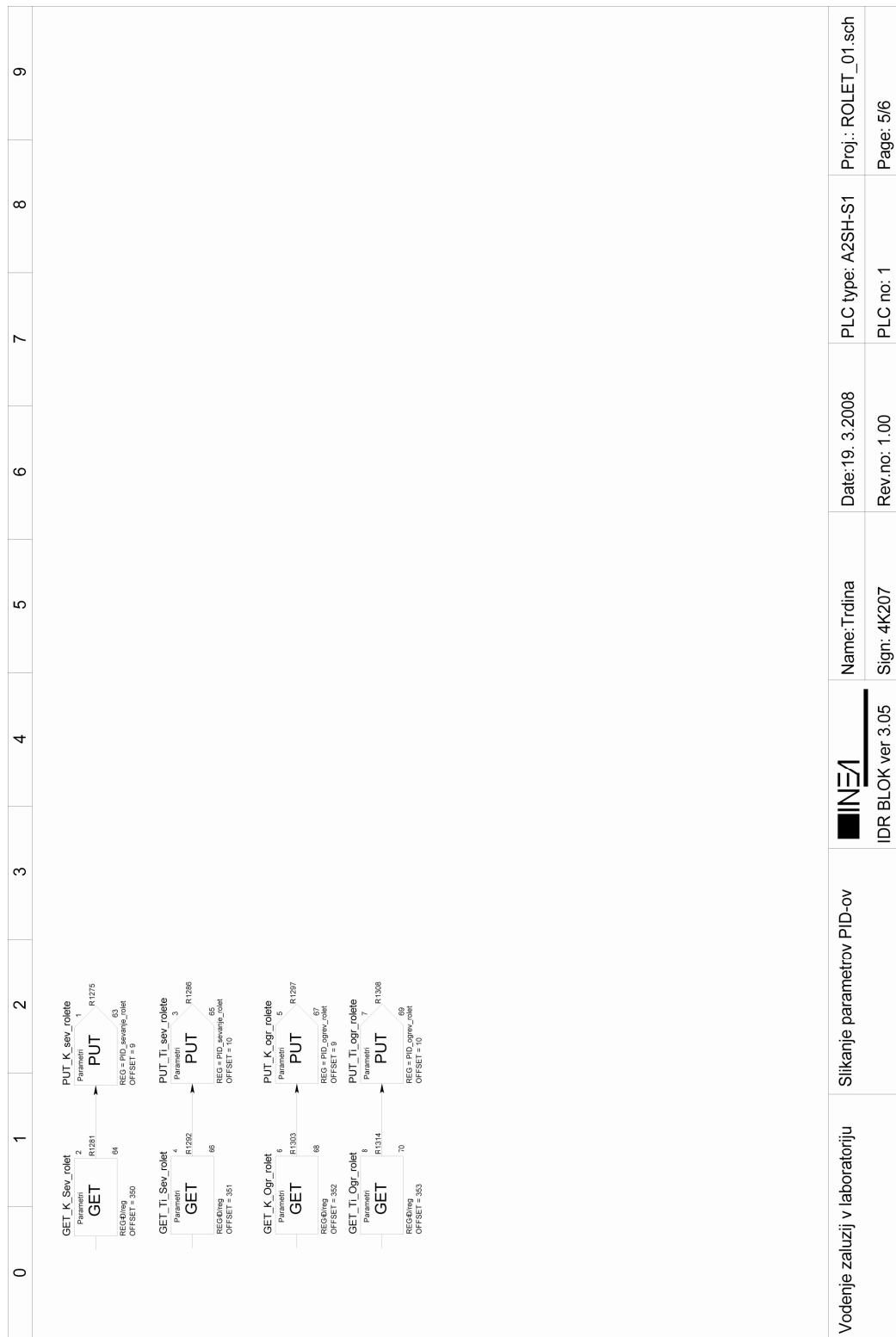
Slika 7.18: Shema izvedenega regulacijskega algoritma IRsNO v okolju IDR BLOK (4/6).
 (Trdina, 2008, str.: 4)

Fig. 7.18: Diagram of regulating algorithm of IRsNO executed in the IDR BLOK
 application (4/6). (Trdina, 2008, str.: 4)



Slika 7.19: Shema izvedenega regulacijskega algoritma IRsNO v okolju IDR BLOK (5/6). (Trdina, 2008, str.: 5)

Fig. 7.19: Diagram of regulating algorithm of IRsNO executed in the IDR BLOK application (5/6). (Trdina, 2008, str.: 5)



Slika 7.20: Shema izvedenega regulacijskega algoritma IRsNO v okolju IDR BLOK (6/6).
 (Trdina, 2008, str.: 6)

Fig. 7.20: Diagram of regulating algorithm of IRsNO executed in the IDR BLOK application (6/6). (Trdina, 2008, str.: 6)

