PRILAZ OPTIMIZACIJI ENERGETSKE EFIKASNOSTI KONTROLOM DNEVNOG OSVETLJENJA

THE APPROACH TO THE OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY BY DAYLIGHT CONTROL

Rade Đukanović, dipl. inž., „EnPlus", Beograd, i
prof. dr Marija Todorović, dipl. inž.,
Laboratorija za termodinamiku i termotehniku
Poljoprivrednog fakulteta u Beogradu

U radu su izloženi pregled i analiza tehnologija i tehnika kontrole i mogućnosti optimizacije korišćenja dnevnog osvetljenja sa ciljem minimiziranja upotrebe veštačkog osvetljenja i unutrašnjih toplotnih dobitaka, odnosno ukupnog toplotnog opterećenja sistema za klimatizaciju. Posebno je analiziran uticaj regulacije intenziteta veštačkog osvetljenja na smanjenje ukupne potrošnje električne energije u većim komercijalnim i administrativnim objektima.

The analysis of technologies and methods for daylight control and optimization aimed to the artificial lighting usage minimization has been performed in this paper. The influence of the artificial light intensity control on electric power consumption decrease in large administrative and commercial buildings has been particularly studied.

Ključne reči: dnevno i veštačko osvetljenje; matematičko modeliranje; dinamičke simulacije; kontrola; optimizacija; potrošnja energije
Key words: daily and artificial light; mathematical modeling; dynamical simulation; control; optimization; energy consumption

1. Uvod

Pre prilaza efikasnom korišćenju obnovljivih izvora energije, neophodno je minimizirati potrebe energije određenog potrošača primenom različitih mera poboljšanja energetske efikasnosti. Osvetljenje spada među najveće potrošače električne energije u kancelarijskim prostorima u administrativnim i komercijalnim objektima. Ti objekti ponekad troše električnu energiju za osvetljenje i u onom periodu dana kada je raspoloživost dnevne svetlosti najveća. Nedostatak svesti da se tako nepotrebno povećava potrošnja energije i ograničenje ljudskih sposobnosti da osete dovoljan intenzitet svetla, razlog su što je individualna kontrola osvetljenosti prostora teško ostvarljiva, te veštačko osvetljenje ostaje uključeno mnogo duže nego što je to potrebno.

U klimatskom području jugoistočnog Jadrana, kao i svim područjima sa izraženim većim intenzitetom sunčevog zračenja u letnjem periodu godine, da bi se umanjio upad sunčevog zračenja u unutrašnji prostor objekta i time smanjilo njegovo spoljašnje toplotno opterećenje, koriste se venecijaneri i drugi zastori. Njihovom upotrebom se jednovremeno smanjuje i prodor dnevne svetlosti u prostoriju što dalje može da dovede i do povećanog korišćenja veštačkog osvetljenja, odnosno dalje posledično povećanje unutrašnjeg toplotnog opterećenja i veću potrošnju energije za klimatizacione sisteme. To vodi ka zaključku da je potrebno ostvariti sklad, harmonizaciju kontrole upada sunčevog zračenja i dnevne svetlosti, tj. korišćenja prirodnog dnevnog svetla i veštačkog osvetljenja, da bi se minimiziralo toplotno opterećenje kako od spoljnih, tako i od unutrašnjih izvora, a u isto vreme obezbedio zadovoljavajući vidni komfor za rad i boravak ljudi u objektu. Tako kontrola dnevnog osvetlenja postaje jedan od veoma važnih prilaza unapređenju i optimizaciji energetske efikasnosti objekata u nizu efektivnih strategija koje vode očuvanju energije.

2. Optimizacija kontrole putem simulacija

U razvoju su brojni modeli opisa dinamike promene upada, raspoloživosti i raspodele dnevne svetlosti, profila dnevnih, mesečnih i godišnjih potreba za veštačkim osvetljenjem, odnosno potreba i potrošnje električne energije za osvetljenje unutrašnjeg prostora određenog oblika.

U osnovi danas jednog od najviše primenjivanih programa za energetsku simulaciju objekata u DOE2.1E, nalazi se model dinamičkih simulacija dnevnog osvetljenja kojim se u sprezi sa dinamičkom termičkom analizom, ispituje uticaj i mogući doprinos dnevnog osvetljenja energetskoj optimizaciji omotača objekta [1, 2, 3, 7]. Ovim modelom može se sprovoditi analiza mogućnosti energetskih efekata kontrole dnevnog osvetljenja putem različitih strategija i tehnika, uzimajući u obzir raspoloživost dnevnog osvetljenja na datoj lokaciji, prolaz kroz omotač objekta, izbor vrste tehnike upravljanja senčenjem prozora (fiksnim – stacionarnim ili nestacionarnim – linearno ili dinamički promenljivim položajem zastora), veličinu dobitaka toplote – toplotno opterećenje od sunčevog zračenja, kvalitet osvetljenosti unutrašnjeg prostora i veličinu neprijatnog blještanja. Prema ovom modelu „proračun dnevnog osvetljenja", odnosno optimizacija „dnevnog osvetljenja" u okviru energetske optimizacije objekta ima dva dela:

1) određivanje intenziteta dnevne svetlosti u unutrašnjem prostoru simulacijom promena osvetljenosti od sunca i neba za uslove „tipične meteorološke godine" (TMG);

2) određivanje potreba za veštačkim osvetljenjem i mogućih smanjenja potrošnje električne energije kako za samo osvetljenje, tako i integralno energije, obuhvatajući uticaj veštačkog osvetljenja na potrebu za hlađenjem, odnosno ukupnu potrošnju energije.

Određivanje intenziteta dnevne svetlosti u unutrašnjem prostoru simulacijom časovnih promena osvetljenosti od sunca/neba za TMG. Za svaki vremenski korak totalna osvetljenost referentne tačke u unutrašnjem prostoru od svih spoljnih prozora u zoni određena je izrazom:

$$I_{tot}(i_{SV}, i_S) = \sum_{i=1}^{Np} [d_{sun}(i_{SV}, i_S) E_{h,sun} + d_n(i_{SV}, i_S) E_{h,n}] \qquad (1)$$

gde je: *Np* broj prozora; i_{SV} indeks referentne tačke; i_S faktor osenčenosti sa vrednostima $i_S = 1$ ako je osenčen, $i_S = 2$ ako je neosenčen prozor; d_{sun} i d_n, su faktori dnevne svetlosti od sunca i od neba; E_{hsun} i E_{hn} su spoljašnje horizontalne osvetljenosti od sunca i neba.

Osvetljenost referentne tačke za svaku zonu dobija se integracijom preko površine svakog spoljašnjeg prozora, da bi se ustanovio doprinos direktne svetlosti koja prolazi kroz prozor i doprinos svetla koji se reflektuje od strane zidova, poda i plafona pre nego što dospe do referentne tačke.

Proračun trenutne osvetljenosti svake referentne tačke, u svakoj zoni, vrši se interpolacijom proračunatih faktora dnevne svetlosti i množenjem tih faktora sa spoljašnjom horizontalnom osvetljenošću, koristeći uslove oblačnosti i položaj sunca u tom trenutku [4].

Faktori dnevne svetlosti predstavljaju odnos unutrašnje osvetljenosti u referentnoj tački i horizontalne spoljašnje osvetljenosti. Oni se proračunavaju u prethodnom postupku za svaku referentnu tačku za svaki prozor, za čisto i oblačno nebo za 20 različitih vrednosti solarnog azimuta i visine koji pokrivaju godišnji raspon sunčanih pozicija za datu geografsku lokaciju.

E_{hsun} i E_{hn} [4] spoljašnje horizontalne osvetljenosti od sunca i neba određuju se za svaki vremenski korak iz baze podataka za tipičnu meteorološku godinu, ili na osnovu meteoroloških podataka za posmatrani vremenski period. Spoljašnja horizontalna osvetljenost od neba određuje se na osnovu standardnih funkcija raspodele sjajnosti neba za uslove čistog i delimično oblačnog neba [2–4].

Unutrašnja osvetljenost se sastoji od direktne komponenete *Eh* (2) i unutrašnje reflektovane komponenete *Er,* koja se računa metodom „razdvajanja fluksa" [6].

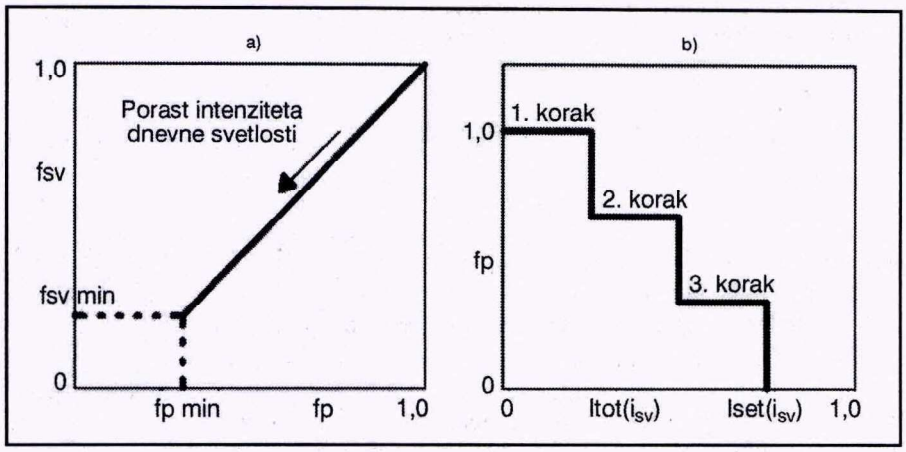
Takođe je za potpuno sagledavanje primene dnevne svetlosti neophodno odrediti odblesak i primeniti osenčenje kada je odblesak iznad zadatog nivoa. Za određivanje odbleska neophodno je odrediti sjajnost prozora i pozadine prozora [2].

Potreba za vestačkim osvetljenjem i potrošnja električne energije. Po određivanju promena intenziteta dnevne svetlosti u unutrašnjem prostoru u zavisnosti od promena spoljne osvetljenosti od sunca i neba za uslove „tipične meteorološke godine" (TMG), prilazi se određivanju relativnog udela potreba za veštačkim osvetljenjem f_{VO}, koje je potrebno da nadomesti razliku između nivoa raspoložive osvetljenosti dnevnom svetlošću i zadatog nivoa osvetljenosti. Tako određenom potrebom veštačkog osvetljenja utvrđuje se relativan udeo potreba električne snage f_P na osnovu kojeg se posle integracije po vremenu određuje potrebna električna energija za samo veštačko osvetljenje, odnosno i ukupno potrebna energija, obuhvatajući uticaj veštačkog osvetljenja na potrebu energije za hlađenje.

Relativan udeo intenziteta veštačkog osvetljenja, f_{VO}, potreban da zadovolji zadatu vrednost osvetljenosti u referentnoj tački određen je izrazom:

$$f_{VO}(i_L) = \max\left[0, \frac{I_{set}(I_{SV}) - I_{tot}(i_{SV})}{I_{set}(i_{SV})}\right] \tag{2}$$

gde je I_{set} zadata vrednost jačine svetlosti, I_{tot} je jačina dnevne svetlosti u referentnoj tački, pri čemu se pretpostavlja da električno osvetljenje pri punoj snazi proizvodi jačinu svetlosti jednaku I_{set} u referentnoj tački.



Slika 1. Kontinualna a) i stepenasta b) kontrola veštačkog osvetljenja

Redukcija snage električnog osvetljenja. Koristeći vrednost f_p u svakoj referentnoj tački i deo f_z zone kontrolisane od pojedine referentne tačke, proračunavamo faktor smanjenja svetlosne snage zbog korišćenja dnevne svetlosti M_p za celu zonu.

$$Mp = \sum_{i_L=1}^{2} f_p(i_{SV})\, fz(i_{SV}) + \left(1 - \sum_{i_L=1}^{2} f_z(i_{SV})\right) \tag{3}$$

gde $1 - \sum_{i_L=1}^{2} f_z(i_{SV})$

predstavlja deo zone nekontrolisan od referentnih tačaka. Za taj deo električno osvetljenje se ne uzima u obzir i faktor snage je 1.

Za postignut kvalitet kontrole raspoloživosti dnevnog osvetljenja odabranom tehnologijom odnosno tehnikom dnevnog osvetljenja, po određivanju preostalih potreba za veštačkim osvetljenjem zatim se ispituju mogućnosti njegovog minimiziranja, izborom prikladnog načina odnosno sistema njegove kontrole.

Relativan udeo potrebne električne snage f_P koji odgovara f_{SV} određuje se u zavisnosti od izbora tipa kontrole. U ovom radu se analiziraju dva načina kontrole veštačkog osvetljenja i njihov uticaj na smanjenje potrebe za električnim osvetljenjem korišćenjem dnevnog svetla.

Kontinualna kontrola veštačkog osvetljenja. Za kontinualno kontrolisani sistem, pretpostavlja se da je f_p konstantno i jednako f_{pmin} za $f_{SV} < f_{SVmin}$ i da se f_p povećava linearno od f_{pmin} do 1 sa porastom f_{SV} od f_{SVmin} do 1 (slika 2).

$$f_p = \left\{ f_{p,\min} \quad za\, f_{SV} < f_{SV,\min};\ \frac{f_{SV} + (1 - f_{SV}) f_{p,\min} - f_{SV,\min}}{1 - f_{SV,\min}} \quad za\, f_{SV} < f_{L,\min} \le 1 \right\} \tag{4}$$

Stepenasta kontrola. Za stepenastu kontrolu, f_P uzima diskretne vrednosti u zavisnosti od opsega f_{SV} i broja koraka N_{SV} (slika 3).

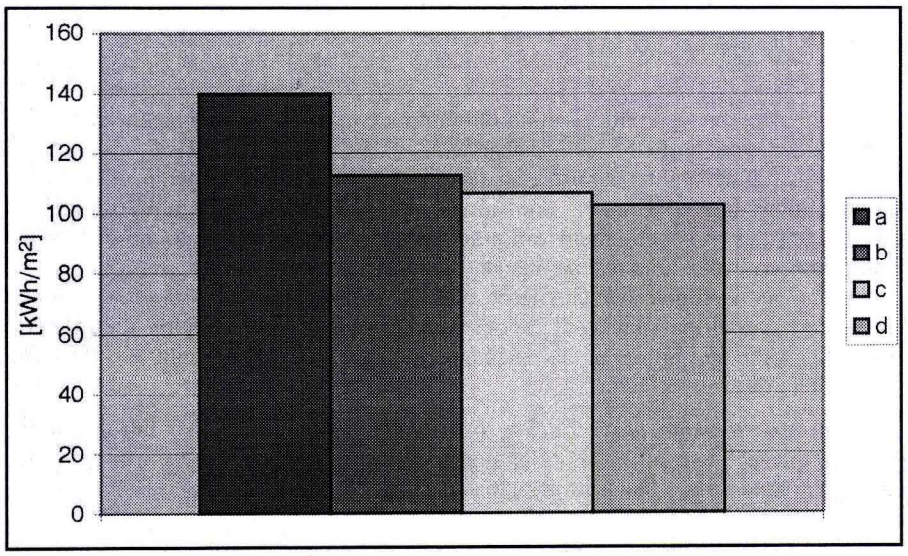
$$f_p = \left\{ 0 \;\; za\, f_{SV} = 0; \;\; \frac{\text{int}(N_{SV} f_{SV}) + 1}{N_{SV}} \;\; za \;\; 0 < f_{SV} \leq 1; 1 \; za \; f_{SV} = 1 \right\} \quad (5)$$

Ako se verovatnoća upotrebe ovog vida kontrole osvetljenja, p_{SV}, odredi, f_P se postavlja na jedan nivo više kao deo vremena jednak $1 - p_{SV}$. Određeno, ako $f_p < 1$, $f_p - f_p + 1/N_{SV}$ ako je proizvoljni broj između 0 i 1 prevazilazi p_{SV}. To može da se koristi za simulaciju nepredvidivosti vezanu za manuelno gašenje svetla.

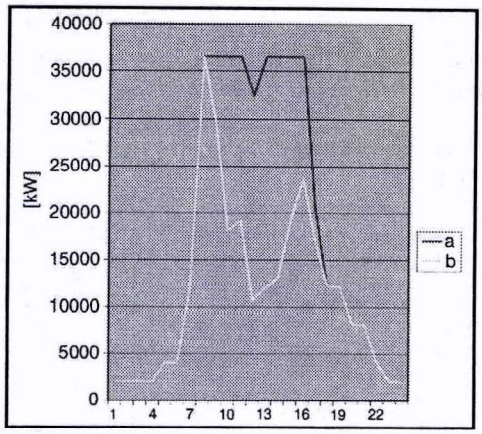
Najzad, na osnovu mogućih efekata smanjenja potreba energije za veštačko osvetljenje, definisanih faktorom redukcije potrošnje električne energije, vrši se dalje određivanje termičkog opterećenja i potreba za hlađenjem (u letnjem režimu rada), ili smanjenja opterećenja za grejanje (u zimskom režimu rada).

3. Smanjenje potrošnje električne energije regulacijom intenziteta veštačkog osvetljenja

Ispitivanje mogućnosti smanjenja potrošnje električne energije za osvetljenje kontrolom intenziteta veštačkog osvetljenja u zavisnosti od raspoloživosti unutrašnjeg dnevnog osvetljenja sprovedeno je dinamičkim simulacijama „dnevnog osvetljenja" za jedan poslovni centar u uslovima tipične meteorološke godine za referentno područje crnogorskog primorja. Posmatrani objekat ima korisnu površinu od 2895 m^2. Omotač objekta karakteriše odnos površine stakla i ukupne površine zidova omo-



Slika 2. Zavisnost ukupne godišnje električne energije od promene intenziteta veštačkog osvetljenja



Slika 3. Dnevna dinamika promene električnog opterećenja od osvetljenja

tača od 19% (za zidove svih orijentacija). Merodavne osobine stakla prozora su: propustljivost vidljive svetlosti je $VT = 0{,}88$ (odnos propuštene svetlosti i upadne svetlosti na ravan stakla).

Prilikom dinamičkih simulacija ispitivanog scenarija uzima se u obzir da se zastori na prozorima spuštaju kad nivo odbljeska svetlosti u radnom prostoru pređe propisani nivo definisan za kancelarijski prostor indeksom 20, odnosno kada intenzitet normalnog sunčevog zračenja pređe 100 W/m^2. Modeliranjem, dinamičkim simulacijama ispitani su sledeći načini i režimi kontrole dnevnog osvetljenja:

a) radni prostor osvetljava se plafonskim osvetljenjem intenziteta 500 lukseva i osvetljenje radi tokom celog perioda radnog vremena;

b) vrši se regulacija isključivanja i uključivanja veštačkog osvetljenja, istog intenziteta kao u osnovnom slučaju sa promenom intenziteta dnevnog svetla;

c) kontrola kontinualnom regulacijom intenziteta veštačkog osvetljenja sa promenom intenziteta dnevnog svetla;

d) radni prostor se osvetljava sa plafonskim osvetljenjem intenziteta 300 lukseva, čije se uključivanje i isključivanje definiše intenzitetom dnevnog svetla, a na radnim mestima zaposleni stonim svetiljkama dopunjuju i regulišu potreban intenzitet osvetljenja.

Rezultati simulacija su prikazani dijagramima na slikama 2 i 3, na kojima se vidi da je ušteda na godišnjem nivou značajna čak pri primeni jednostavnijih sistema centralne regulacije osvetljenja isključivanjem i uključivanjem.

Primena kontinualne regulacije intenziteta dnevnog osvetljenja zahteva veće investicione troškove (približno duplo veće) od troškova diskontinualne regulacije, ali pored smanjenja potrošnje električne energije omogućava veću vidnu udobnost zaposlenih. U četvrtom slučaju smanjenjem intenziteta osnovnog plafonskog osvetljenja i postavljanjem lokalnog osvetljenja na radnom mestu postižu se manji investicioni troškovi nego u prvom slučaju.

4. Zaključak

Zbog malog efekta koji energija potrebna za grejanje ima na ukupnu potrošnju energije u toku godine, poslovni objekti sa staklenim površinama koje omogućavaju dovoljan prodor dnevne svetlosti u radne prostorije, sa kontrolisanim zastorima koji sprečavaju neželjeni uticaj direktnog prodora sunčevih zraka u letnjem režimu, mogu da obezbede dovoljanu količinu dnevne svetlosti za radne potrebe tokom većeg dela godine u klimatskim uslovima južnomediteranske klime. Automatskom regulacijom rada veštačkog osvetljenja moguće je ostvariti značajne uštede u potrošnji električne energije, kao i uštede u novcu s obzirom na sadašnji nivo cena električne energije.

Literatura

[1] ***: *Energy and Environment,* Division Lawrence and Berkeley Laboratory University of California: „*DOE2.1E Supplement, Daylighting Calculations*", November, 1993, pp. 2.37–2.38.

[2] **Winkelmann, F. C.:** *Daylighting Calculation in DOE-2,* Lawrence Berkeley Laboratory report no. LBL-11353, January, 1983.

[3] **Winkelmann, F. C. and S. Selkowitz:** *Daylighting simulation in DOE-2,* Building simulation program, Energy and Buildings, LBL-18508, October, 1984.

[4] **Rančić, P. D. i D. G. Zulkić:** *Raspoloživost dnevnog svetla pri karakterizaciji dnevnog osvetljenja,* Osvetljenje 2000, Soko Banja, 2000.

[5] **Rančić, D. Predrag:** *Prilozi svetlotehničkim karakterizacijama,* jun, 1997.

[6] **Lynes, J. A.:** *Principles of Natural Lighting,.* Applied Science Publishers, Ltd., London, 1968, pp. 129.

[7] ***: *The Reference to EnergyPlus Calculations,* EnergyPlus Engineering Document, LBL, April, 2001.