

VIBRACIJE SPREGNUTIH NOSAČA MEĐUSPRATNIH KONSTRUKCIJA OD ČELIKA I BETONA, IZAZVANIH AKTIVNOSTIMA LJUDI

VIBRATIONS OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE FLOORS INDUCED BY HUMAN ACTIVITIES

Nina GLUHOVIĆ
Milan SPREMIĆ
Zlatko MARKOVIĆ
Dragan BUĐEVAC
Nenad FRIC

PREGLEDNI RAD
REVIEW PAPER
UDK: 692.522.072.2
doi:10.5937/grmk1604017G

1 UVOD

Trenutni zahtevi pri projektovanju konstrukcija u zgradarstvu najčešće uslovljavaju primenu konstrukcija velikih raspona, s velikim otvorenim unutrašnjim prostorima, sa spregnutim međuspratnim konstrukcijama od čelika i betona visokih kvaliteta. Takođe, često se zahteva mogućnost naknadne prenamene prostora u druge svrhe, odnosno fleksibilnost prostora koji se može postići većim rasponima. Ovakve težnje prouzrokuju to da konstrukcija ima niže vrednosti sopstvenih frekvencija oscilovanja i manji koeficijent prigušenja, što veoma utiče na dinamički odgovor konstrukcije kada je ona izložena dinamičkom opterećenju, kao što je - na primer - kretanje ljudi unutar objekta.

Konstrukcija, pored kriterijuma sigurnosti koji se dokazuje putem graničnih stanja nosivosti, mora da zadovolji i kriterijume funkcionalnosti. Kriterijumi funkcionalnosti zavise od namene objekta, a dokazuju se kon-

1 INTRODUCTION

The latest demands in the field of building construction are mostly reflected in the design of structures with large spans, large open interiors with composite steel-concrete floors using high grade of steel and concrete. Also, frequent requests for subsequent reuse of the interior space of buildings for other purposes in relation to those originally envisaged by project are very common. These latest demands are leading to lower natural frequencies and lower natural damping of structures, considerably influencing dynamic response of the structure exposed to dynamic actions, such as walking of people inside the building.

Except the safety criteria which are checked through calculation of ultimate limit states, structure also has to satisfy serviceability criteria. Serviceability criteria which depend on the intended use of the structure are checked through calculation of serviceability limit states. Servicea-

Asistent student doktorskih studija Nina Gluhović, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, nina@imk.grf.bg.ac.rs
Doc. dr Milan Spremić, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, spremit@imk.grf.bg.ac.rs
Prof. dr Zlatko Marković, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, zlatko@imk.grf.bg.ac.rs
Prof. dr Dragan Buđevac, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, budjoni@imk.grf.bg.ac.rs
Doc. dr Nenad Fric, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, fric@imk.grf.bg.ac.rs

Teaching assistant Nina Gluhovic, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Republic of Serbia, nina@imk.grf.bg.ac.rs
Assis. Prof. Milan Spremic, PhD, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Republic of Serbia, spremit@imk.grf.bg.ac.rs
Prof. Zlatko Markovic, PhD, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Republic of Serbia, zlatko@imk.grf.bg.ac.rs
Prof. Dragan Budjevac, PhD, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Republic of Serbia, budjoni@imk.grf.bg.ac.rs
Assis. Prof. Nenad Fric, PhD, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Republic of Serbia, fric@imk.grf.bg.ac.rs

trolom graničnih stanja upotrebljivosti, koja obuhvataju kontrolu deformacija (ugibi, horizontalna pomeranja i obrtanja preseka), kontrolu vibracija, kao i naponske kontrole u slučaju pojedinih, dinamički opterećenih konstrukcija.

2 IZVORI VIBRACIJA MEĐUSPRATNIH KONSTRUKCIJA

Pojam vibracija podrazumeva pojavu oscilatornog kretanja pojedinih delova konstrukcije određenom amplitudom i frekvencijom oscilovanja. U zgradarstvu se problem vibracija uglavnom odnosi na vertikalne vibracije međuspratnih konstrukcija, ali u pojedinim slučajevima, posebno kada su u pitanju visoke i vitke konstrukcije, mogu se pojaviti i horizontalne vibracije usled dejstva vetra.

Kretanje ljudi unutar objekta predstavlja najčešći i najvažniji unutrašnji izvor vertikalnih vibracija međuspratnih konstrukcija. Unutrašnji izvor vibracija međuspratnih konstrukcija može biti i dinamički opterećenje izazvano radom mašina i opreme unutar objekta. Vertikalne vibracije međuspratnih konstrukcija mogu biti izazvane i spoljašnjim dinamičkim opterećenjem (drumski i železnički saobraćaj), kao i dejstvom zemljotresa ili udarom vozila.

Vibracije međuspratnih konstrukcija mogu značajno da utiču na kvalitet života, komfor ljudi, a samim tim - i na funkcionalnost objekta. Osetljivost ljudi na pojavu vibracija međuspratnih konstrukcija jeste veoma velika, odnosno nivo prihvatljivosti vibracija veoma je nizak. Reakcija ljudi na pojavu vibracija međuspratnih konstrukcija najčešće zavisi od toga kojom aktivnošću se osoba bavi u datom trenutku. Pored toga što vibracije mogu veoma da umanje komfor ljudi i kvalitet života unutar određenog objekta, drugi bitan faktor u pogledu ocene prihvatljivosti vibracija međuspratnih konstrukcija jeste funkcionalnost objekta. Funkcionalnost objekta može posebno biti ugrožena pojavom vibracija u slučaju kada se u objektima obavljaju specifične aktivnosti (na primer, operacione sale) ili u slučaju kada prevelike vibracije međuspratnih konstrukcija mogu da ugroze rad određenih mašina ili tačnost opreme s kojom se radi unutar objekta.

Jednom projektovana i izgrađena konstrukcija teško se može naknadno modifikovati u pogledu poboljšanja kriterijuma vibracija, izuzev ako se ne razmatraju znatne promene u pogledu mase konstrukcije, krutosti konstrukcije i povećanja koeficijenta prigušenja. Stoga, veoma je bitno da se nivo prihvatljivosti vibracija međuspratnih konstrukcija objekta definiše na početku, u fazi projektovanja, u zavisnosti od namene objekta i zahteva investitora.

2.1 Modeliranje dinamičkog opterećenja izazvanog ljudskim aktivnostima

Prvi korak u dinamičkoj analizi konstrukcija i u naknadnom određivanju nivoa prihvatljivosti vibracija spregnutih međuspratnih konstrukcija predstavlja modeliranje dinamičkog opterećenja izazvanog aktivnostima ljudi.

ability limit states include calculation of deformations (vertical deflection, horizontal displacement and end rotation), calculation of vibrations and also verification of stresses for specific, dynamically loaded structures.

2 SOURCES OF FLOOR STRUCTURES VIBRATIONS

The term vibration implies oscillatory movement of specific parts of structure with certain amplitude and frequency. Vibrations are mostly related to vertical movement of floor mass, but in the case of very tall and slender structures, horizontal vibrations induced by wind action are very frequent.

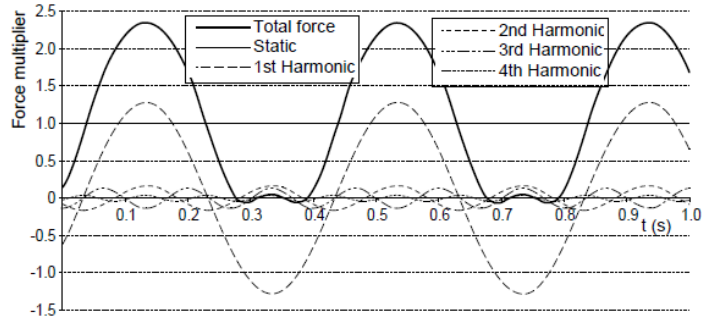
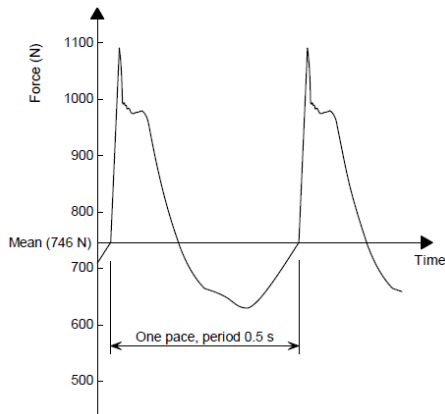
Walking of people inside the building is the most usual and most important internal source of floor vertical vibrations. Also, dynamic loads induced by machines and equipment working inside the building are usual internal sources of floor vibrations. Vertical vibrations of floor structures can also arise from external dynamic loads such as road and rail traffic, seismic actions or vehicular impact on structural members.

Annoying floor vibrations can significantly affect quality of life inside the building, comfort of the user, and therefore the building functionality. Human susceptibility to the appearance of floor vibrations is very pronounced, involving very low levels of acceptance criteria. Human perception of the appearance of floor vibrations is mostly related to the type of the activity being performed in that moment. Although, annoying vibrations of floors can significantly decrease comfort of the user and quality of life inside the building, second very important factor which influences the acceptance criteria of floor vibrations is the building functionality. Building functionality can significantly be compromised due to floor vibrations, especially in the case of special activities inside the building, such as surgery rooms, or in the case when extensive floor vibrations can compromise the operation of the machinery or equipment accuracy inside the building.

Once designed and constructed, it is difficult to modify an existing structure to reduce its susceptibility to vibrations, unless introducing significant modifications considering structure mass and stiffness and increase of structure natural damping. Therefore, it is important to define the acceptance criteria of floor vibrations at the early stage of design, depending of the anticipated usage of structure and client requirements.

2.1 Modelling dynamic loads induced by human activities

The first step in dynamic analysis of structures and subsequent determination of acceptance criteria of floor vibrations is modelling dynamic loads induced by human activities.



a) dinamičko opterećenje izazvano hodanjem ljudi
a) dynamic load induced by human activities

b) Furijeova transformacija
b) Fourier transformation

Slika 1. Ljudski hod predstavljen skupom jednostavnih sinusnih funkcija (harmonika) Furijeovom transformacijom [1]
Figure 1. Walking of people presented by series of simple sinusoidal functions (harmonics) using Fourier transformation [1]

Modeliranje ove vrste dinamičkog opterećenja izuzetno je kompleksno, a dinamički odgovor konstrukcije koji se dobija usled ove vrste dinamičkog opterećenja najčešće je predstavljen u vidu velikog broja različitih oblika oscilovanja konstrukcije. Tokom godina istraživanja, urađene su brojne studije s ciljem definisanja preporuka za pojednostavljen način prikazivanja dinamičkog opterećenja izazvanog ljudskim aktivnostima. Dinamičko opterećenje, izazvano hodanjem ljudi, ubraja se u grupu kontinualnog dinamičkog opterećenja, čija se složena funkcija može predstaviti u vidu serije sinusnih funkcija pomoću Furijeove transformacije (kao što je prikazano na slici 1). Furijeova transformacija za ovaj vid dinamičkog opterećenja može se predstaviti izrazom (1):

Modelling of this type of dynamic load is extremely complex and dynamic response of structure influenced by this type of dynamic loading is usually presented in large number of different mode shapes of structure. Over past years, numerous studies have been carried out resulting with recommendations for simplified presentation of dynamic loads induced by human activities. Dynamic loads induced by human activities can be classified as continuous dynamic loading, which complex function can be broken down into a series of sinusoidal functions based on the Fourier transformation, as it is shown in Figure 1. Fourier transformation for this type of dynamic loading can be presented with Eq. (1):

$$F(t) = P \left[1 + \sum_i \alpha_i \cos(2\pi f_s t + \phi_i) \right] \quad (1)$$

gde je:

- P težina osobe koja hoda (746N);
- α_i dinamički koeficijent za i -ti harmonik;
- i harmonik ($i=1,2,3,\dots$);
- f_s frekvencija dinamičkog opterećenja (frekvencija koraka pri hodanju);
- t vreme (s);
- ϕ_i fazni ugao za i -ti harmonik.

Nacionalni prilog NA to BS EN 1991-2:2003 [2] definiše dinamičko opterećenje na pešačkim mostovima usled ljudskog hoda. Ovakav način definisanja dinamičkog opterećenja preporučeno je da se usvoji u okviru Nacionalnog priloga za SRPS EN 1991-2:2012 [3]. Opterećenje koje deluje na konstrukciju, kao posledica hodanja jedne osobe ili grupe pešaka, može se predstaviti vetrikalnom promenljivom silom F , koja se kreće konstantnom brzinom v_t , kako je prikazano izrazom 2:

where:

- P is the person's weight (746 N);
- α_i is the dynamic load factor for the i^{th} harmonic;
- i is the harmonic ($i=1,2,3,\dots$);
- f_s is the frequency of the forcing function (frequency of one walking step) (Hz);
- t is the time (s);
- ϕ_i is the phase angle for the i^{th} harmonic.

National Annex NA to BS EN 1991-2:2003 [2] defines dynamic load models for pedestrian actions on footbridges. This method for dynamic loads modelling is recommended for implementation within the National Annex to SRPS EN 1991-2:2012 [3]. Actions on structures which are the result of single pedestrian or pedestrian groups walking over footbridge can be presented by application of a vertical pulsating force F (N), moving at a constant speed v_t , as shown in Eq. (2):

$$F = F_0 k(f_v) \sqrt{1 + \gamma(N - 1)} \sin(2\pi f_v t) \quad (2)$$

gde je:

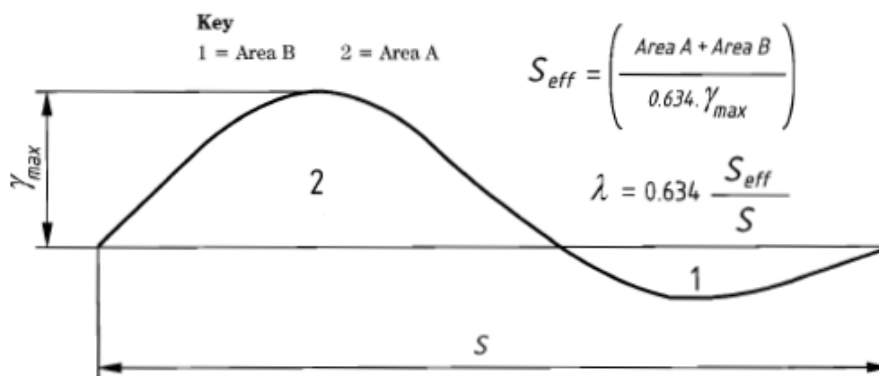
- N broj pešaka u grupi;
 F_0 referentna amplituda promenljive sile (N);
 f_v svojstvena frekvencija vertikalnog oblika oscilovanja (Hz);
 $k(f_v)$ kombinovani koeficijent koji uzima u obzir uticaj stvarne grupe pešaka i harmonijske odgovore;
 t vreme (s);
 γ koeficijent redukcije koji uzima u obzir nesinhronizovanu kombinaciju dejstava grupe pešaka;
 S_{eff} dužina efektivnog raspona (m), jednaka površini oivičenoj krivom koja opisuje vertikalnu komponentu oblika oscilovanja koji se posmatra, podeljenu s proizvodom broja 0,634 i maksimalnom vrednošću oscilovanja u vertikalnom pravcu (slika 2). Usvajanje da je $S_{eff} = S$ je na strani sigurnosti.
 S raspon mosta (m).

Vrednosti referentne amplitude promenljive sile i brzine kretanja definisane su u Nacionalnom prilogu NA to BS EN 1991-2:2003 [2].

where:

- N is the number of pedestrians in the group;
 F_0 is the reference amplitude of the applied fluctuating force (N);
 f_v is the natural frequency of the vertical mode under consideration (Hz);
 $k(f_v)$ is a combined factor which takes into account the effects of a more realistic pedestrian population and harmonic responses;
 t is the time (s);
 γ is a reduction factor which takes into account the unsynchronized combination of actions in a pedestrian group;
 S_{eff} is an effective span length (m) equal to the area enclosed by the vertical component of the mode shape of interest divided by 0.634 times the maximum of the vertical component of the same mode shape (see Figure 2). Adopting $S_{eff} = S$ is conservative.
 S is the span of the bridge (m).

Recommended values of the reference amplitude of a vertical pulsating force and pedestrian crossing speed are given in National Annex NA to BS EN 1991-2:2003 [2].



Slika 2. Određivanje efektivnog raspona za opterećenje izazvano ljudskim hodom na pešačkim mostovima [2]
Figure 2. Effective span calculation for dynamic loading induced by walking of people over footbridges [2]

3 PRORAČUNSKI KRITERIJUMI ZA VIBRACIJE SPREGNUTIH KONSTRUKCIJA

Preporuke za projektovanje objekata radi zadovoljavanja kriterijuma vibracija mogu se pronaći u različitim standardima, priručnicima za proračun i stručnim publikacijama. Problemom vibracija međuspratnih konstrukcija - izazvanih ljudskim aktivnostima - bavili su se mnogi autori koji daju različite preporuke, najčešće u pogledu ograničavanja sopstvenih frekvencija oscilovanja međuspratnih konstrukcija, u zavisnosti od namene objekta i vrste dinamičkog opterećenja. Tradicionalno, mnogi autori smatraju da dovoljno visoka sopstvena frekvencija oscilovanja konstrukcije omogućava da ona bude izvan opsega frekvencije pobude, odnosno frekvencije dinamičkog opterećenja usled različitih aktivnosti ljudi.

Prema Evrokodu, kriterijumi upotrebljivosti u pogledu vibracija treba da se propišu za svaki projekat i da se dogovore sa investitorom, ili se mogu definisati u okviru Nacionalnog priloga. Prema SRPS EN 1994:2012 [4], dinamičke karakteristike međuspratnih konstrukcija treba

3 DESIGN RECOMMENDATIONS OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE FLOOR VIBRATIONS

Design recommendations for structures considering fulfilment of vibrations acceptance criteria can be found in different standards, design manuals and specialized literature. Floor vibrations induced by human activities are analyzed by many authors, defining different recommendations, which are usually related to limiting of floors natural frequencies, depending on the intended use of the structure and the type of dynamic loading. Traditionally, many authors consider that sufficiently high natural frequency of the structure enables it to be outside of the range of dynamic loading frequencies, or frequency of the dynamic loads induced by different human activities.

According to Eurocode, serviceability criteria of floor vibrations should be considered for each project and agreed with the client, or it should be defined within National Annex. According to SRPS EN 1994:2012 [4], dynamic properties of floor structures should satisfy recommendations given in SRPS EN 1990:2012 [5].

da zadovolje preporuke date u SRPS EN 1990:2012 [5]. SRPS EN 1990:2012, Prilog A1 [5] definiše da se za zadovoljavajuće ponašanje konstrukcije u pogledu vibracija mora imati u vidu komfor ljudi koji borave unutar objekta i funkcionalnost objekta, a ostali aspekti treba da se usaglase u skladu s namenom objekta. Kako granična stanja upotrebljivosti u pogledu vibracija ne bi bila prekoračena, neophodno je da sopstvena frekvencija oscilovanja konstrukcije ili delova konstrukcije bude iznad određenih granica, koje zavise od namene objekta i izvora vibracija. SRPS EN 1990:2012 [5] definiše da su za ostale informacije referentni standardi: SRPS EN 1991:2012 [6], SRPS EN 1991:2012 [7] i ISO 10137 [8]. SRPS EN 1990:2012, Prilog A2 [5] preporučuje maksimalne vrednosti ubrzanja za bilo koje delove međuspratne konstrukcije od $0,7 \text{ m/s}^2$ za vertikalne vibracije i $0,2 \text{ m/s}^2$ za horizontalne vibracije.

Nacionalni prilog SRPS EN 1990/NA [9] propisuje iskustvene vrednosti sopstvenih frekvencija oscilovanja i ograničenja vertikalnih ubrzanja izraženih u procentima ubrzanja zemljine teže g , koje bi u većini regularnih slučajeva trebalo da obezbede prihvatljivo ponašanje međuspratne konstrukcije (tabela 1). Međutim, sopstvena frekvencija nije jedini parametar koji utiče na prihvatljivost vibracija, pa u određenim slučajevima kontrola graničnog stanja upotrebljivosti usled vibracija ne može da se svede samo na ograničenje sopstvene frekvencije [10]. Tada je neophodno da se sprovedu složeniji postupci analize koji mogu da se nađu u specijalizovanoj literaturi, a koji se uglavnom zasnivaju na direktnoj ili indirektnoj kontroli vertikalnog ubrzanja međuspratne konstrukcije, koje najviše utiče na komfor korisnika [10].

Comfort of user and functionality of structure or its structural members, should be considered in order to achieve satisfactory behaviour regarding vibrations of floor structures, according to SRPS EN 1990:2012, Annex A1 [5] and other aspects should be considered for each project regarding intended use of the building. For serviceability criteria of a structure not to be exceeded when subjected to vibrations the natural frequency of vibrations of the structure or structural members should be kept above appropriate values considering intended use of the structure and sources of vibrations. SRPS EN 1990:2012 [5] defines that for the further guidance SRPS EN 1991:2012 [6], SRPS EN 1991:2012 [7] and ISO 10137 [8] should be used. SRPS EN 1990:2012, Annex A2 [5] gives recommended maximum values for accelerations of any part of the floor structures as $0,7 \text{ m/s}^2$ for vertical vibrations and $0,2 \text{ m/s}^2$ for horizontal vibrations.

National Annex SRPS EN 1990/NA [9] prescribes indicative values of natural frequencies and limitations for vertical accelerations expressed as a percentage of the acceleration of gravity g , which in the majority of regular situations should ensure the acceptable behaviour of floor structures (Table 1). However, natural frequency of structure is not the only parameter which should be considered in order to define vibrations acceptance criteria and in specific situations check of the serviceability limit state of structure when subjected to floor vibrations should not be reduced only to the limitation of natural frequencies [10]. In that situation it is necessary to conduct more complex analytical methods which can be found in specialized literature and which are mainly based on direct or indirect check of vertical accelerations of different parts of floor structures which mostly affects the comfort of the user [10].

Tabela 1. Iskustvene vrednosti za prihvatljive sopstvene frekvencije konstrukcije zgrada i ograničenja ubrzanja [9]
Table 1. Indicative values of natural frequencies of buildings and limitations of accelerations [9]

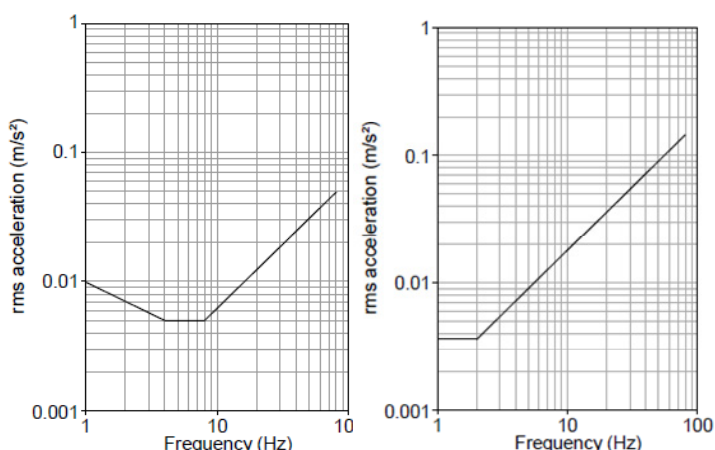
| Namena objekta <i>Intended use of the structure</i> | Obično zadovoljavajuće ponašanje <i>Usually satisfactory behaviour</i> | Često nezadovoljavajuće ponašanje <i>Usually unsatisfactory behaviour</i> | Preporučena granična vertikalna ubrzanja (u % od g) <i>Recommended limitations of vertical accelerations (% of g)</i> |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sportske dvorane, javni prostori <i>Sports facilities, public areas</i> | $n_e > 10 \text{ Hz}$ | $n_e < 6 \text{ Hz}$ | 10 % |
| Stambene zgrade <i>Residential buildings</i> | $n_e > 8 \text{ Hz}$ | $n_e < 5 \text{ Hz}$ | 0,1 % |
| Poslovne zgrade <i>Office buildings</i> | $n_e > 8 \text{ Hz}$ | $n_e < 5 \text{ Hz}$ | 0,2 % |

BS 6472 [11] pokriva različite izvore vibracija u međuspratnim konstrukcijama, a nivoi prihvatljivosti dati su u obliku težinskih funkcija za osnovne krive i serije faktora za uvećanje u zavisnosti od namene objekta (date na slici 3). Osnovne krive za vibracije u pravcu z ose (vertikalni pravac) i x i y ose (horizontalni pravac) izvedene su na osnovu sledećih osnovnih vrednosti srednjeg kvadratnog ubrzanja a_{rms} (m/s^2):

- $a_{\text{rms}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ za vertikalne vibracije (z pravac);
- $a_{\text{rms}} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ za horizontalne vibracije (x i y pravac).

BS 6472 [11] gives recommendations for different sources of floor vibrations and acceptance criteria are defined in form of weighting functions for basic curves and multiplying factors defined for different intended use of the structure, as shown in Figure 3. Basic curves for vibrations in z direction (vertical direction) and x and y direction (horizontal direction) are derived from following base values of root mean square accelerations a_{rms} (m/s^2):

- $a_{\text{rms}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ for vertical vibrations (z axis);
- $a_{\text{rms}} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ for horizontal vibrations (x and y axis).



a) z pravac
a) z axis direction

b) x i y pravac
b) x and y axis direction

| Namena objekta Intended use of the structure | Faktor uvećanja R Multiplying factor R |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Bolnice i operacione sale Hospitals and surgery rooms | 1 |
| Prostorije za stanovanje Residential buildings | 4 |
| Kancelarije / Offices | 4 |
| Radionice / Workshops | 8 |
| Prometne kancelarije Very busy offices | 12 |
| f_0 (Hz) | C_f |
| $3 < f_0 < 4$ | 0,4 |
| $4 < f_0 < 4,8$ | $1,4 - 0,25f_0$ |
| $f_0 > 4,8$ | 0,2 |

c) vrednosti faktora uvećanja R i koeficijenta C_f
c) multiplying factor R and factor C_f

Slika 3. Osnovne krive za vibracije i faktor uvećanja prema BS 6472 [11]
Figure 3. Basic curves of floor vibrations and multiplying factors according to BS 6472 [11]

Faktor uvećanja R određuje se u zavisnosti od vrednosti sopstvene frekvencije oscilovanja međuspratne konstrukcije [12]. Ukoliko je sopstvena frekvencija oscilovanja konstrukcije manja od 7 Hz, konstrukcija se smatra niskofrekventnom i faktor uvećanja R određuje se prema izrazu 3:

$$R = \frac{68000C_f}{m_g S_{eff} L \zeta} \quad (3)$$

Za visokofrekventne konstrukcije (sopstvena frekvencija oscilovanja konstrukcije - veća od 7 Hz), faktor uvećanja R određuje se prema izrazu 4:

$$R = \frac{3000}{m_g b_e L} \quad (4)$$

gde je:

m_g masa konstrukcije koja osciluje (kg/m^2);
 L raspon spregnutog grednog nosača (m);
 I_s moment inercije spregnute ploče (m^4);
 ζ koeficijent prigušenja,
 $b_e = \min(b, 40h_p)$ gde je b rastojanje grednih nosača (m), a h_p visina betonske ploče (m);

$S_{eff} = 4,5 \left(\frac{E_a I_s}{m_g f_0^2} \right)^{1/4}$ efektivna širina međuspratne konstrukcije (m).

Multiplying factor R can be calculated depending on the floor natural frequency [12]. If the fundamental natural frequency is less than 7 Hz, floor structure should be considered as floor with low natural frequency and multiplying factor R should be calculated using Eq. (3):

For floors which have high natural frequency (fundamental natural frequency exceeds 7 Hz), multiplying factor R should be calculated using Eq. (4):

where:

m_g is the floor mass (kg/m^2);
 L is the composite beam span (m);
 I_s is the second moment of area of composite slab (m^4);
 ζ is the natural damping ratio;
 $b_e = \min(b, 40h_p)$ where b is composite beam spacing (m), and h_p is the height of concrete beam (m);

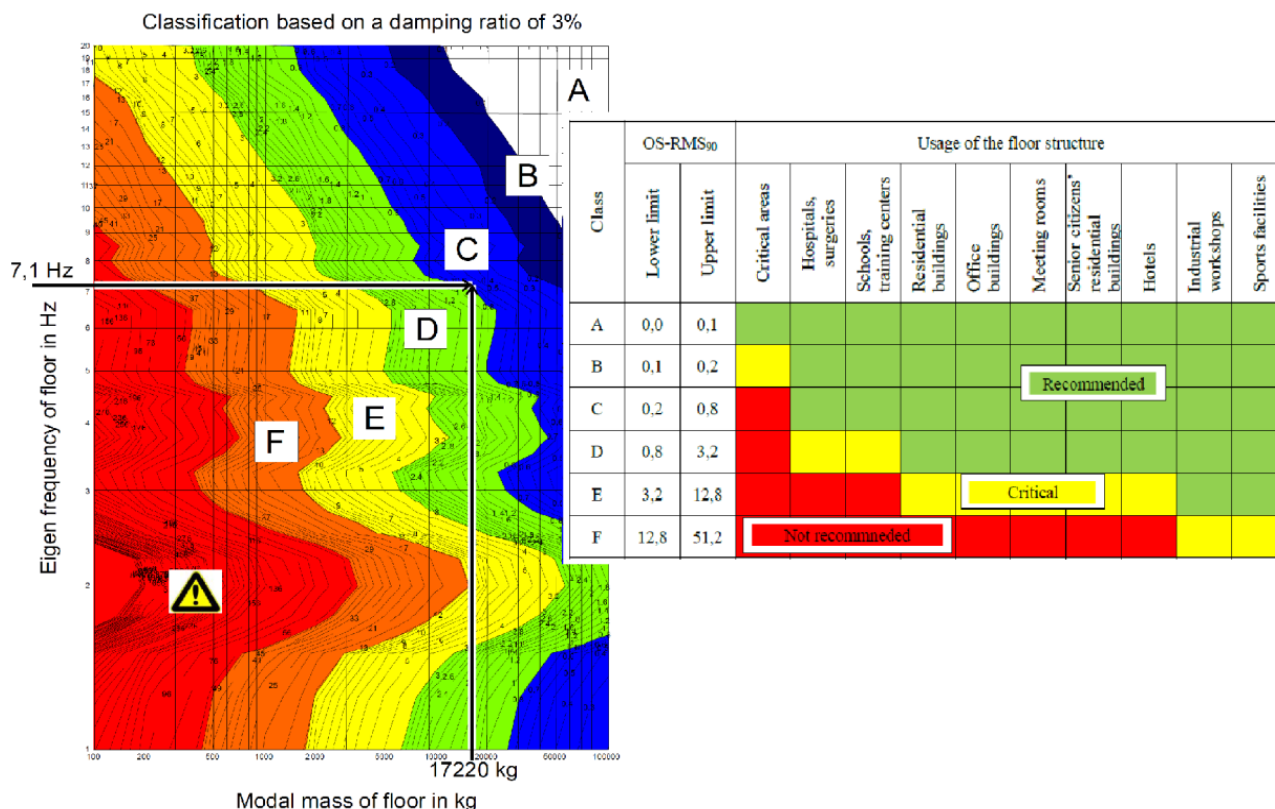
$S_{eff} = 4,5 \left(\frac{E_a I_s}{m_g f_0^2} \right)^{1/4}$ is the composite floor effective width (m).

Koeficijent C_f određuje se u zavisnosti od sopstvene frekvencije oscilovanja konstrukcije (prikazano na slici 3).

Factor C_f is defined depending on the natural frequency of structure, as shown in Figure 3.

Na osnovu rezultata istraživanja u okviru ECCS-a (projekat JRC55118 [13]), definisane su preporuke za projektovanje međuspratnih konstrukcija usled dejstva vibracija izazvanih ljudskim hodom. Izvod iz ovih istraživanja publikovao je i Arcelor-Mittal u vidu preporuka [14]. Tri osnovna parametra koja utiču na vibracije međuspratnih konstrukcija jesu sopstvena frekvencija konstrukcije f , prigušenje D i modalna masa M_{mod} . S ciljem ocene komfora i definisanja kriterijuma prihvatljivosti u pogledu vibracija, uvedena je veličina OS-RMS₉₀ (One Step - Root Mean Square 90%) koja predstavlja brzinu (ili ubrzanje) reprezentativnog pojedinačnog koraka koja odgovara 90-procentnom fraktilu svih različitih ljudskih koraka.

Recommendations for design of composite steel-concrete floors exposed to vibrations induced by human activities are defined based on the results of extensive investigation within ECCS (research project JRC55118 [13]). A short extract from this investigation is published by Arcelor-Mittal in form of design recommendations [14]. Three main parameters that influence the floor vibrations are fundamental natural frequency f , structural damping D and modal mass M_{mod} . Variable OS-RMS₉₀ is introduced in purpose of comfort estimation and defining the vibrations acceptance criteria presenting velocity (or acceleration) for a significant single step that is larger than the 90% fractal of people walking steps.



Slika 4. Klasifikacija međuspratnih konstrukcija (Arcelor-Mittal [14])
Figure 4. Classification of floor response (Arcelor-Mittal [14])

Ukupno prigušenje konstrukcije određuje se kao zbir tri različite komponente prigušenja: prigušenja konstrukcije, prigušenja usled opreme i nameštaja unutar objekta i prigušenja usled završne obrade međuspratnih konstrukcija. Procedura ocene prihvatljivosti međuspratne konstrukcije usled vibracija sastoji se u:

- određivanju osnovnih karakteristika konstrukcije, kao što su sopstvena frekvencija, modalna masa i prigušenje;
- utvrđivanju kategorije kojoj pripada međuspratna konstrukcija, na osnovu dijagrama koji su dati za različite nivoe prigušenja, na osnovu vrednosti sopstvene frekvencije i modalne mase;
- proveriti da li je dobijena kategorija prihvatljiva ili nije za zahtevanu namenu, odnosno funkciju međuspratne konstrukcije.

Total natural damping of structure is defined as summation of three different damping components: structural damping, damping from furniture inside the building and damping from finishings of floor structures. Estimation of acceptance criteria of floor vibrations is defined through:

- determination of basic characteristics of structure, such as natural frequency, modal mass and natural damping;
- estimation of floor class, based on the diagrams given for different values of structural damping, based on values of natural frequency and modal mass;
- check whether the estimated floor class is acceptable or unacceptable for intended use of the building or composite steel-concrete floor structure.

Definisano je šest klasa međuspratnih konstrukcija, u zavisnosti od opsega vrednosti OS-RMS₉₀, kao i različiti nivoi prihvatljivosti vibracija međuspratnih konstrukcija u zavisnosti od funkcije (namene) objekta (prikazano na slici 4).

Six classes of floor structures are defined depending on the OS-RMS₉₀ range and different acceptability levels of floor vibrations for different intended use of floor structure, as shown in Figure 4.



4 ODREĐIVANJE DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA SPREGNUTIH MEĐUSPRATNIH KONSTRUKCIJA

Za definisanje nivoa prihvatljivosti međuspratne konstrukcije na dejstvo vibracija, potrebno je odrediti osnovne karakteristike konstrukcije kao što su sopstvena frekvencija, modalna masa i prigušenje. Sopstvena frekvencija oscilovanja međuspratne konstrukcije može se odrediti korišćenjem pojednostavljenih metoda proračuna datih u literaturi, ili pomoću odgovarajućih programa.

4 DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE FLOORS

Determination of dynamic properties of floor structures, such as natural frequency, modal mass and natural damping of structure is important for definition of acceptance levels of floor vibrations. Natural frequency of floor structures can be defined using simplified design procedures given in different literature or using FEM analysis in appropriate software.

Tabela 2. Izrazi za određivanje sopstvenih frekvencija oscilovanja i modalnih masa spregnutih međuspratnih konstrukcija
Table 2. Simplified calculation methods for determination of natural frequencies and modal masses of composite floors

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gredni nosači / Beams (self weight approach) [12] |  | $\delta_m = 5m_g L^4 / (384E_a I_{i0})$ $f_0 = 17,8 / \sqrt{\delta_m}$ |
| Ortotropna međuspratna konstrukcija / Orthotropic floor structures [13] |  deformacija ploče+deformacija grednog nosača / vertical deflection of slab + vertical deflection of beam | $\frac{1}{f_{0s}} = 3,56(E_a I_s / m_p b^4)^{1/2}$ $\frac{1}{f_{0b}} = (\pi/2)(E_a I_{i0} / m_g b L^4)^{1/2}$ $\frac{1}{f_0^2} = \frac{1}{f_{0s}^2} + \frac{1}{f_{0b}^2}$ |
| Određivanje modalne mase međuspratne konstrukcije / Floor structure modal mass determination [13] | $M_{\text{mod}} = M_{\text{total}} \left(\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2\delta^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\delta_x \delta_y}{\delta^2} \right) \delta_x = \delta_p = \frac{5}{384} \frac{m_p b^4}{E_a I_s} \delta_y = \delta_g = \frac{5}{384} \frac{m_g b L^4}{E_a I_{i0}}$ | |
| f_0, f_{0s}, f_{0b} | sopstvena frekvencija oscilovanja posmatrane konstrukcije (gredni nosač ili ortotropna ploča), ploče i spregnute grede, respektivno / is the natural frequency of considered floor structure (self weight or orthotropic floor approach), slab and composite beam, respectively; | |
| δ_m | ugib grednog nosača (mm) / is the beam vertical deflection (mm); | |
| E_a | modul elastičnosti čelika / is the modulus of elasticity of structural steel, | |
| I_{i0} | moment inercije spregnutog grednog nosača / is the second moment of area of composite beam; | |
| m_p | masa spregnute ploče / is the composite slab mass; | |
| M_{total} | ukupna masa međuspratne konstrukcije / is the total mass of floor structure. | |
| * ostale veličine imaju značenja data u izrazima (3) i (4) / other variables have same definitions as given in Eq. (3) and (4). | | |

Pojednostavljene metode proračuna (tabela 2) obuhvataju proračun sopstvene frekvencije oscilovanja i modale mase, koristeći izraze za gredne nosače, ili izraze za ortotropnu ploču, kada se spregnuta međuspratna konstrukcija posmatra kroz frekvencije oscilovanja spregnute betonske ploče i grednog nosača.

Simplified calculation methods (Table 2) include calculation of natural frequency and modal mass, using equations for beams or orthotropic floor structures, when composite floors is analyzed through natural frequency of composite concrete slab and natural frequency of composite beam.

5 PRIMERI

Primena različitih metoda proračuna prihvatljivosti spregnutih međuspratnih konstrukcija na dejstvo vibracija sprovedena je u nekoliko numeričkih primera.

5 EXAMPLES

Different design recommendations for calculations of acceptance criteria of composite floors exposed to vibrations are given through several numerical

Analizirana su četiri spregnuta nosača raspona 8, 10, 12 i 15 metara, na međusobnom rastojanju od četiri metra, čije su karakteristike prikazane u tabeli 3.

examples. Four different steel-concrete composite beams with 8, 10, 12 and 15 m span and 4 m spacing between beams which geometrical properties are shown in Table 3, are analyzed.

Tabela 3. Karakteristike spregnutih nosača
Table 3. Composite beams properties

| Nosač Composite beam | Profil Section | Raspon Span (m) | Moment inercije spregnute ploče Second moment of area of composite slab | Moment inercije spregnutog nosača Second moment of area of composite beam | Efektivna širina međuspratne konstrukcije Composite floor effective width |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | I_s (cm ⁴ /m) | I_{I0} (cm ⁴) | S_{eff} (m) |
| SN1 | IPE 360 | 8 | 881,21 | 65040 | 14,61 |
| SN2 | IPE 400 | 10 | 881,21 | 88800 | 16,46 |
| SN2-1 | IPE 600 | 10 | 881,21 | 269000 | 13,03 |
| SN3 | IPE 500 | 12 | 881,21 | 165200 | 16,91 |
| SN3-1 | HEB 500 | 12 | 881,21 | 245972 | 15,47 |
| SN4 | IPE 550 | 15 | 881,21 | 275500 | 18,46 |

Tabela 4. Sopstvene frekvencije oscilovanja spregnutih nosača
Table 4. Natural frequency of composite beams

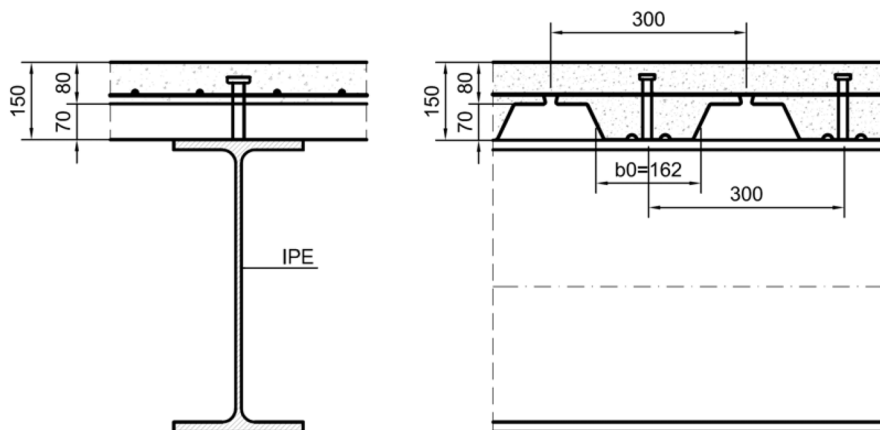
| Nosač Composite beam | Gredni nosač Self weight approach | | | Ortotropna ploča (čelični nosač+AB ploča) Orthotropic floor structures (steel beam + concrete slab) | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|------------|
| | m_g (kN/m) | δ_m (mm) | f_0 (Hz) | m_p (kg/m ²) | m_g (kg/m ²) | f_{0s} (Hz) | f_{0b} (Hz) | f_0 (Hz) |
| SN1 | 19,00 | 7,41 | 6,54 | 468,91 | 483,44 | 13,98 | 6,52 | 5,87 |
| SN2 | 19,06 | 13,31 | 4,88 | 468,91 | 485,73 | 13,98 | 4,87 | 4,61 |
| SN2-1 | 19,62 | 4,52 | 8,37 | 468,91 | 500,00 | 13,98 | 8,35 | 7,26 |
| SN3 | 19,31 | 15,03 | 4,59 | 468,91 | 492,10 | 13,98 | 4,58 | 4,34 |
| SN3-1 | 20,27 | 10,60 | 5,47 | 468,91 | 516,57 | 13,98 | 5,45 | 5,06 |
| SN4 | 19,50 | 22,22 | 3,78 | 468,91 | 496,94 | 13,98 | 3,77 | 3,63 |

Čelični nosač - standardni vruće valjani IPE i HEB profili spregnuti su sa armirano-betonskom pločom na profilisanom limu CF70 (pravac profilacije lima je upravan na pravac nosača), videti sliku 5. Nosači SN2-1 i SN3-1 jesu varijantna rešenja s nosačima jačim od osnovnih nosača SN2 i SN3, respektivno. U poređenju sa SN2, povećana je visina poprečnog preseka nosača SN2-1, dok je u slučaju nosača SN3-1 IPE profil zamenjen HEB profilom iste visine. Za sprežanje se koriste zavareni moždanici s glavom, prečnika 19 mm za nosače SN1 i SN2, odnosno 22 mm za ostale nosače. Visina moždanika jeste 120 mm. Ukupna visina betonske ploče na profilisanom limu iznosi 150 mm, a visina betona iznad gornje ivice profilisanog lima jeste 80 mm (videti sliku 5). Kvalitet čelika od kojeg su izrađeni vruće valjani profili i profilisani lim jeste S235, a klasa čvrstoće betona - C30/37. U svim analiziranim numeričkim primerima, pored sopstvene težine konstruktivnih elemenata, u obzir je uzeto i korisno opterećenje od 2,5 kN/m², opterećenje u toku gradnje od

Composite steel-concrete beams are made from steel beams (standard hot-rolled IPE and HEB sections) and reinforced concrete slabs on profiled sheet CF70 (direction of profiling is perpendicular to the beam axis), as shown in Figure 5. Composite beams SN2-1 and SN3-1 are alternative solutions with larger steel sections in relation to the steel sections used for composite beams SN2 and SN3, respectively. Steel section used for SN2-1 composite beam is higher in relation to the steel section used for SN2 composite beam and in the case of SN3-1 composite beam IPE section is replaced with HEB section with same height. Composite action between steel beam and composite slab is achieved with 19 mm diameter welded headed studs for composite beams SN1 and SN2 and 22 mm diameter for other beams. The height of the welded headed studs is 120 mm. Total height of composite concrete slab on profiled sheet is 150 mm and height of the concrete slab above upper edge of profiled sheet is 80 mm (see Figure 5). All steel sections and profiled sheet which are analyzed in

0,75 kN/m² i opterećenje od završnih radova i instalacija od 1,0 kN/m². Proračun graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti izvršen je prema preporukama datim u SRPS EN 1994: 2012 [4], pri čemu je nosač raspona 15 m proračunat kao nosač koji je poduprt u toku gradnje. Za sve nosače predviđeno je nadvišenje čeličnog profila za vrednost koja odgovara deformaciji nosača pre dostizanja spregnutog dejstva.

numerical examples are made from steel grade S235 and concrete strength class is C30/37. Beside the self weight of all analyzed members of composite steel-concrete floor structures, same loads are adopted in all numerical examples: 2,5 kN/m² of imposed load, 0,75 kN/m² of loads during construction and 1,0 kN/m² of finishings and installations. Calculation of ultimate and serviceability limit states is performed according to recommendations given in SRPS EN 1994: 2012 [4] and composite beam with 15 m span is calculated as beam supported during construction in the middle of the span. For all analyzed composite beams, precamber of the steel section is predicted for the value of beam vertical deflection which is reached before composite action is envisaged.



Slika 5. Geometrija analiziranih podnih nosača
Figure 5. Layout of analyzed composite beams

Prigušenje konstrukcije usvojeno u svim analiziranim primerima jeste 3%. Prilikom proračuna sopstvene frekvencije oscilovanja, prema preporukama datim u literaturi [1], [12], [13], masu konstrukcije koja osciluje čini stalno opterećenje i 10% korisnog opterećenja. Za analizirane gredne nosače, sopstvene frekvencije oscilovanja prikazane su u tabeli 4.

Adopted natural damping of all analyzed structural members is 3%. For determination of natural frequency of floor structures, according to the recommendations given in [1], [12] and [13], 10% of imposed loads together with self weight of the structure are used for calculation of modal mass. Natural frequencies of all analyzed composite beams are shown in Table 4.

Tabela 5. Nivoi prihvatljivosti vibracija
Table 5. Acceptance levels for floor structures exposed to vibrations

| Nosač Composite beam | BS 6472 [11] | | Arcelor-Mittal [14] | | | | | Klasa Class |
|----------------------------|--------------|------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | C_f | R | M_{mod} (kg) | δ_p (mm) | δ_g (mm) | δ_{total} (mm) | M_{total} (kg) | |
| SN1 | 0,20 | 8,03 | 15470 | 8,29 | 7,41 | 15,69 | 7050 | D |
| SN2 | 0,26 | 7,34 | 19430 | 8,29 | 13,31 | 21,60 | 8844 | D |
| SN2-1 | 0,20 | 0,15 | 20000 | 8,29 | 4,52 | 12,81 | 9135 | C |
| SN3 | 0,31 | 7,13 | 23620 | 8,29 | 15,03 | 23,32 | 10790 | D |
| SN3-1 | 0,20 | 4,73 | 24800 | 8,29 | 10,60 | 18,88 | 11240 | C |
| SN4 | 0,40 | 6,59 | 29820 | 8,29 | 22,22 | 30,50 | 13790 | C |

Nivoi prihvatljivosti spregnutih grednih nosača koji su prikazani u tabeli 5, pokazuju da prema BS 6472 [11] svi analizirani gredni nosači, izuzev nosača SN2-1, imaju vrednost faktora R između 4 i 8, odnosno razmatrani gredni nosači u okviru spregnutih međuspratnih konstrukcija se mogu koristiti u slučajevima prostorija predviđenih za radionice i kancelarije. Nosač SN2-1 zadovoljava kriterijume vibracija za upotrebu u objektima svih namena, pa tako i u međuspratnim konstrukcijama bolnica i operacionih sala, za koje su definisani najstroži uslovi ($R < 1$) BS 6472 [11].

Prema preporukama koje je dao Arcelor-Mittal [14], analizirani gredni nosači pripadaju klasi C i D. Nosači raspona 8, 10 i 12 metara (SN1, SN2 i SN3) pripadaju klasi D i mogu se koristiti u slučaju međuspratnih konstrukcija prostorija za stanovanje, kancelarija, sportskih i industrijskih objekata, što omogućava raznovrsniju primenu ovih nosača u pogledu namene objekta u odnosu na BS 6472 [11]. Nosači SN2-1 i SN3-1 sa znatno većim čeličnim profilima jesu klase C, što omogućava da budu prihvatljivi u pogledu vibracija u objektima skoro svih namena (izuzev kritičnog radnog prostora). Analizirani gredni nosači ne zadovoljavaju iskustvene vrednosti koje propisuje Nacionalni prilog SRPS EN 1990/NA [9], za uobičajeno zadovoljavajuće ponašanje.

Kada međuspratne konstrukcije treba da zadovolje strože kriterijume vibracija, nije opravdano korišćenje čelika kvaliteta višeg od S275. Izborom čelika boljih mehaničkih svojstava, dobijaju se manji poprečni preseki, čime se smanjuje krutost nosača, što za rezultat ima manje vrednosti sopstvenih frekvencija i pogoršanje karakteristika iz aspekta prihvatljivih vibracija. Stepem iskorišćenja nosivosti poprečnog preseka analiziranih podnih nosača, u ovom radu, jeste od 69% do 77% (nosači SN1, SN2, SN3 i SN4) od plastičnog momenta nosivosti spregnutog poprečnog preseka. Na osnovu dobijenih rezultata, može se izvesti zaključak da u slučajevima kada se zahteva da konstrukcija ima bolje dinamičke karakteristike u pogledu vibracija, granično stanje upotrebljivosti postaje merodavan kriterijum za dimenzionisanje.

Na osnovu analize rezultata prethodnih primera, može se zaključiti da značajna promena dinamičkih karakteristika konstrukcije i poboljšanje komfora u pogledu vibracija zahteva rešenje s nosačima znatno većih visina, što podrazumeva i povećanje spratnih visina.

6 ZAKLJUČCI

Pri projektovanju spregnutih međuspratnih konstrukcija - koje se po svojim dinamičkim karakteristikama mogu svrstati u vitke konstrukcije - posebnu pažnju treba posvetiti proveru graničnih stanja upotrebljivosti, koja često mogu biti merodavna za dimenzionisanje. Konstrukcije koje ne zadovoljavaju kriterijume vibracija za zahtevanu namenu objekta jako je teško, neekonomično, a često i neizvodljivo, naknadno preprojek-

Acceptance levels for composite beams exposed to vibrations which are presented in Table 5, indicate that all analyzed composite beams, except composite beam SN2-1, have multiplying factor R between 4 and 8, according to BS 6472 [11]. Therefore, those composite beams as part of the composite floor structures can be used for workshops and offices. Composite beam SN2-1 satisfies the vibration acceptance criteria for all intended uses of floor structures, even in the composite floor structures of hospitals and surgery rooms, which have the strictest acceptance criteria ($R < 1$) BS 6472 [11].

According to the recommendations given by Arcelor-Mittal [14], considered composite beams belong to floor response class C and D. Composite beams with 8, 10 and 12 m span (SN1, SN2 and SN3) belong to floor response class D and should be used in floor structures of residential buildings, office buildings, sport and industrial facilities, which gives possibility for diverse application of those composite beams regarding the intended use of the structure in relation to the acceptance criteria given in BS 6472 [11]. Composite beams SN2-1 and SN3-1, with significantly larger steel sections, belong to the floor response class C providing the use of these composite beams in buildings of almost every intended use (except critical areas). Analyzed composite beams fail to satisfy indicative recommendations given in National Annex SRPS EN 1990/NA [9], for usually satisfactory behaviour.

When it is expected that floor structure exposed to vibrations satisfy strict acceptance criteria, use of the steel grade higher than S275 is unreasonable. Adoption of steel materials with higher mechanical properties is related to the adoption of smaller steel sections with lower geometrical properties resulting in lower natural frequencies and deterioration of characteristics important from the aspect of vibrations criteria. Cross section resistance utilization degree for analyzed composite beams in this paper is between 69% and 77% (composite beams SN1, SN2, SN3 and SN4) considering design value of the plastic resistance moment of the composite section. Based on the obtained results of numerical examples it can be concluded that in the situations when better dynamic properties of the structure due to floor vibrations are requested, serviceability limit state becomes authoritative criteria for structures design.

Based on the obtained results of previously explained numerical examples, it can be concluded that significant modification of structures dynamic properties and improvement of comfort regarding floor vibrations require solutions with significantly higher cross sections of steel beams which leads to the increase of storey height.

6 CONCLUSIONS

During the design of composite steel-concrete floor structures which can be classified as slender structures according to their dynamic properties, special attention should be given to serviceability limit states verification, which can often be authoritative criteria for structures design. Subsequent re-design of structures which fail to satisfy vibrations acceptance criteria for intended use of the structure is very difficult, not economical and often

tovat. Jasno definisanje nivoa prihvatljivosti vibracija međuspratnih konstrukcija u fazi projektovanja, u zavisnosti od namene objekta i zahteva investitora, veoma je važno radi zadovoljenja predviđenih kriterijuma, ispunjenja uslova funkcionalnosti i komfora ljudi koji borave unutar objekta. Ovo je veoma važno, jer zahtevani nivo komfora - kako je pokazano na primerima - direktno utiče na dimenzije čeličnih nosača, a samim tim - i na vrednost investicionih troškova.

Postojeća domaća regulativa, SRPS EN 1990:2012 [5] i SRPS EN1990/NA [9], daje samo okvirne (iskustvene) preporuke za ocenu prihvatljivosti konstrukcija u pogledu vibracija međuspratnih konstrukcija. Evrokod, takođe, ne daje preciznije preporuke za proračun vibracija međuspratnih konstrukcija. Treba naglasiti još i to da sopstvena frekvencija konstrukcije nije jedini parametar za ocenu prihvatljivosti u pogledu vibracija, te da slepo praćenje konzervativnih uslova u pogledu frekvencija može dovesti do neracionalnih rešenja konstrukcija. U različitoj stručnoj literaturi mogu se pronaći preporuke i pojednostavljeni postupci za proračun dinamičkih karakteristika konstrukcije, što je veoma značajno za uobičajenu inženjersku praksu, s ciljem lakšeg sagledavanja različitih kriterijuma u pogledu vibracija, koji moraju biti zadovoljeni prilikom projektovanja konstrukcija.

unfeasible. Strict definition of acceptance criteria of floor structures exposed to vibration during the structure design, depending on the intended use of the object and client demands is very important in order to satisfy envisaged criteria, fulfilment of functionality requirements and comfort of the people inside the building. This is very important considering that required comfort level, as shown through numerical examples, directly influences the dimensions of the steel sections and consequently the value of the investment costs.

Existing national standards, SRPS EN 1990:2012 [5] and SRPS EN1990/NA [9], define only rough (indicative) recommendations for evaluation of acceptance criteria regarding vibrations of floor structures. Also, Eurocode fails to provide more precise recommendations for calculation of floor structures exposed to vibrations. It should also be noted that natural frequency of structure is unlikely the only parameter for evaluation of acceptance criteria regarding vibrations of floor structures and strict follow of conservative requirements in terms of frequencies can lead to irrational structural solutions. Recommendations and simplified procedures for calculation of structure dynamic properties can be found in different specialized literature, which is very important for ordinary engineering practice in order to facilitate consideration of the various criteria in terms of floor vibrations, which should be satisfied during structure design.

7 LITERATURA REFERENCE

- [1] A.L. Smith, S.J. Hicks, P.J. Devine: Design of Floors for Vibration: A New Approach, Steel Construction Institute, SCI PUBLICATION P354, Revised Edition 2009.
- [2] NA to BSEN 1991-2:2003: UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, British Standards Institution, London, UK, 2008.
- [3] SRPS EN 1991-2: Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 2: Saobraćajno opterećenje na mostovima, Beograd, Srbija: Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [4] SRPS EN 1994-1-1: Evrokod 4: Projektovanje spregnutih konstrukcija od čelika i betona - Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, Beograd, Srbija: Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [5] SRPS EN 1990: Evrokod 0: Osnove projektovanja konstrukcija: Beograd, Srbija: Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [6] SRPS EN 1991-1-1: Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 1-1: Opšta dejstva - Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade, Beograd, Srbija: Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [7] SRPS EN 1991-1-4: Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 1-4: Opšta dejstva - Dejstva vetra, Beograd, Srbija: Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [8] International Standard ISO 10137: Bases for design of structures- Serviceability of buildings and walkways against vibrations, International Standard Organization (ISO), Switzerland, 2007.
- [9] SRPS EN 1990/NA: Evrokod - Osnove projektovanja konstrukcija - Nacionalni prilog, Beograd, Srbija: Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [10] Z. Marković: Granična stanja čeličnih konstrukcija prema Evrokodu, Akademska misao, Beograd, 2014. godine.
- [11] British Standard BS 6472: Guide to Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), BSI, Switzerland, 1992.
- [12] T.A. Wayatt: Design Guide on the Vibration on Floors, Steel Construction Institute, SCI PUBLICATION 076, 1989.
- [13] M. Feldmann, Ch. Heinemeyer, Chr. Butz, E. Caetano, A. Cunha, F. Galanti, A. Goldack, O. Hechler, S. Hicks, A. Keil, M. Lukic, R. Obiala, M. Schlaich, G. Sedlacek, A. Smith, P. Waarts: Design of floor structures for human induced vibrations, Background document in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, ECCS, Italy, 2009.
- [14] ArcelorMittal: Design Guide for Floor Vibrations, ArcelorMittal Commercial Sections, Luxembourg.

REZIME

VIBRACIJE SPREGNUTIH NOSAČA MEĐUSPRATNIH KONSTRUKCIJA OD ČELIKA I BETONA, IZAZVANIH AKTIVNOSTIMA LJUDI

Nina GLUHOVIĆ
Milan SPREMIĆ
Zlatko MARKOVIĆ
Dragan BUĐEVAC
Nenad FRIC

Najnovije tendencije u građevinarstvu u pogledu projektovanja vitkih konstrukcija s velikim rasponima, velikim otvorenim unutrašnjim prostorima, nekonvencionalnim oblicima i konstrukcijskim rešenjima, često uzrokuju izražene probleme u pogledu graničnih stanja upotrebljivosti. Vitke konstrukcije velikih raspona - s niskim sopstvenim frekvencijama oscilovanja i sopstvenim koeficijentom prigušenja - značajno utiču na dinamički odgovor konstrukcije. Izražene vibracije međuspratnih konstrukcija, izazvane ljudskim aktivnostima, mogu veoma da utiču na funkcionalnost objekta, komfor ljudi i kvalitet života unutar objekta. Preporuke za projektovanje spregnutih konstrukcija, s ciljem zadovoljenja kriterijuma vibracija, mogu se naći u različitim standardima. U ovom radu dat je kratak prikaz proračuna spregnutih nosača na dejstvo vibracija, kao i preporuke za proračun vibracija izazvanih ljudskim aktivnostima, putem prikaza dva proračunska kriterijuma.

Ključne reči: vibracije spregnutih međuspratnih nosača, sopstvene frekvencije oscilovanja, kriterijumi prihvatljivosti

SUMMARY

VIBRATIONS OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE FLOORS INDUCED BY HUMAN ACTIVITIES

Nina GLUHOVIC
Milan SPREMIC
Zlatko MARKOVIC
Dragan BUDJEVAC
Nenad FRIC

The latest demands in construction design towards slender structures with large spans, large open interiors, unconventional shapes and constructional solutions are leading to the extensive problems related to the serviceability limit state. Slender structures with large spans have lower natural frequencies and lower natural damping, considerably influencing the dynamic response of the structure. Annoying vibrations induced by human activities can significantly affect the structure's functionality, comfort of people and quality of life. Design recommendations for composite steel-concrete floor vibrations can be found in different standards. This paper presents a short overview of design procedures for vibrations of composite steel-concrete beams and design recommendations of floor vibrations induced by human activities, through two design criteria.

Key words: composite steel-concrete floor vibrations, natural frequency, vibration acceptance criteria