

# PROMENA KOEFICIJENTA TERMIČKOG ODZIVA OMOTAČA ZGRADE (BER), TOKOM PRELAZNIH REŽIMA GREJANJA

CHANGE OF BUILDING ENVELOPE RESPONSE FACTOR (BER)  
DURING HEATING TRANSIENT REGIME

**Dr Nebojša Lukić, dipl. inž., Mašinski fakultet, Kragujevac**

---

*Na naučno verifikovanom i eksperimentalno potvrđenom dinamičkom modelu zgrade, ispituje se promena prethodno definisanog [1, 2] koeficijenta termičkog odziva zgrade (BER), tokom karakterističnih prelaznih režima grejanja (prekidi grejanja, promene spoljašnjih uslova). Koeficijent BER (Building Envelope Response factor) izračunava se za svaki čas posmatranog grejnog dana i prezentuje se njegova promena za karakteristične simulirane modele zgrade i grejne režime. Ovim istraživanjem se želi istaći značaj novouvedenog koeficijenta u praćenju sprege potrošnja energije – ostvarena termička ugodnost u prelaznim režimima grejanja zgrade.*

---

*In this paper, a transient regime of central heating system was simulated by dynamical model of building-software (DZID). In investigated cases, the transient heating regime has a significant influence on the thermal comfort in a building. The simulation model of building with and without insulation was investigated. The heating system is made as a combination of radiators and electrical heater. The building envelope response factor is used as the value influencing the thermal comfort. The variation of the BER factor is calculated for each hour of one heating day. The results of investigation show that for different simulated scenarios, the BER factor can point to the heating regimes with the highest or the lowest influence on the thermal building envelope.*

---

**Ključne reči:** grejanje; dinamički model zgrade; prelazni režim i koeficijent BER  
**Key words:** heating; building dynamic model; transient regime; BER factor

## 1. Uvod

Proračuni potrošnje toplotne energije, potrebne za klimatizaciju unutrašnjosti zgrada, baziraju se sve više na dinamičkim modelima zgrada. U ranije objavljenim radovima dosta je rečeno o ovim modelima [1, 2, 3, 4].

Ispitivanja ponašanja termičkih omotača zgrada, nezavisno od primenjene metode u formiranju samog modela, u istraživanjima se sprovodi tako što se koriste komercijalni programi dostupni na tržištu [5, 6] (to su većinom širokoobuhvatni mod-

eli: DOE-2, BLAST, ESP, ..., na čijoj izradi radi veliki broj eksperata i za čije se korišćenje, na ime autorskih prava plaćaju značajne sume novca), ili se formiraju originalni modeli prilagođeni manjem broju prethodno definisanih primena na kojima se sprovode određene simulacije. Ovaj drugi način se već niz godina primenjuje na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu na Katedri za energetiku i procesnu tehniku i više značajnih rezultata stoje iza ovog dugoročnog istraživanja [1, 2, 7]. Radi se o softveru DZID, koji se prema sve većim potrebama, dograđuje i upotpunjava novim funkcijama.

U istraživanju koje je prethodilo ovom radu [2, 3], definisan je koeficijent BER iz časa u čas tokom definisanog grejnog dana. Ovim radom se želi ukazati na časovne promene koeficijenta BER, za iste modele i režime, kao i u [2, 3]. Mišljenje autora je da koeficijent BER može biti značajan pokazatelj i za mnogo uređenije sisteme centralnog grejanja od sistema srpskih gradova. U svakom slučaju, sa više prisutnih prelaznih grejnih režima (prekidi u zagrevanju, velika inercija sistema, dogrevanje, nepredviđeni zastoji u radu), razmatrani koeficijent dobija na težini.

## 2. Dinamički model zgrade

Korišćeni dinamički model zgrade baziran na numeričkim metodama, objašnjen je u [1 i 2]. Novina u modelu–softveru je mogućnost računanja koeficijenta termičkog odziva zgrade – BER ( $\text{kW}^\circ\text{Ch}^2$ ), za svaki čas posmatranog grejnog dana:

$$BER = \sum_{\tau_p}^{\tau_k} (Q \Delta \tau) \sum_{\tau_p}^{\tau_k} (\Delta T_{tk} \Delta \tau) \quad (2.1)$$

gde je  $\sum(\Delta T_{tk} \Delta \tau)$  veličina stepen-časa  $Sh$  ( $^\circ\text{Ch}$ ) definisana u [2, 3],  $\Delta T_{tk} = T_{tk} - T_u$  ( $^\circ\text{C}$ ), 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 početnog  $\Delta \tau_p$ , do krajnjeg trenutka  $\tau_k$ , odnosno za jedan sat grejnog dana ( $\tau_k - \tau_p = 1\text{h}$ ). Negativne razlike  $\Delta T_{tk}$  se ne uzimaju u obzir, odnosno u tom slučaju veličina  $\Delta T_{tk}$  ima vrednost 0,  $Q$  (kW) snaga grejanja (radijatori i eventualno dodatni izvori toplote) u tekućem trenutku. Kako je to već rečeno u [3], veličina BER pokazuje kakav je efekat proizvela angažovana grejna snaga na temperaturu vazduha u zgradi (uslovno termička ugodnost). Veličina je aktuelna za prelazne i startne režime grejanja, kada je veličina stepen-časa 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, dolazi i po pojave da je  $\Delta T_{tk} > 0$ .

## 3. Simulacija grejnog dana

### 3.1. Polazni podaci

Podaci koji su korišćeni kao konstantne ili promenljive veličine modela, najvećim delom su identični sa podacima korišćenim u [2 i 3] ali se zbog preglednosti rada, zaokruženi daju u tekstu koji sledi.

Termodinamičke karakteristike omotača zgrade:

- Dimenzije zgrade (jednokomorne): 10 x 10 x 3 m.
- Omotač je promenljivih karakteristika i to:



1) jednoslojni betonski omotač debljine 25 cm, gustine 2000 kg/m<sup>3</sup>, specifične toplote 840 J/kgK, toplotne provodljivosti 1,28 W/mK;

2) dvoslojni betonsko-izolacioni omotač; beton debljine 25 cm istih gore spomenutih karakteristika i izolacioni sloj debljine 5 cm, gustine 40 kg/m<sup>3</sup>, specifične toplote 670 J/kgK, toplotne provodljivosti 0,06 W/mK; položaj slojeva: izolacija je unutrašnji sloj;

3) dvoslojni betonsko-izolacioni omotač, beton debljine 25 cm istih gore spomenutih karakteristika i izolacioni sloj debljine 5 cm, istih gore spomenutih karakteristika, položaj slojeva: izolacija je spoljašnji sloj;

4) troslojni betonsko-izolaciono-betonski omotač, jedan sloj betona debljine 12,5 cm istih gore spomenutih karakteristika i izolacioni sloj debljine 5 cm, istih gore spomenutih 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 iste su 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 W/m<sup>2</sup>K, konstantna temperatura zemljišta ispod poda zgrade 8°C, promena spoljne temperature vazduha je u obliku sinusoide, srednje vrednosti 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 W/m<sup>2</sup>K, konstantno provetravanje prostorije 1 izmena/h, zagrevanje prostorije se vrši centralnim radijatorskim grejanjem u kombinaciji sa dogrevanjem električnim grejačem snage 3 kW. Temperatura primarne vode centralnog radijatorskog grejanje menja se u direktnoj zavisnosti od spoljne temperature (sinusoide), kako je to objašnjeno u [8]. Sve karakteristike elemenata i veličina vezanih za sistem centralnog su takode kao u [4]. Zadana temperatura vazduha u zgradi je 20±1°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 do 20 h.

– Prvi simulirani grejni dan podrazumeva da su temperature materijala zidova jednake spoljnoj temperaturi, u početnom trenutku simulacije. Za drugi i svaki naredni, simulirani, grejni dan temperature materijala zidova u početnom trenutku simulacije se nadovezuju na odgovarajuće temperature u krajnjem trenutku simulacije prethodnog dana.

### 3.2. Izabrana simulaciona okruženja

Razmatraju se četiri tipa omotača zgrade:

1) zgrada bez izolacije,

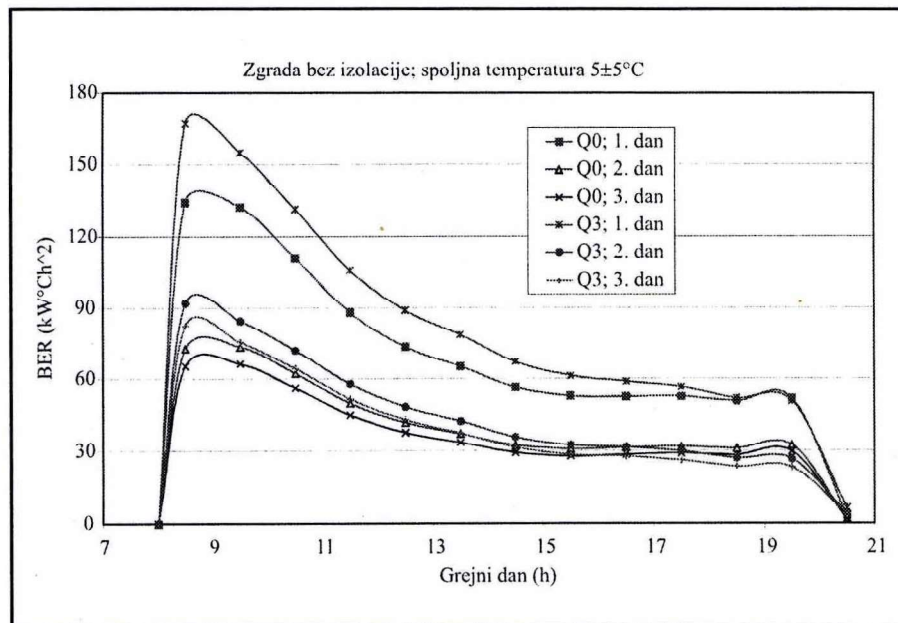
- 2) zgrada sa izolacijom smeštenom kao unutrašnji sloj dvoslojnog zida,
- 3) zgrada sa izolacijom smeštenom kao spoljašnji sloj dvoslojnog zida,
- 4) zgrada sa izolacijom smeštenom u sredini troslojnog zida (za konkretne vrednosti videti odeljak 3.1),
  - za dve sinusoidne promene spoljne temperature  $5\pm 5^{\circ}\text{C}$  i  $10\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,
  - za slučaj dogrevanja, snaga električnog dogrejača iznosi 3 kW,
  - za tri uzastopna grejna dana.

Izračunavaju se sve moguće kombinacije, a registruju se: potrošnja energije na radiatorima  $Q_r$  (kWh), na električnim grejačima  $Q_{cg}$  (kWh), ukupna potrošnja  $Q_u = Q_r + Q_{cg}$  (kWh), stepen-dan veličina, za svaki sat posmatranog grejnog dana  $Sh$  ( $^{\circ}\text{Ch}$ ). Sve pomenute veličine koriste se u izračunavanju odgovarajućeg koeficijenta BER ( $\text{kW}^{\circ}\text{Ch}^2$ ) (jednačina 2.1), jasno za svaki sat posmatranog grejnog dana.

### 3.3. Rezultati simulacija

Na slici 3.1 prikazana je promena koeficijenta BER za zgradu sa dogrevanjem (Q3) ili bez dogrevanja (Q0), za prvi dan (1. dan), drugi (2. dan) ili treći grejni dan (3. dan), za omotač bez izolacije (25 cm betonski zid), pri spoljnoj temperaturi  $T_o = 5\pm 5^{\circ}\text{C}$ , tokom dvanaestočasovnog grejnog dana.

Dakle, radi se o zgradi sa betonskim neizolovanim omotačem, sa hladnim zidovima na početku grejnog dana (prekidi u zagrevanju), a što je naročito izraženo za prvi grejni dan. Tog dana za slučajeve i sa dogrevanjem i bez dogrevanja, koeficijent BER uzima najveće vrednosti, a što je posledica akumulirane „hladnoće“ u



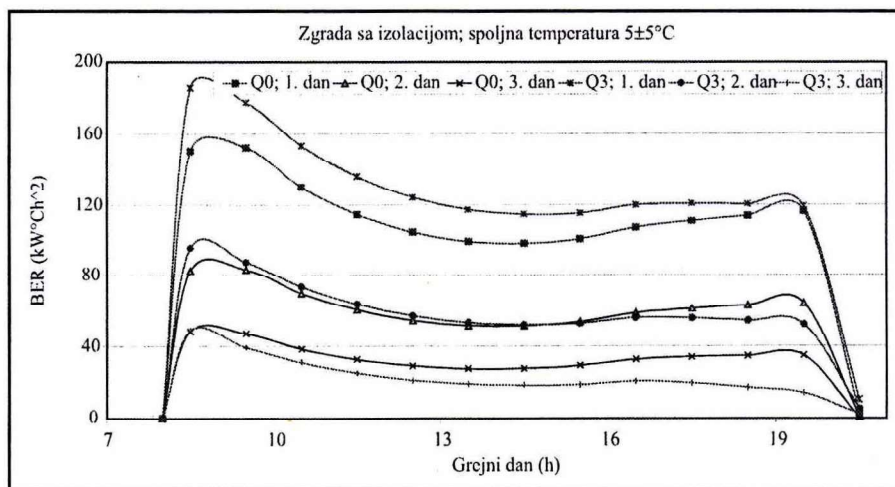
Slika 3.1. Promena koeficijenta BER za zgradu sa dogrevanjem (Q3) ili bez dogrevanja (Q0), za prvi (1. dan), drugi (2. dan) i treći grejni dan (3. dan), tokom dvanaestočasovnog grejnog dana



betonskim zidovima, tako da utrošena toplotna energija (centralno grejanje i dogre- jač) ima prigušeni efekat na povećanje temperature vazduha u prostoriji. Jasno je da utrošena toplotna energija podiže temperaturu vazduha u prostoriji (režim bez neuo- bičajenih grejnih situacija kakve su na primer enormne količine infiltriranog vaz- duha), međutim u kojoj meri i kojom brzinom, u velikoj meri zavisi od odziva posto- jećeg termičkog omotača zgrade. Uvedeni koeficijent BER ima zadatak da nam olakša poimanje prelaznih grejnih režima. Promena koeficijenta BER tokom drugog i trećeg grejnog dana, zgrade bez dogrevanja, vrlo je slična, što nam govori o sličnim režimima grejanja i promeni temperatura unutrašnjeg vazduha. To znači da termički omotač zgrade na isti način utiče na proces grejanja svakog sledećeg dana, naravno, ukoliko se zadrže simulirani parametri. Početne vrednosti BER-a, za iste grejne dane, uvek su veće za zgradu sa dogrevanjem, što je posledica veće toplotne snage takvog sistema grejanja i niskih temperatura vazduha u prostoriji posle prekida u zagrevan- ju. Međutim, pri kraju grejnog dana snažniji sistem grejanja značajnije povišava tem- peraturu unutrašnjeg vazduha, kao i zidova, tako da zapažamo niže vrednosti BER-a za zgradu sa dogrevanjem u odnosu na isti grejni dan za zgradu bez dogrevanja. U svakom slučaju, apsolutne vrednosti BER-a na kraju grejnog dana značajno su manje od njegovih vrednosti na početku grejanja.

Na slici 3.2 je prikazana promena koeficijenta BER za zgradu sa dogrevanjem (Q3) ili bez dogrevanja (Q0), za prvi (1. dan), drugi (2. dan) ili treći grejni dan (3. dan), za omotač sa izolacijom između dva betonska sloja (12,5 cm – 5 cm – 12,5 cm beton–izolacija–beton), pri spoljnoj temperaturi  $T_o = 5 \pm 5^\circ\text{C}$ , tokom dvanaestčasovnog grejnog dana.

Razlika između razmatranog simuliranog slučaja i prethodnog (slika 3.1) jeste da postoji unutrašnji betonski sloj omotača čije je zagrevanje (naročito prvog grejnog dana) sa strane spoljašnjosti otežano postojanjem srednjeg izolacionog sloja. Posle-

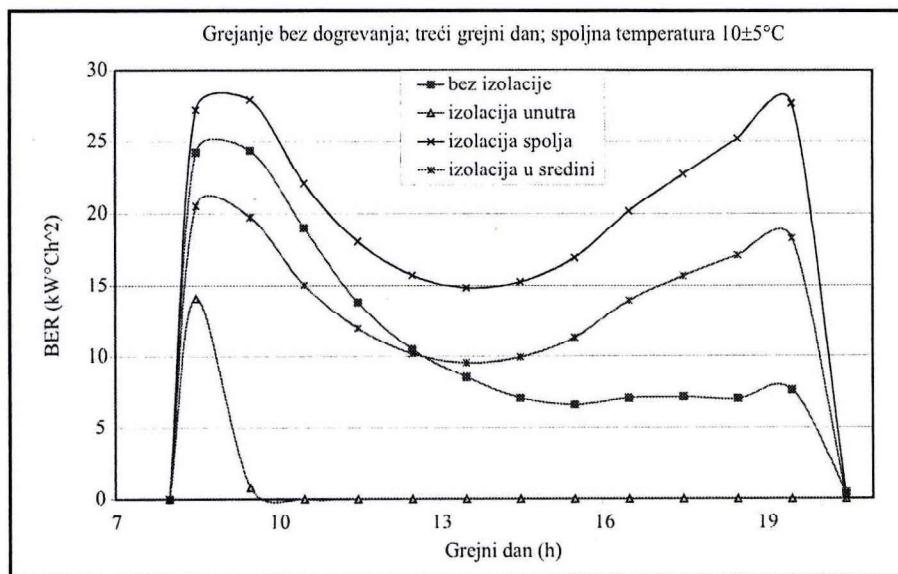


Slika 3.2. Promena koeficijenta BER za zgradu sa dogrevanjem (Q3) ili bez dogre- vanja (Q0) za prvi (1. dan), drugi (2. dan) ili treći grejni dan (3. dan), tokom dva- naestčasovnog grejnog dana

dica toga je da se prvog grejnog dana zapažaju visoke vrednosti BER-a za oba sistema grejanja (sa dogrevanjem i bez njega). Primećuju se i grupisane krive BER-a po istim grejnim danima, odnosno razdvojene krive za iste uslove grejanja (sa dogrevanjem ili bez njega). U ovom slučaju se radi o značajnijem uticaju omotača zgrade i u drugom i trećem grejnom danu. Na kraju grejnog dana zapaža se ponovni porast BER-a (razlika u odnosu na sliku 3.1). Izuzetak je treći grejni dan u sistemu sa dogrevačem, gde se na kraju grejnog dana skoro dostiže zadata temperatura vazduha u prostoriji i BER opada do samog završetka grejanja. Za sve ostale trendove krivih, razlog je taj što krajem grejnog dana, zbog pada spoljne temperature, raste temperatura vode u radiatorima ([8]), raste potrošnja toplotne energije, što se još uvek nedovoljno odražava na temperaturu unutrašnjeg vazduha, zbog snažnog uticaja omotača zgrade. Ovakvi efekti još su izraženiji za slučaj dvoslojnog zida sa položajem izolacije spolja.

Na slici 3.3 je prikazana promena koeficijenta BER za zgradu sa sva četiri usvojena termička omotača, bez dogrevanja ( $Q_0$ ), za treći grejni dan (3. dan), pri spoljnoj temperaturi  $T_o = 10 \pm 5^\circ\text{C}$ , tokom dvanaestčasovnog grejnog dana.

Za razliku od prethodne dve slike gde se radilo o, za svaku sliku, jednom termičkom omotaču, ovde se daje promena BER-a tokom grejnog dana za različite termičke omotače, dok su simulirani grejni dan, uslovi grejanja (bez dogrevanja) i spoljna temperatura ( $10 \pm 5^\circ\text{C}$ ), identični za sve četiri prikazane krive. I na prvi pogled se može zaključiti da bez obzira na iste spoljne i unutrašnje simulirane uslove, u prelaznim režimima struktura termičkog omotača zgrade ima presudni uticaj na potrošnju toplotne energije i temperaturu u prostoriji, što pokazuju prikazani koeficijenti BER. Za slučajeve omotača zgrade sa izolacijom u sredini i spolja, jak je uticaj

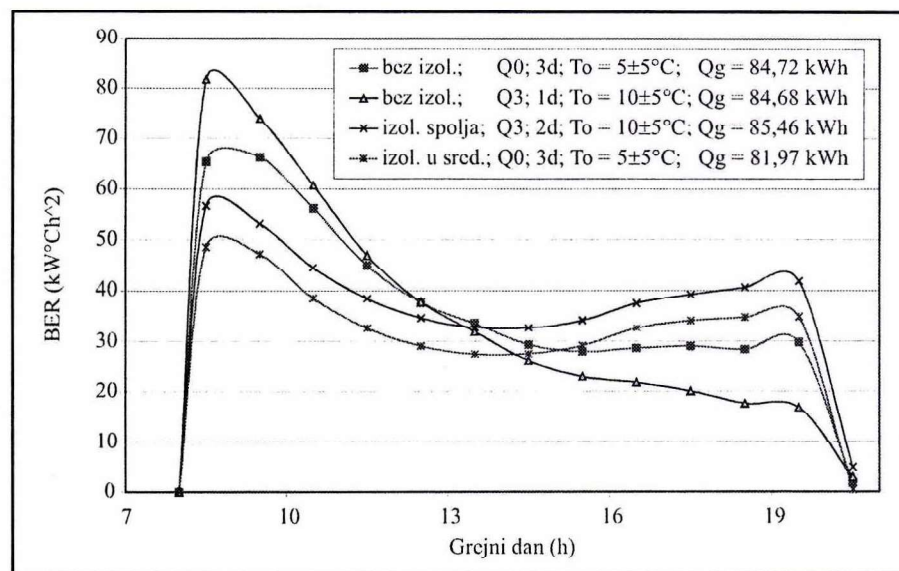


Slika 3.3. Promena koeficijenta BER za zgradu sa četiri različita termička omotača, bez dogrevanja ( $Q_0$ ), za treći grejni dan (3. dan), tokom dvanaestčasovnog grejnog dana



hladnog betonskog unutrašnjeg sloja, što se vidi i u promeni koeficijenta BER sa čak identičnim vrednostima na početku i kraju grejnog dana za slučaj dvoslojnog omotača sa položajem izolacije spolja. Za slučaj jednoslojnog betonskog omotača zgrade, trend promene BER-a je sličan prethodno opisanim dvema krivama samo u prvom delu grejnog dana. U tom slučaju, značajan je i spoljašnji uticaj na omotač zgrade (zagrevanje), što se naročito uočava pri kraju grejnog dana. U slučaju dvoslojnog omotača zgrade sa položajem izolacije iznutra, BER je prisutan samo u prva dva sata grejnog dana, dok se ne dostigne zadata temperatura u prostoriji, kada je BER po definiciji (jednačina 2.1) jednak nuli. Ovakav odnos se zadržava do kraja posmatranog grejnog dana.

Na slici 3.4 je prikazana promena koeficijenta BER za zgradu sa različitim termičkim omotačima, za različite sisteme grejanja (sa dogrevanjem i bez njega), za različite grejne dane, za različite spoljne temperature ali za približno iste utrošene ukupne količine toplotne energije (za ceo grejni dan  $Q_g$ ), tokom dvanaestočasovnog grejnog dana.



Slika 3.4. Promena koeficijenta BER za zgradu sa različitim termičkim omotačima, pri različitim spoljnim i unutrašnjim uslovima, za približno iste utrošene količine toplotne energije, tokom dvanaestočasovnog grejnog dana

Iz obilja podataka dobijenih simuliranjem ranije opisanih uslova, na dinamičkom modelu zgrade, izdvojena su četiri slučaja sa približno istim ukupnim dnevnim potrošnjama toplotne energije ( $Q_g \approx 84$  kWh). Zanimljivo je da se najveće varijacije BER-a tokom grejnog dana uočavaju u slučaju jednoslojnog termičkog omotača zgrade (prvi grejni dan, grejanje sa dogrevanjem). Za ovaj slučaj se registruju i maksimalne i minimalne časovne vrednosti BER-a tokom posmatranog gre-

jnog dana. Za slučajeve termičkih omotača zgrade, izolacija u sredini i izolacija spolja, dobijaju se ujednačenije vrednosti BER-a sa lokalnim maksimumima na početku i kraju grejnog dana.

#### 4. Zaključak

U zaključku rada [1] kaže se da je poseban doprinos tog rada 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. U međuvremenu je napravljen još jedan korak u potvrdi uvođenja BER-a [2]. Rezultatima simulacija prikazanim u ovom radu, izučava se promena BER-a iz časa u čas, tokom jednog grejnog dana. Lokalni maksimumi BER-a ukazuju na najnepovoljnije uticaje omotača zgrade na proces grejanja u zgradi i oni se najčešće javljaju na početku i kraju grejnog dana, ali mogu da se jave i u nekom drugom trenutku grejnog dana. Omotač zgrade se sve više posmatra kao pasivni izvor toplotne energije. Nove značajnije uštede energije u sferi klimatizacije pretpostavljaju „inteligentne“ termičke omotače zgrada promenljivih karakteristika.

#### 5. Literatura

- [1] **Bojić, M., N. Lukić**, *Numerical Evaluation of Solar Energy Use Through Passive Heating of Weekend Houses in Yugoslavia*, RENEWABLE ENERGY, No. 20 (2000), pp. 207–222.
- [2] **Lukić, N., M. Bojić**, *The Transient House Heating Condition – The Building Envelope Response Factor (BER)*, RENEWABLE ENERGY (objavljivanje se očekuje tokom 2002. godine), Elsevier Science.
- [3] **Lukić, N., G. Radivojević**, *Dinamički model zgrade – funkcionisanje sistema centralnog grejanja u startnim režimima, pri promenljivom položaju izolacije, sa dogrevanjem ili bez njega*, 32. kongres o KGH, zbornik radova, SMEITS, Beograd, 2001, str. 242–248.
- [4] **Lukić, N.**, *Dinamički model zgrade – uticaj dogrevanja prostorija na funkcionisanje radijatorskog grejanja*, zbornik radova za 31. kongres o KGH, SMEITS, Beograd, str. 55–61.
- [5] **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, 505–510.
- [6] **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) 569–581.
- [7] **Kalogirou, S., M. Bojić**, *Artificial neural networks for the evaluation of a passive solar building energy consumption*, Energy, 25 (2000) 479–491.
- [8] **Lukić, N.**, *Kvalitet unutrašnjeg vazduha u zgradama sa centralnim grejanjem u toku grejnog dana*, zbornik radova za 30. kongres o KGH, SMEITS, Beograd, 1999, str. 228–234.