

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У
БЕОГРАДУВеће научних области
техничких наука7/2

(Број захтева)

(Назив већа научне области
коме се захтев упућује)16.01.2025.

(Датум)

ЗАХТЕВ

**за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о
одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**ПРОСТИРАЊЕ ТАЛАСА КРОЗ МЕТАСТРУКТУРЕ ОД СПРЕГНУТИХ ЕЛАСТИЧНИХ,
ВИСКОЕЛАСТИЧНИХ И КРУТИХ СЕГМЕНАТА**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: Механика)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
НЕВЕНА (АЛЕКСАНДАР) РОСИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2018.
- Година уписа на докторске студије: 2018.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Михаило Лазаревић

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. N. Rosić, D. Karličić, M. Cajić, S. Adhikari and M. Lazarević, (2024), Wave propagation in tailored metastructures consisting of elastic beams and rigid bodies, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol.382, Iss.2279, pp.1-14, Sept.2024. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0362>, IF 2022: 5.0, M21
2. Nešić N., Cajić M., Karličić D., Lazarević M., Adhikari S., (2023). Vibration and stability of a nonlinear nonlocal strain-gradient FG beam on a visco-Pasternak foundation, Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering, pp.1-25, 2023, DOI:10.22190/FUME230419022N, IF 2022:7.9, M21a
3. P.Mandić, T.Šekara, M.Lazarević, M.Bošković, (2017), Dominant pole placement with fractional order PID controllers: D-decomposition approach, ISA Transactions, Vol.67, March 2017, pp. 76-86., 2017. DOI: 10.1016/j.isatra.2016.11.013 IF 2016: 3.4 M21a
4. M. Cajić, D. Karličić, M. Lazarević, (2017). Damped vibration of a nonlocal nanobeam resting on viscoelastic foundation: fractional derivative model with two retardation times and fractional parameters, Meccanica, vol.52, Issue 1-2, pp. 363-382, 2017, DOI: 10.1007/s11012-016-0417-z IF 2016: 2.196 M21
5. Lazarević, M., (2015). Elements of mathematical phenomenology of self-organization nonlinear dynamical systems: Synergetics and fractional calculus approach, International Journal of Non-Linear Mechanics, 73, 31-42, 2015, DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2014.11.011 IF 2014: 1.977 M21
6. D. Karličić, P. Kozić, S. Adhikari, M. Cajić, T. Murmu, M. Lazarević, (2015). Nonlocal mass nanosensor model based on the damped vibration of single-layer graphene sheet influenced by in-plane magnetic field, Int. Journal of Mech. Sciences, Volumes 96–97, June 2015, Pages 132–142. IF 2015: 2.481, M21
7. M. Cajić, M. Lazarević, D. Karličić, H.G. Sun, X. Liu, (2018). Fractional order model for vibration of a nanobeam influenced by the axial magnetic field and attached nanoparticles, Acta Mechanica, Acta Mechanica 229 (12), 4791-4815, 2018. IF 2017: 2.133 M22
8. M. Cajić, M.P. Lazarević, (2014). Fractional order spring/spring-pot/actuator element in a multibody system: Application of an expansion formula, Mechanics Research Communications 62 (2014) pp.44–56. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.08.009> IF 2013: 1.495 M22

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Милан Цајић

Звање: виши научни сарадник Математички институт САНУ

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Mukherjee, S., Maeder, M., Cajić, M., Kronowetter, F., Adhikari, S., & Marburg, S. (2024). Tailoring band gap properties of curved hexagonal lattices with nodal cantilevers. *Composite Structures*, 345, 118342. M21a
2. Rosić, N., Karličić, D., Cajić, M., Adhikari, S., & Lazarević, M. (2024). Wave propagation in tailored metastructures consisting of elastic beams and rigid bodies. *Philosophical Transactions A*, 382(2279), 20230362. M21
3. Cajić, M., Karličić, D., & Adhikari, S. (2024). Inerter-controlled topological interface states in locally resonant lattices with beyond-nearest neighbor coupling. *Journal of Applied Physics*, 135(18). M22
4. Chatterjee, T., Karličić, D., Cajić, M., Adhikari, S., & Friswell, M. I. (2023). Uncertainty quantification in inerter-based quasiperiodic lattices. *International Journal of Mechanical Sciences*, 249, 108258. M21a
5. Mukherjee, S., Cajić, M., Karličić, D., & Adhikari, S. (2023). Enhancement of band-gap characteristics in hexagonal and re-entrant lattices via curved beams. *Composite Structures*, 306, 116591. M21a
6. Cajić, M., Karličić, D., Christensen, J., & Adhikari, S. (2023). Tunable topological interface states in one-dimensional inerter-based locally resonant lattices with damping. *Journal of Sound and Vibration*, 542, 117326. M21a
7. Cajić, M., Christensen, J., & Adhikari, S. (2021). Tuning of topological interface modes in an elastic beam array system with inerters. *International Journal of Mechanical Sciences*, 205, 106573. M21a
8. Paunović, S., Cajić, M., Karličić, D., & Mijalković, M. (2019). A novel approach for vibration analysis of fractional viscoelastic beams with attached masses and base excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 463, 114955. M21

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 16.01.2025. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 7/2
Датум: 16.01.2025. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 16.01.2025. године донело је:

О Д Л У К У
о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **НЕВЕНЕ РОСИЋ**, маг. инж. маш. под насловом **„ПРОСТИРАЊЕ ТАЛАСА КРОЗ МЕТАСТРУКТУРЕ ОД СПРЕГНУТИХ ЕЛАСТИЧНИХ, ВИСКООЕЛАСТИЧНИХ И КРУТИХ СЕГМЕНАТА“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Александар Обрадовић, ред. проф., др Петар Мандић, ванр. проф. и др Данило Карличић, виши научни сарадник, Математички институт САНУ.

За менторе докторске дисертације именују се др Михаило Лазаревић, редовни професор Универзитета у Београду - Машинског факултета и др Милан Џајић, виши научни сарадник, Математички институт САНУ.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Невене А. Росић, маг. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета број 1981/3 од 24.12.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Невене А. Росић, маг. инж. маш. под називом:

**Простирање таласа кроз метаструктуре од спрегнутих еластичних,
вискоеластичних и крутих сегмената**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидаткињи

1.1. Биографски подаци

Невена А. Росић (рођена Аранђеловић), маг. инж. маш., рођена је 8. децембра 1994. године у Београду, Република Србија. Основну школу „Ђура Даничић“ у Београду, завршила је са одличним успехом. Након тога је похађала „Дванаесту београдску гимназију“, општи смер у Београду, коју је завршила као добитник дипломе „Вук Караџић“ за постигнут успех са просечном оценом 5.00 (пет и 00/100) у свакој школској години и проглашена је за ђака генерације.

На Универзитет у Београду – Машински факултет уписала се школске 2013/2014. године. Основне академске студије – машинско инжењерство завршила је 2016. године. Укупна просечна оцена током Основних академских студија износи 9,97 (девет и 97/100). Завршни рад на тему „Конвекција“, из предмета Термодинамика Б код проф. др Милана Гојака, одбранила је са оценом 10 (десет).

У току Основних академских студија поднела је, у својству проналазача, пријаву за признање малог патента под називом „Уређај за писање текста и управљање екстерним модулом на који је повезан, без гледања у екран“. Пријава МП-2015/0030 је поднета 5. јуна 2015. године. Мали патент је уписан у Регистар малих патената 18. априла 2016. године, и објављен у Гласнику интелектуалне својине број 3/2016 дана 30. јуна 2016. године.

Добитник је похвале за изванредан успех на првој, другој и трећој години Основних академских студија Машинског факултета Универзитета у Београду. У току прве и друге године Основних академских студија је била добитник стипендије за студенте Републике Србије, коју додељује Министарство просвете Републике Србије, док је на трећој години Основних академских студија била добитник стипендије Фонда за младе таленте Министарства омладине и спорта Републике Србије – „Доситеја“.

Излагала је свој проналазак, „Уређај за писање текста и управљање екстерним модулом на који је повезан, без гледања у екран“, на Међународном фестивалу иновација, знања и стваралаштва „Тесла фест“, који је одржан у октобру 2015. године у Новом Саду и том приликом јој је додељена златна плакета са ликом Николе Тесле.

Школске 2016/2017. године уписала је Мастер академске студије – машинско инжењерство, модул Механика, а завршила их је 26. септембра 2018. године, одбравивши са оценом 10 (десет) мастер рад на тему „Напонско-деформациона анализа стентова помоћу методе коначних елемената“ из предмета „Теорија коначних елемената“, под менторством проф. др Владимира Буљака. Укупна просечна оцена током Мастер академских студија износи 9,90 (девет и 90/100).

Добитник је похвале за изванредан успех на првој и другој години Мастер академских студија Машинског факултета Универзитета у Београду. У току прве године Мастер академских студија је била добитник стипендије за студенте Републике Србије, коју додељује Министарство просвете Републике Србије, док је на другој години Мастер академских студија била добитник стипендије Фонда за младе таленте Министарства омладине и спорта Републике Србије – „Доситеја“.

У школској 2018/2019. години уписала је Докторске академске студије – машинско инжењерство на Универзитету у Београду - Машинском факултету (број индекса Д01/2018). Кандидаткиња је положила све испите на Докторским академским студијама и тренутно је студент 3. године.

Кандидаткиња је од 28. децембра 2018. године запослена на Машинском факултету Универзитета у Београду, као асистент на Катедри за механику, и учествовала је у извођењу наставе на Основним и Мастер академским студијама, на следећим предметима катедре за Механику: Механика 1, Механика 2, Механика 3, Механика М, Механика робота, Биомеханика ткива и органа и Биомеханика локомоторног система.

Почевши од фебруара 2019. године учествовала је на пројекту „Динамика хибридних система сложених структура. Механика материјала“, који је финансирало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије. Од августа 2024. године учествује на пројекту „Примена Хидрогел Јонотронике у Мекој Роботици“, у оквиру програма билатералне научне и технолошке сарадње између Републике Србије и Народне Републике Кине.

Добитник награде „Растко Стојановић“ Српског друштва за механику, за самостални научни рад под насловом „Rotation Transformation Matrix of the Joint Coordinate System with the Application to the Knee Joint“, који је презентован на конференцији Eighth International Congress of Serbian Society of Mechanics, која је одржана јуна 2021. године у Крагујевцу.

Познавање страних језика

- Енглески језик - говори, чита и пише,
- Немачки језик - говори, чита и пише,
- Француски језик - споразумева се у свакодневном говору.

Познавање рада на рачунару

- Има значајне вештине кодирања у програмским језицима C/C++ и C#, као и „embedded“ програмирања, уз напредно коришћење софтвера Matlab/Simulink, Latex и Microsoft Office.
- Има вишегодишње искуство у коришћењу софтвера Abaqus, ANSYS и Comsol Multiphysics, као и SolidWorks, Inkscape и LabVIEW.
- Има сертификате за „web“ програмирање (HTML, PHP), објектно-оријентисано програмирање (сертификат за C# у Visual Studio и Java као положен изборни предмет на Основним академским студијама), рад са базама података (SQL Server), обраду слика и анимацију (GIMP, Macromedia Flash и 3D Studio MAX).

Истраживачке области

- Теоријска и примењена механика, биомедицинско инжењерство.

Остало

- Возачка дозвола за Б категорију возила.
- Тромесечна пракса током лета 2017. године у компанији MikroElektronika.
- Вишегодишњи члан Српског друштва за механику.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидаткиња Невена А. Росић, маг. инж. маш., уписала је Докторске академске студије – машинско инжењерство на Универзитету у Београду – Машинском факултету школске 2018/2019. године. У циљу реализације Програма усавршавања, положила је следеће обавезне и изборне предмете:

Назив предмета	Предметни наставник	ЕСПБ	Оцена
Обавезни предмети			
Виши курс математике	проф. др Слободан Радојевић	5	10
Нумеричке методе	проф. др Миодраг Спалевић	5	10
ОМНИР и комуникација	проф. др Милош Недељковић	5	10
Истраживање и публиковање 1	проф. др Александар Обрадовић	10	10
Истраживање и публиковање 2	проф. др Александар Обрадовић	15	10
Истраживање и публиковање 3	проф. др Зоран Митровић	20	10
Истраживање и публиковање 4	проф. др Зоран Митровић	8	10
Пројекат идеје докторске дисертације	проф. др Петар Мандић проф. др Михаило Лазаревић в. науч. сар. др Милан Џајић, Математички институт САНУ	30	10
Изборни предмети			
Механика континуума	проф. др Никола Младеновић	5	10
Механика локомоторног система	проф. др Михаило Лазаревић	5	10
Механика удара	проф. др Александар Томовић	5	10
Одабрана поглавља из биомеханике ткива и органа	проф. др Михаило Лазаревић	5	10
Одабрана поглавља из механике	проф. др Зоран Митровић	5	10
Рачун нецелобројног реда са применама у инжењерству	проф. др Михаило Лазаревић	5	10
Додатни изборни предмети			
Аналитичка механика	проф. др Оливера Јеремић	5	10
Динамика система крутих тела	проф. др Михаило Лазаревић	5	10
Одабрана поглавља из механике флуида	проф. др Александар Ђоћић	5	10
Одабрана поглавља из термодинамике	проф. др Милан Гојак	5	10
Напредна роботика – изабрана поглавља	проф. др Михаило Лазаревић	5	10
Оптимално управљање кретањем механичких система	проф. др Александар Обрадовић	5	10
Укупно ЕСПБ		158	

Кандидаткиња је од 2018. године запослена на Машинском факултету Универзитета у Београду, као асистент на Катедри за механику, и учествовала је у извођењу наставе на Основним и Мастер академским студијама, на следећим предметима катедре за Механику: Механика 1, Механика 2, Механика 3, Механика М, Механика робота, Биомеханика ткива и органа и Биомеханика локомоторног система.

У наставку је дат списак објављених научних радова и других релевантних резултата и активности кандидаткиње Невене А. Росић, маг. инж. маш., у вези са темом докторске дисертације:

Рад објављен у врхунском међународном часопису (M21)

[1] N. Rosić, D. Karličić, M. Cajić, S. Adhikari and M. Lazarević, 2024, Wave propagation in tailored metastructures consisting of elastic beams and rigid bodies, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 382, Issue 2279, pp. 1-14. DOI: 10.1098/rsta.2023.0362, IF 2022: 5.0, M21 (извор: KOBSON).

Рад објављен у националном часопису међународног значаја (M24)

[1] N. Rosić, D. Karličić, M. Cajić and M. Lazarević, 2022, Parametrically excited unidirectional wave propagation in thin beam phononics, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 49(2), pp. 137-155. DOI: 10.2298/TAM221030010R.

Радови саопштени на међународном скупу, штампани у изводу (M34)

[1] N. Rosić, M. Cajić, D. Karličić, M. Lazarević, 2024, Waves in beam metastructures with rigid bodies on inerter-based foundations, Booklet of abstracts of the "2nd International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering", Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, 12.-14. September 2024. Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, ISBN: 978-86-80593-77-7.

[2] N. Rosić, D. Karličić, M. Cajić, M. Lazarević, 2023, Wave propagation in periodic Timoshenko beams on different elastic foundation types, Booklet of abstracts of the "9th International Congress of Serbian Society of Mechanics", Vrnjačka Banja, Serbia, July 5-7, 2023. Belgrade: Serbian Society of Mechanics, ISBN: ISBN-978-86-909973-9-8.

[3] N. Rosić, D. Karličić, M. Cajić, M. Lazarević, 2022, Non-reciprocal wave propagation in periodically structured Timoshenko beams, Book of abstracts of the "1st International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering", Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts, 08-10. September, 2022. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ISBN: 978-86-6060-127-0.

Учешће у научно-истраживачким, стручним и образовно-развојним пројектима

[1] Пројекат ОН-174001: „Динамика хибридних система сложених структура. Механика материјала“, руководилац пројекта проф К. (Стевановић) Хедрих, Београд 2018.-2019.

[2] Пројекат „Примена Хидрогел Јонотронике у Мекој Роботици“, руководилац пројекта др Милан Цајић, Београд 2024.-2026.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидаткиња Невена А. Росић, маг. инж. маш., је својим досадашњим истраживачким активностима показала неопходно знање, заинтересованост и способност за научноистраживачки рад. Њени биографски подаци, објављени научни радови и други остварени резултати суштински су повезани са научном облашћу којој припада предложена тема, што кандидаткињу, према мишљењу Комисије, квалификује за самосталан научноистраживачки рад на предметној докторској дисертацији.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет планираних истраживања односи се на развој математичког модела као и нумеричког прорачуна који би био користан за ефикасно и сврсисходно одређивање дисперзних карактеристика аналитички описаних периодичних структура (метаструктура).

У ужем смислу, планирана истраживања усмерена су на метаструктуре које се преваходно састоје од редно или паралелно повезаних еластичних греда. Просторна периодичност структуре постиже се понављањем јединичних ћелија које се састоје од истих или различитих еластичних греда, повезаних крутим, еластичним или вискоеластичним сегментима, уз присуство различитих резонатора. Уз то се примењује и временска модулација параметара система у циљу постизања временске периодичности. Уопштавање модела периодичних структура, које се састоје од еластичних, вискоеластичних и крутих сегмената, уз просторно-временску модулацију параметара система, омогућава упоредну анализу утицаја различитих параметара на простирање таласа кроз такве сложене метаструктуре, са циљем да се омогући функционални дизајн таквих метаструктура, уз допринос бољем разумевању различитих механизма који доводе до феномена значајног пригушења или потпуног заустављања таласа, као и једносмерне (нереципрочне) пропагације таласа са фреквенцијама из одређеног опсега.

Периодичне структуре се могу представити као низ јединичних ћелија које се узастопно понављају. Оне показују интересантне и корисне особине које немају јединичне ћелије од којих су начињене, те су познате и под називом „метаструктуре“ (грч. μετά, са значењем изнад, више, преко) [1-4]. При наиласку таласа на границе између различитих делова структуре, долази до њиховог одбијања и преламања, као и до интерференције резултујућих таласа [1-4]. Када је таласна дужина упоредива са дужином јединичне ћелије структуре, долази до појаве Бреговог расејања, при чему се услед деструктивне

интерференције формира такозвана „зона заустављања“ на одређеним опсезима таласних дужина, тј. фреквенција [1-4]. Таласи чија фреквенција припада зауставном опсегу не могу да се простиру кроз такву структуру јер долази до њиховог значајног пригушења или заустављања. Преостале фреквенције припадају пропусном опсегу, с обзиром на то да такви таласи могу неометано да се простиру кроз посматрану структуру. У том смислу се говори о дисперзној карактеристици структуре, при чему је веома корисна њена визуализација уз помоћ дијаграма дисперзне карактеристике, на којем се поменути зауставни и пропусни опсежи јасно уочавају. С тим у вези, веома је интересантан утицај локалне резонанције, која се јавља услед присуства одређених врста дискретних механичких система (као што су различити резонатори и инертери) [19-22]. Локална резонанција доводи до појаве зоне заустављања у околини сопствене фреквенције осциловања поменутих механичких система, као и до померања, тј. ширења или сужавања, осталих зауставних и пропусних опсега фреквенција.

Уколико је ред величине јединичних ћелија релативно мали, говори се о фононским кристалима или метаматеријалима. Такви материјали и структуре показују и разне друге егзотичне особине које ову област чине интересантном за савремена истраживања, нпр. могућност једносмерне (нереципрочне) пропагације таласа, негативне групне брзине, негативног Поасоновог коефицијента, итд [1-4, 8, 18]. Појава једносмерне (нереципрочне) пропагације таласа врло је ретка и до ње долази само под изузетним околностима, чак и у природи [26-29]. Могућност нарушавања симетрије при пропагацији таласа (нереципрочна пропагација таласа) може да се искористи врло повољно ради једносмерне филтрације таласа, заштите извора звука од његовог еха, скретања таласа одређених фреквентних опсега, итд. Међутим, у научној и инжењерској пракси је највише пажње посвећено сузбијању нежељених вибрација, нарочито на нижим фреквенцијама.

Утемељеност избора овакве теме лежи у свеprisутности периодичних материјала и структура у свим гранама инжењерске праксе (нпр. машинство, грађевина, ваздухопловство) [1-6], нарочито када су у питању структуре које се састоје од еластичних греда повезаних знатно крућим спојницама, као што су мостови, трансконтинентални цевоводи за транспорт нафте и гаса, велика постројења за космичка истраживања која се налазе у Земљиној орбити или у свемиру, итд [11,22]. Одређивање утицаја различитих параметара на положај и ширину фреквентног опсега на коме се налазе зоне заустављања је од кључног значаја за функционални дизајн различитих структура [11-13]. У том смислу, може се искористити и њихов проводни фреквентни опсег, уколико је потребно спровођење таласа жељених фреквенција. Проучавање дисперзне карактеристике периодичних материјала и структура нарочито је актуелно у истраживањима везаним за звучну изолацију, изолацију осетљивих мерних инструмената од шума одређених фреквенција, као и изолацију стамбених зграда и других грађевинских конструкција од градске буке, сеизмичких поремећаја и олујних ветрова.

У литератури су проучаване дисперзне карактеристике и пропагација таласа кроз различите структуре које се састоје од еластичних греда, са нагласком на коришћење Ојлер-Бернулијеве теорије витких греда [5,6,9-11,19-21], чији је научни допринос у

предметној области развој методологије за формирање математичког модела понашања различитих структура уз примену методе трансфер матрице и методе коначних елемената, као и визуализација уз помоћ дијаграма дисперзне карактеристике. Претходна истраживања вишестепених греда повезаних крутим телима су вршена у циљу одређивања особина слободних и принудних осцилација таквих структура, као што су сопствене фреквенције осциловања и облици модова осциловања, уз примену методе трансфер матрице ради формирања математичког модела понашања спрегнутих Ојлер-Бернулијевих греда и крутих тела, са различитим граничним условима [14-16]. У области грађевинских конструкција, где су високе зграде разматране као периодичне структуре које се састоје од Тимошенкових греда и крутих плоча [11], пропагација таласа је проучавана уз помоћ матрица пропагације, чиме је направљен искорак у односу на поступке хомогенизације чија употреба је уобичајена у том домену научних истраживања. Такође су изучавани периодични темељи који се састоје од низа наизменично постављених материјала чије се карактеристике значајно разликују, и то у циљу сеизмичке изолације [12]. Сличне анализе рађене су и на мостовима са вишеструким распонима [13]. Када је у питању једносмерна (нереципрочна) пропагација таласа, највише истраживања из ове области везано је за електромагнетне таласе, оптику и акустику. У актуелној литератури веома су присутна теоријска и експериментална истраживања [26-29] у којима се једносмерна пропагација механичких таласа јавља услед нелинеарности материјала кроз који се талас простира или се изазива временском модулацијом особина материјала. Такође је показана и код ротирајућих структура, где до једносмерне пропагације таласа долази услед дејства Кориолисове силе.

При изради докторске дисертације биће детаљно анализирани услови под којима долази до формирања зона заустављања на нижим и вишим фреквентним опсезима код периодичних структура које се састоје од еластичних греда и крутих тела, при чему ће бити посматране мале осцилације у равни кретања. Уопштавање структуре јединичне ћелије биће извршено у погледу еластичних и крутих сегмената, те се еластичне греде могу међусобно разликовати и не морају бити коаксијалне, а крута тела којима су повезане могу имати произвољан облик чија је геометрија дефинисана положајем центра масе, као и сопственим аксијалним моментом инерције за осу управну на раван кретања. Такође ће бити узет у обзир и утицај различитих дискретних механичких система (резонатори, инертери и уземљења), уз помоћ којих се може вршити додатна манипулација над положајем и ширином фреквентних опсега од интереса. За описивање понашања греда биће коришћена Тимошенкова теорија греда, ради повећања фреквентног опсега тачности резултата. Кретање крутог тела биће описано уз помоћ теореме о промени количине кретања крутог тела и теореме о промени момента количине кретања крутог тела. Применом методе трансфер матрице биће добијен математички модел понашања таквих структура, а затим ће бити извршени нумерички прорачуни ради одређивања дисперзне карактеристике таквих структура, као и визуализације пропагације таласа одређених фреквенција (које припадају карактеристичним зонама видљивим на дијаграму дисперзне карактеристике), уз анализу добијених резултата. Тиме ће бити представљени и анализирани сложени, уопштени модели периодичних структура који се састоје од еластичних греда и крутих тела,

употпуњеним различитим дискретним механичким системима, при чему ће бити примењене методе формирања математичког модела као и нумеричких прорачуна које су се у литератури показале као ефикасне за такве структуре, а добијени математички модел, као и одговарајући резултати представљаће научни допринос у виду различитих могућности за контролу пропагације таласа кроз такве структуре, а самим тим и функционални дизајн таквих структура. Такође ће бити проучена пропагација таласа кроз структуре од паралелно нанизаних витких греда (уз примену Ојлер-Бернулијеве теорије греда), које су аксијално напегнуте и повезане различитим еластичним и вискоеластичним слојевима, чије се карактеристике мењају у току времена, услед чега се очекује појава једносмерне (нереципрочне) пропагације таласа. Научни допринос се огледа у увођењу и моделирању такве фононске структуре која није присутна у доступној литератури и анализи могућности које она пружа у погледу пригушења таласа одређених фреквентних опсега, као и изазивања једносмерне пропагације таласа модулацијом одговарајућих параметара структуре.

За нумеричке прорачуне засноване на аналитичком моделу биће коришћено MATLAB програмско окружење, уз примену методе трансфер матрице, методе спектралних елемената, Галеркинове методе и методе коначних разлика. Уз то ће бити дата и квалитативна анализа предности и мана тих метода, као и могућности њихове примене за ефикасно решавање различитих проблема у овој области са високим степеном тачности добијених решења. Флокет-Блохова теорема и периодични гранични услови ће бити коришћени како би било омогућено проучавање дисперзне карактеристике теоретски бесконачне периодичне структуре уз помоћ јединичне ћелије. Тиме ће обим нумеричких прорачуна бити значајно умањен. Валидација добијених резултата ће бити урађена поређењем са доступним резултатима за специјалне случајеве приказане у литератури, као и уз коришћење методе коначних елемената применом комерцијалног софтвера Comsol Multiphysics.

Планирана истраживања, у оквиру предложене докторске дисертације, по садржају обухватају неколико актуелних истраживачких целина које се односе на:

- Формирање релевантне метаструктуре,
- Аналитички приступ формирању математичког модела понашања такве метаструктуре,
- Поступак нумеричких прорачуна,
- Анализу добијених резултата и интерпретацију физичких појава које се одвијају при простирању механичких таласа кроз такве метаструктуре,
- Анализу утицаја параметара система и могућности пасивног управљања нежељеним механичким таласима,
- Валидацију формираног математичког модела путем поређења добијених нумеричких резултата са одговарајућим резултатима добијеним методом коначних елемената у комерцијалном софтверу.

Научни циљ истраживања у оквиру докторске дисертације односи се на следеће целине:

- Развој математичког модела понашања посматраних метаструктура.

- Нумерички прорачуни у MATLAB програмском окружењу.
- Анализа простирања таласа и утицаја различитих параметара система на дисперзне карактеристике посматраних метаструктура.
- Валидација резултата коришћењем методе коначних елемената у Comsol Multiphysics програмском окружењу.

2.1. Библиографски извори: преглед релевантних референци

У наставку је наведен део релевантне литературе на којој се заснивају истраживања превиђена овом докторском дисертацијом:

[1] M.I. Hussein, M. Ruzzene, M. Leamy, 2014, Dynamics of Phononic Materials and Structures: Hystorical Origins, Recent Progress, and Future Outlook, Applied Mechanics Reviews, Vol. 66, 040802. DOI:10.1115/1.4026911.

[2] W. Ding, T. Chen, C. Chen, D. Chronopoulos, B. Assouar, Y. Wen, J. Zhu, 2023, Description of bandgaps in chiral phononic crystals by analogy with Thomson scattering, New Journal of Physics, Vol. 25, 103001. DOI:10.1088/1367-2630/acfc5e.

[3] A. Banerjee, R. Das, E.P. Calius, 2019, Waves in structured mediums or metamaterials: a review, Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 26, pp. 1029-1058. DOI:10.1007/s11831-018-9268-1.

[4] C. Muhammad, C.W. Lim, 2022, From Photonic Crystals to Seismic Metamaterials: A Review via Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials, Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 29, pp. 1137-1198.

[5] D.J. Mead, 1986, A new method of analyzing wave propagation in periodic structures; applications to periodic Timoshenko beams and stiffened plates, Journal of Sound and Vibration, Vol. 104(1), pp. 9-27. DOI:10.1016/S0022-460X(86)80128-6.

[6] Y.K. Lin, T.J. McDaniel, 1969, Dynamics of beam-type periodic structures, Journal of Engineering for Industry, Vol. 91(4), p. 1133. DOI:10.1115/1.3591761.

[7] V.S. Sorokin, 2019, Longitudinal wave propagation in a one-dimensional quasi-periodic waveguide, Proceedings of the Royal Society A, Vol. 475, 20190392. DOI:10.1098/rspa.2019.0392.

[8] M.I.N. Rosa, B.L. Davis, L. Liu, M. Ruzzene, M.I. Hussein, 2022, Material vs. structure: Topological origins of band-gap truncation resonances in periodic structures, arXiv: cond-mat.mtrl-sci, 2301.00101v1. DOI:10.48550/arXiv.2301.00101.

- [9] J.W. Lee, J.Y. Lee, 2017, Free vibration analysis of functionally graded Bernoulli-Euler beams using an exact transfer matrix expression, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 122, pp. 1-17. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2017.01.011.
- [10] J.S. Wu, C.T. Chen, 2008, A continuous-mass TMM for free vibration analysis of a non-uniform beam with various boundary conditions and carrying multiple concentrated elements, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 311, pp. 1420-1430. DOI:10.1016/j.jsv.2007.09.048.
- [11] A. Ozmutlu, M. Ebrahimian, I.M. Todorovska, 2018, Wave propagation in buildings as periodic structures: Timoshenko beam with rigid floor slabs model, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 144(4), 04018010. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001436.
- [12] J. Bao, Z. Shi, H. Xiang, 2012, Dynamic responses of a structure with periodic foundations, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 138, pp. 761-769. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000383.
- [13] G. Carta, G.F. Giaccu, M. Brun, 2017, A phononic band gap model for long bridges. The 'Brabau' bridge case, *Engineering Structures*, Vol. 140, pp. 66-76. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.01.064.
- [14] A. Obradovic, S. Salinic, D.R. Trifkovic, N. Zoric, Z. Stokic, 2015, Free vibration of structures composed of rigid bodies and elastic beam segments, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 347, pp. 126-138. DOI:10.1016/j.jsv.2015.03.001.
- [15] D.C.D. Oguamanam, 2003, Free vibration of beams with finite mass rigid tip load and flexural-torsional coupling, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, pp. 963-979. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2003.09.014.
- [16] S. Naguleswaran, 2004, Vibration of an Euler-Bernoulli stepped beam carrying a non-symmetrical rigid body at the step, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 271, pp. 1121-1132. DOI:10.1016/S0022-460X(03)00574-1.
- [17] M.A. Heckl, 2002, Coupled waves on a periodically supported Timoshenko beam, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252(5), pp. 849-882. DOI:10.1006/jsvi.2001.3823.
- [18] S. Liu, S. Li, H. Shu, W. Wang, D. Shi, L. Dong, H. Lin, W. Liu, 2015, Research on the elastic wave band gaps of curved beam of phononic crystals, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 457, pp. 82-91. DOI:10.1016/j.physb.2014.09.021.

- [19] C. Chesnais, C. Boutin, S. He, 2012, Effects of the local resonance on the wave propagation in periodic frame structures: generalized Newtonian mechanics, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132(4), pp. 2873-2886. DOI:10.1121/1.4744975.
- [20] L. Liu, M.I. Hussein, 2012, Wave Motion in Periodic Flexural Beams and Characterization of the Transition Between Bragg Scattering and Local Resonance, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 79, 011003-1. DOI:10.1115/1.4004592.
- [21] G. Carta, M. Brun, 2015, Bloch-Floquet waves in flexural systems with continuous and discrete elements, *Mechanics of Materials*, Vol. 87, pp. 11-26. DOI:10.1016/j.mechmat.2015.03.004.
- [22] N. Fukuwa, S. Matsushima, 1994, Wave dispersion and optimal mass modeling for one-dimensional periodic structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 1165-1180. DOI:10.1002/eqe.4290231102.
- [23] Y. Yesilce, 2010, Effect of Axial Force on the Free Vibration of Reddy-Bickford Multi-span Beam Carrying Multiple Spring-mass Systems, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 16(1), pp. 11-32. DOI:10.1177/1077546309347985.
- [24] D. Younesian, A. Hosseinkhani, H. Askari, E. Esmailzadeh, 2019, Elastic and viscoelastic foundations: a review on linear and nonlinear vibration modeling and applications, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 97, pp. 853-895. DOI:10.1007/s11071-019-04925-5.
- [25] T.M. Wang, J.E. Stephens, 1977, Natural frequencies of Timoshenko beams on Pasternak foundations, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 51(2), pp. 149-155. DOI:10.1016/S0022-460X(77)80292-2.
- [26] H. Nassar, B. Yousefzadeh, R. Fleury, M. Ruzzene, A. Alu, C. Daraio, A.N. Norris, G. Huang, M.R. Haberman, 2020, Nonreciprocity in acoustic and elastic materials, *Nature Reviews Materials*, Vol. 5(9), pp. 667-685. DOI:10.1038/s41578-020-00239-1.
- [27] J. Marconi, E. Riva, M. Di Ronco, G. Cazzulani, F. Braghin, M. Ruzzene, 2020, Experimental Observation of Nonreciprocal Band Gaps in a Space-Time-Modulated Beam Using a Shunted Piezoelectric Array, *Physical Review Applied*, Vol. 13, 031001. DOI:10.1103/PhysRevApplied.13.031001.
- [28] J. Vila, R.K. Pal, M. Ruzzene, G. Trainiti, 2017, A Bloch-based procedure for dispersion analysis of lattices with periodic time-varying properties, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 406, pp. 363-377. DOI:10.1016/j.jsv.2017.06.031.

[29] G. Trainiti, M. Ruzzene, 2016, Non-reciprocal elastic wave propagation in spatiotemporal periodic structures, *New Journal of Physics*, Vol. 18, 083047. DOI:10.1088/1367-2630/18/8/083047.

Основ за проучавање посматраних метаструктура у предметној докторској дисертацији представља заступљеност периодичних структура у научној и инжењерској пракси, као и велика потреба за пригушењем/филтрирањем механичких таласа одређених таласних дужина, тј. фреквенција [1-6]. С обзиром на себи својствену особину периодичних структура да се код њих формирају зоне заустављања у одређеним фреквентним опсезима [1-4], пажљивим проучавањем утицаја различитих параметара система на положај и ширину тих опсега може се извршити одабирање фреквенција таласа који ће бити пригушени или потпуно заустављени при проласку кроз такву метаструктуру. У вези са тим, до данас је публиковано мноштво истраживачких радова и докторских дисертација, уз реализацију великог броја пројеката, у којима су коришћени различити приступи проучавања поменутих појава [1-10] и њихове примене у различитим сферама инжењерске праксе. Велика је заступљеност периодичних структура које се састоје од спрегнутих сегмената који се знатно разликују по крутости, те се могу посматрати као еластични и крути сегменти [11-13]. У предложеној дисертацији се до математичког модела понашања таквих метаструктура долази применом методе трансфер матрице и Флокет-Блохове теореме на јединичну ћелију структуре, при чему се научни допринос огледа у представљању сложеног, уопштеног модела таквих структура, формирању трансфер матрице уопштеног крутог тела која је независна од теорије примењене на греде са којима је спрегнута [1-4,9,10-16]. У разматрање је узета и могућност спрезања деформација еластичних сегмената у различитим правцима [17,18], те је анализиран утицај таквог спрезања на дисперзионе карактеристике посматраних структура. Увођењем различитих дискретних система тј. осцилатора постижу се интересантни ефекти померања и ширења зауставних, тј. пропусних опсега, чиме је омогућена контрола над дисперзионим карактеристикама система без значајног утицаја на геометрију и/или масу система [19-22]. Такође је у литератури показано да аксијално оптерећење може имати значајан утицај на дисперзионе карактеристике периодичних структура које се састоје од еластичних греда [23]. Периодичну структуру могу чинити и различита уземљења или темељи, који могу бити еластичног или вискоеластичног карактера [24,25]. Временском модулацијом одређених параметара структуре постиже се и периодичност у времену, при чему је за одређене вредности параметара модулације могуће остварити једносмерну (нереципрочну) пропагацију таласа [26-29]. У предложеној дисертацији разматра се систем паралелних аксијално оптерећених еластичних греда које су повезане еластичним и вискоеластичним слојевима, уз временску модулацију појединих параметара такве просторно-периодичне структуре која није проучавана у доступној литератури.

3. Основне хипотезе

Фокус истраживања у оквиру предметне докторске дисертације односи се на проучавање утицаја различитих параметара сложених метаструктура на њихову дисперзну карактеристику, у циљу контроле механичких таласа који се простиру кроз посматрану структуру, тј. њиховог пригушења, филтрације или омогућавања њихове једносмерне (нереципрочне) пропагације.

Коришћењем аналитичког приступа за формирање математичког модела, уз примену одговарајућих нумеричких метода при прорачунима, биће обезбеђено ефикасно добијање адекватних резултата, чиме ће бити омогућен олакшан функционални дизајн таквих метаструктура. Верификација резултата биће спроведена уз примену методе коначних елемената у комерцијалном софтверу.

На основу детаљне анализе релевантне литературе и помоћу знања стечених током досадашњих истраживања, будућа истраживања, као и рад на овој докторској дисертацији, засниваће се на следећим полазним хипотезама:

Прва хипотеза: Аналитичким приступом формирању математичког модела понашања сложених периодичних структура (метаструктура), применом методе трансфер матрице, као и нумеричким методама (нпр. Галеркинова метода, метода спектралних елемената, метода коначних разлика), могуће је са задовољавајућом тачношћу одредити дисперзне карактеристике посматраних структура.

Друга хипотеза: Применом различитих дискретних механичких система (као што су резонатори, инертери и уземљења) и просторно-временском модулацијом одређених параметара периодичне структуре, могућа је сврсисходна контрола дисперзне карактеристике такве структуре (положаја и ширине зауставног, тј. пропусног, опсега фреквенција).

4. Научне методе истраживања

С обзиром на комплексност тематске области, у овој докторској дисертацији предлажу се следеће научне методе истраживања:

- Аналитичке методе за формирање математичког модела понашања сложених структура које се састоје од деформабилних и крутих сегмената.
- Методе нумеричких прорачуна за добијање неопходних резултата за даљу анализу.
- Методе за софтверску имплементацију алгоритама, уз различите технике оптимизације прорачуна.
- Методе за валидацију добијених резултата уз примену методе коначних елемената у комерцијалном софтверу.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани резултати предложених научних истраживања у оквиру предметне докторске дисертације су:

- Математички модел и софтверска имплементација алгоритма за проучавање дисперзних карактеристика сложених структура које се састоје од деформабилних и крутих сегмената, уз присуство дискретних механичких система (резонатори, инертери и уземљења).
- Допринос бољем разумевању утицаја различитих механизма, као што су Брегово расејање и локална резонанција, који доводе до феномена значајног пригушења или потпуног заустављања пропагације таласа на одређеном опсегу фреквенција, уз могућност функционалног дизајна таквих метаструктура одабиром њихових параметара. Посебна пажња биће посвећена утицају крутог тела и спрезања деформација еластичних греда у различитим правцима на дисперзне карактеристике посматраних метаструктура, и то у случајевима када се суседне греде налазе под одређеним углом (када нису коаксијалне). Такође ће бити анализиран утицај временске модулације на појаву једносмерне (нереципрочне) пропагације таласа са фреквенцијама из одређеног опсега, при чему ће се карактеристике еластичних и вискоеластичних слојева између греда периодично мењати у времену.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања у оквиру предметне докторске дисертације реализује се кроз следеће фазе:

1. Преглед досадашњих резултата у предложеној научној области.
2. Развој математичког модела за одређивање дисперзионих карактеристика метаструктура које се састоје од еластичних и крутих сегмената.
3. Проширење модела уз примену различитих дискретних механичких система (као што су резонатори, инертери и уземљења).
4. Развој математичког модела за одређивање дисперзионих карактеристика метаструктура које се састоје паралелних еластичних греда повезаних еластичним и вискоеластичним слојевима, са просторно-временском модулацијом одређених параметара периодичне структуре.
5. Развој алгоритама и кода за нумеричке прорачуне.
6. Верификација резултата који се односе на дисперзионе карактеристике метаструктура које се састоје од еластичних и крутих сегмената уз помоћ методе коначних елемената у комерцијалном софтверу.

7. Анализа добијених резултата и утицаја различитих параметара на дисперзионе карактеристике посматраних метаструктура, као и могућности контролисања положаја и ширине зауставног, тј. пропусног опсега.
8. Закључна разматрања и будући правци истраживања.

7. Закључак и предлог

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата Невене А. Росић, маг. инж. маш., архивирани под евиденционим бројем 1981/1 од 20.11.2024. године, а сходно сагласности Колегијума наставника Катедре за механику 1981/2 од 02.12.2024. године, као и Одлуци Наставно-научног већа број 1981/3 од 24.12.2024. године, Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације закључује да је предложена тема научно утемељена и адекватна за израду докторске дисертације високог ранга, као и да кандидат испуњава све услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета који га квалификују за рад на предметној докторској дисертацији.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да се Невени А. Росић, маг. инж. маш. одобри израда докторске дисертације са темом

Простирање таласа кроз метаструктуре од спрегнутих еластичних, вискоеластичних и крутих сегмената

научна област: **машинско инжењерство** (ужа научна област - **механика**).

На основу Одлуке Наставно-научног већа број 1981/3 од 24.12.2024. године, за менторе кандидата Невене А. Росић, маг. инж. маш., током рада на предметној докторској дисертацији, Комисија предлаже да буду именовани др Михаило Лазаревић, ред. проф. и др Милан Цајић, в. науч. сар., Математички институт САНУ, који задовољавају услове члана 28, став 9, Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду – Машинском факултету (Образац 3.) и то у домену машинског инжењерства – механике, дакле имају све неопходне компетенције у оквиру научне области којој припада тема докторске дисертације, са чиме је Комисија у потпуности сагласна.

С поштовањем,

Београд, 09.01.2025. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Александар Обрадовић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
др Петар Мандић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
др Данило Карличић, виши научни сарадник
Математички институт САНУ