

**DINAMIČKI MODEL ZGRADE –
FUNKCIONISANJE SISTEMA CENTRALNOG GREJANJA U
STARTNIM REŽIMIMA, PRI PROMENLJIVOM POLOŽAJU
IZOLACIJE, SA DOGREVANJEM ILI BEZ NJEGA**

DYNAMIC MODEL OF A BUILDING – FUNCTIONING
OF THE CENTRAL HEATING SYSTEM IN START MODES AT
VARIABLE INSULATION POSITION, WITH OR WITHOUT REHEATING

**Dr Nebojša Lukić, dipl. inž., i Goran Radivojević, dipl. inž.,
Mašinski fakultet, Kragujevac**

Na naučno verifikovanom i eksperimentalno potvrđenom dinamičkom modelu zgrade, ispituje se funkcionisanje centralnog sistema grejanja u startnim režimima, kada veliki uticaj na potrošnju energije u prostorijama ima nezažrejeni termički omotač zgrade. Prati se zavisnost ukupne potrošnje toplotne energije, između ostalog i od položaja izolacije u termičkom omotaču zgrade, pri primenjenom dogrevanju prostora ili bez njega. Kvalitet ostvarene temperature vazduha u prostoriji prati se preko broja stepen-časova. Uticaj akumulirane „hladnoće” u zidovima na potrošnju toplotne energije i ostvarenu temperaturu u prostoriji prati se preko veličine koeficijenta termičkog odziva omotača zgrade (BER). Rezultati pokazuju da postoje situacije (BER maksimum) kada se, bez obzira na velike utroške energije, postiže loša termička ugodnost u zgradi.

On a scientifically verified and experimentally proven dynamic model of a building, the functioning of the central heating system in start modes are analyzed when unheated thermal envelope of the building has a significant influence on energy consumptions in rooms. The dependence of total heat power consumption on, among others, the insulation position in the building's thermal envelope, with or without room reheating, is considered in the paper. The quality of achieved indoor air temperature is monitored via the number of degree-hours. The influence of accumulated "cold" in the wall on the heat power consumption and achieved indoor temperature are monitored via the coefficient of the thermal building envelope reply (BER). The results show that there are some situations (BER maximum) when low thermal comfort is achieved regardless the large power consumption.

Ključne reči: dinamički model zgrade; startni režimi; termički omotač
Key words: dynamic model of a building; start modes; thermal envelope

1. Uvod

Kako je to već rečeno [1], proračuni potrošnje toplotne energije, potrebne za klimatizaciju unutrašnjih zgrada, baziraju se sve više na dinamičkim modelima zgrada. Ovim modeli se mogu podeliti na modele na bazi numeričkih [2 i 3], harmonijskih ili metoda termičkog odziva zgrade [4 i 5].

Ispitivanja ponašanja termičkih omotača zgrada u radovima sprovodi se tako što se koriste komercijalni programi dostupni na tržištu (predviđeni za tu namenu) [6 i 7], ili se formiraju originalni modeli na kojima se sprovode određene simulacije. Ovaj drugi način je primenjen u ovom radu. Koristi se originalni softver DZID, naučno verifikovan [2], koji se dograđuje i upotpunjava novim funkcijama.

U radu se pre svega posmatra ponašanje termičkog omotača zgrade kao pasivnog izvora toplote, ili u ovom slučaju „hladnoće”. U startnim režimima zagrevanja zgrade, koji nastaju posle dužih prekida u funkcionisanju grejnog sistema, termički omotač zgrade (laki ili teški) predstavlja ozbiljnu prepreku u brzom postizanju željene temperature u prostoriji. Simulira se ponašanje termičkog omotača zgrade bez izolacije i sa njom. Izolacija je smeštena kao unutrašnji, spoljašnji ili središnji sloj omotača zgrade. Svi pomenuti slučajevi se izučavaju.

Uvode se veličine stepen-čas i koeficijent BER (building envelope response). Obe veličine su aktuelne samo u startnim i prelaznim režimima zagrevanja (ili hlađenja) prostorija, kada temperatura vazduha ili termička ugodnost u unutrašnjosti nisu dostigle zadati nivo.

2. Dinamički model zgrade

Korišćeni dinamički model zgrade baziran na numeričkim metodama, objašnjen je u [2 i 8]. Novina u modelu-softveru je mogućnost računanja dve gore pomenute veličine.

Veličina stepen-čas Sh ($^{\circ}Ch$) predstavljena je jednačinom (2.1):

$$Sh = \sum_{T_p}^{T_k} \Delta T_{tk} \Delta \tau \quad (2.1)$$

gde je $\Delta T_{tk} = T_{tk} - T_u$ ($^{\circ}C$), razlika između zadate (T_{tk}) i postojeće temperature vazduha u prostoriji (T_u) u tekućem vremenskom trenutku, a $\Delta \tau$ (h) vremenski proračunski korak. Integracija se vrši od vremena početka klimatizacije zgrade (T_p) do vremena njenog prestanka (T_k), za posmatrani grejni dan. Negativne razlike ΔT_{tk} se ne uzimaju u obzir, odnosno u tom slučaju veličina ΔT_{tk} ima vrednost 0. Što je veća veličina Sh , u toku jednog grejnog dana, veća su i odstupanja od neke zadate temperature vazduha u prostoriji, drugim rečima otvoreni termički komfor u zgradi je lošiji.

Koeficijent termičkog odziva zgrade je predstavljen kao:

$$BER = \sum_{T_p}^{T_k} Q \Delta \tau \Delta T_{tk} \Delta \tau \quad (2.2)$$

gde je Q (W) snaga grejanja (radijatori i eventualno dogrevni izvori toplote) u tekućem trenutku. Veličina BER uzeta za jedan grejni dan, pokazuje kakav je efekat proizvela angažovana grejna snaga na temperaturu vazduha u zgradi. Veličina je aktuel-

na za prelazne i startne režime grejanja, kada je veličina stepen-čas veća od nule. U slučajevima neprekidnog grejanja i održavanja propisane temperature, ova veličina bi trebalo da bude jednaka nuli. Kaže se treba, jer ne postoji sistem klimatizacije koji nema određenu inerciju, tako da u slučaju naglih spoljašnjih promena uticajnih veličina, mora doći i do pojave da je $\Delta T_{tk} > 0$.

3. Simulacija potrošnje toplotne energije u zgradi

3.1. Polazni podaci

Podaci koji su korišćeni kao konstantne ili promenljive veličine modela, nalaze se u tekstu koji sledi.

Termodinamičke karakteristike omotača zgrade:

- dimenzije zgrade (jednkomorne): $10 \times 10 \times 3$ m;
- omotač je promenljivih karakteristika i to:

1. Jednoslojni betonski omotač debljine 25 cm, gustine 2000 kg/m^3 , specifične toplote 840 J/kgK , toplotne provodljivosti $1,28 \text{ W/mK}$.

2. Dvoslojni betonsko-izolacioni omotač; beton debljine 25 cm istih gore pomenutih karakteristika i izolacioni sloj debljine 5 cm, gustine 40 kg/m^3 , specifične toplote 670 J/kgK , toplotne provodljivosti $0,06 \text{ W/mK}$; položaj slojeva: izolacija je unutrašnji sloj.

3. Dvoslojni betonsko-izolacioni omotač, beton debljine 25 cm istih gore pomenutih karakteristika i izolacioni sloj debljine 5 cm, istih gore pomenutih karakteristika; položaj slojeva: izolacija je spoljašnji sloj.

4. Troslojni betonsko-izolaciono-betonski omotač, jedan sloj betona debljine 12,5 cm istih gore pomenutih karakteristika i izolacioni sloj debljine 5 cm, istih gore pomenutih karakteristika; položaj slojeva: izolacija je središnji sloj (između dva betonska sloja, svakog debljine 12,5 cm):

- koeficijent emisije spoljnih površina omotača zgrade 0,8. Svi zidovi, krov i pod zgrade su iste debljine. Udeo staklenih površina u ukupnoj površini južnog i severnog zida iznosi 20%, dok je za ostale zidove, krov i pod zgrade ovaj udeo jednak nuli;

- podaci vezani za sunčevo zračenje: geografska širina položaja zgrade 44° , geografska dužina 21° , nadmorska visina 130 m, datum 10. 01, orijentacija severnog zida 0° (ugao između smera severa i normale površine datog zida), nagib krova zgrade 30° , orijentacija krova 180° (ugao između smera severa i projekcije normale krova na horizontalnu ravan), udeo jasnih sunčanih sati u danu 70% (pretežno vedro);

- podaci vezani za druge spoljašnje uslove: koeficijent prelaza toplote na spoljnoj površini omotača zgrade $15 \text{ W/m}^2\text{K}$, konstantna temperatura zemljišta ispod poda zgrade 8°C , promena spoljne temperature vazduha je u obliku sinusoide, srednje vrednosti 0°C , 5°C i 10°C i amplitude 5°C . Maksimalna spoljna temperatura vazduha se dostiže u 13 h, a minimalna u 01 h;

- podaci vezani za unutrašnje uslove: koeficijent prelaza toplote na unutrašnjoj površini omotača zgrade $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, konstantno provetravanje prostorije 1 izmena/h, zagrevanje prostorije se vrši centralnim radijatorskim grejanjem u kombinaciji sa dogrevanjem električnim grejačem snage 3, 5, 10 i 15 kW. Temperatura primarne vode centralnog radijatorskog grejanja se menja u direktnoj zavisnosti od spoljne temperature (sinusoide), kako je to objašnjeno u [8]. Sve karakteristike elemenata i veličina vezanih za sistem centralnog su takođe kao u [1]. Zadana temperatura vazduha u zgra-

di je $20 \pm 1^\circ\text{C}$, s tim što se u slučaju da temperatura vazduha u prostoriji dostigne vrednost od 21°C , isključuje samo sistem dogrevanja (električni grejač). Sistem je izabran tako da je grejanje radijatorskim sistemom nedovoljno naročito u prvom delu grejnog dana koji traje od 08 h do 20 h;

– startni režim grejanja podrazumeva da su temperature materijala zidova jednake spoljnoj temperaturi, u početnom trenutku simulacije.

3.2. Izabrana simulaciona okruženja

Razmatraju se četiri tipa omotača zgrade:

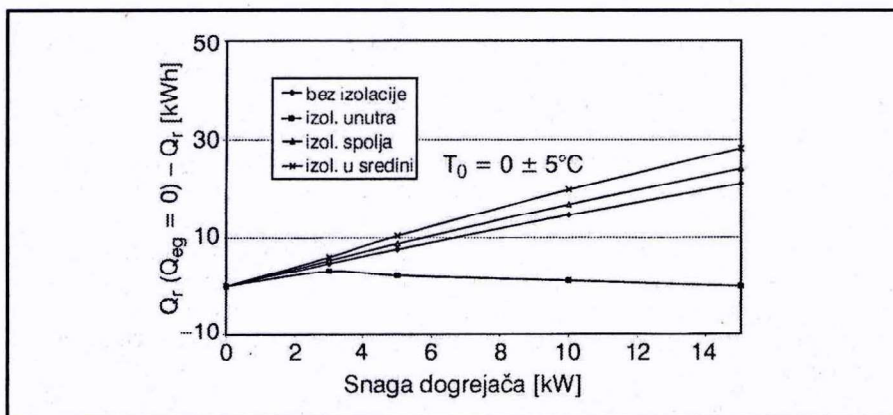
1. zgrada bez izolacije,
2. zgrada sa izolacijom smeštenom kao unutrašnji sloj dvoslojnog zida,
3. zgrada sa izolacijom smeštenom kao spoljašnji sloj dvoslojnog zida,
4. zgrada sa izolacijom smeštenom u sredini troslojnog zida (za konkretne vrednosti videti odeljak 3.1), za tri sinusoidne promene spoljne temperature $0 \pm 5^\circ\text{C}$, $5 \pm 5^\circ\text{C}$ i $10 \pm 5^\circ\text{C}$, za pet toplotnih snaga raspoloživih, električnih dogrevača: 0, 3, 5, 10 i 15 kW.

Izučavaju se sve moguće kombinacije, a registruju se: potrošnja energije na radijatorima Q_r [kWh], na električnim grejačima Q_{eg} [kWh], ukupna potrošnja $Q = Q_r + Q_{eg}$ [kWh], stepen-dan veličina u okviru jednog grejnog dana Sh ($^\circ\text{Ch}$) i koeficijent BER ($\text{kW}^\circ\text{Ch}^2$), takođe u okviru jednog grejnog dana.

3.3. Rezultati simulacija

Na slici 3.1 je prikazana zavisnost ostvarenih razlika količine toplote razmenjene samo na radijatorima, bez dogrevanja i sa dogrevanjem (0–15 kW), za neizolovanu i izolovanu zgradu, pri spoljnoj temperaturi $0 \pm 5^\circ\text{C}$, za posmatrani grejni dan, u starnom režimu grejanja.

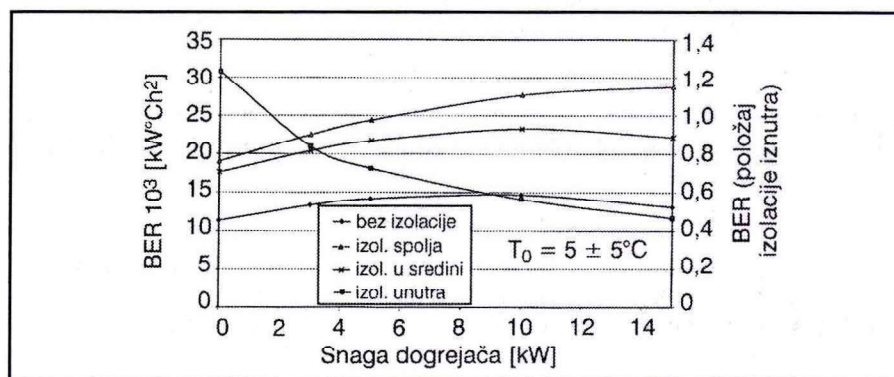
Najmanji uticaj na razmenu toplote rad dogrevača ima za izolovanu zgradu, položaj izolacije unutra. To je razumljivo, jer kako je hladan betonski omotač relativno ve-



Slika 3.1. Razlika utrošene toplotne energije radijatora bez dogrevanja i sa dogrevanjem, u zavisnosti od snage dogrevanja, pri spoljnoj temperaturi $0 \pm 5^\circ\text{C}$, za posmatrani grejni dan

likog toplotnog kapaciteta, od unutrašnjosti zgrade razdvojen izolacionim slojem, sistem grejanja veoma brzo dostiže zadatu temperaturu u prostoriji (kada dolazi do nazmeničnog uključivanja/isključivanja električnog dogrejača). Za velike snage dogrejača dolazi čak do neznatnog povećanja razmenjene toplote na radiatorima, ali to je već problem ujednačenosti sobne temperature u periodima uključenje/isključenje dogrejača. Kako je to već pokazano u [1], kako rad dogrejača povišava temperaturu u prostoriji, on istovremeno smanjuje razmenjenu količinu toplote na radiatorima. Što je to povišenje značajnije, manja je razmenjena količina toplote na radiatorima. Zanimljivo da u imuliranim situacijama najveću „smetnju” razmeni toplote na radiatorima predstavlja slučaj izolovane zgrade, položaj izolacije u sredini zida.

Na slici 3.2 prikazana je promena koeficijenta BER (jednačina 2.2) u zavisnosti od snage dogrevanja prostorije, za izolovanu/neizolovanu zgradu, pri spoljnoj temperaturi $5 \pm 5^\circ\text{C}$, za posmatrani grejni dan, u startnom režimu grejanja.



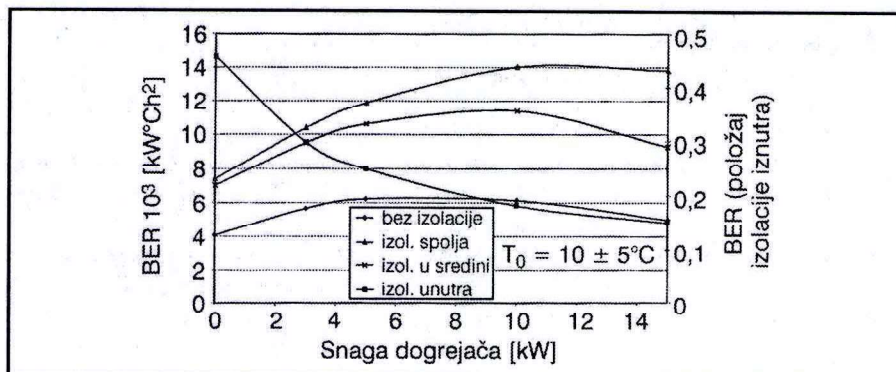
Slika 3.2. Koeficijent termičkog odziva zgrade (BER), u zavisnosti od snage dogrevanja, pri spoljnoj temperaturi $5 \pm 5^\circ\text{C}$, za posmatrani grejni dan

Možemo uočiti tri različite promene – trenda koeficijenta BER: opadajući, rastuće-opadajući (postoji maksimum) i rastući. Kako je veće dogrevanje, manja je veličina stepen-časa (Sh), odnosno bolja je termička ugodnost. U slučaju unutrašnjeg hladnog betonskog omotača zgrade, koji je od spoljašnjeg porasta temperature razdvojen izolacionim slojem, veliki deo toplotne energije troši se upravo na njegovo zagrevanje, drugim rečima – iako je snaga grejanja/dogrevanja velika, mali su efekti na povećanje termičke ugodnosti (za jedan grejni dan, 8–20 h).

Tačka maksimuma koeficijenta BER pokazuje slučaj kada termički omotač zgrade ima najveći uticaj na promenu temperature u prostoriji. Jasno je da se radi o režimima koje bi, ukoliko je to moguće, trebalo izbeći, jer u opisanim slučajevima termički omotač zgrade predstavlja ozbiljnu smetnju postizanju zadovoljavajuće termičke ugodnosti u zgradi.

Slučajevi kada koeficijent BER opada (unutrašnji položaj izolacije) i to posle tačke kada se nagib krive primetno smanjuje (dogrevanje oko 4 kW), jesu oni kada toplotni kapacitet termičkog omotača zgrade nema značajan uticaj na temperaturu u prostoriji. Teorijski koeficijent BER opada do nule, ali kako je to već rečeno, u realnim uslovima to je veoma teško ostvariti.

Na slici 3.3 prikazana je identična zavisnost, kao i na slici 3.2, ali sada za spoljnu temperaturu $10 \pm 5^\circ\text{C}$.



Slika 3.3. Koeficijent termičkog odziva zgrade (BER), u zavisnosti od snage dogrevanja, pri spoljnoj temperaturi $10 \pm 5^\circ\text{C}$, za posmatrani grejni dan

Jasno, apsolutne vrednosti koeficijenta BER su niže za sve ispitivane slučajeve. Ono što je zanimljivo primetiti jeste da i kriva za najnepovoljniji slučaj položaja izolacije spolja ima svoj maksimum (dogrevanje oko 11 kW).

4. Zaključak

Autori su želeli da u ovom radu istaknu uticaj pasivnih izvora toplote/”hladnoće” na grejne sisteme, utrošak toplotne energije i nivo termičke ugodnosti u prostoriji. Kao što je pokazano, njihov uticaj može biti daleko značajniji od spoljašnjih temperaturnih i drugih promena, na temperaturu vazduha u unutrašnjosti zgrade, u specifičnim uslovima kakvi su startni i prelazni režimi, koji sa druge strane ne mogu da se izbegnu. Poseban doprinos ovog rada, kako autori smatraju, jeste uvođenje koeficijenta BER, koji do sada nije korišćen u pregledanoj literaturi, a uveden je baš iz razloga boljeg sagledavanja uticaja termičkog omotača zgrade u prelaznim režimima klimatizacije. Pokazano je da postoji tačka kada je taj uticaj najizraženiji, a predstavljena je maksimumom koeficijenta BER. Potvrda značaja uvedenog koeficijenta biće dobijena i u nekom od priznatih međunarodnih časopisa iz ove tematike.

Literatura

- [1] Lukić, N.: *Dinamički model zgrade – uticaj dogrevanja prostorija na funkcionisanje radijatorskog grejanja*, zbornik radova sa 31. kongresa o KGH, SMEITS, Beograd, 2000, str. 55–61.
- [2] Bojić, M., N. Lukić: *Numerical Evaluation of Solar Energy Use Through Passive Heating of Weekend Houses in Yugoslavia*, Renewable Energy, No. 20 (2000), Elsevier Science, 2000, pp. 207–222.
- [3] Price, B. A, and T. F. Smith: *Thermal Response of Composite Building Envelopes Accounting for Thermal Radiation*, Energy Convers. Mgmt, Vol. 36, NO. 1, 1995, pp. 23–33.

- [4] **Mathews, E. H., P. G. Richards, C. Lombard:** *A first-order thermal model for building design*, Energy and Buildings, No. 21, 1994, pp. 133–145.
- [5] **Richards, P. G., E. H. Mathews:** *A Thermal Design Tool for Buildings in Ground Contact*, Building and Environment, Vol. 29, No. 1, 1994, pp. 73–82.
- [6] **Bojić, M., F. Yik, K. Wan, J. Burnett:** *Investigations of Cooling Loads in High-Rise Residential Buildings in Hong Kong*, Proceedings of the ASME-ZSITS International Thermal Science Seminar, June 11–14, 2000, Bled, Slovenia, pp. 505–510.
- [7] **Bojić, M., F. Yik, P. Sat:** *Influence of thermal insulation position in building envelope on the space cooling of high-rise residential buildings in Hong Kong*, Energy and Buildings, 33/6 (2001), pp. 569–581.
- [8] **Lukić, N.:** *Kvalitet unutrašnjeg vazduha u zgradama sa centralnim grejanjem u toku grejnog dana*, zbornik radova sa 30. kongresa o KGH, SMEITS, Beograd, 1999. str. 228–234.