

УТИЦАЈ ХИДРОДИНАМИЧКИХ И ВИБРАЦИОНИХ КАРАКТЕРИСТИКА РЕКЕ НА АМБИЈЕНТАЛНИ АКУСТИЧКИ ШУМ

Миодраг С. Врачар, Војнотехнички институт, Београд, Катанићева 15

Садржај – У раду је извршено нумеричко моделовање турбулентних и вибрационих појава дела речног тока реке Саве. Добијени резултати су поређени са спектром амбијенталног шума који је измерен на посматраној локацији. Овом анализом је обухваћена област од 0 до 200 Hz. Резултати обављене анализе указују да је амбијентални шум, у наведеном опсегу фреквенција, снажно корелисан са овим процесима.

1. УВОД

Хидроакустички амбијентални шум може се описати као еластични поремећај водене средине чији је спектар у широком опсегу фреквенција, практично од нуле, па све до неколико стотина килохерца. Наравно, описивање карактеристика шума у тако широком опсегу фреквенција није могуће извршити на јединствен начин. У овом раду су анализирани појаве и процеси, као и особине речног тока које утичу на карактеристике амбијенталног шума у опсегу ниских фреквенција, мањих од 200 Hz. На основу проведене анализе може се закључити да доминантну улогу у овим процесима имају турбуленција и вибрациони модови речне водене средине. Турбулентни утицаји се манифестују у области ниских фреквенција, нижим од 10 Hz, док су вибрациони утицаји доминантни у опсегу фреквенција између 20 и 100 Hz. Извршене су нумеричке симулације ових процеса на реалним сегментима речног тока, и то турбуленција је анализирана на релативно кратком току укупне дужине 2.5 m, док су вибрациони модови израчунати на сегменту речног тока дужине 1500 m. Резултати нумеричке симулације турбуленције и вибрационих модова речне водене масе су квалитативно упоређени са резултатима мерења хидроакустичког амбијенталног шума реке.

2. МОДЕЛИ ПРОТОКА НЕСТИШЉИВОГ ФЛУИДА И ТУРБУЛЕНЦИЈА

Navier-Stokes систем једначина се користе за фундаментални опис како ламинарног, тако и турбулентног протока флуида. Решавање проблема у овој области подразумева решавање система нелинеарних диференцијалних једначина. Протицање флуида може се окарактерисати као нестишљиво, ламинарно и турбулентно уз постојање слободне површине док је локална расподела дубине тако расподељена да је задовољена једначина континуитета. Постоји велики број природних протицаја који се могу анализирати на овај начин, као што су то реке, канали, морске струје у теснацима и заливима. Систем једначина који се користи

за опис таквих појава назива се плитководна проточна форма. Нумеричко решавање ових једначина, односно, примена метода коначних елемената у моделовању хидродинамичког протока започето је 1976 [1]. Систем парцијалних диференцијалних једначина које се користе за описивање хидродинамичког протока се састоји од једначине континуитета, одржања момента, притиска и конвекционо-дифузионе једначине:

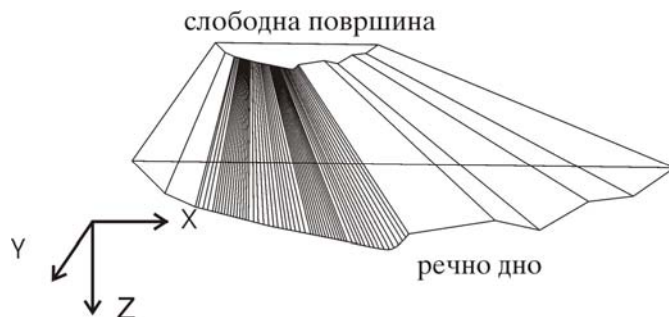
$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \Omega_{ij} u_j - \tau_i \Big|_b^h &= 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g \frac{\partial h}{\partial x_i} - g \frac{\partial b}{\partial x_i} - \frac{gh}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Где је h дубина флуида, $b(x_i)$ је профил дна, а u_i је дубински усредњени вектор брзине који је дефинисан на следећи начин:

$$u_i(x, y, t) \equiv \frac{1}{h-b} \int_b^h u_i(x, y, z, t) \cdot dz. \quad (2)$$

Stokes-ов напонски тензор је дефинисан са σ_{ij} а $\Omega_{ij} = 2\omega \epsilon_{ij} \sin \phi$ је Coriolis-ов коефицијент (ω је угаона брзина, а ϕ географска ширина, док је τ_i је нормална компонента напона услед деловања ветра на водену површину).

Типични облик речног тока је приказан на слици 1.



Сл. 1. Сегмент речног корита

У основи ових једначина је постојање слободне површине и дубинска расподела протока је такве природе да је обезбеђен услов одржања континуитета. Турбулентни проток се карактерише преко флукутирајућег брзинског поља. Такве флукутације доводе и до флукутације других величина, као на пример:

момента, енергије, густине, ρ , и др. Постоји више модела помоћу којих је могуће описати појаву турбуленције, и то:

1. Spalart-Allmaras модел;
2. k - ε модели;
3. k - ω модели;
4. v^2 - f модел;
5. Reynolds-ов напонски модел и
6. Велики вртложни модел.

Бројност физичких модела указује на потребу да се врши пажљиви одабир одговарајућег модела који би био прикладан у решавању одговарајућег проблема.

Потпуно решавање Navier-Stokes једначина у временском домену и у случају постојања сложене геометрије представља сложен задатак. Стога, у пракси се обично проблем поједоставаљује, тако што се флукуације чији је утицај мањег значаја потпуно занемарују. Тако на пример, Рејнолдсово усредњавање Navier-Stokes-ових једначина као резултат даје транспортне једначине које описују средње вредности протока, што значајно редукује потребно рачунарско време. Рејнолдсов метод усредњавања је превагнуо у прорачунима који се врше у циљу решавању практичних инжењерских проблема.

У овом раду проблем турбулентног тока реке је решаван применом класичног k - ε модела. Наиме, овај модел је полуемпиријски и темељи се на моделу транспортне једначине турбулентне кинетичке енергије (k) и брзине дисипације (ε).

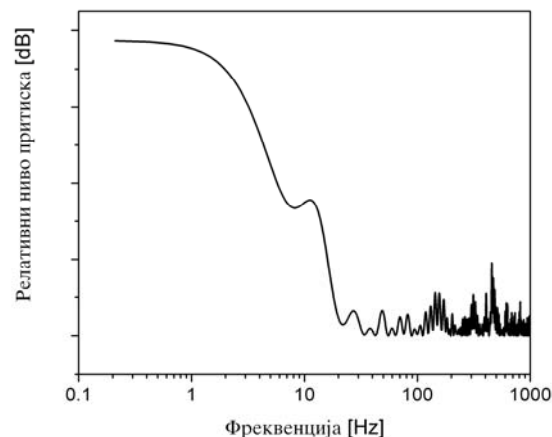
Нумеричком симулацијом реалног сегмента речног тока, који је добијен екструдовањем реалног речног профила на дужину од 2.5 m и израчуната је кинетичка енергија турбуленције у свим чворовима. Анализа расподеле ове енергије, односно притиска, у фреквенцијском домену је извршена применом брзе Фуријеове трансформације и добијени резултат је приказан на слици 2.

Основне карактеристике нумеричког модела су приказане у Табели 1.

ТАБЕЛА 1.
Карактеристике модела реке *Save* за прорачун турбулентног утицаја

Физичка карактеристика	Вредност	Јединица
Број тетраедарских запремина	647578	
Број троугаоних улазних површина	53510	
Број излазних троугаоних површина	53336	
Број површина дна	1800	
Број троугаоних унутрашњих површина	1228305	
Број чворова	142764	
Минимална запремина тетраедра	$1.111981 \cdot 10^{-5}$	m^3
Максимална запремина тетраедра	$1.152432 \cdot 10^{-1}$	m^3
Минимална троугаона површина	$6.056146 \cdot 10^{-4}$	m^2
Максимална троугаона површина	$5.260213 \cdot 10^{-1}$	m^2
Брзина воде на улазној површини	0.5	ms^{-1}

Физичка карактеристика	Вредност	Јединица
Интезитет турбуленције	5	%
Укупна запремина модела	$8.922435 \cdot 10^3$	m^3
Количник вртложне и ламинарне вискозности	$\frac{\mu_t}{\mu} = 10$	



Сл. 2. Спектар турбулентног притиска који је добијен применом класичног k - ε модела на сегмент речног тока реке *Save*.

Резултат нумеричке симулације показује добро слагање са релевантним литературним подацима [2].

3. СТРУКТУРНО-ВИБРАЦИОНИ МОДЕЛ РЕЧНЕ ВОДЕНЕ МАСЕ

Модел реке за потребе вибрационе анализе је такође добијени екструдовањем реалног речног профила. Анализиран је речни сегмент дужине 1500 m са истим попречним профилем. Основни подаци о геометрији модела су приказани на систематичан начин у Табели 2, а облик речног корита је исти као на слици 1.

ТАБЕЛА 2.
Физичке карактеристике модела реке *Save* за процену утицаја вибрација

Физичка карактеристика	Вредност	Јединица
Запремина	$5,86087 \cdot 10^6$	m^3
Маса	$5,86087 \cdot 10^9$	kg
Површина река/гло	435.527,80	m^2
Површина границе ваздух-вода	423.601,00	m^2
Површина попречног пресека реке	3.907,25	m^2
Број чворова	6.058	
Број елемената	2.903	

Моду еластичности речне воде износи $2.1025 \cdot 10^9$ Pa. У овом случају је занемарена чињеница да речни ток представља тродимензионални вискозно ламинарни

и/или турбулентни ток воде, обзиром да је овај утицај анализиран у претходном делу.

Наиме, показано је да турбулентна компонента у спектру притиска шума амбијента се запажа на фреквенцијама нижим од 10 Hz, за случај средњих брзина протицања које су карактеристичне за анализирани реке.

Гранични услови са којима је обављена вибрациона анализа модела реке су дефинисани на следећи начин:

- гранична површина ваздух/вода је изложена деловању атмосферског притиска;
- речно дно дефинисано као крута површина а
- оба попречна пресека су дефинисана као слободне површине у правцу воденог тока.

4. ВИБРАЦИОНА АНАЛИЗА И LANCZOS-ОВА МЕТОДА

Модови модела река су израчунати применом метода коначних елемената. Сваки елемент модела је концептуално посматран као систем маса-опруга. Модел реке је упрошћен тако што је претпостављено да вискозно пригушење не постоји, тако да анализа сопствених вредности омогућава израчунавања реалних нормалних модова. Слични резултати се добијају и у случају када вискозно пригушење постоји али је пропорционално крутости, тако да је пригушење расподељено дуж модела као маса и крутост.

Познато је да проблем анализе сопствених вредности, и стим у вези структурних вибрација, је рачунарски интезиван процес. Проблем вибрационих сопствених вредности је могуће дефинисати на следећи начин

$$[\mathbf{K}] \cdot \{\mathbf{X}\} = \omega^2 [\mathbf{M}] \cdot \{\mathbf{X}\}, \quad (3)$$

где је $\{\mathbf{X}\}$ вектор помераја, $[\mathbf{K}]$ и $[\mathbf{M}]$ су симетричне матрице крутости и масе, респективно, а $\omega^2 = \lambda$ је фреквенцијски параметар [3-5].

Множењем горње једначине са $[\mathbf{M}]^{-1}$ и груписањем добија се

$$[[\mathbf{M}]^{-1} \cdot [\mathbf{K}] - \lambda \cdot [\mathbf{I}]] \cdot \{\mathbf{X}\} = 0 \quad (4)$$

где је $[\mathbf{M}]^{-1} \cdot [\mathbf{K}]$ тзв. динамичка матрица, а $[\mathbf{I}]$ јединична матрица. Нетривијална решења постоје уколико је детерминанта система једнака нули.

$$\det[[\mathbf{M}]^{-1} \cdot [\mathbf{K}] - \lambda [\mathbf{I}]] = 0. \quad (5)$$

Овај услов је добро познат као карактеристична једначина система. То је полином по λ за систем са n степени слободне. Корени λ_i карактеристичне једначине се називају сопствене вредности непригушених природних фреквенција система, а одређују се помоћу једначине $\omega_i^2 = \lambda_i$.

Заменом λ_i у матричну једначину (4) добијамо одговарајуће природне модалне облике који се називају сопствени вектори $\{\phi_i\}$.

$$[\mathbf{K}] \cdot \{\phi_i\} = \lambda_i \cdot [\mathbf{M}] \cdot \{\phi_i\} \quad (6)$$

Два мода задовољавају следећу једначину

$$(\lambda_i - \lambda_j) \cdot \{\phi_i\}^T \cdot [\mathbf{M}] \cdot \{\phi_j\} = 0. \quad (7)$$

Ако је $i = j$, тада прозвод $\{\phi_i\}^T \cdot [\mathbf{M}] \cdot \{\phi_i\}$ није нужно нула, већ је једнак некој скаларној константи M_i која се назива генералисана маса или модална маса.

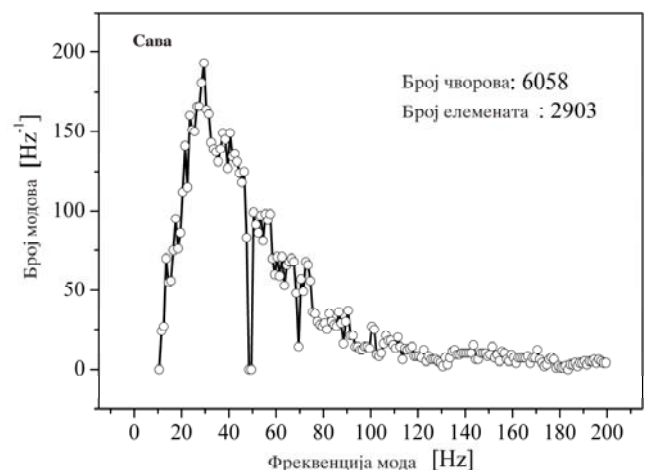
Бројни и различити алгоритми се данас користе за израчунавање сопствених вредности и сопствених вектора. Lanczos-ова метода омогућава израчунавање неколико парова сопствених вредности и сопствених вектора у случају модела који поседују велики број степени слободне. Велики број модова се може одредити помоћу тзв. Lanczos-овог алгоритма са вишеструким померањем. Сопствене вредности се процењују након релативно малог броја корака. Такође, мање сопствене вредности матрице је могуће израчунати без факторизације. Lanczos-ов метод је могуће описати помоћу неколико фаза. Пре свега неопходно је увести мали померај у спектар сопствених вредности. Након тога врши се декопозиција матрица крутости и маса. Одабирањем почетног вектора и извођењем m Lanczos-ових циклуса да би се генерисали дијагонални елементи. Метода дељења се користи за добијање сопствених вредности три-дијагоналног система. Сопствена вредност се претвара у жељени фреквенцијски параметар помоћу

$$\omega_k = \delta + \frac{1}{\lambda_k} \quad (8)$$

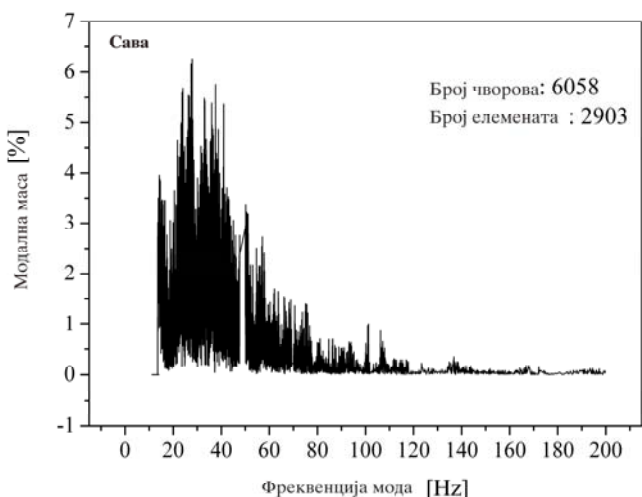
Где је ω_k фреквенцијски параметар, δ параметар помераја а λ_k је сопствена вредност.

5. РЕЗУЛТАТИ СТРУКТУРНЕ ВИБРАЦИОНЕ АНАЛИЗЕ

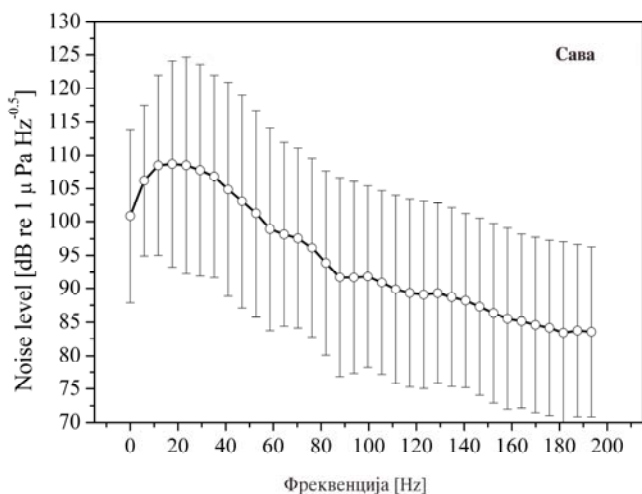
Сопствене вредности, модалне фреквенције и модалне масе се израчунавају у фреквенцијском опсегу од нуле до 200 Hz. Више хиљада вертикалних и трансверзалних модова је добијено приликом израчунавања сваког речног модела. Резултати анализе су приказани у облику зависности броја модалних фреквенција у појасу ширине 1 Hz у функцији од фреквенције и модалне масе у процентима укупне масе у функцији фреквенције мода. Модална структура модела реке *Sava* је приказана на сликама 3 и 4.



Сл. 3. Модел реке Sava: број модалних фреквенција у појасу ширине 1 Hz у функцији од модалне фреквенције.



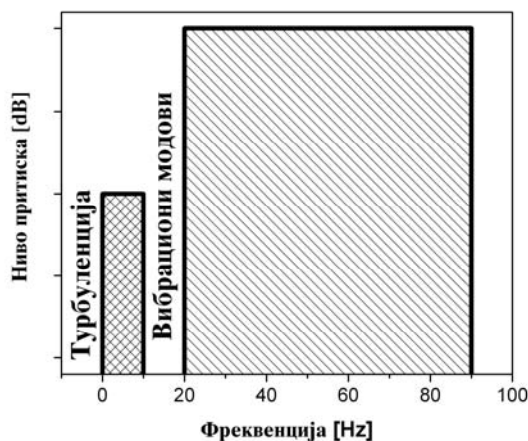
Сл. 4. Модел реке Сава: модална маса изражена у процентима укупне масе модела у функцији од модалних фреквенција.



Сл. 5. Спектар амбијенталног шума реке Сава.

6. ЗАКЉУЧАК

Нумеричко моделовање појава турбуленције и вибрација реке Сава указују да се те појаве јављају у области ниских фреквенција, до око 100 Hz, слика 6.



Сл. 6. Области фреквенција у којима се манифестују турбулентни и вибрациони утицаји на шум амбијента реке Сава.

Квалитативна поређења са спектром амбијенталног шума потврђују ове тврдње. Наиме амбијентални шум показује постојање релативно широког максимума у области фреквенција од 20 до 40 Hz чија је природа вибрациона и последица је постојања различитих побуда које се преко границе тло – вода преносе у водену средину. Турбулентни утицај се манифестује на ниским фреквенцијама, нижим од 10 Hz и овај утицај је значајно нижег нивоа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.J.Baker, "Finite Element Computational Fluid Mechanics", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1983.
- [2] G.M. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources", J.Acoustic.Soc.Am. **62**, No. 1, 1962, pp 1936-1956.
- [3] Susan W.Bostic and Robert E. Fulton, "Implementation of the Lanczos method for structural vibration analysis on a parallel computer", Computers & Structures, Vol. **25**, No. 3, 1987, pp 395-403.
- [4] V.I. Weingarten, R.K. Ramanathan and C.N. Chen, "Lanczos eigenvalue algorithm for large structures on a minicomputer", Computers & Structures, Vol. **16**, No. 1-4, 1983, pp 253-257.
- [5] Edward L. Wilson, "An eigensolution Strategy for large systems", Computers & Structures, Vol. **16**, No. 1-4, 1983, pp 259-265.

Abstract – Numerical models of the turbulent and vibrating phenomenon of the river Sava are presented in this work. The results of the numerical simulation these phenomenon been compared with the spectra of the river ambient noise at the same river location. The turbulent and vibrating effects analyzed in frequency range from zero to 200 Hz. The results of the numerical simulation shows that spectra of the river ambient noise, in observed frequency range, are strongly correlated with mentioned process.

INFLUENCE OF THE HYDRODYNAMIC AND VIBRATING PHENOMENON ON THE RIVER ACOUSTIC AMBIENT NOISE CHARACTERISTICS

Миодраг Врачар