



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ – ШТИП
ФАКУЛТЕТ ЗА ИНФОРМАТИКА
Катедра по Применета математика
Штип

М-Р МИРЈАНА КОЦАЛЕВА

**ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ПРИРОДНИ ПЕРИОДИ НА ГРАДЕЖНИ ОБЈЕКТИ
ПРЕКУ МЕРЕЊЕ И ПРОЦЕСИРАЊЕ НА АМБИЕНТАЛНИ ВИБРАЦИИ**

- ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА-

Штип, февруари 2021

Комисија за оценка и одбрана:

Интерен ментор: редовен проф. д-р Владо Гичев
Факултет за информатика
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Екстерен ментор: вонреден проф. д-р Роман Голубовски
Природно-математички факултет
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје

Членови на комисија за оценка и одбрана:

Претседател вонреден проф. д-р Билјана Златановска
Факултет за информатика
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Член редовен проф. д-р Владо Гичев
Факултет за информатика
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Член редовен проф. д-р Сашо Коцески
Факултет за информатика
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Член вонреден проф. д-р Роман Голубовски
Природно-математички факултет
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје

Член вонреден проф. д-р Наташа Стојковиќ
Факултет за информатика
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Научно поле: 212 Компјутерска техника и информатика

Научна област: 21201 Програмски јазици и технологии

21206 Процесирање на податоци

Датум на одбрана: 22.02.2021

Датум на промоција:

Посветено на мојата фамилија



**Листа на рецензирани и објавени трудови произлезени од
истражувањето:**

1. Gicev, Vlado and Trifunac, Mihailo and Todorovska, Marija and Kocaleva, Mirjana and Stojanova, Aleksandra and Kokalanov, Vasko (2021) **Мерење на амбиентални вибрации во зграда со нерегуларна форма (Ambient Vibration Measurements in an Irregular Building)**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, volume 141, ISSN 0267-7261, IF 2.637.
 2. Kocaleva, Mirjana and Gicev, Vlado (2020) **Методологија за одредување на природните фреквенции на ниски згради (A methodology of determining the natural frequencies of low-rise buildings)**. Balkan Journal of Applied Mathematics and Informatics, 3 (2). ISSN 2545-4803.
 3. Kocaleva, Mirjana and Gicev, Vlado (2020) **Сопствени вредности и сопствени вектори на модел на зграда како еднодимензионален елемент (Eigenvalues and eigenvectors of a building model as a one-dimensional element)**. Balkan Journal of Applied Mathematics and Informatics, 3 (1). ISSN 2545-4803.
 4. Stojanova, Aleksandra and Zlatanovska, Biljana and Kocaleva, Mirjana and Rendzova, Dobrila and Stojkovic, Natasa and Bikov, Dusan (2019) **Употреба на Матлаб во математичкото образование (Using of MatLab in the Mathematical Education)** In: ITRO 2019, June 27, 2019, Zrenjanin, Republic of Serbia.
 5. Kocaleva, Mirjana and Zlatanovska, Biljana and Stojanova, Aleksandra and Stojkovic, Natasa and Gicev, Vlado (2017) **Бранова равенка со Дирихлет гранични услови (Wave equation with Dirichlet boundary conditions)**. In: ITRO 2017, 22 June 2017, Zrenjanin, Serbia.
 6. Kocaleva, Mirjana and Risteska, Aleksandra (2017) **Практична примена на еднодимензионалната бранова равенка (Practical application of one-dimensional wave equation)** Yearbook of the Faculty of Computer Science, 5 (5). pp. 5-12. ISSN 1857- 8691.
 7. Stojanova, Aleksandra and Zlatanovska, Biljana and Kocaleva, Mirjana and Gicev, Vlado (2015) **Добивање на функции од фуријеви серии со помош на Матлаб (Obtaining functions from fourier series with Matlab)**. A journal for information technology, education development and teaching methods of technical and natural sciences, 5 (1). pp. 1-10. ISSN 2217-7949.
-

ПРИРОДНИ ПЕРИОДИ НА ГРАДЕЖНИ ОБЈЕКТИ ПРЕКУ МЕРЕЊЕ И ПРОЦЕСИРАЊЕ НА АМБИЕНТАЛНИ ВИБРАЦИИ

Краток извадок

За оцена на повредливоста на постоечките и новопроектираните згради, потребно е да се знаат нивните природни периоди. Знаејќи ја локацијата на објектот и неговиот фундаментален (максимален) период, врз база на спектрални сеизмички мапи, може да се оцени степенот на неговото оштетување од сеизмички настани. Уште повеќе, преку методот на импулсен одговор, може да се издвои фундаменталната фреквенција на зградата на фиксна основа, f_1 од фреквенцијата на системот тло-конструкција (системска фреквенција), f_s .

Во ова истражување ќе дефинираме методологија за определување на неколку најниски природни фреквенции и соодветните на нив функции на обликот (модални или тонови форми) на тродимензионални, геометриски нерегуларни објекти. Природните фреквенции одговараат на сопствени вредности, а функциите на обликот одговараат на сопствени вектори во тродимензионалниот математички модел на објектот. Во преглед на литературата ќе разгледаме емпириски равенки за оцена на фундаменталните периоди на згради. Параметри кои влијаат на фундаменталниот период на зградата се: (1) висината и катноста, (2) материјалот на носечките елементи, (3) стандардот по кој е градена зградата, (4) структурните и геометриски нерегуларности, (5) староста.

Во докторскиот труд прво е даден осврт на емпириските формули кои се користат во светот. Тежиштето на истражувањето ќе биде да се одредат најниските природни фреквенции (највисоките природни периоди) на објектот врз основа на побуди од микротемори, кои доаѓаат преку тлото во зградата или побуди од ветер на надворешните ѕидови. За дефинирање на методологијата на истражувањето, користевме акцелерометри со кои меревме амбиентални вибрации на објект на Беровско Езеро со приближно исти димензии во три ортогонални правци (должина, ширина и висина) и со нерегуларна геометрија. Со процесирање на податоците од мерењата ги добиваме првите неколку природни фреквенции. На почеток, ќе биде дадено теоретско решение за

сопствени вектори и сопствени вредности на наједноставен еднодимензионален модел на објект. Овој едноставен модел ни дава идеја дека за да се дефинира емпириска равенка за оценка на фундаменталните периоди на објекти, основен параметар покрај висината е и материјалот на носечките елементи. Кај објекти со приближно регуларна геометрија, основниот (фундаментален) природен период одговара на првиот трансверзален мод на движење на објектот. Меѓутоа за објекти со нерегуларна геометрија, каков што е објектот на Беровско Езеро, првиот побуден мод може да биде ротација, односно торзија на објектот.

Главната цел на ова истражување е да се дефинира соодветна методологија за наоѓање на природни фреквенции на објекти. Даден е детален опис на објектот на кој ги вршме мерењата, како и на инструментот со кој ги вршме тие мерења. Од извршените мерења, со процесирање на податоците ги добиваме првите неколку природни фреквенции (периоди). Освен тоа можеме да ги одредиме амплитудите на брзините (микротреморите) како и грешката на дискретизација.

Врз основа на оваа методологија, со извршени мерења на доволен број објекти во иднина ќе формираме база на измерени објекти. Преку регресиона анализа, врз основа на усвоена емпириска равенка, ќе ги определиме коефициентите во равенката, а со тоа ќе добиеме реална оценка за природни периоди на објектите во Република Северна Македонија.

Според моите истражувања оваа тема не е многу актуелна кај нас, додека во светот постојано се спроведуваат истражувања за изнаоѓање на природните фреквенции со цел да се предвидат и намалат загубите при силни потреси на тлото. Поради таа причина ми претставува голем предизвик успешно да ја обработам оваа тема и да ги презентирам резултатите од истата.

Клучни зборови: природни фреквенции, конволуција, корелација, Фуриева трансформација, објекти, микротремори, грешка на дискретизација.

NATURAL PERIODS OF CIVIL ENGINEERING OBJECTS OBTAINED BY MEASURING AND PROCESSING OF AMBIENT VIBRATIONS TESTS

Abstract

To estimate vulnerability of existing and newly designed buildings, we need to know their natural periods. Knowing the location of the building and its fundamental (longest) natural period, based on spectral seismic maps, we can estimate the level of its damage due to seismic event. Moreover, using impulse response method, we can separate fixed-base frequency, f_1 from system frequency, f_s .

In this research we will define a methodology for obtaining the several lowest natural frequencies and corresponding shape functions (modal shapes) of 3D, geometrically irregular structures. The natural frequencies correspond to eigenvalues and the shape functions to eigenvectors in the 3D mathematical model of the structure.

In the literature review we will show empirical equations used for estimation of fundamental periods of buildings. Parameters influencing fundamental period of a building are: (1) height, (2) material of supporting construction, (3) design code of the building, (4) structural and geometric irregularities and (5) age of the building.

In my doctoral dissertation first, I will give an overview of the empirical formulas used in the world. The focus of the research will be to determine the lowest natural frequencies (highest natural periods) of the building based on excitations from microtremors coming through the ground in the building or wind motions on the outer walls. To define the research methodology, we used accelerometers with which we measured ambient vibrations on a house on Berovo Lake with irregular geometry. By processing the measurement data, we get the first few natural frequencies. At the beginning, a theoretical solution for eigenvectors and eigenvalues of the simplest one-dimensional model of an object will be given. This simple model gives us the idea that in order to define an empirical equation for estimating the fundamental periods of objects, the basic parameter besides the height is the material of the load-bearing elements. In objects with approximately regular geometry, the basic (fundamental) natural period corresponds to the first transverse mode of motion of the object. However, for objects with irregular

geometry, such as the house on Berovo Lake, the first excited mode can be rotation, i.e torsion of the object.

The main goal of this research is to define an appropriate methodology for finding natural frequencies of objects. A detailed description of the object on which we perform the measurements is given, as well as the instrument with which we perform those measurements. From the performed measurements, by processing the data we get the first few natural frequencies (periods). In addition, we can determine the amplitudes of the velocities (microtremors) as well as the discretization error

Based on this methodology, with measurements of an enough objects in the future we will create a database of measured objects. Through regression analysis, based on the adopted empirical equation, we will determine the coefficients in the equation, and thus we will get a realistic estimate of the natural periods of the buildings in the Republic of North Macedonia.

According to my research, this topic is not very relevant in our country, while around the world every day research is being conducted to find natural frequencies in order to predict and reduce losses during strong tremors on the ground. For that reason, it is a great challenge for me to successfully process this topic and to present the obtained results.

Key words: natural frequencies, convolution, correlation, Fourier transform, objects, microtremors, discretization error.

Содржина

1. ВОВЕД	1
1.1. Фуриева трансформација	6
1.2. Трансфер функција	9
1.3. Корелација	9
1.4. Конволуција	10
1.5. Шумови (извори и видови на шумови)	11
1.6. Филтрирање	13
1.7. Спектрална густина (Power spectral density - PSD)	15
1.8. Сопствени вредности и сопствени вектори на еднодимензионален елемент	16
1.9. Преглед на литературата	18
1.10. Содржина на дисертацијата	26
2. ОПИС НА ОБЈЕКТОТ И ИНСТРУМЕНТОТ	28
2.1. Опис на објектот	28
2.2. Опис на инструментот	32
3. МЕТОДОЛОГИЈА	35
4. РЕЗУЛТАТИ	41
4.1. Резултати од мерење во 2 точки	41
4.2. Резултати од мерење во 68 различни точки	43
5. МИКРОТРЕМОРИ	49
5.1 Пресметување и претставување на микротреморите	55
6. АНАЛИЗА НА ГРЕШКАТА НА ДИСКРЕТИЗАЦИЈА	71
7. ЗАКЛУЧОК	85
8. ДОДАТОК	90
8.1. Користени кратенки	90
8.2. Спецификација на акцелерометрите	90
ПРИЛОГ 1- ДЕЛ ОД ТРАНСФЕР ФУНКЦИИТЕ И ФУРИЕВИТЕ СПЕКТРИ НА ПРИЗЕМЈЕТО	92
ПРИЛОГ 2- ДЕЛ ОД ТРАНСФЕР ФУНКЦИИТЕ И ФУРИЕВИТЕ СПЕКТРИ НА ПРВИОТ КАТ	97
ПРИЛОГ 3- ДЕЛ ОД ТРАНСФЕР ФУНКЦИИТЕ И ФУРИЕВИТЕ СПЕКТРИ НА ПОТКРОВЈЕТО	101
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)	105

Листа на слики

Слика 1.1 Трансфер функција	9
Слика 1.2 Линеарен и временски непроменлив систем	11
Слика 1.3 Модел на зграда како едnodимензионален елемент.....	16
Слика 1.4 Фреквенција на појава на објавени придонеси со тест на амбиентални вибрации на целосна структура (а) згради, брани, оџаци, силоси,... (б) мостови.....	21
Слика 1.5 Армирано-бетонско платно	23
Слика 2.1 Викенд куќата на Беровско Езеро а) југозапад поглед б) северисток поглед.....	28
Слика 2.2 (а) Вертикален пресек А-А (види сл. 2.2б и сл. 2.3 до 2.6) кој има правец север-југ. (б) темелниот ѕид за време на изградбата. Вертикалните арматурни шипки за столбовите 2А, 2Б, 3А преку 3Д и 4А и 4Б ја покажуваат идната локација на столбовите на кои се потпира приземјето.	29
Слика 2.3 План на подрумот и гаражата. Структурата на гаражата е во непосредна близина, но е одвоена од структурата на главната зграда. Подрумот ја опфаќа областа јужно од темелниот ѕид (А преку Е на сл. 2.3б). Постојаната локација на EQR120 акцелерометарот служеше како референтна станица за време на мерењата на амбиенталните вибрации.	30
Слика 2.4 План на приземјето. Сивата површина го покажува обемот на правоаголна бетонска плоча од 10.5 x 12.0 m ² , со отвор за скалите.	31
Слика 2.5 План од 1 кат. Сивата површина го покажува обемот на правоаголна бетонска плоча од 10.5 x 12.0 m ² , со отвор за скалите	31
Слика 2.6 План на поткровје. Сивата површина го покажува обемот на правоаголна бетонска плоча од 10.5 x 12.0 m ² , со отвор за скалите. Црвениот правоаголник ја покажува постојаната локација на акцелерометарот EQR120.32	
Слика 2.7 EQR 120 акцелерометар.....	34
Слика 2.8 QR 120 акцелерометар во нарачана дрвена кутија.....	34
Слика 4.1 FFT на забрзувања a(t) во три ортогонални правци добиени од мерења на амбиентални вибрации со два акцелерометри EQR 120 во викенд куќа на Беровско Езеро.....	41
Слика 4.2 Холограми на забрзувањето во И-С рамнина за време на 20 минути снимање. (а) Подрум и гаража, (б) приземје, (в) 1-ви кат и (г) поткровје	43
Слика 4.3 (а) Фуриев амплитуден спектар на движења регистрирани на станицата FC4 во насоките ИЗ (горе) и СЈ (средина), и во референтната точка во подрумот (долу). (б) Соодветни трансфер функции. Точката FC4 е на 1-ви кат до столбот С4 (Сл. 2.5)	45
Слика 4.4 Трансфер-функции на движења снимени на станицата AA2 (Слика 2.5). Станицата AA2 е на таванот до столбот А2.....	46
Слика 4.5 Вектори на преместување, поврзани со вибрациите кај f = 10.5 Hz, на: (а) таванот, (б) 1-ви кат и (ц) приземјето. Приближно, тие вектори може да се толкуваат како резултат на крута ротација на телото на подната плоча околу точка што е на околу 1.5 m источно од колоната Д1, која се наоѓа во СИ агол на зградата. (д) Шематско претставување на соодветните преместувања.....	47
Слика 4.6 Вектори на преместување, поврзани со вибрации кај f = 11.9 Hz, на: (а) таванот, (б) 1-ви кат и (ц) приземјето. Преместувањата може да се	

толкуваат како резултат на транслацијата во правец ЈЗ-СИ, приближно нормална линија В-В. (д) Шематско претставување на соодветните преместувања	48
Слика 5.1 Забрзувањата на сигналот	49
Слика 5.2 Филтрирање на забрзувањата	50
Слика 5.3 Забрзување, брзина и поместување	51
Слика 5.4 Брзината на сигналот	52
Слика 5.5 Филтрирање на брзината а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 6000 точки од записот)	53
Слика 5.6 Ормсби филтерот во фреквентен домен	54
Слика 5.7 Ормсби филтерот во временски домен	54
Слика 5.8 Ормсби филтер (2 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)	57
Слика 5.9 Ормсби филтер (4 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)	58
Слика 5.10 Ормсби филтер (7 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)	60
Слика 5.11 Ормсби филтер (10 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)	61
Слика 5.12 Ормсби филтер (15 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)	63
Слика 5.13 Ормсби филтер (20 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)	64
Слика 5.14 Врв до врв амплитуда	65
Слика 5.15 Микротремори (брзина по фреквенција) во куќата во Берово во децимална (горе) и во логаритамска (долу) скала	68
Слика 5.16 Микротремори во Rural Valley во Пансилванија, Америка	69
Слика 5.17 Микротремори во Берово наспроти рурални области во САД	70
Слика 6.1 Амплитуден спектар на куќата во Берово	71
Слика 6.2 Функцијата $g(t)$ за 10 херци (сина боја) и 2.5 херци (црвена боја)	75
Слика 6.3 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=10$ Hz	76
Слика 6.4 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=2.5$ Hz	76
Слика 6.5 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=10$ Hz	77
Слика 6.6 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=2.5$ Hz	77
Слика 6.7 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво 0.0024 cm / s^2 (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)	78
Слика 6.8 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво 0.001 cm / s^2 (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)	79
Слика 6.9 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво 0.0001 cm / s^2 (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)	79
Слика 6.10 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво 0.00001 cm / s^2 (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)	80

Слика 6.11 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=5$ минути за $f=10$ Hz б) за $f=2.5$ Hz	81
Слика 6.12 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=10$ минути за $f=10$ Hz б) за $f=2.5$ Hz	81
Слика 6.13 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=30$ минути б) за $f=2.5$ Hz	82
Слика 6.14 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=60$ минути за $f=10$ Hz б) за $f=2.5$ Hz	82
Слика 6.15 Нумеричко решение за $T=3600$ секунди за различните дискретни нивоа	84
Слика 7.1 Трансфер функции на станицата FB4 (прв кат на колоната Б4, Сл. 2.5) за движења во насоките СЈ, ИЗ и вертикално. Погледнете го врвот на трансфер функцијата за вертикалните движења близу 18.4 Hz.....	87
Слика 7.2 Забрзување (горе), брзина (средина) и поместување (долу) на сегмент (со должина 1 секунда) на СЈ движење во референтната станица во подрумот (слика 2.3)	88

Листа на табели

Табела 1 Резултати од нумеричкото решение.....	83
--	----

1. ВОВЕД

Мајката природа е една од најкомплицираните и најмоќните системи на планетата Земја. Живееме во свет во кој постојано се соочуваме со природни катастрофи како што се земјотреси, поплави, цунами и други геолошки процеси. Овие катастрофи покрај тоа што предизвикуваат материјални штети, понекогаш се кобни и по животот на луѓето. Затоа секојдневно се вршат мерења, се прават најразлични истражувања сè со една иста цел - да се предвидат катастрофите и нивните последици, како и да се најде начин да се заштитиме од нив. Цел на земјотресното инженерство е да се проектираат објекти отпорни на земјотрес. Почетокот на современото земјотресно инженерство го поставил Maurice Biot во 1932 година со неговиот метод на спектрален одговор.

Нашето внимание е посветено на катастрофите кои ги предизвикуваат земјотресите. Земјотресот, како што кажува самото име, претставува тресење на земјата. Секоја година насекаде низ планетата Земја се случуваат стотици илјади земјотреси. Причинителот на земјотресот може да бидат најразлични фактори, но најчесто се случува поради поместување на земјините тектонски плочи кои се тријат, подвлекуваат една под друга или одвојуваат и притоа создаваат големи напрегања на местата на контакт. Кога овие напрегања надминат одредена критична вредност, која е поголема од јакоста на карпите кои го формираат масивот, настануваат пукнатини и лизгање меѓу тектонските плочи. Тогаш, поради нагла релаксација (анулирање) на напоните, во карпите на контактот од тектонските плочи, потенцијалната енергија која беше резултат на големите напрегања се трансформира во различни типови енергија. Еден, голем дел од оваа потенцијална енергија, се троши за формирање на пукнатини – трајни деформации на контактите, друг дел се троши на промена на температурата во околината на хипоцентарот – изворот на земјотрес, а трет дел, еластодинамичка енергија, оди на генерирање на сеизмички бранови кои се опасни за објектите на површината на земјата. Овие бранови се шират во просторот од изворот на земјотресот при што пренесуваат сеизмичка енергија. Кога дојдат до површината на Земјата, дел од оваа сеизмичка енергија се пренесува на постоечките објекти, при што може да дојде до нивно оштетување и рушење. Земјотрес може да предизвика и вулканска активност

која предизвикува поместување на земјата. Исто така, земјотрес може да биде причинет и преку човечка активност при што подземните нуклеарни проби може да предизвикаат умерени до јаки земјотреси. За среќа по безбедноста на луѓето и материјалните добра, најголем број од земјотресите се толку слаби, што човекот не може ниту да ги осети, и истите може да се регистрираат само со употреба на сеизмолошки мерни инструменти. Науката што се занимава со изучување на земјотреси се нарекува сеизмологија. Инструментот со кој се мери поместување при земјотреси се нарекува сеизмограф, а записот од поместувањата во тек на време се вика сеизмограм. Инструментот кој мери забрзувања во тек на време се нарекува акцелерограф, а записите кои тој ги регистрира во тек на време се нарекуваат акцелерограми. (Boore, 1989; Geller et al., 1997; Hanks & Kanamori, 1979; Kanamori, 1978, 1983; “Modified Mercalli Intensity Scale of 1931,” 1931; Scholz, 1998). Во денешно време, овие уреди се толку сензитивни, што освен земјотреси, можат да регистрираат и микро вибрации на објектите при секојдневни побуди, како сообраќај во околина на објектот, ветер, движење на луѓе во објектот и сл. Овие побуди се нарекуваат амбиентални побуди, а одговорот на објектите на нив, амбиентални вибрации.

Земјотресите се манифестираат со поместување на земјиното тло и се мерат според интензитет или магнитуда. Интензитетот е описна мерка на јачината на земјотресот врз луѓето и зградите во специфично место. Една од најчесто употребуваниите скали за мерење на интензитет на земјотреси е Меркалиевата скала или Mercalli – Cancani - Sieberg (MCS), скалата која има 12 степени. Кога вредноста на интензитетот е поголема од 5, тој може да се осети, а при поголеми вредности може да настане оштетување на објектите. (“Modified Mercalli Intensity Scale of 1931,” 1931)

1. Не се чувствува – се бележи само со уреди.
2. Многу слаб – го чувствуваат само некои луѓе во куќите, главно на повисоките катови.
3. Слаб – мал број од оние кои се внатре ќе го осетат, главно има ист ефект како кога минува возило.
4. Умерен – ќе го осетат многумина внатре и некои надвор. Ако е ноќе, некои ќе се разбудат. Чиниите, вратите, прозорите се тресат,

сидовите пукаат, има сличен ефект како куќа што се тресе поради потешки возила, ги уништува паркираните коли.

5. Прилично силен – скоро секој ќе го осети, многумина ќе се разбудат, прозорите ќе се скршат, сидовите ќе напукнат, се нишаат објекти кои висат од таванот, клатното на саатот може да застане, се нишаат дрвја.
6. Силен – секој го чувствува, многумина се плашат и ќе излезат надвор, еден или повеќе тешки делови од мебелот се мрдаат од место, може да се урнат повеќе оџаци.
7. Многу силен – секој бега од дома во паника, има мали штети на зградите, а поголеми штети на несолидно изградените куќи, многу оџаци се рушат, возачите ќе го осетат при возење.
8. Прилично разорен – четвртина од зградите се многу оштетени, некои паѓаат, не се за живеење, паѓаат оџаци и фабрички оџаци, споменици, статуи. Од земјата излегува матна вода, не може да се вози.
9. Разорен – половина од градбите се тешко оштетени, релативно многу паднале, повеќето не се за живеење. Има пукнатини на земјата, се кинат преносните жици.
10. Многу разорен – тешко се оштетени $\frac{3}{4}$ од зградите, повеќето паднале, тешко се оштетени и солидно изградените згради, има свлечишта, огромни пукнатини на земјата.
11. Катастрофален – сите камени куќи паѓаат, паѓаат и мостовите, преносните жици се неупотребливи, патиштата извиткани.
12. Тотално катастрофален – сите човечки структури се уништени, има бранови на површината, некои објекти се исфрлаат во воздух од земјата.

Рихтеровата скала служи за мерење на магнитудата т.е. јачината (количината) на енергија што се ослободува при потресот. Оваа скала се базира на емпириска формула. Скалата ја мери магнитудата на земјотресот на скала од 0 до 9. Потреси со магнитуда од 4,6 и повеќе се доволно силни за да ги регистрира било кој сеизмограф во светот. (Boore, 1989)

- Магнитуда 1-2: земјотресот може да се регистрира само со сеизмограф или друг уред. Над 500.000 такви земјотреси се случуваат годишно во светот.
- Магнитуда 3-4: земјотресот едвај се чувствува. Се нишаат лустери, може да се случат помали штети. Има од 10.000-100.000 вакви земјотреси годишно.
- Магнитуда 5-6: земјотресот многу се чувствува. Паѓаат предмети од полица, ѕидовите пукаат. Има од 20-200 вакви земјотреси годишно.
- Магнитуда 7-8: земјотресот предизвикува голема штета. Паѓаат згради и мостови, патиштата се уништени. Вакви земјотреси има околу 10 годишно.

Енергијата која се ослободува при појава на земјотреси е штетна по објектите и по луѓето и за да се заштитат, луѓето ги проучуваат земјотресите и нивните последици на објектите. Енергијата е конзервативна т.е. ниту се создава, ниту се губи, само се претвора од еден во друг вид. Сеизмологијата е дел од физиката која ги проучува изворите на земјотресите и простирањето на сеизмичките бранови низ земјините слоеви. Земјотресното инженерство е мултидисциплинарна техничка наука која го проучува однесувањето на објектите на побуда од сеизмички бранови.

Постојат повеќе видови на земјотреси, меѓу кои најчести (90% од случаевите) се т.н. тектонски потреси, коишто воедно се и најсилни и најразрушувачки. Постојат уште и вулкански земјотреси (7% од случаевите), коишто се послаби и настануваат при ерупција на вулкан, и земјотреси коишто настануваат при пропаѓање на земјиштето, т.н. одронски земјотреси (3% од случаите).

Земјотресот се случува во внатрешноста на Земјата и тоа место се нарекува жариште. Точката во внатрешноста на Земјата каде што настанува земјотресот се нарекува хипоцентар, а местото на површината на Земјата каде тој најсилно се чувствува е епицентар. Од епицентарот, брановите продолжуваат да се движат во концентрични кругови, но со послаб интензитет. Според длабочината, хипоцентарот може да биде плиток (до 70 km длабочина), среден (70-300 km длабочина) и длабок (300-730 km длабочина).

Традиционалниот начин на проектирање на сеизмичките отпорни објекти е базиран на определување на вкупната сеизмичка сила $S = S_d(T_1) \cdot W$. Оваа сила зависи од масата на зградата, W , и фундаменталната периода на зграда со фиксна основа T_1 . За периодата T_1 , од кодовите се отчитува ординатата во спектарот на одговори $S_d(T_1)$ и со множење на ординатата на најголемото Земјино забрзување и вкупната маса на зградата, се добива вкупната сеизмичка сила. Понатаму, оваа сила се распределува на катовите, зголемувајќи се линеарно со висината. Потоа, анализата може да се направи како линеарна - спектрална анализа и нелинеарна - пушвер анализа. Интензитетот на сеизмичките сили е дефиниран со вкупниот сеизмички коефициент (K) и со тежината на објектот (G) $S = K \cdot G$. G се добива како сума од постојаните, променливи товари и товарот од снег.

Проектирањето на сеизмички отпорни објекти во С. Македонија е сè уште базирано на старите ЈУ кодови од 1981 година. Вкупната сеизмичка сила се пресметува како производ од четири коефициенти и вкупната маса на објектот $S = k_o \cdot k_s \cdot k_p \cdot k_d \cdot W$. Коефициентот k_o зависи од категоријата на зградата и може да има вредности во размер од $0.75 \leq k_o \leq 1.5$. Сеизмичкиот коефициент, k_s , зависи од сеизмичноста на локацијата и може да има вредности од 0.025 за сеизмичка активност VII до 0.1 сеизмичка активност IX во MCS скалата. Коефициентот на дуктилност, k_p , зависи од конструктивниот систем на зградата и има вредности од еден до два. Динамичкиот коефициент, k_d , зависи од земјените карактеристики и фундаменталната периода на зграда со фиксна основа T_1 . Од погоре изложеното, може да се забележи дека сите кодови ја користат природната фреквенција на зграда со фиксна основа, T_1 . Од таа причина, важно е точно да се одреди T_1 .

Постојат многу истражувачки проекти за изнаоѓање на емпириските формули за периодите на згради (Lee et al., 2000; Rahimian et al., 2004; Trifunac et al., 2001a, 2001b; Trifunac & Todorovska, 2001; Velani & Ramancharla, 2017b) и во повеќето од нив, истражувачите користат тестови со амбиентални вибрации врз основа на кои, со регресиона анализа ги добиваат непознатите коефициенти во емпириските равенки. При тоа добиените емпириски формули за периодите на зградите се функции од геометријата (висина, должина),

материјалот и конструктивните карактеристики на зградата. Бидејќи во различни региони во светот конструктивните системи, материјалите и карактеристиките на тлото се различни, не постои една единствена формула која би ги определувала периодите на зградите во сите региони. Поради тоа е важно да се изведе оригинална формула за одредување на периодите на зградите за специфичен регион. Вака добиените формули ги одредуваат периодите T_s , кои освен од спецификите на објектите, зависат и од почвените карактеристики. Ова значи дека иста зграда на различни локации ќе има различни периоди на системот тло - конструкција. Од таа причина, покрај фундаменталната периода на системот, T_s , важно е да се одреди и фундаменталната периода на зграда на фиксна основа, T_1 . Фундаменталната природна периода на зграда на фиксна основа, T_1 , е посебно важна за мониторирање на состојбата на зградите.

1.1. Фуриева трансформација

Еден начин да се претстави сигналот е во дискретен временски домен, кој претставува низа на вредности h последователно во времето, $h(t)$. На овој начин можеме да кажеме нешто за однесувањето на сигналот во секој момент на времето, а исто така можеме да добиеме некои прелиминарни сознанија за неговите карактеристики. Друг начин да се претстави сигналот е во фреквентен домен, каде што е претставен со Фуриевата амплитуда H како функција на фреквенција f , $H(f)$ и каде $-\infty < f < \infty$.

За многу цели, корисно е $h(t)$ и $H(f)$ да се сметаат како две различни претстави на една иста функција. Овие две репрезентации ги спојува Фуриевата равенка за трансформација. Фуриевата трансформација (ФТ) го претставува сигналот како целина. Таа ја менува димензијата на времето со димензијата на фреквенцијата.

$$\begin{aligned}
 H(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{2\pi ift} dt \\
 h(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(f)e^{-2\pi ift} df
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Може да се користи и аголната фреквенција ω , дадена во радијани по секунда. Односот помеѓу ω и f , $H(\omega)$ и $H(f)$ е:

$$\omega \equiv 2\pi f, H(f) \equiv |H(f)|_{f=\omega/2\pi} \quad (1.2)$$

и равенката (1.1) би била

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{i\omega t} dt$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (1.3)$$

Од равенката (1.1) се гледа дека Фуриевата трансформација е линеарна операција. Трансформацијата на збирот на две функции е еднаква на збирот на трансформациите.

Со две функции $h(t)$ и $g(t)$ и нивните соодветни Фуриеви трансформации $H(f)$ и $G(f)$, можеме да ја пресметаме конволуцијата од двете функции, означена со $g * h$, и дефинирана со

$$g * h \equiv \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (1.4)$$

$$g[t] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[\tau]h[t - \tau] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[t - \tau]h[\tau]$$

$g * h$ е функција во временски домен и $g * h = h * g$ (комутативен закон).

$$F(g * h) \leftrightarrow G(f)H(f) \text{ „Теорема на конволуција“} \quad (1.5)$$

Со други зборови, како што можеме да забележиме од равенка (1.5) Фуриевата трансформација на конволуцијата е производ од индивидуалните Фуриерови трансформации. (Press et al., 2010)

Брзата Фуриева трансформација (FFT) е алгоритам што ја пресметува дискретната Фуриева трансформација (DFT) на некоја секвенца. Дискретната Фуриева трансформација е Фуриева трансформација во дискретно време и дискретни фреквенции. Таа ја трансформира брановата форма во синусни компоненти.

Брзата Фуриева трансформација може да се користи во различни типови на обработка на сигнал. Може да биде корисна при читање на звучни бранови или за какви било технологии за обработка на слики. Фуриевата трансформација е важна алатка за обработка на слики затоа што со нејзина помош сликата се дели на нејзините синусни и косинусни компоненти. Излезот

на трансформацијата ја претставува сликата во Фуриев или фреквентен домен, додека влезната слика е еквивалент на просторен домен. Исто така, може да се користи за решавање на разни видови равенки или за прикажување на разни видови на активност на фреквенцијата на корисни начини.

FT се користи за филтрирање. Ги множиме FT од $x[n]$ и $h[n]$ и земаме инверзен FT на производот. Така, операцијата на конволуирање се претвора во операција за множење. Ако имаме N примероци, DFT зема N^2 операции, додека FFT зема само $N * \log_2(N)$ операции. Оттука FFT е многу побрз од DFT. FFT е поедноставен и побрз метод за спроведување на DFT. Ова е многу корисно кога вредноста на N е голема.

Фуриевата трансформација е алатка што ја претставува брановата форма (функција или сигнал) во алтернативна претстава, која се карактеризира со синуси и косинуси. Фуриевата трансформација покажува дека секоја форма на бранот може да се презапише како збир на синусоидни функции.

Физичката релевантност на Фуриевата трансформација е дека таа ја прикажува релативната амплитуда на фреквенциите присутни во сигналот. Може да се дефинира и за дискретен временски сигнал и за континуиран временски сигнал. Секој сигнал може да се претстави како збир на многу хармоници.

Главната предност на Фуриевата анализа е дека многу малку информации се губат од сигналот за време на трансформацијата. Фуриевата трансформација одржува информации за амплитудата, фреквенцијата и фазата и ги користи сите делови на брановата форма за да го преведе сигналот во доменот на фреквенција.

Фуриевиот ред се користи за да претстави периодична функција со дискретен збир на комплексни експоненцијали, додека Фуриевата трансформација се користи за да претстави општа, непериодична функција со континуирана суперпозиција или интеграл на комплексни експоненцијали. Фуриевите редови се користат за решавање на парцијални диференцијални равенки, кои се појавуваат во многу проблеми кај машинското инженерство како што се дифузија на топлина, ширење на бранови и проблеми со механиката на флуиди. Исто така, Фуриевата трансформација, која е многу

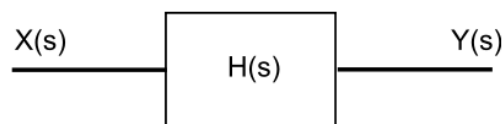
поврзана со Фуриевите редови, се користи во спектрална анализа на сигналите.

Фуриевият спектар е приказ на големината (магнитудата) на Фуриевата трансформација на функцијата.

1.2. Трансфер функција

Трансфер функцијата претставува сооднос на излезот во системот и на влезот на системот, во Лапласов домен со оглед на неговите првични услови и точка за рамнотежа нула. Ако имаме влезна функција $X(s)$ и излезна функција $Y(s)$, Трансфер функцијата ја дефинираме со равенката

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.6)$$



Слика 1.1 Трансфер функција
Figure 1.1 Transfer function

1.3. Корелација

Вкрстената корелација (Cross correlation) е мерка за сличноста на две множества на податоци едни со други. Вкрстената корелација се пресметува со формулата

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t + \tau)^* dt \quad , \quad (1.7)$$

и претставува скаларен производ (inner product) помеѓу $x(t)$ и комплексно конјугираната функција на $y(t)$ по време τ . (Ivanovic, S. S., & Trifunac, 1995)

Позитивната корелација $R_{xy}(0) > 0$ укажува на степенот до кој паралелно се зголемуваат или намалуваат тие променливи; негативна корелација $R_{xy}(0) < 0$ укажува на степенот до кој се зголемува едната променлива, додека другата се намалува. Ако независната променлива X влијае на променливата Y и двете се позитивно поврзани (корелирани), тогаш како што се зголемува

вредноста на X , така ќе се зголемува и вредноста на Y . Ако $R_{xy}(0) = 0$, тогаш $x(t)$ и $y(t)$ се целосно некорелирани (немаат заеднички компоненти).

Оттука, вкрстената корелација е споредба на два различни временски реда, за да се открие дали постои корелација помеѓу метриката со исти максимални и минимални вредности.

Вкрстената корелација и авто корелацијата најчесто се користат за мерење на сличноста на сигналите, особено за препознавање на облици и за откривање на сигнали. Пример: Авто корелација се користи за извлекување на радарски сигнали за подобрување на чувствителноста.

Корелацијата како статистичка мерка е многу важна во областа на психологијата и образованието бидејќи ја мери поврзаноста помеѓу резултатите од тестовите и другите мерки на работење.

1.4. Конволуција

Во математиката (особено, функционална анализа) конволуција е математичка операција на две функции $(f * g)$ што произведува трета функција. Таа покажува како се менува обликот на едната во зависност од другата. Терминот конволуција се однесува и на резултатот од функцијата и на процесот на нејзино пресметување.

Конволуцијата претставува сигнал што минува низ LTI (линеарен и временски непроменлив) систем. Ако имаме сигнал $s(t)$ што минува низ систем со импулсен одговор $h(t)$, излезот е конволуцијата на $s(t)$ со $h(t)$. Конволуцијата се дефинира и како интеграл на производ на две функции (во овој случај функциите се $s(t)$ и $h(t)$ каде што една од нив е во обратен редослед).

Конволуцијата е дефинирана како интеграл на производот на две функции откако една ќе се смени и префрли. Како таква, тоа е посебен вид интегрална трансформација:

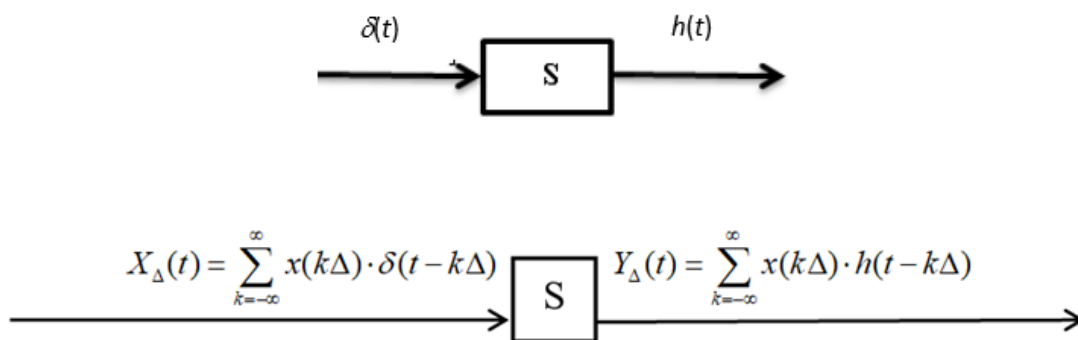
$$(f * g)(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau \quad (1.8)$$

Бидејќи важи комутативниот закон, еквивалентна дефиниција е:

$$(f * g)(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau)g(\tau)d\tau \quad (1.9)$$

Теоремата на конволуција гласи $F\{f * g\} = k \cdot F\{f\} \cdot F\{g\}$ каде $F\{f\}$ и $F\{g\}$ означуваат Фуриева трансформација на f и g , и k е константа која зависи од специфичната нормализација на Фуриевата трансформација. Верзиите на оваа теорема исто така се однесуваат на Лапласовата трансформацијата, Z-трансформацијата и трансформацијата на Мелин.

Кај аналогните сигнали, односно кај оние сигнали кои се дефинирани за секое t сигналот е сума од Диракови импулси $\delta(t)$. Ако на системот во релаксирачка состојба примениме како влезен сигнал Дираков импулс како излезен се добива импулсен одзив $h(t)$. $\delta(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta_{\Delta}(t)$. Ако $\Delta \rightarrow 0$ се добива Дираков импулс.



Слика 1.2 Линеарен и временски непроменлив систем
Figure 1.2 Linear and time invariant system

1.5. Шумови (извори и видови на шумови)

Во инженерството постојат корисни сигнали, но постојат и други видови на сигнали кои не се корисни, го загадуваат вистинскиот сигнал, и тие се нарекуваат бучава или шум. Во аудио уредите, корисен сигнал е посакуваниот звук; во видео уредите - посакувана слика; во информатичките системи - посакуваната информација; во мерните системи - измерена големина итн.

Шумовите всушност се дефинираат како несакани сигнали што го покриваат и маскираат сигналот што носи информации (корисниот сигнал).

Соодносот на сигналот со шумот (Signal to Noise Ratio - SNR) е мерка за

квалитетот на колото / уредот / системот и се дефинира како количник на моќноста на сигналот P_s и моќноста на шумот P_n . $\left(\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_n}\right)$

Шенонвата формула за пресметување на информацискиот капацитет е:

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) = 3.32 B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1.10)$$

I е информациски капацитет (бит во секунда),

B е пропусниот опсег на системот (херци),

S/N е односот на јачината на сигналот и јачината на шумот.

Системот има поголем капацитет ако односот S / N е поголем. Шумот е секогаш присутен во практичните системи. Шумовите се мерат со електричните инструменти: амперметар, волтметар и ватметар. Се мерат во dBmр – децибел по миливат.

Шумовите може да бидат

- корелирани (поврзани со сигналот) и
- некорелирани (не поврзани со сигналот):
 - Внатрешни (генерирани во внатрешноста на уредот). Во приемникот има извори на шумови што дополнително ја зголемуваат моќноста на вкупниот шум, тие се: термички шум, шум од полупроводнички компоненти, $1 / f$ шум, минлив шум
 - Надворешни (генерирани надвор од уредот). На влезот во приемникот, постои шум од надворешни извори, како што се: шум од природен извор и вештачки генериран шум (човечка активност). Во шум од природен извор спаѓаат: атмосферски шум (0.1 (F=200 dB) до 30 MHz (F=0 dB)), земјен (F=0 dB), космички, соларен, имплусен, интерференција, амбиентален, шум предизвикан од искри на електричен систем, вселенски, предизвикани од струја, од квантизација, од звучна интермодулација, топлински,... Вештачки генерирани шумови се индустрискиот (од индустриската зона), шум од градовите и населените места (од превозните средства, од апаратите за домаќинство, електраните, комуникациските објекти..).

Термички/топлински шум (или бел шум)

Овој шум е случаен, но присутен во сите уреди. Се пресметува со формулата $N = KTB$ каде N е моќноста на шумот (W), B е пропусниот опсег на системот (Hz), K е Болцманова константа на пропорционалноста ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K) и T е апсолутна температура (келвини). Густината на спектралната моќност на топлинскиот шум е приближно константна во опсег од 0 Hz до $4.3 \cdot 10^9$ T [Hz] (и за пониски температури над 10 GHz), поради тоа уште се нарекува и бел шум.

Шум од полупроводнички компоненти

Полупроводничките компоненти (диоды, транзистори, FET, MOSFET, интегрираните кола) создаваат шумови. Овој шум е исто така познат како Гаусов бел шум кој се наоѓа со формулата

$$I_N^2 = 2eIB \quad (1.11)$$

I_N^2 е квадратот на ефективната струја на шумот,

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] - елементарен квантен електрицитет,

I [A] - еднонасочна компонента на струјата низ полупроводничкиот елемент,

$B = f_v - f_n$ [Hz] - фреквентен опсег на системот.

- При пониски фреквенции се појавува дополнителен шум како резултат на површинскиот феномен на полупроводници; овој шум се зголемува со намалена фреквенција.

- На повисоки фреквенции, шумот е предизвикан од инерцијата на слободна дифузија на носителите (електрони); овој шум се зголемува со зголемување на фреквенцијата.

1.6. Филтрирање

Филтрирањето е модификација на измерен или пресметан сигнал — користејќи алгоритам и / или логика - за да се отстранат непожелните делови на сигналот пред да се користи за пресметки или во контролер.

Главната причина за филтрирање на сигнал е да се намали и изедначи

шумот со висока фреквенција поврзан со мерење како што се проток, притисок, ниво или температура. Шумот со висока фреквенција се смета за случаен и додаток на измерениот сигнал и вообичаено не е во корелација со времето т.е. вредноста на шумот во секое време τ не зависи од претходните вредности на шумот. Идеално е да го процениме основниот сигнал без шум, воведувајќи што е можно помалку дисторзија.

Постојат три вида на филтри за отстранување на шумот од сигналот: high pass, band pass и low pass филтри.

High pass филтрите не работат на пониски фреквенции. Се користат во аудио системи за да им овозможат на високите фреквенции да се пробијат додека се филтрираат или сечат ниските фреквенции. На пример, се користат со мали звучници за да се отстрани басот. Повисоките фреквенции минуваат со мали нарушувања.

Band pass филтер е всушност high pass филтер во серија со додатен low pass филтер кои се преклопуваат. Некои од ниските фреквенции што можат да се добијат преку low pass филтерот, се идентични со некои високи фреквенции што можат да ги добијат преку high pass филтерот. High pass филтер што опфаќа фреквенции над 10kHz во серија со low pass филтер што опфаќа фреквенции под 12kHz, создаваат band pass филтер од 10kHz до 12kHz. Band-pass филтерот е уред кој опфаќа фреквенции во одреден опсег и ги отфрла фреквенциите надвор од тој опсег.

Low pass филтер е филтер кој пропушта сигнали со фреквенција помала од одредена фреквенција на пресек (фреквенција на прекин) и ги отфрла сигналите со фреквенции повисоки од фреквенција на пресек. Овие филтри престануваат да работат на повисоки фреквенции. Low pass филтер може да се дефинира и како електричното коло, низ кое минуваат сигнали со ниски фреквенции, почнувајќи од 0 Hz до фреквенција на пресек (f_c).

Клучната разлика помеѓу high pass и low pass филтрите е во тоа што низ high pass филтерот минуваат сигнали со фреквенција поголема од фреквенција на пресек, додека низ low pass филтерот минуваат сигнали со фреквенцијата помала од фреквенција на пресек.

1.7. Спектрална густина (Power spectral density - PSD)

Функцијата на спектралната густина ја покажува јачината на варијациите (енергијата) како функција на фреквенцијата. Со други зборови, тоа покажува во кои фреквенции варијациите се силни и во кои фреквенции варијациите се слаби. Единица PSD е енергија по фреквенција (ширина) и од овде можеме да ја добиеме енергијата во специфичен опсег на фреквенција со интегрирање на PSD во тој опсег на фреквенција. Пресметувањето на PSD се врши директно со методот наречен FFT или со компјутерска функција за авто корелација и потоа трансформирање на истата.

PSD е едноставно амплитудата на квадрат на FFT спектарот. Кога временскиот сигнал се анализира со FFT (исто како и со DFT), добиените податоци ќе бидат сложен спектар кој се состои од реални и имагинарни делови за секоја фреквенција. Со примена на равенката (реален) * (реален) + (имагинарен) * (имагинарен), го добиваме PSD. Сепак, неколку работи мора да бидат земени во предвид, како што се користење на time window функцијата и процесот на средно проверување за да се добијат поточни резултати.

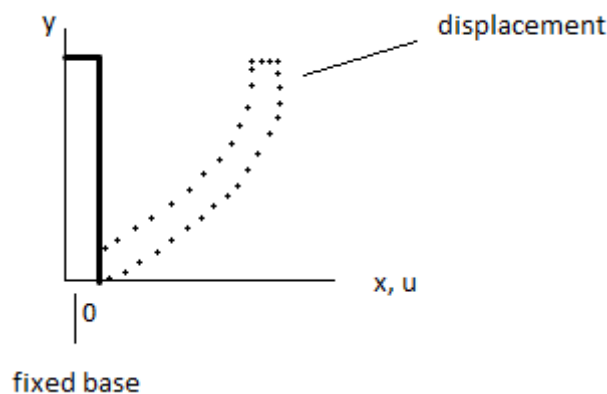
Спектралната густина на сигналот е моќност по херц во дадена фреквенција. Математички $PSD = P(f)/df$ што е моќноста во f поделена со фреквентен интервал df .

Да претпоставиме дека имаме сложена бранова форма $x(t)$ во временски домен и ја претвораме во фреквентен домен со $X(f)$ со X амплитуда како функција на фреквенцијата. Во дискретен фреквентен домен, ако $X(f)^2$ ја претставува содржината на моќноста во одреден фреквентен интервал df , тогаш $PSD = X(f)^2/df$.

Како конечно толкување, PSD е моќноста содржана во фреквентен интервал поделена со тој интервал на фреквенција.

1.8. Сопствени вредности и сопствени вектори на еднодимензионален елемент

За да посочиме дека висината на објектот и карактеристиките на материјалот од кој е изграден се важни параметри во определување на неговите природни фреквенции, анализираме наједноставен, еднодимензионален модел на нашиот објект. Равенката која го опишува нашиот проблем е еднодимензионалната бранова равенка $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ со чија помош го изразуваме поместувањето на зградата u , на растојание y во секој момент на времето t (слика 1.3). C е брзината на пропагирање на бранот и е дефинирана преку материјалните карактеристики на еднодимензионалниот модел како $C = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ каде μ е крутоста на материјалот, а ρ е густина на материјалот. μ и ρ се параметри кои се различни и карактеристични за секој материјал од која е направена зградата. C е константа и е секогаш позитивна. (Erwin Kreyszig, 2011)



Слика 1.3 Модел на зграда како еднодимензионален елемент
Figure 1.3 Building model as a one-dimensional element

Ако $Y(y)$ е функција од растојанието и $T(t)$ е функција од времето, тогаш поместувањето на зградата за растојание y во секој момент на времето t , може да го претставиме како функција $u = u(t, y)$ или $u = Y \cdot T$.

Оттука следува дека брановата равенка можеме да ја запишеме во следниот облик:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(Y \cdot T) = C^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}(Y \cdot T) \quad (1.12)$$

а по нејзиното диференцирање станува $Y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} \cdot T$.

Бидејќи $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \ddot{T}$ и $\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} = Y''$ од овде равенката го добива обликот

$$Y \cdot \ddot{T} = C^2 \cdot T \cdot Y'' \quad (1.13)$$

Ако од едната страна на равенството го ставиме растојанието, а на другата времето за да се еднакви резултатот мора да биде константа

$$\frac{Y''}{Y} = \frac{\ddot{T}}{C^2 T} = k = -\alpha^2 \quad (1.14)$$

α мора да биде негативен број, затоа што ако е позитивен број ќе тежнее кон бесконечност. Овој број е исто така познат и како бранов број и се наоѓа со равенката:

$$\alpha_n = \frac{2n-1}{2H} * \pi \quad (1.15)$$

Од овде равенството $u = Y \cdot T$ може да се запише како

$$u = T \cdot Y = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} [A_n \cos(C \cdot \alpha_n \cdot t) + B_n \sin(C \cdot \alpha_n \cdot t)] \cdot \sin \alpha y \quad (1.16)$$

За да ги одредиме A_n и B_n мора да ги разгледаме и иницијалните услови кои се

$$\begin{cases} t = 0, u(y) = f(y) \\ t = 0, \dot{u}(y) = g(y) \end{cases} \quad (1.17)$$

каде $f(y)$ е почетното поместување, а $g(y)$ е почетната брзина.

За дадено почетно поместување и $t = 0$ имаме

$$u(0, y) = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} [A_n \cos(C \alpha_n t) + B_n \sin(C \alpha_n t)] \cdot \sin(\alpha_n y) \quad (1.18)$$

$$u(0, y) = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} A_n \sin(\alpha_n y) = f(y) \quad (1.19)$$

Кога е дадена почетната брзина и $t = 0$ добиваме:

$$(1.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} &= \left[\sum_{n=1,3,5..}^{\infty} (-A_n C \alpha_n \sin(C \alpha_n t) + B_n C \alpha_n \cos(C \alpha_n t)) \sin(\alpha_n y) \right]_{t=0} \\ &= \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} B_n C \alpha_n \sin(\alpha_n y) = g(y) \end{aligned}$$

Мора да го избереме A_n за кое $u(y, 0)$ ќе стане Фуриева синусна серија од $f(y)$. Така ќе имаме

$$A_n = \frac{2}{H} \int_0^H f(y) \sin(\alpha_n y) dy, \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (1.21)$$

Исто така мора да го избереме B_n за кое за $t = 0$ изводот $\frac{\partial u}{\partial t}$ ќе стане Фуриева синусна серија од $g(y)$. Оттука ќе имаме

$$B_n C \alpha_n = \frac{2}{H} \int_0^H g(y) \sin(\alpha_n y) dy, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (1.22)$$

Или за B_n добиваме

$$B_n = \frac{2}{H C \alpha_n} \int_0^H g(y) \sin(\alpha_n y) dy. \quad (1.23)$$

Природната фреквенција на едно – димензионален елемент, во нашиот случај зграда се наоѓа со помош на кружната фреквенција $\omega_n = C * \alpha_n$. Бидејќи $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ следува дека $\frac{2\pi}{T_n} = C * \alpha_n \Rightarrow T_n = \frac{2\pi}{C \alpha_n} = \frac{2\pi}{C * \frac{2n-1}{2H} * \pi} = \frac{4H}{(2n-1) * C}$. Со последната равенка докажуваме дека периодот T_n зависи од висината H и од брзината на пропагирање на брановите C т.е. од материјалот. Кога веќе ги знаеме T и C можеме да ја пресметаме и брановата должина λ на бранот кој се пропагира во зградата, $\lambda = C * T_n$.

Повеќе детали може да се најдат во (Kocaleva & Gicev, 2020).

1.9. Преглед на литературата

Математичките модели што се користат во динамичната анализа на структурите се идеализации потребни за да се претстави одговор на реалните структури на различни динамички оптоварувања (на пр. силно тресење на земјата, силни ветрови, експлозии и сл.). Тие можат да бидат проверени со спроведување на експерименти врз структури, на пр. амбиентална и присилна вибрација. Последните две можат да се користат за да се идентификуваат структурните карактеристики, од кои најважни се природните фреквенции.

Тестовите на амбиенталните вибрации го опишуваат линеарното однесување на структурите бидејќи амплитудите на вибрации се мали. Тие можат да се користат и за опишување на линеарното однесување на оштетените структури и нивните компоненти. Врз основа на овие резултати се развиваат алгоритми за мониторирање и контрола на функционалноста на

објектот. Затоа, натамошниот развој на експериментални методи за мерење на лице место на делумно оштетени структури во целост и големи размери е од голем интерес (S. S. Ivanovic et al., 2001; Trifunac, Ivanović, & Todorovska, 1999; Trifunac, Ivanović, Novikova, et al., 1999; Trifunac & Todorovska, 1999). Предност на амбиенталните вибрациите во однос на присилната вибрација е тоа што тие обично бараат лесна опрема и помал број на оператори. Извори на побудување се ветер, микро-потреси, микросеизми и разни локални случајни и периодични извори (на пр. сообраќај или тешка машинерија).

Присилните тестови за вибрации може да бараат големи сили да произведат корисни (поголеми) амплитуди на одговор на структури во целост. Силата обично се наоѓа на врвот на зградата. Ова доведува до поистакнато побудување на режимите на вибрации кои имаат големи амплитуди на повисоко ниво на структурите. Сепак, патеките на ширењето на брановите преку структурата се различни од оние во случај на тресење на земја или побудување на ветер, и е потребно претпазливо толкување на резултатите за да се земат во предвид таквите разлики.

Првиот акцелерограм од земјотрес е регистриран од земјотресот во Long Beach, California на 10 март 1933. Овој настан го одбележува почетокот на младата применета наука Земјотресно инженерство. Триесет години подоцна, (Crawford & Ward, 1964) го оживеале интересот за овој метод и покажале дека може да се искористи за да се утврдат најниските фреквенции и начините на вибрации на структурите во целост. (Trifunac, 1970b, 1970a) користел вибрации предизвикани од ветер и микро-тремори за да тестира згради. Неколку години подоцна, тој ги споредил резултатите од експериментите со присилна вибрација на истите две згради со резултатите од истражувањата за амбиентални вибрации. Резултатите од двата теста биле конзистентни и споредливи, (Udwadia & Trifunac, 1973) ги презентирале резултатите од тестовите за амбиентални вибрации на четири згради од различен тип (зграда од 22 ката, зграда од 39 ката, зграда од 9 ката и 9 катна зграда од армиран бетон) и ги дискутирале промените во одговорот на амбиенталните вибрациите пред и по земјотресот. Тие ги анализирале ефектите на интеракција помеѓу меко тло и објект веднаш и долго после земјотресот. Во текот на 1970-тите и 1980-тите, тестовите за амбиентална и присилна вибрација се користеле за да

се споредат мали амплитудни (линеарни) со поголеми амплитудни одговори и да се најдат природните фреквенции пред и после земјотресот на структурите како и да се идентификува тродимензионалната природа на деформациите што ја придружуваат фреквенцијата на одговорот. Тие исто така биле искористени за да се решат контрадикторните толкувања на значајноста на интеракцијата на структурата и тлото и причините за нелинеарноста (во тлото или структурата) во анализираниот одговор на зградите на силна побуда од земјотрес. Во текот на 1990-тите, тестовите за амбиентални вибрации продолжиле да придонесуваат за длабинско проучување на промените во структурните својства и кон понатамошен развој на структурни методи за идентификација. (Ivanović et al., 2000; Sanja Ivanovic et al., 2000; SS Ivanovic et al., 1999)

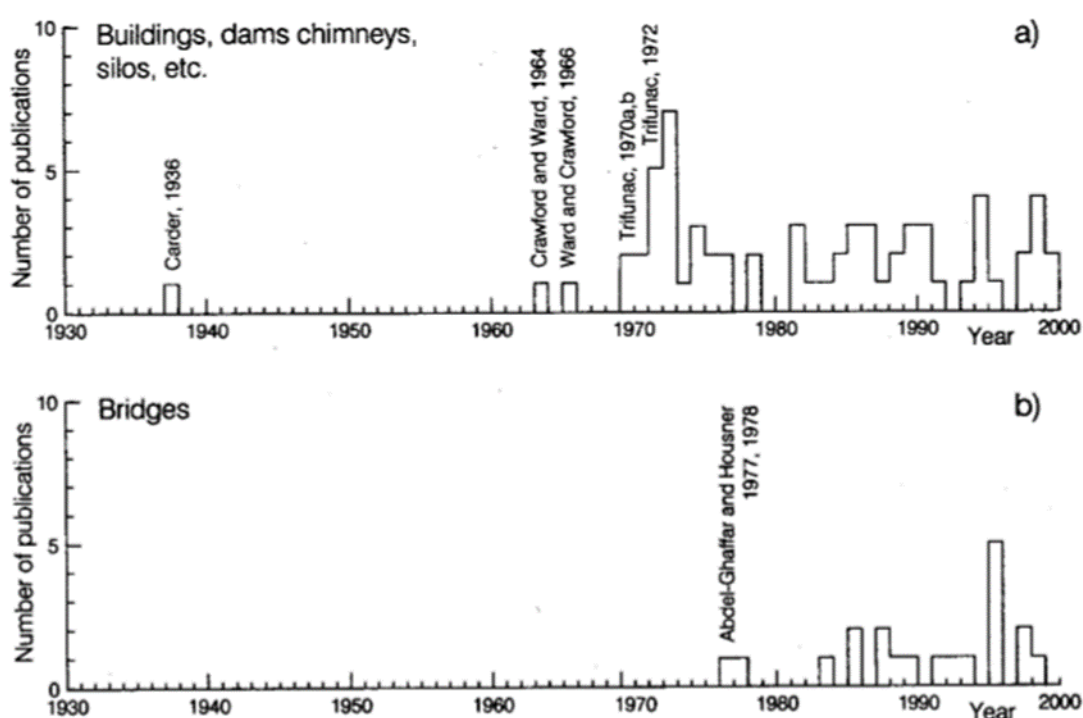
Методот на амбиентални вибрации бил потврден со директна споредба со тестовите за присилна вибрација со мали амплитуди и биле предложени процедури за негова употреба во структурното следење и контрола.

Една од најчестите употреби на анализата на амбиентални вибрации вклучува идентификација на природни фреквенции, облици на вибрации и еквивалентни параметри на различни згради во целост, мостови, брани и нуклеарни центри. Тестовите за амбиентални вибрации се користеле и за подобрување на проценката на параметрите и целокупната дефиниција и својства на моделите на структурите во целост, за релативна калибрација на различни возбудувања на мали амплитуди: амбиентални и присилни вибрации, побудување предизвикани од човекот и пад на тегови, за моделирање мостови, оџаци, брани, нуклеарни центри, резервоари за вода и да се процени амортизацијата на зрачење на постојните брани на карпите.

Тестирањето на амбиенталните вибрации се користи широко за да се идентификуваат и да се следат промените на фреквенциите на системот. После секој земјотрес во носечките елементи на објектите се јавуваат микропрнатини кои ја намалуваат крутоста (отпорноста на деформации) на објектот како целина. Бидејќи природните фреквенции се пропорционални на крутоста, последица од појавата на микропрнатини во системот е намалување на природните фреквенции. На овој начин периодичното мерење на

природните фреквенции е еден од начините на мониторирање на здравјето на објектот.

Според наведените 87 цитирани трудови во трудот (Sanja Ivanovic et al., 2000), што се директно поврзани со тестирање на целокупните структури до 2000 година, 77% ја опишуваат употребата на мерењата на амбиенталните вибрации за тестирање на згради, брани, нуклеарни центри, оџаци и др. Останатите 23% ги опишуваат тестовите за амбиентални вибрации на мостови (сл. 1.4).



Слика 1.4 Фреквенција на појава на објавени придонеси со тест на амбиентални вибрации на целосна структура (а) згради, брани, оџаци, силоси,... (б) мостови

Figure 1.4 Frequency of occurrence of published contributions to the subject of ambient vibration testing of full-scale structure (a) buildings, dams, chimneys, silos,... (b) bridges

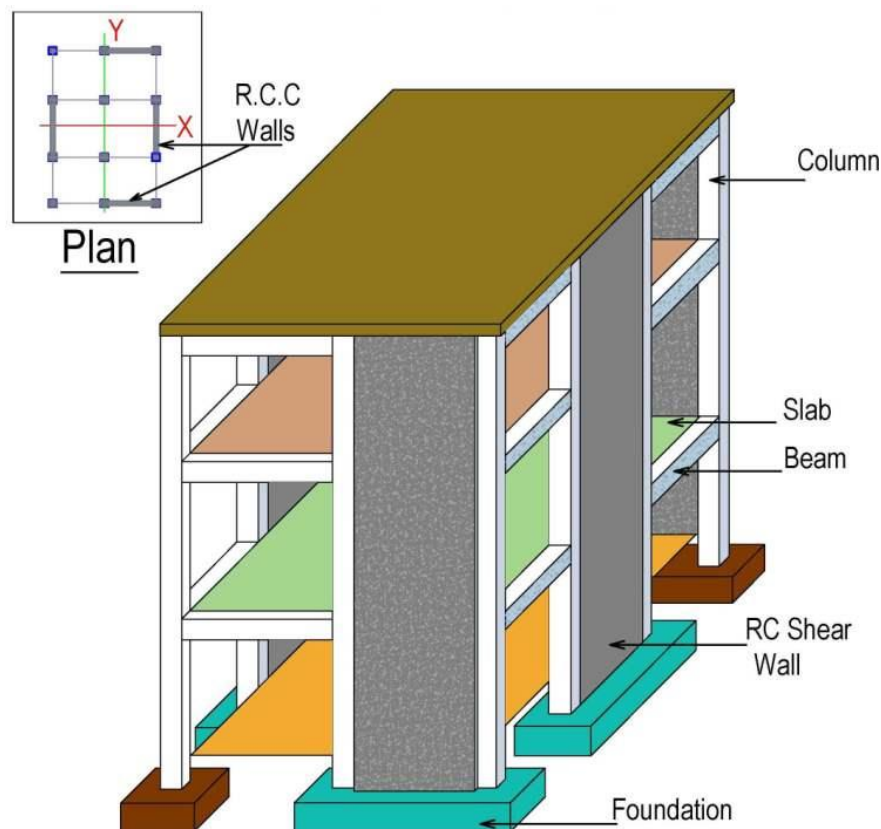
Од сликата се гледа дека употребата на тестовите за амбиентални вибрации во суштина започнува во 1970 година, по што најмалку два труда годишно се објавувале во категоријата згради и други структури. И покрај тоа

првите цитирани трудови за амбиентални вибрации на мостови се од 1977 и 1978 година и почести тестови започнале да се спроведуваат дури по 1985 година, произведувајќи околу 1 труд годишно. После 2000-та година оваа тема се обработува во околу најмалку 1200 труда годишно и нивниот број од година во година постојано расте за околу 30 до 50 труда плус.

Во трудот (Manohar et al., 2012) е претставена процената на ранливост на разни згради во Гувахати (Индија) и е прикажан степенот на ранливост на зградите, како и мерките кои можат да се преземат за да се спречат потенцијалните штети. Процената на ранливоста од земјотреси била спроведена првенствено во два чекори - (i) прелиминарна проценка и (ii) детална проценка. За прелиминарна проценка го користеле методот брз визуелен скрининг (RVS) кој визуелно ја испитува зградата за да идентификуваат карактеристиките што влијаат на сеизмичката изведба на зградата, како што се типот на зградата, сеизмичноста, условите на почвата и неправилностите. Визуелниот преглед на зградата според овој метод може да се заврши за помалку од 30 минути и може да се оствари од улицата без влегување во зградата. Оваа анкета била спроведена врз основа на критериумите предложени од Arya (2000). (Anand S. Arya, 2006) Тие исто така го пресметуваат резултатот на изведба (PS) за секоја зграда врз основа на нумерички вредности на формуларот RVS користејќи ја формулата $PS = (BS) - \sum[(VSM)_x(VS)]$ каде VSM се модификатори на резултатот на ранливост и BS е резултатот на ранливост што се множи со VSM за да се добие вистинскиот модификатор што ќе се примени на VS (основниот резултат).

Во својата студија (Chun et al., 2000) се фокусираат на процената на веродостојноста на емпириска формула која се користела за да се процени основниот период на masonry-reinforced concrete (сидарски – армирано - бетонски) згради и предлагање на подобрена емпириска формула. За таа цел, целосни мерења биле извршени на педесетина згради во Кореја и нивните резултати биле споредени со оние добиени со тековната формула во Корејските стандарди за динамичка анализа. Забрзувањата на зградите биле мерени со два акцелерометри (Dytran Model 3191A) поставени на највисокиот кат на зградите. За да се отстранат повисоките фреквенции се користел 12.5 Hz low - pass филтер. Било забележано дека дотогашната емпириска формула

не се покажала како добра и дека со користење на оваа формула се појавиле релативно големи грешки. Тие своето истражување го започнале со постојната формула $T = 0.09H/\sqrt{B}$, каде што, фреквенцијата зависи само од висината на зградата во метри (H) и димензијата на зградата во метри (B), правец во кој се определува природниот период. Тие предложиле нова подобрена формула врз основа на мерењата на амбиенталните вибрации.



Слика 1.5 Армирано-бетонско платно

Figure 1.5 Reinforced concrete shear wall

Goel и Chopra (Goel & Chopra, 1998) прво ги проценувале емпириските формули наведени во тековните US кодови, користејќи ги достапните податоци за фундаменталните периоди на зградите измерени за време на осум земјотреси во Калифорнија, почнувајќи со земјотресот во Сан Фернандо од 1971 година и завршувајќи со Northridge земјотресот во 1994. Тие покажале дека тековните формули во американските стандарди за проценка на фундаменталниот период на бетонски згради се несоодветни. Последователно, подобрена формула се развива со калибрирање на теоретска

формула, изведена користејќи го Dunkerley's методот, наспроти измерените податоци за периодот преку регресионата анализа. Исто така препорачале фактор за ограничување на периодот пресметан со „рационална“ анализа, како што е Rayleigh's методот. Тие покажале дека досегашната формула се покажала како несоодветна за новите згради и од таа причина тие предлагаат нова подобрена формула, слична како во трудот (Chun et al., 2000) $T = C \frac{1}{\sqrt{A_e}} H$ каде A_e е еквивалентна површина на смолкнување изразена како процент, C е сеизмички коефициент и H е висината на зградата во метри.

Други истражувања (Yamin et al., 2012) разработуваат модел за проценка на катастрофален ризик на згради, веројатни загуби и чисти премии од различни портфолија. Моделот вклучува модул за опасност, модул за изложеност, модул за ранливост и модул за ризик. Презентирано е кратко резиме на методолошкиот пристап усвоен за проценка на катастрофалниот ризик и подобрување на методолошкиот пристап за проценка на ранливоста на градежните структури. Предложени биле динамички нелинеарни или поедноставени нелинеарни анализи, вршеле разгледување на повеќе функции на оштетување за различни типови на компоненти на конструкцијата и методолошки пристап на трошоците за поправка, со цел да се интегрираат вкупните економски загуби за зградата, за различни нивоа на анализа. Методологијата е илустрирана со еднокатна, армирана бетонска рамка, која не е засилена со сидови. На крај биле презентирани прелиминарни заклучоци и препораки за спроведување на предложената методологија.

Pulkit Velani и Pradeep Kumar Ramancharla (Velani & Ramancharla, 2017a) ја истражуваат зголемената изградба на високи згради во Индија и постоењето неколку кодови за високи згради при што многу од нив имаат недостатоци во изнаоѓањето на параметрите за сеизмички дизајн. Еден таков параметар бил основниот природен период на високите згради. Изразот на фундаменталниот период бил првично развиен заснован на Калифорниските земјотреси и усвоен од многу сеизмички кодови ширум светот; вклучувајќи го и тековниот, Индиски сеизмички код IS 1893: 2002 година. Овој труд има за цел да ја проучи веродостојноста на емпириското изразување на фундаменталниот период за високи згради во Индија. За таа цел, биле спроведени тестови за амбиентални

вибрации на 21 армиранобетонски (RC) згради, лоцирани во градовите Мумбаи (Бомбај) и Хајдерабад, со поставување на сензор за вибрации на највисокиот достапен кат. Измерените периоди се споредувале со одредбите на кодот. Во студијата било откриено дека како што се зголемува висината на зградата, природниот период не е линеарно пропорционален на висината; наместо тоа станува флексибилен. Оттука постои итна потреба за ревизија на емпирискиот израз. На крајот за проценка на фундаменталните природни периоди на армирано-бетонски згради со инфил панели тие ја предложиле формулата $T = 0.01 H^{1.1}$ и за RC згради над 20 спрата предложиле друга формула $T = 0.009 H^{1.1}$.

Сеизмичките кодови, предлагаат емпириска формула заснована врз вообичаениот дизајн и градежната практика во соодветна земја. Rahimian et al., (2004) истражуваат како техниката на градење во Иран, каде што градежните техники се далеку поразлични од западните развиени земји, ги прави иранските изградени згради да се однесуваат различно од другите земји. Затоа, неопходно било да се провери применливоста на претходно донесените формули за Иранскиот сеизмички код и доколку било потребно да се прилагоди нова формула. Била направена студија за да се види дали е потребна промена во тековниот код. Биле избрани 10 армирано-бетонски (RC) згради од вкупно 45 згради. Природните периоди биле добиени со анкета за амбиентални вибрации (AVS) и метод на конечни елементи (FEM) – анализа на сопствени вредности и сопствени вектори. Предложената формула во „Иранскиот код за сеизмички отпорен дизајн на згради“ во 1997 година се покажала како не соодветна за обичните RC згради, кои обично биле градени од приватни сопственици. Оваа студија вовела емпириска формула за употреба во следната ревизија на Иранскиот сеизмички код.

(Ivanovic, S. S., & Trifunac, 1995) правеле преглед на постоечките техники за определување на амбиентални вибрации, илустрирале компјутерски базиран систем за процесирање на амбиентални вибрации и прикажале резултати од 4 тестирања спроведени во Kaprielian Hall, четири спратна зграда на Универзитетот Southern California.

Специфична форма на вибрации што ја извршува механички систем со

одредена фреквенција се нарекува мод. Со секој мод е поврзана модална фреквенција и модален вектор. Публикации кои истражуваат тродимензионални модови на вибрации со процесирање на измерени податоци на мноштво точки на различни нивоа во објектите, се ретки.

Обично кај високи објекти кај кои висината е доминантна во однос на ширината и должината, енергијата воглавно се пренесува преку латералните, трансляторни модови. Кај ниските објекти, кај кои висината е многу помала од должината и ширината на објектот, доминантни се торзионите модови кои претставуваат ротации на објектот околу вертикалната оска. Кај објектите каде што трите димензии се приближно исти, енергијата се пренесува преку трансляциони и ротациони модови или преку комбинација од овие два. Детални 3D деформации на една зграда, поврзани со надолжни и попречно вибрации на една зграда се опишани за библиотеката Milican на кампусот на CalTech во Пасадена, Калифорнија за време на тестови со присилна вибрација. (Foutch et al., 1975)

Целта на овој труд е да се опише стратегијата за мерење и процедурите за анализа на еден релативно едноставен пример. Методот што го опишуваме во овој труд е продолжение и подобрување на постапките користени во (Ivanović et al., 2000; Sanja Ivanovic et al., 2000). Методот може да ги идентификува комбинирани тродимензионални (3D) модови (форми) на вибрирање и нивните фреквенции. Во овој труд, ние се фокусираме само на дводимензионалните (2D) хоризонтални компоненти на облиците на 3D режим на вибрирање. За да се покаже ова, неопходно е да се работи со несиметрична градба (зграда, куќа) и поради таа причина куќата опишана во дисертацијата е несиметрична, главно заради нејзината каскадна и несиметрична основа.

1.10. Содржина на дисертацијата

Докторската дисертацијата е структурирана во 7 целини, напишани на 108 страни. Во неа се опфатени 53 слики и една табела.

Поглавје 1 е Вовед во докторската дисертација. Во ова поглавје се анализирани постоечки трудови од оваа област и се дефинирани целите на дисертацијата. Исто така е дадено кратко објаснување на основните поими

како: Фуриева трансформација, трансфер функција, корелација, конволуција, шум, филтрирање, спектрална густина кои ќе се користат при процесот на анализирање и процесирање на амбиенталните вибрации. Претставен е накратко и процесот на аналитичко определување на сопствени вредности и сопствени вектори на еднодимензионален модел на објект.

Поглавје 2 дава информации и детален опис на објектот на кој е вршено истражувањето. Опишани се локацијата, местоположбата на објектот, број на спратови, фотографии од планот и од самиот објект. Исто така е даден опис и спецификација на инструментите со кои се вршат мерењата на амбиенталните вибрации.

Поглавје 3 ја опишува методологијата применета во истражувањето. Во овој дел се дефинира постапката за процесирање на податоците добиени од страна на инструментите и се кажува како се применува корелацијата, трансфер функцијата, конволуцијата и филтрите врз податоците. Се применува предложената методологија сè со цел подобро да се обработат податоците и да добиеме конкретни резултати.

Поглавје 4 е посветено на резултатите добиени од мерењата спроведени во објектот. Ова поглавје се состои од 2 дела на резултати, први добиени од мерење на 2 точки по 30 минути и вторите со мерења во 68 различни точки по 60 минути.

Поглавје 5 ги опишува микротреморите, нивното претставување преку брзината, филтрирањето во поширок и потесен фреквенциски опсег и анализа на амплитудите на брзината со која се пропагираат амбиенталните вибрации.

Во поглавје 6 се истражува како нивото на дискретизација и должината на траење на мерењето на амбиентални вибрации влијае на точноста на резултатите. Се разгледуваат различни нивоа на дискретизација на синусна функција. Овде решаваме нумерички експеримент аналитички и дигитално.

Поглавје 7 ги сублимира заклучоците на истражувањата опфатени со оваа дисертација и дава насоки за понатамошен развој на предложениот метод, како и идеи за понатамошни истражувања.

2. ОПИС НА ОБЈЕКТОТ И ИНСТРУМЕНТОТ

2.1. Опис на објектот

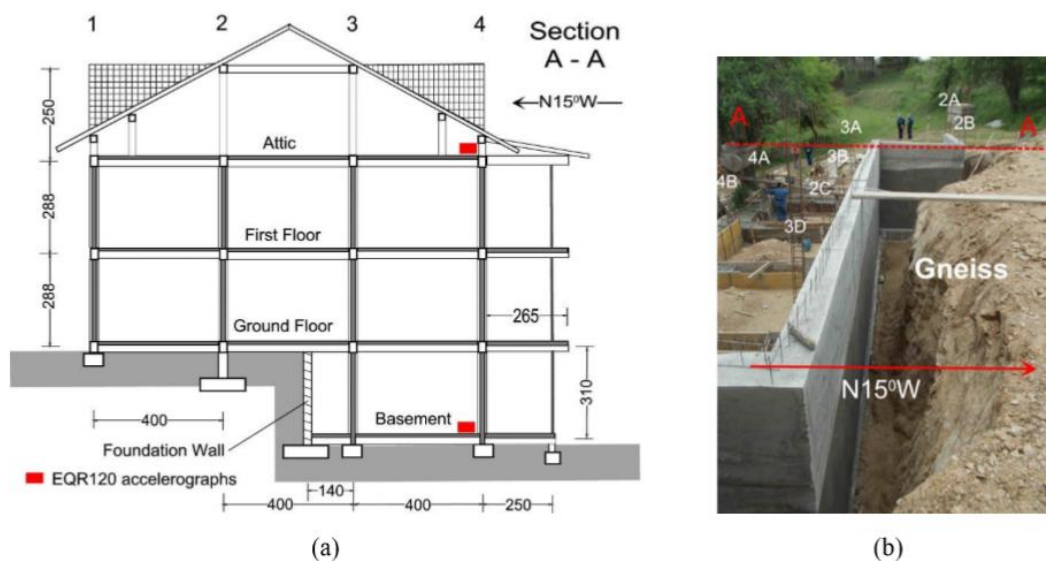
Објектот кој го анализираме и во кој вршиме мерења е викенд куќа која се наоѓа во Берово, во близина на северниот брег на Беровското Езеро на 940 метри надморска височина. Куќата е двокатна армирано-бетонска зграда со делумно закопан подрум и поткровје и се наоѓа на 41 степени 40 минути 34,99 секунди северна географска ширина и 22 степени 53 минути и 54,75 секунди источна географска должина. Куќата е фундирана на падина што се протега од североисток кон југозапад. На сл. 2.1 е прикажан поглед на куќата од југозапад (дел а) и од северисток (дел б).



Слика 2.1 Викенд куќата на Беровско Езеро а) југозапад поглед б) северисток поглед

Figure 2.1 Weekend house at Berovo lake a) North-East view b) South-West view

Куката се состои од четири висински нивоа: подрум, приземје, прв спрат и поткровје. Планот на куката е правоаголник со димензии 12 метри x 10.5 метри. Поголемата димензија (12 м) зафаќа агол од 345° (измерено во насока на стрелките на часовникот од Север, сл. 2.3), така што во понатамошниот текст поголемата хоризонтална димензија ќе ја реферираме како технички правец север-југ, а помалата технички исток-запад.

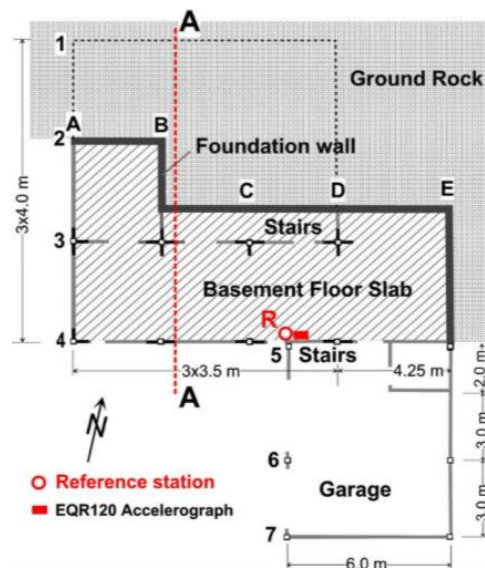


Слика 2.2 (а) Вертикален пресек А-А (види сл. 2.2б и сл. 2.3 до 2.6) кој има правец север-југ. (б) темелниот ѕид за време на изградбата. Вертикалните арматурни шипки за столбовите 2А, 2Б, 3А преку 3Д и 4А и 4Б ја покажуваат идната локација на столбовите на кои се потпира приземјето.

Figure 2.2 (a) NS vertical section A-A. (b) Foundation wall during construction. Vertical reinforcing bars for columns, 2A, 2B, 3A through 3D, and 4A and 4B show the future location of the columns that would support the ground floor.

Структурата има 16 армирано-бетонски столбови со $25 \times 25 \text{ cm}^2$ пресек (сл. 2.4). Тие се меѓусебно поврзани со армирано-бетонски греди со ширина од 25 см и висина од 35 см. Подовите се двонасочно армирани бетонски плочи, дебели 12 см. За да се обезбеди дополнителна хоризонтална крутост, на фасадните столбови, во правец на фасадата поставени се два армиранобетонски платна со дебелина од 20 см и ширина од 50 см. Внатрешните столбови исто така имаат два, три или четири вакви ѕидови, во

зависност од нивната локација и од ограничувањата на околниот простор. Тие сидови се прикажани со црни полни, издолжени правоаголници до столбовите кои се прикажани со мали бели квадратчиња на сл. 2.3 до 2.5.

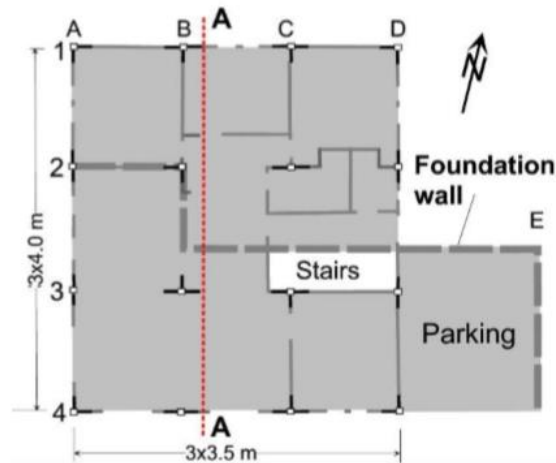


Слика 2.3 План на подрумот и гаражата. Структурата на гаражата е во непосредна близина, но е одвоена од структурата на главната зграда. Подрумот ја опфаќа областа јужно од темелниот сид (A преку E на сл. 2.3б). Постојаната локација на EQR120 акцелерометарот служеше како референтна станица за време на мерењата на амбиенталните вибрации.

Figure 2.3 Plan of the basement and garage. The structure of the garage is adjacent to but separate from the structure of the main building. The basement comprises the area south of the foundation wall (A through E in Fig. 2b). The permanent location of the EQR120 accelerograph served as a reference station during the ambient vibration measurements.

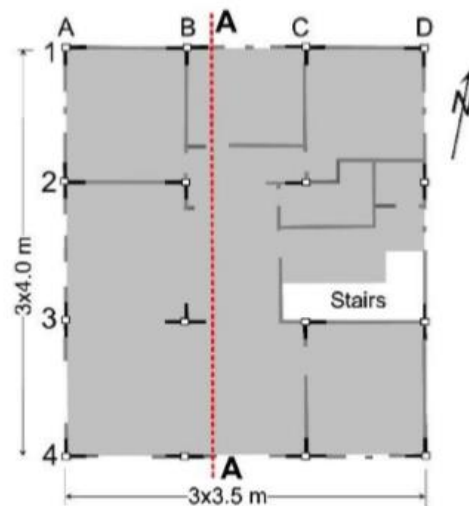
Дел (а) на сл. 2.2 го покажува вертикалниот пресек A-A (сл. 2.3 до 2.6), додека дел (б) го покажува темелниот сид за време на изградбата. На слика 2.3 е прикажан планот на подрумот и гаражата. Како што може да се види на сл. 2.2 а, б и сл. 2.3, северниот дел од приземјето е поставен директно на карпа. Јужниот дел од куќата, јужно од темелниот сид се состои од подрум, што е 3,1 м под приземјето. Црвените квадрати на сл. 2.2 а) ги прикажуваат постојаните места на двата инструменти EQR120 при мерење на вибрациите. За време на

тестовите за амбиентални вибрации, акцелерометрот во подрумот служеше како референтна станица и не ја менуваше својата локација, додека инструментот на поткровјето беше преместуван на 68 различни локации во куќата за време на тестовите.



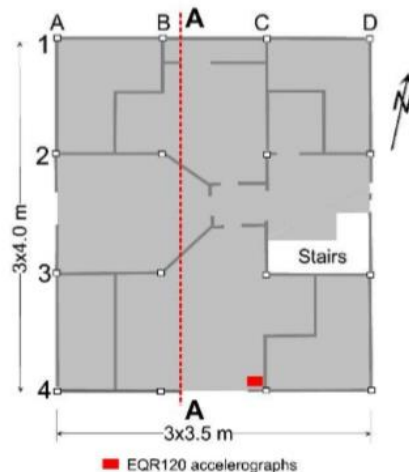
Слика 2.4 План на приземјето. Сивата површина го покажува обемот на правоаголна бетонска плоча од $10.5 \times 12.0 \text{ m}^2$, со отвор за скалите.

Figure 2.4 Plan of the ground floor. The gray area shows the extent of the rectangular concrete floor slab $10.5 \times 12.0 \text{ m}^2$, with an opening for the stairs.



Слика 2.5 План од 1 кат. Сивата површина го покажува обемот на правоаголна бетонска плоча од $10.5 \times 12.0 \text{ m}^2$, со отвор за скалите

Figure 2.5 Plan of the 1st floor. The gray area shows the extent of the rectangular concrete floor slab $10.5 \times 12.0 \text{ m}^2$, with an opening for the stairs



Слика 2.6 План на поткровје. Сивата површина го покажува обемот на правоаголна бетонска плоча од $10.5 \times 12.0 \text{ m}^2$, со отвор за скалите. Црвениот правоаголник ја покажува постојаната локација на акцелерометарот EQR120.

Figure 2.6 Plan of the attic. The gray area shows the extent of the rectangular concrete floor slab $10.5 \times 12.0 \text{ m}^2$, with an opening for the stairs. The solid rectangle shows the permanent location of the EQR120 accelerograph.

Беа спроведени две мерења во истата куќа. Првото мерење беше во 2 точки и беше спроведено на 19 октомври 2019. Второто мерење беше спроведено од 5-ти до 8-ми март 2020 и мерењата беа извршени на 68 различни точки во викенд куќата. Во трудот се претставени и двете мерења, со посебно внимание на анализата правена врз основа на вторите мерења.

2.2. Опис на инструментот

Во ова истражување ќе работиме со податоци добиени со помош на теренски мерења со употреба на два EQResponder120 акцелерометри. EQR 120 акцелерометрите се високо сензитивни и затоа се во состојба да регистрираат и најмали амбиентални движења и амбиентален шум (Instruments, 2019). Акцелерометрите најпрво ќе бидат конфигурирани (сетирани) со помош на интернет конекција и поврзани со GPS антени. GPS антените е потребно да бидат поставени под отворено небо и да добиваат добар сателитски сигнал за синхронизација на времето на двата инструмента. Истовремено, со поставување на инструментите близу до краевите на кровот и

снимајќи ги амбиенталните вибрации во насока на должината и ширината на зградата, може да се одредат и торзионите периоди на мерените згради (Rahmani & Todorovska, 2014). Акцелерометрите вообичаено се поставуваат на континуиран режим на работа и секој од нив треба да е синхронизиран со UTC (Координирано универзално време) од сопствените GPS приемници (точност 1 μ s).

Секој EQR120 е триаксијален акцелерометар со MEMS серво силиконски сензор со динамичен опсег од 128 dB (0.1-20 Hz) и опсег на снимање $\pm 4g$, со импликации на нивото на прагот на снимање $2.4 \times 10^{-6}g$ ($g = 9.81 m/s^2 =$ забрзување поради гравитација) или $2.4 \times 10^{-3}gal$. Имаат грешка за неутрализирање $<\pm 0.02\%$, грешка за линеарноста $<\pm 0.1\%$ и грешка на добивка $<\pm 0.08\%$, во текот на опсегот на работната температура (-10 до +60 °C).

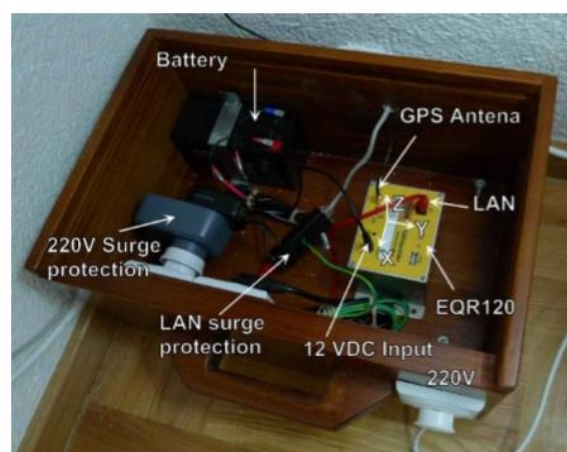
Во режим на мерење на силни потреси на тлото, акцелерометрите се поставуваат најчесто едниот во подрум (Slave), а другиот на последен кат, на поткровјето (Master). Во овој режим инструментите не мерат сè додека одреден надворешен настан не предизвика забрзување на инструментот над претходно сетираниот праг (trigger). Мерењето се прекинува кога односот на краткотрајната и долготрајната средна вредност на забрзувањето STA/LTA е помал од претходно сетираниот праг. Кога мериме амбиентални вибрации, режимот на мерење е континуиран и акцелерометрите снимаат податоци во датотеки, кои се затвораат на секои 30 минути, 1 час, 2 часа или 6 часови во зависност од тоа како е избрано во поставките. Ако сензорите се поставени на континуиран режим на работа, треба да почекаме датотеката да се затвори и да се ресетира сензорот. Податоците никогаш не се губат.

На сл. 2.7 е претставен акцелерометарот. Ние користиме два акцелерометри за нашето истражување. Подетална спецификација за истиот е дадена во додаток 8.3 на крајот од трудот.



Слика 2.7 EQR 120 акцелерометар
Figure 2.7 The EQR120 accelerograph

EQR120 е самостоен и може да работи самостојно или може да работи во мрежи. Изграден е со 32 Gb флеш меморија, која може да чува активирани / континуирани текови на податоци повеќе од 80 дена. Има напојување од 12V DC и има резервни батерии, внатрешен часовник и GPS приемник. Во независен режим на работа, GPS приемникот го поставува внатрешниот часовник на UTC време со точност од $1\mu\text{s}$. Работи на етернет, во мрежен режим, поддржува тајминг за NTP и PTP. На сл. 2.8 е прикажана фотографија од сензорот во рамките на посебно припремена дрвена кутија.



Слика 2.8 QR 120 акцелерометар во нарачана дрвена кутија
Figure 2.8 The EQR120 accelerograph inside a custom-made wooden box

3. МЕТОДОЛОГИЈА

За да ги обработиме податоците соодветно, ќе работиме според следниов концепт:

Со инструментите ќе мериме забрзувања на различни точки во куќата генерирани од амбиентални побуди (сообраќај, ветер, движења во објектите итн.) во тек на време. Мериме во три правци: x (во правец на помалата хоризонтална димензија), y (во правец на поголемата хоризонтална димензија) и z (вертикална димензија), при што позитивна x е насочена кон технички исток, позитивна y кон технички север и позитивна z оска е насочена нагоре. Овие мерења ќе траат по триесет, односно шеесет минути, со временски чекор од 0.005 секунди т.е. 0.01 секунда. Од тука за едно мерење ќе имаме 360 000 записи.

Добиените резултати од мерењата се забрзувања добиени во зависност од времето, меѓутоа при процесирање на податоците овие резултати ќе ги трансформираме и во фреквентен домен.

Прва фаза од анализата на добиените податоци е воочување на очигледни грешки од мерењата. Како грешка може да се појави несинхронизација на инструментите. Иако на почеток добро синхронизирани, во тек на време, поради губиток на сателитски сигнал, еден од инструментите може да покажува различно време од другиот. Сепак овие грешки не се толку чести. Почесто како грешка може да се јави во измерениот сигнал да имаме учество од работата на некој уред во куќата кој предизвикува присилни вибрации, на пример машина за перење. Овие присилни вибрации го загадуваат оригиналниот сигнал од амбиентални побуди. Записите за вакви и слични несовапања ќе бидат анализирани на почеток и мерењето за локацијата каде е утврдена грешка ќе се повтори. Откако ќе се увериме дека записите се прочистени, ќе пристапиме на нивно процесирање.

Користејќи Фуриева трансформација, измерените и прочистени записи за забрзувањата во референтната точка во подрумот (Slave), $a_0(t)$ и кај инструментот на поткровје (Master), $a_T(t)$, ќе бидат трансформирани во фреквентен домен $F_0(\omega)$ и $F_T(\omega)$ соодветно. Тоа го правиме затоа што

Фуриевата трансформација во фреквентен домен обезбедува повеќе информации за сигналот.

Количникот од забрзувањата во фреквентен домен на горниот инструмент и на долниот инструмент ќе ни ја даде трансфер функцијата на куќата како $H(\omega) = F_T(\omega) / F_0(\omega)$. Реципрочната вредност на кружните фреквенции ω што одговара на пиковите од трансфер функцијата скалирана со 2π ги одредува природните периоди. Најголемата периода е фундаменталната периода на системот тло - конструкција.

За да ги утврдиме природните фреквенции на објектот, вршење мерења на забрзувањата со траење од 60 минути до секој столб на секој кат со менување на локацијата на еден од сензорите, именуван како „Master“, додека другиот сензор наречен „Slave“, е оставен на фиксна позиција во подрумот да служи како референтна точка. Сензорот со x-y-z координатен систем беше секогаш усогласен во структурниот систем E-N-Up координатен систем (сл. 2.3 до 2.8). (Gicev et al., 2020)

Од секој 60 минутен запис на забрзување со фреквенција на излезот од 100 Hz (временски чекор $t = 0.01$ s), односно вкупно 360000 излези во еден час, сегмент од $N = 2^{18} = 262144$ точки (или 43.69 мин.) беше искористен за да се пресмета неговата Фуриева трансформација со алгоритмот за Брза Фуриева трансформација (FFT) (Press et al., 1997)

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N}, k = 0, \dots, N - 1 \quad (3.1)$$

каде $x_n = x(n \Delta t)$, $n = 0, \dots, N - 1$ е дискретната секвенца во време и x_k е соодветната дискретна Фуриева трансформација, со чекор на фреквенција $\Delta f = 1/(N \Delta t)$. Фуриевата трансформација за фреквенција во Hz може да се пресмета со $X(f_k) = \Delta t X_k$, $k = -\frac{N}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2}$

Бидејќи мерењата се направени во различни временски прозорци, за да се компензираат флукуациите од амплитудите на микротрemor со времето, нормализираните Фуриеви амплитудни спектри беа пресметани со делење на Фуриевиот амплитуден спектар на точката $|X_{x,y,z}^{ms}(f_k)|$, снимена од Master сензорот со оној кој одговара на y - компонентата на соодветниот запис на референтната страница $|X_y^{sl}(f_k)|$, снимен од Slave сензорот соодветно. За да

избегнеме делење со многу мали амплитуди, прво го измазнуваме последниот спектар со филтерот со средна вредност $w(f_n)$ (running mean filter) и добиваме измазнет Slave спектар

$$|X_y^{sl}(f_k)| = X_y^{sl}(f_k) * w(f_k) \quad , \quad (3.2)$$

каде * претставува конволуција.

Ние го користиме филтерот со средна вредност $w(f_n)$ кој има 801 тежини за еднакви распоредени фреквентни точки со чекор $\Delta f = \frac{1}{N \Delta t} = 0.000381 \text{ Hz}$ или должина од 0.3052 Hz. На крај овој нормализиран спектар повторно се измазнува со истиот филтер за да се добие измазнета, нормализирана трансфер функција $|\tilde{X}_{x,y,z}^{ms}(f_k)|$ за секоја компонента на $|\tilde{X}_{x,y,z}^{ms}(f_k)| = |X_{x,y,z}^{ms}(f_k) / \tilde{X}_y^{sl}(f_k)| * w(f_k)$ како количник од оригиналниот, неизмазнет Фуриев спектар од Master инструментот и измазнетиот Фуриев спектар на Slave инструментот. Во трудот во детали ги опишуваме хоризонталните компоненти и вклучуваме само коментари за вертикалните компоненти.

Потоа ја анализираме измазнетата, трансфер функција. Прво ги наоѓаме пиковите во спектарот со цел да ги идентификуваме природните фреквенции. Потоа ги отчитуваме амплитудите на трансфер функцијата на секоја од овие фреквенции. Нека $f^p, p = 1, \dots$ се идентификуваните модални фреквенции. Во секоја од овие фреквенции, ги читаме амплитудите од трансфер функциите во двата ортогонални правци $|\tilde{X}_x^{ms}(f^p)|$ и $|\tilde{X}_y^{ms}(f^p)|$ и ја пресметуваме големината на векторот на движење (забрзувањата во овој случај) со

$$|\tilde{X}^{ms}(f^p)| = [|\tilde{X}_x^{ms}(f^p)|^2 + |\tilde{X}_y^{ms}(f^p)|^2]^{1/2}. \quad (3.3)$$

Следната задача е да го одредиме квадрантот на x-y рамнината што го содржи векторот на поместување во таа фреквенција и во таа точка во просторот. Го одредуваме квадрантот со анализа на корелацијата на двете хоризонтални компоненти и корелацијата на секоја од нив со референтно движење. Корелацијата помеѓу две функции $g(t)$ и $h(t)$ е по дефиниција

$$\text{Corr}(g, h)(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau + t) h(\tau) d\tau \quad , \quad (3.4)$$

каде t е временското заостанување (lag). Според Теоремата за корелација, ова заостанување може да се пресмета од Фуриевата трансформација

$$\text{Corr}(g, h)(t) \leftrightarrow G(f)\bar{H}(f) , \quad (3.5)$$

каде $G(f)$ и $H(f)$ се Фуриевите трансформации на $g(t)$ и $h(t)$.

Потоа, корелацијата помеѓу двете хоризонтални компоненти е

$$\text{Corr}(x_x^{ms}, x_y^{ms})(t_n) = FT^{-1}\{X_x^{ms}(f_k)\bar{X}_y^{ms}(f_k)\}, n = -\frac{N}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2} , \quad (3.6)$$

каде $FT^{-1}\{\cdot\}$ претставува инверзна Фуриева трансформација и $t_n = n \Delta t$.

Функцијата за корелација е осцилаторна функција и има многу пикови. Го избираме пикот со минимално временско заостанување и го запишуваме неговиот знак. Забележуваме дека, бидејќи движењата се снимени во иста точка и се со тесен опсег (во хармонија со фреквенција f^p), минималниот врв на временското заостанување ќе биде многу близу $t_n = 0$. Ако $\text{Corr}(x_x^{ms}, x_y^{ms})(0) > 0$, тоа значи дека векторот на забрзување е или во квадрант I или во квадрант III и, ако $\text{Corr}(x_x^{ms}, x_y^{ms})(0) < 0$, тогаш тој е или во квадрант II или во квадрант IV.

За да се утврди точниот квадрант, корелациите на секоја од компонентите и референтното движење близу нула временско заостанување, беше пресметано со корелација на записите меѓу Master и Slave инструментот $\text{Corr}(x_x^{ms}, x_y^{sl})(t_n)$ и $\text{Corr}(x_y^{ms}, x_y^{sl})(t_n)$. Бидејќи Slave сензорот е во подрумот и затоа што е потребно време микротремор брановите да се пропагираат од подрумот до мерната станица каде е Master инструментот повисоко во зградата, пиковите со минимално време на заостанување во овие функциите на корелација ќе се појават во време $t \neq 0$. Ако побудувањето од микротреморите кои доаѓаат од тлото е доминантно во амбиенталните вибрации, движењето на мастер-станцијата може да застане до околу 0,04 секунди (ова одговара на брзините на брановите во зградата во опсегот од 150 м / с до 250 м / с), додека ако побудувањето од ветер врз ѕидовите на објектот е доминантно во амбиенталните вибрации, движењето кај Slave станицата ќе доцни зад движењето на мастер станицата. Поради разликите во целокупната крутост на зградата во x и во y насоките, временското заостанување τ од пикот

најблиску до $t = 0$ или $Corr(x_x^{ms}, x_y^{sl})(t_n)$ и $Corr(x_y^{ms}, x_x^{sl})(t_n)$ ќе бидат различни. Нека овие заостанувања се τ_x и τ_y . Тогаш ако

$$Corr(x_x^{ms}, x_y^{ms})(0) > 0 \text{ и}$$

$$\begin{cases} Corr(x_x^{ms}, x_y^{sl})(\tau_x) > 0 \text{ и } Corr(x_y^{ms}, x_x^{sl})(\tau_y) > 0 \rightarrow \text{quadrant I} \\ Corr(x_x^{ms}, x_y^{sl})(\tau_x) < 0 \text{ и } Corr(x_y^{ms}, x_x^{sl})(\tau_y) < 0 \rightarrow \text{quadrant III} \end{cases} \quad (3.7)$$

и

$$Corr(x_x^{ms}, x_y^{ms})(0) < 0$$

$$\text{и} \begin{cases} Corr(x_x^{ms}, x_y^{sl})(\tau_x) < 0 \text{ и } Corr(x_y^{ms}, x_x^{sl})(\tau_y) > 0 \rightarrow \text{quadrant II} \\ Corr(x_x^{ms}, x_y^{sl})(\tau_x) > 0 \text{ и } Corr(x_y^{ms}, x_x^{sl})(\tau_y) < 0 \rightarrow \text{quadrant IV} \end{cases} \quad (3.8)$$

Ако условите во равенките (3.7) и (3.8) не се исполнети строго, што може да биде случај заради сложеноста на структура-основа системот, тогаш се бара одредена пресуда за да се утврди правецот на векторот на движење.

Вршине симултани мерење со Master и Slave инструментот за секоја станица по еден час (и користиме 43,7 минути за да го пресметаме Фуриевиот спектар). Овие долги мерења се потребни за да се овозможи придонесот на карактеристичните фреквенции на движење во креирањето на Фуриевите амплитуди, над амбиентната бучава. Како и да е, бидејќи не ги следиме ниту бројот, ниту јачината на моменталните вибрации во микротремор брановите кои пристигнуваат од земјата во зградата, или пак ветерот што предизвикува брановите да влезат во зградата од страна, не знаеме дали енергијата акумулирана во спектралните амплитуди е доволна за целосно развивање на амплитудите на сите природни фреквенции.

Оттука, кога ги пресметуваме трансфер функциите, преку односот на Фуриевиот спектар во мастер станицата и на измазнетиот Фуриев спектар во slave станицата, пиковите на трансфер функциите на природните фреквенции може да се гледаат само како пониски граници на вистинските врвови. Бидејќи ние ги исцртуваме векторите на преместување на секоја мерна станица со употреба на NS (север-југ) и EW (исток-запад) амплитудите на пиковите на

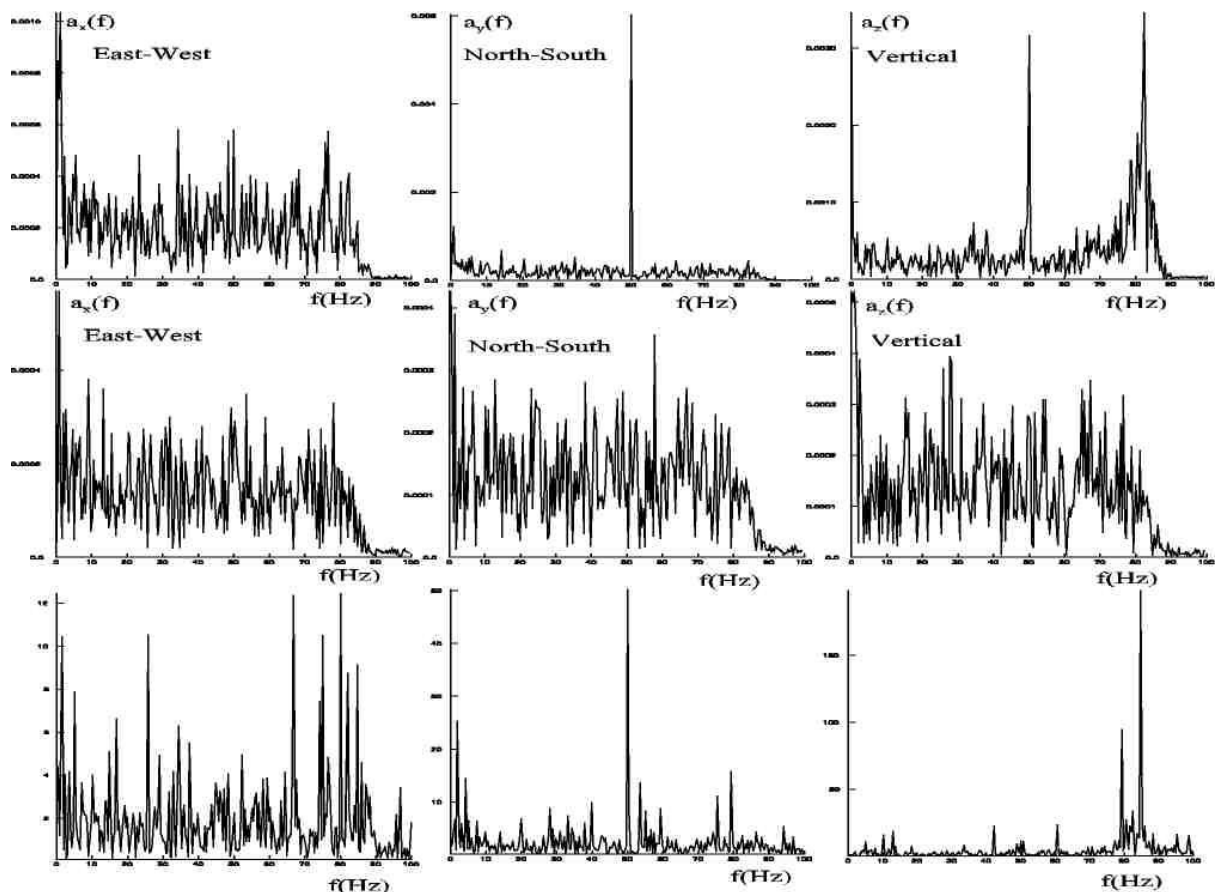
трансфер функцијата, можеме да ги добиеме само долните граници за должината на компонентите на овие вектори, и следствено на тоа само приближно нивната ориентација.

Поради екстремно „мирната“ околина околу објектот на кој беа вршени мерењата како и фактот дека објектот е со приближно исти димензии во трите правци, кај голем број од мерењата, пиковите кај природните фреквенции не можеа да се забележат и имаше потреба кај многу од станиците да се повторат мерењата. Кога мерењата би се вршеле на објекти во урбани подрачја со изразени амбиентални вибрации и кај објекти каде димензиите во трите правци суштински се разликуваат, природните фреквенции (сопствени вредности) и соодветните на нив функции на обликот (сопствени вектори) многу полесно и со помалку мерења ќе бидат добиени.

4. РЕЗУЛТАТИ

4.1. Резултати од мерење во 2 точки

Пред да почнеме да ги истражуваме природните фреквенции и функциите на облик, извршивме пробно мерење и процесирање на податоци со т.н. brute force, без да ги измазниме добиените Фуриеви спектри. Главна цел на ова пробно мерење беше да се запознаеме со инструментите и да видиме до кој степен можеме да извлечеме податоци од измерените вредности. Акцелерометрите ги поставивме едниот во подрумот (Slave), а другиот во поткровјето (Master). Мерењата траеја по 30 минути на одбраната локација. По извршените мерења вршевме процесирање на податоците и ги добивме резултатите претставени на слика 4.1.



Слика 4.1 FFT на забрзувања $a(t)$ во три ортогонални правци добиени од мерења на амбиентални вибрации со два акцелерометри EQR 120 во викенд куќа на Беровско Езеро

Figure 4.1 FFT of acceleration $a(t)$ in three orthogonal directions obtained from ambient vibration test with two accelerometers EQR 120 at Berovo lake weekend house

Во горниот ред е даден Фуриевиот спектар од забрзувања $a(t)$ добиени од “Master” инструментот во поткровјето, во средниот ред е даден Фуриевиот спектар од забрзувања $a(t)$ добиени од “Slave” инструментот во подрумот на куќата и во долниот ред е преставена трансфер функцијата во x правец (исток-запад), y правец (север-југ), и z правец (вертикален).

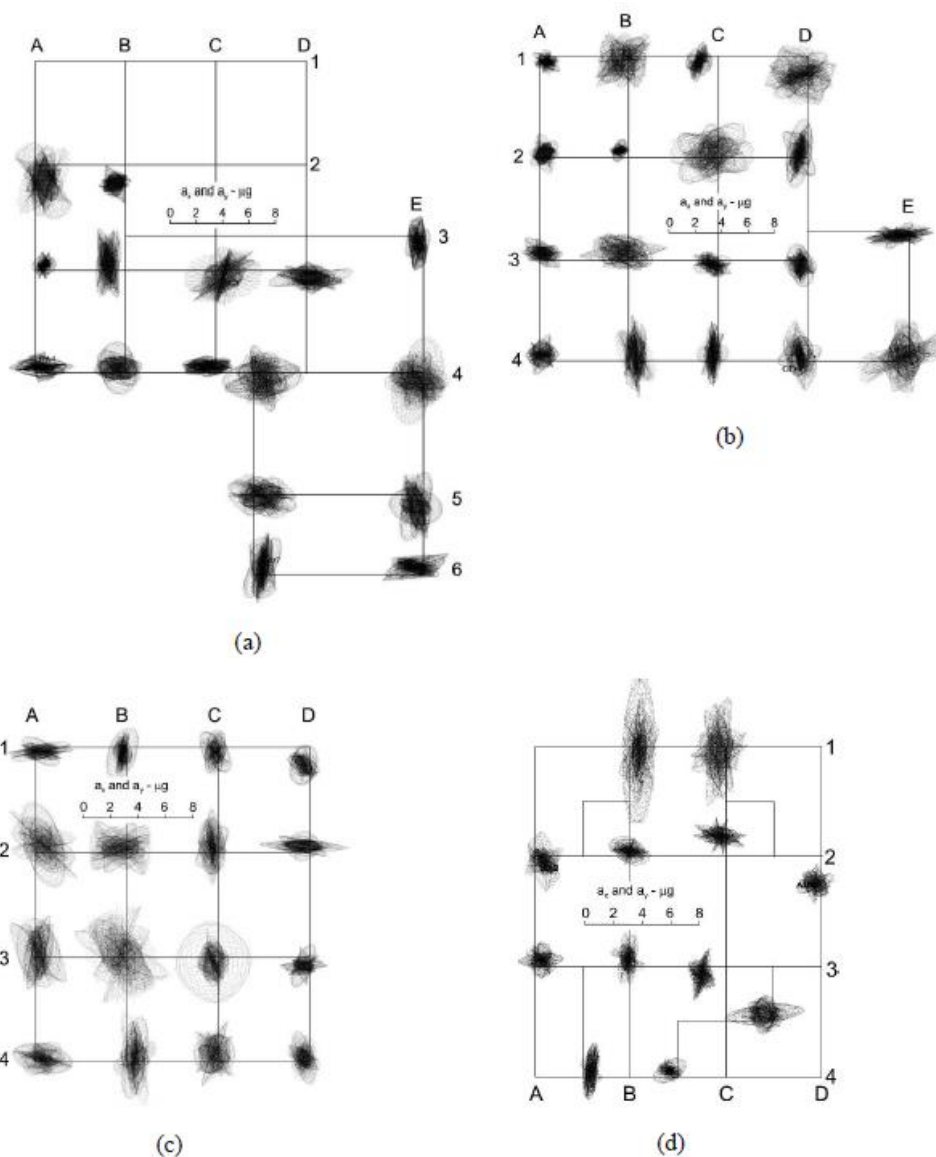
Во Фуриевиот спектар на EW компонентата на одговорот во поткровјето може да се идентификуваат екстреми на околу 35 Hz, 50 Hz и 77 Hz. Во компонентата NS, може да се идентификуваат екстреми на околу 50 Hz. Вертикално, екстреми се идентификуваат на 50 Hz и 82 Hz. Во Фуриевиот спектар на EW компонентата на одговорот во подрумот може да се идентификува врвови на околу 10 Hz, 54 Hz и 78 Hz. Во компонентата NS, може да се идентификуваат врвови на околу 58 Hz. Вертикално врвови се идентификуваат на 28 Hz и 67 Hz. Трансфер функцијата помеѓу поткровјето и одговорите во подрумот ги имаат следниве врвови: кај EW 25 Hz, 67 Hz и 82 Hz, кај NS е 50 Hz и кај вертикалното 85 Hz.

Знаејќи дека фреквенцијата на електричната енергија во нашата земја е 50 Hz, екстремот што се јавува кај 50 Hz во сите записи на горниот инструмент, е последица од интерференцијата со извор на електрична енергија (кабел во сидот во близина на инструментот).

Како што забележуваме од сликата добиените резултати одат до фреквенција 100 Hz. Тоа е критичната фреквенција на Nyquist која зависи од дискретизацијата (sampling rate) на сигналот и нејзината вредност е $f_N = \frac{1}{2} f_s = \frac{1}{2\Delta}$. Во нашиот случај за избран интервал на дискретизација 0.005 секунди, $f_N = \frac{1}{2\Delta} = \frac{1}{2 \cdot 0.005} = 100 \text{ Hz}$. Но, бидејќи најчесто сите објекти варираат до фреквенција од околу 20 до 30 Hz нашата идна цел ќе биде со помош на low-pass филтер да ги отстраниме фреквенциите поголеми од 20 Hz и да работиме само со оние до 20 Hz.

4.2. Резултати од мерење во 68 различни точки

Во текот на ова мерење температурата во куќата беше од -3 рано наутро до 10 степени попладне. Мерењата траеја по 60 минути на една локација со излезна фреквенција од 100 Hz (100 примероци во секунда).



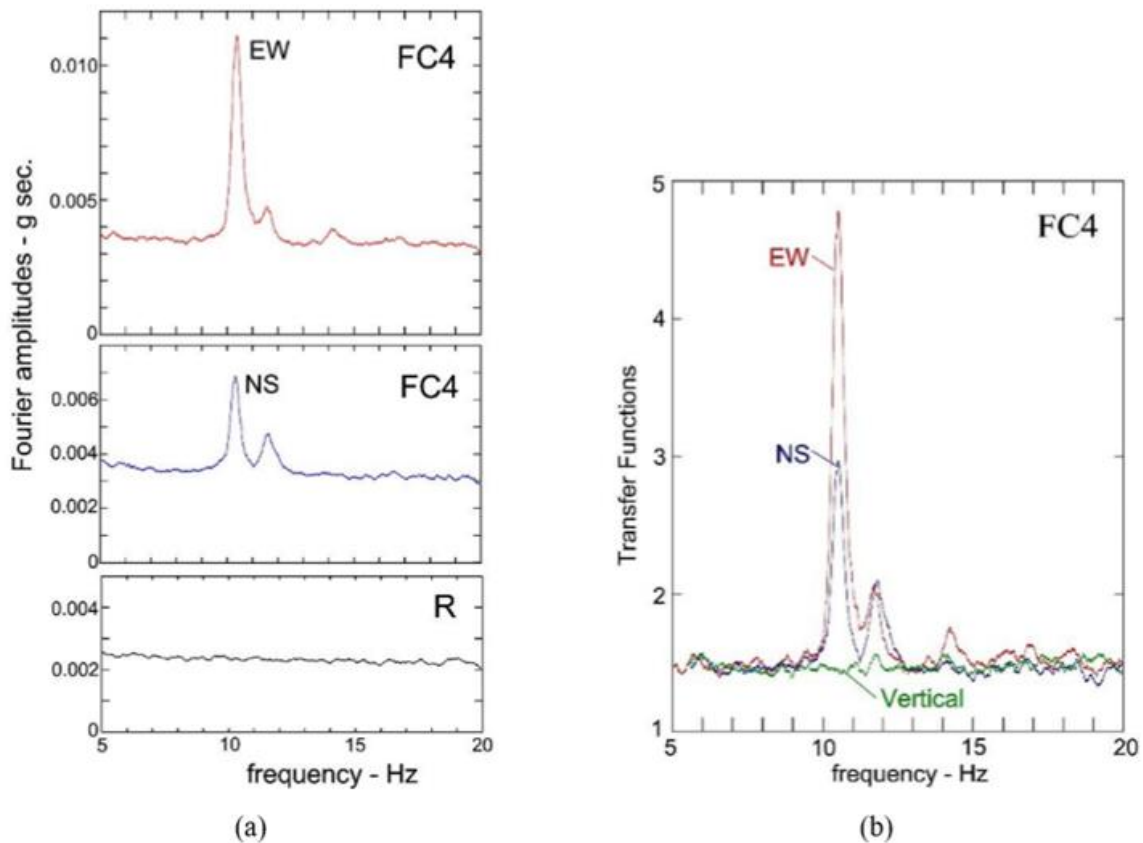
Слика 4.2 Холограми на забрзувањето во И-С рамнина за време на 20 минути снимање. (а) Подрум и гаража, (б) приземје, (в) 1-ви кат и (г) поткровје
Figure 4.2 Hodograms of acceleration in E-N plane during 20 minutes of recording. (a) Basement and garage, (b) ground floor, (c) 1st floor and (d) attic

Вкупниот број на точки во кои беше поместуван инструментот за време на мерењето е 68 (20 во подрумот, 20 на приземјето, 16 на првиот кат и 12 на таванот). За да се добие увид за природата на микротреморите во куќата нацртавме ходограми на забрзувањата за временски интервали од 20 секунди во 62 точки, како што е прикажано на слика 4.2. Цртежите покажуваат дека побудата е минлива, се појавува во сите правци и има променливи амплитуди. Цртежите исто така покажуваат дека за да се добијат природните фреквенции на куќата, мора да се прават релативно долги мерења за да се обезбеди соодветна акумулација на корисни сигнали кои ќе дадат верна интерпретација на одговорот во фреквентен домен.

Ги анализиравме трансфер функциите на сите 68 точки. Во фреквенцискиот опсег од 1 до 20 Hz, идентификувавме четири природни фреквенции на зградата, $f = 10.5 \text{ Hz}$, 11.9 Hz , 14.4 Hz и 17.1 Hz . Пиковите во нормализираниот Фуриев спектар (трансфер функцијата) беа препознатливи кај повеќето од набљудуваните точки само за првите две природни фреквенции, па дури и за овие два први пика, беа изразени само на повисоките нивоа (првиот кат и поткровјето). Покрај малиот пик на локацијата C4 на приземјето, на други места во приземјето (19 станици) и во подрумот и гаражата (20 станици) не можеа да се идентификуваат пикови на модалните фреквенции. Пиковите за 14.4 Hz и 17.1 Hz се појавуваат само во некои точки на повисоките нивоа (првиот кат и на поткровјето), но не и кај доволен број на точки за да ни овозможат да ги дефинираме соодветните функции на обликот. Подетално и посеопфатно тестирање дополнето со анализа преку методот на конечни елементи (МКЕ) се потребни за да се идентификуваат функциите на обликот, поврзани со тие две фреквенции, кои ги оставаме за идна работа. Дел од трансфер функциите и Фуриевите спектри на приземјето се дадени во Прилог 1, на првиот кат се дадени во Прилог 2 и на поткровјето се дадени во Прилог 3 соодветно.

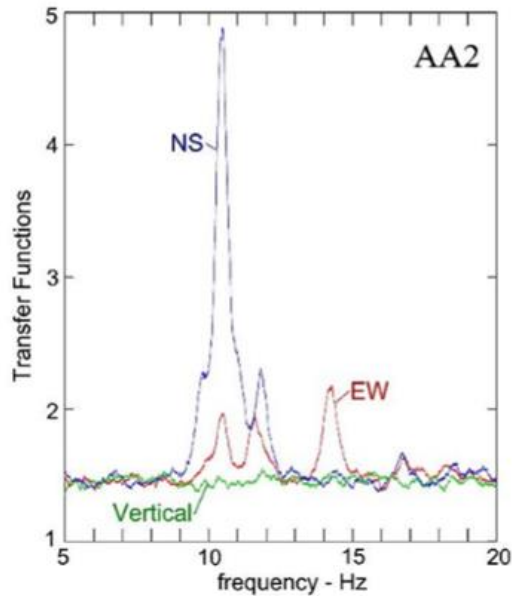
Делот (а) на сл. 4.3 го илустрира Фуриевите амплитуден спектар (FS) на хоризонталните компоненти (EW и NS) на забрзувањето во точката C4 на првиот кат и на соодветното референтно движење (R), додека делот (б) го прикажува нормализираниот Фуриев спектар (трансфер функциите) во истата точка за EW, NS и вертикалните компоненти. Пиковите што одговараат на

првите три природни фреквенции, $f = 10.5 \text{ Hz}$, 11.9 Hz и 14.4 Hz , јасно се гледаат на цртежот. Слично на тоа, на сл. 4.4 се прикажани трансфер функциите на EW, NS и вертикалните компоненти на забрзување на точката A2 на поткровјето (сл. 2.5). Оваа слика ги прикажува четирите природни фреквенции во 10.5 Hz , 11.9 Hz , 14.4 Hz и 17.1 Hz .



Слика 4.3 (а) Фуриев амплитуден спектар на движења регистрирани на станицата FC4 во насоките ИЗ (горе) и СЈ (средина), и во референтната точка во подрумот (долу). (б) Соодветни трансфер функции. Точката FC4 е на 1-ви кат до столбот C4 (Сл. 2.5)

Figure 4.3 (a) Fourier amplitude spectra of motions recorded at station FC4 in the EW (top) and NS (center) directions, and at the reference point in the basement (bottom). (b) Corresponding transfer-functions. Point FC4 is on the 1st floor at column C4 (Fig. 2.5)



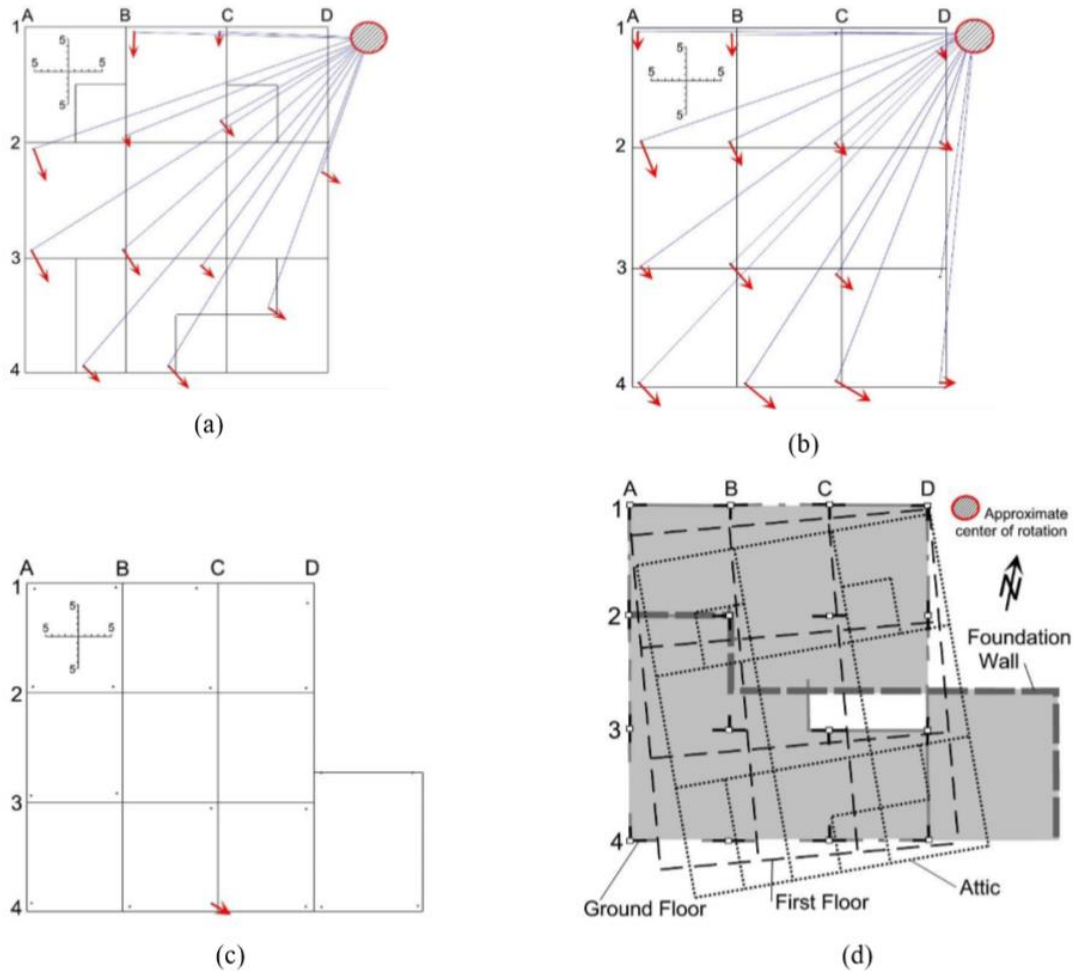
Слика 4.4 Трансфер-функции на движења снимени на станицата AA2 (Слика 2.5). Станицата AA2 е на таванот до столбот A2

Figure 4.4 Transfer-functions of motions recorded at station AA2 (Fig. 2.5). Station AA2 is in the attic at column A2

На сликите 4.5 и 4.6 се прикажани векторите на забрзување во мерните станици што соодветствуваат на првите две природни фреквенции на објектот, $f = 10.5 \text{ Hz}$ и 11.9 Hz . Деловите (а), (б) и (ц) ги прикажуваат векторите за забрзување на поткровјето, првиот кат и на приземјето, додека делот (д) прикажува шематски приказ на соодветните поместувања на подовите.

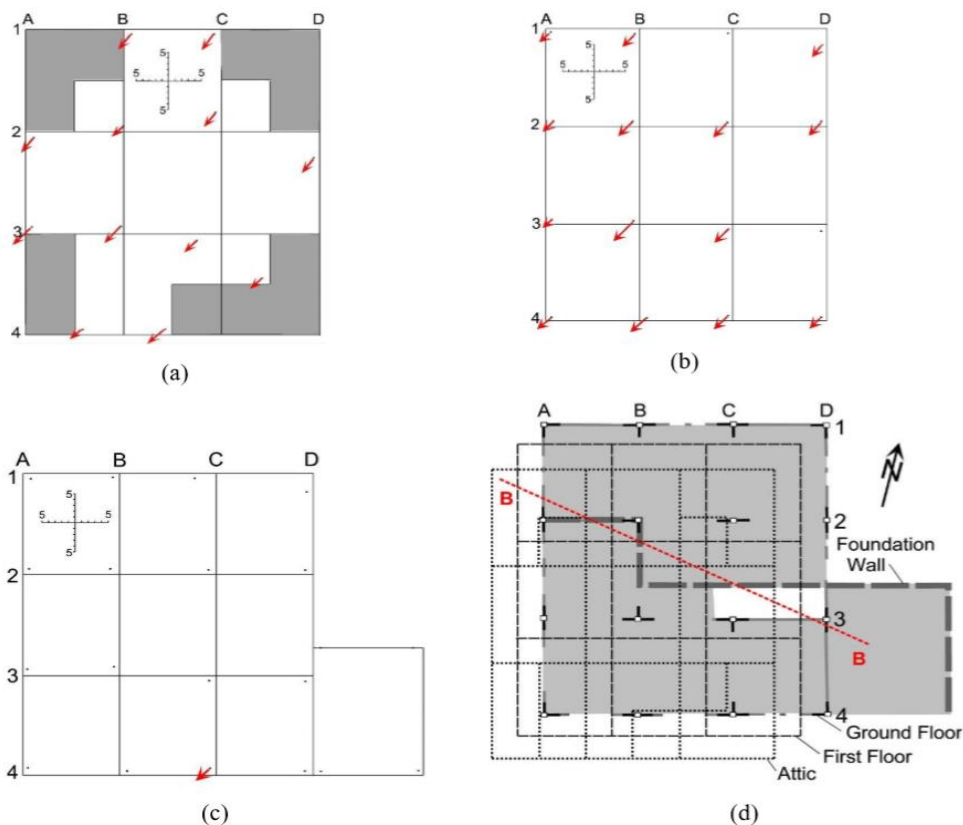
Функцијата на обликот на првиот мод за сопствена фреквенција $f = 10.5 \text{ Hz}$ може да се толкува како ротација околу точка што е надвор од хоризонталната проекција (планот) на објектот и претставува комбинација од translација и торзија. Кај стандардни згради кај кои висината е поголема од другите две димензии, првата модална форма најчесто е латерална translација во хоризонтална рамнина, т.е. во правец каде крутоста на зградата е најмала. Кај повисоките модови се јавуваат торзиони функции на обликот. Објаснувањето зошто функцијата на обликот на првиот мод е хибридна (translација и торзија) треба да го бараме во фактот дека објектот е многу асиметричен што доведува да страничната и торзионата крутост се блиски. Северно од темелниот сид (сл. 4.2а, б и 4.3), зградата е двокатна (со плочата

од приземјето поставена директно на карпа), додека, јужно од ѕидот на основата, зградата е трокатна. Асиметријата е дополнително акцентирана со чекор во темелниот ѕид од А-Б на линијата 2 до Б-Д 1.4 м северно од линијата 3 (сл. 2.3 и 2.4). Оваа геометрија го прави северниот дел од зградата поцврст од јужниот дел, а тоа резултира во ротација прикажана на сл. 4.5 д.



Слика 4.5 Вектори на преместување, поврзани со вибрациите кај $f = 10.5 \text{ Hz}$, на: (а) таванот, (б) 1-ви кат и (ц) приземјето. Приближно, тие вектори може да се толкуваат како резултат на крута ротација на телото на подната плоча околу точка што е на околу 1.5 m источно од колоната Д1, која се наоѓа во СИ агол на зградата. (д) Шематско претставување на соодветните преместувања.

Figure 4.5 Displacement vectors, associated with vibration at $f = 10.5 \text{ Hz}$, at: (a) the attic, (b) the 1st floor and (c) the ground floor. Approximately, those vectors can be interpreted to result from rigid body rotation of the floor slab about a point that is about 1.5 m east of column D1, which is at the NE corner of the building. (d) Schematic representation of the corresponding displacements.



Слика 4.6 Вектори на преместување, поврзани со вибрации кај $f = 11.9$ Hz, на: (а) таванот, (б) 1-ви кат и (ц) приземјето. Преместувањата може да се толкуваат како резултат на translацијата во правец ЈЗ-СИ, приближно нормална линија В-В. (д) Шематско претставување на соодветните преместувања.

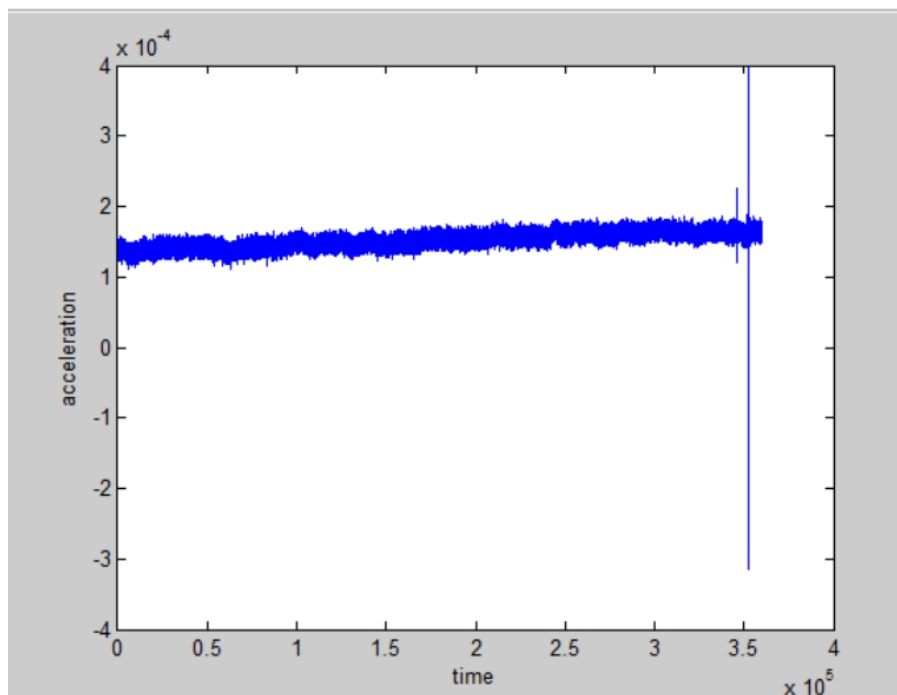
Figure 4.6 Displacement vectors, associated with vibration at $f = 11.9$ Hz, at: (a) the attic, (b) the 1st floor and (c) the ground floor. The displacements can be interpreted as resulting from translation in SW-NE direction, roughly perpendicular a line B-B. (d) Schematic representation of the corresponding displacements.

Вториот мод, со природна фреквенција $f = 11.9$ Hz, е чиста translација во правец нормален на пресекот Б-Б на сл. 4.6 д. Како што се гледа од сликата, овој пресек наликува на линеарна апроксимација на темелниот ѕид преку методот на најмали квадрати. Бидејќи учеството на темелниот ѕид во целокупната крутост на објектот е голема, јасно е дека translациониот мод нормален на овој правец ќе биде порано побуден. За време на оваа вибрација, зградата се деформира во правец кон и од нејзиниот помек дел (јужно од ѕидот на основата).

5. МИКРОТРЕМОРИ

Во овој дел ги испитуваме амплитудите на брзината. Тоа го правиме заради контрола на мерењата добиени од инструментите. Колку е подолг записот, толку се поголеми амплитудите и се доближуваме до идеалната нула на осцилација. Целта на оваа глава од дисертацијата е да имаме приближно иста големина на позитивни и негативни амплитуди кај narrow band-pass записите. Испитувањето го правиме со примена на следнава методологија.

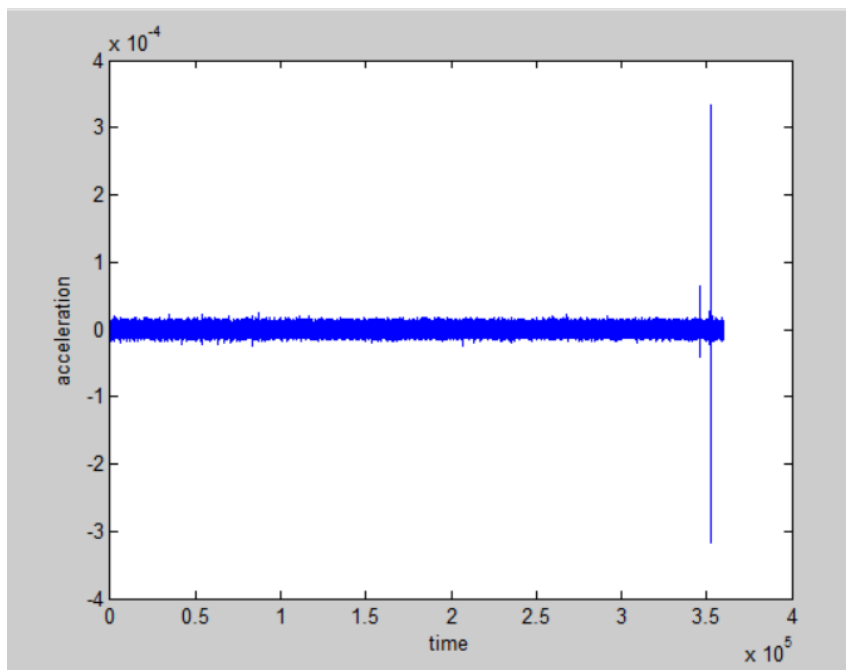
Прво измерените забрзувањата (a) т.е. сигналот кој го добиваме од мерењата со помош на акцелерометарот не е чист (има шумови, нарушувања) и се однесува како крива што е далеку од x оската и од координатниот почеток (сл. 5.1). Акцелерометрите го мерат забрзувањето во единици $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ (по гравитацијата на Земјата). Забрзувањата се познати и како микротремори. Микротреморите се дефинираат како амбиентални вибрации со ниска амплитуда предизвикани од вештачки или атмосферски нарушувања. Набљудувањата на микротреморите може да дадат корисни информации за динамичните својства на локацијата, како што се периодот и амплитудата.



Слика 5.1 Забрзувањата на сигналот

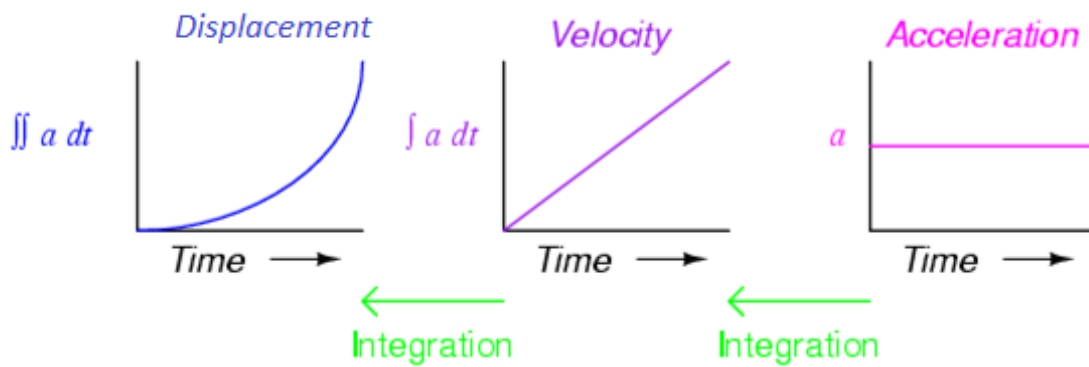
Figure 5.1 Signal accelerations

За таа цел бидејќи сакаме забрзувањата да осцилираат околу нулата го филтрираме сигналот со помош на band pass филтер со поширок опсег од 1 до 50 Hz. Горната граница ја бираме, имајќи предвид дека Nyquist фреквенцијата за избраниот временски интервал $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ е $f_N = \frac{1}{2\Delta t} = 50 \text{ Hz}$. Со тоа ги отстрануваме сите фреквенции помали од 1, а поголеми од 50 Hz со што го елиминираме нискофреквентниот ($f < 1 \text{ Hz}$) шум на инструментот. Тоа е прикажано на сл. 5.2. и забележуваме дека сега сигналот осцилира околу нулата.



Слика 5.2 Филтрирање на забрзувањата
Figure 5.2 Band-pass filtering on acceleration

Забрзувањето, брзината и поместувањето како физички величини се поврзани (сл. 5.3).



Слика 5.3 Забрзување, брзина и поместување
 Figure 5.3 Acceleration, velocity and displacement

Со интегрирање на забрзувањето се добива брзината на сигналот. Оттука, брзината на сигналот ќе биде изразена во единици $g \cdot s = 9.81 \text{ m/s}$. Обично брзините кај амбиенталните вибрации ги изразуваме во cm/s . За да ја добиеме во cm/s прво забрзувањето ќе го помножимо со фактор 981. Со тоа забрзувањето од g го претвораме во единици cm/s^2 .

Знаејќи дека забрзувањето е прв извод на брзината по времето

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (5.1)$$

Интегрирајќи ја (5.1), користејќи централни конечни разлики (CFD), за брзината на крајот од временскиот интервал $[l \cdot \Delta t, (l + 1) \cdot \Delta t]$ добиваме

$$v_{l+1} = v_l + a_{l+1/2} \cdot \Delta t \quad , \quad (5.2)$$

каде $a_{l+1/2}$ е забрзувањето во средина на разгледуваниот интервал.

Бидејќи $a_{l+1/2}$ ја немаме добиено од мерењата, стандардна процедура е да ја интерполираме линеарно (средна вредност) од двете мерења на почетокот и на крајот од интервалот, т.е. $a_{l+1/2} \approx \frac{a_l + a_{l+1}}{2}$.

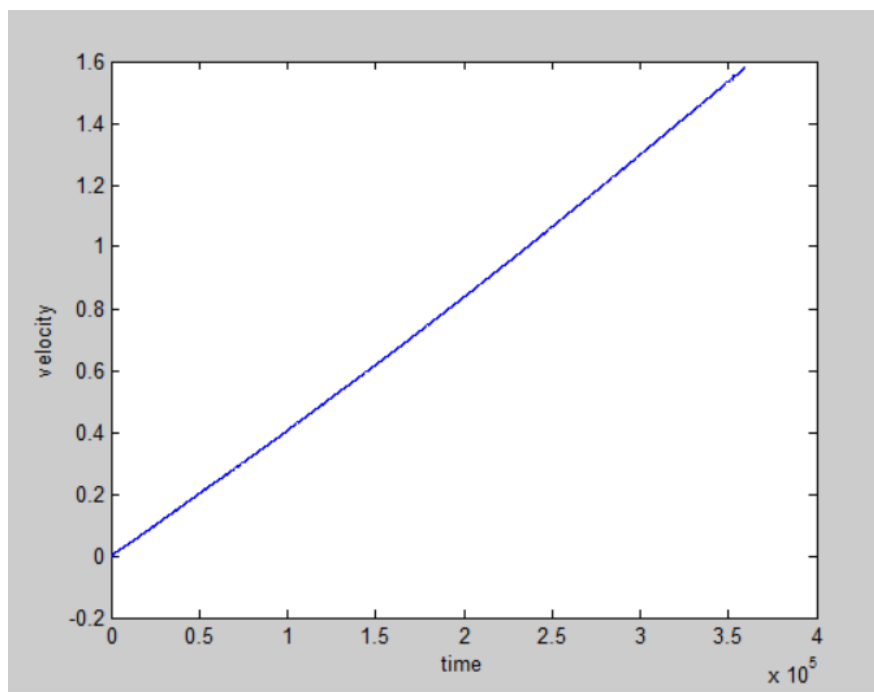
Со замена на оваа апроксимација во (5.2), за брзината на крајот од разгледуваниот интервал добиваме

$$v_{l+1} = v_l + \left(\frac{a_l + a_{l+1}}{2} \right) \cdot \Delta t \quad (5.3)$$

и таа ќе биде изразена во единици cm/s .

Познато е дека при интегрирање, во резултатот добиваме интеграциони константи. За таа цел, начелно треба да се дефинираат онолку почетни или гранични услови, колку што има интеграциони константи во решението. Равенката (5.1) е диференцијална равенка од прв ред во чие решение ќе фигурира една константа. За таа цел мора да ја дефинираме почетната брзина (брзина во време $t = 0$ sec) во равенката (5.3).

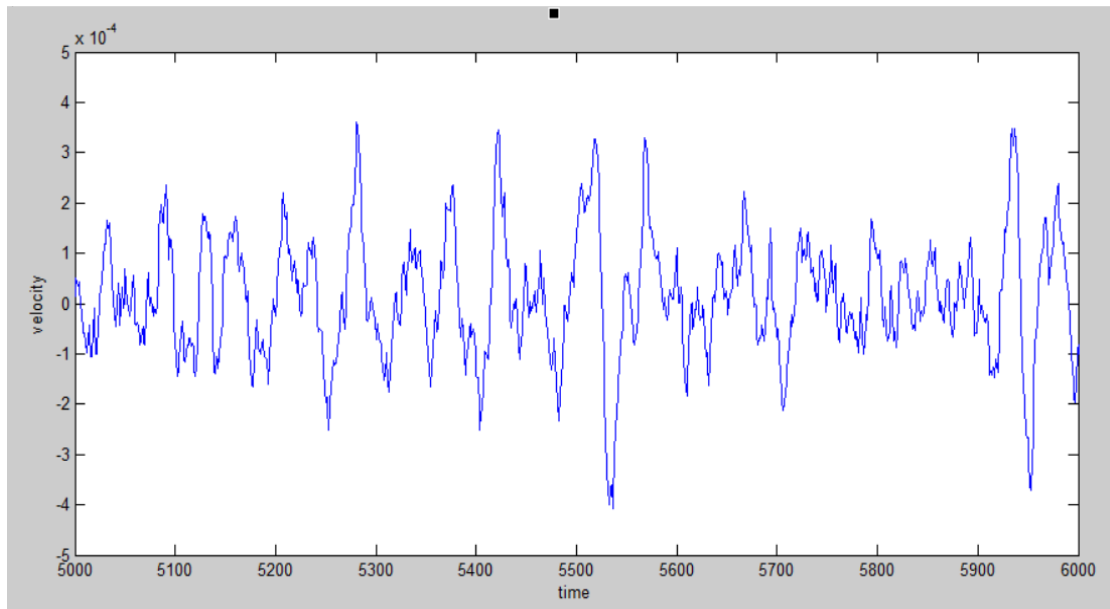
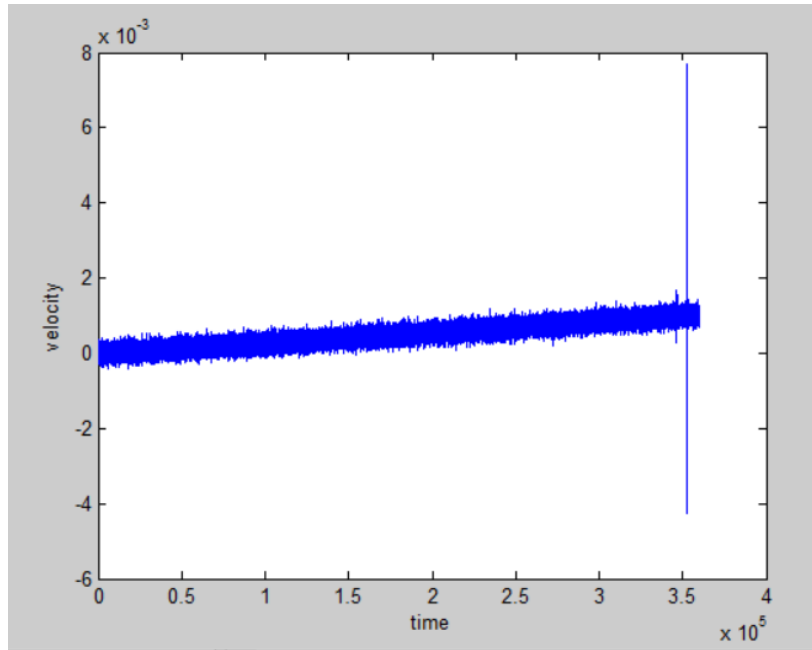
За почетна брзина земаме $v_1 = 0$ (сл. 5.4). За влез од 360 000 забрзувања, на излез добиваме 359 999 вредности за брзината бидејќи точките v_l се средини од забрзувањата.



Слика 5.4 Брзината на сигналот

Figure 5.4 Signal velocity

Откако ќе ја најдеме брзината, потребно е да ја филтрираме и неа со band pass филтер со опсег од 1 до 50 Hz за да се елиминираат нарушувањата од почетните услови и нумеричката бучава. (сл. 5.5)



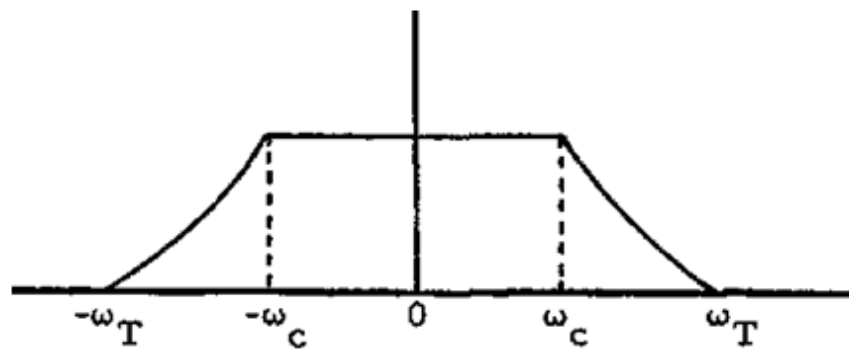
Слика 5.5 Филтрирање на брзината а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 6000 точки од записот)

Figure 5.5 Band-pass filtering on velocity a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 6000)

Ова беше филтрирање во поширок опсег.

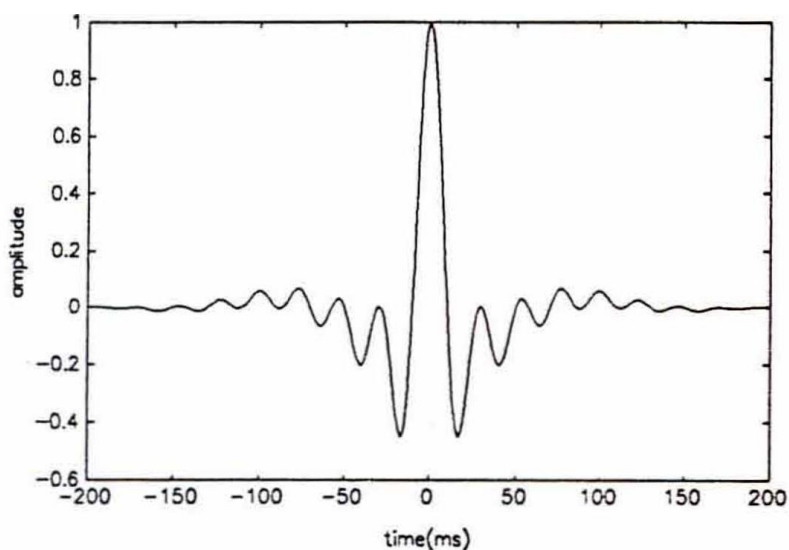
Нареден чекор е со помош на band pass филтрирање да добиеме потесен фреквенциски опсег центриран околу фиксна фреквенција во нашиот случај од 2, 4, 7, 10, 15 и 20 Hz. За добивање на овој фреквенциски опсег го

користиме Ормсби филтерот (сл. 5.6 и сл. 5.7). Ормсби (Ormsby) филтерот е парен филтер $f(\omega) = f(-\omega)$. Овој филтер е low-pass филтер што значи дека целосно ги пропушта фреквенциите од 0 Hz до некоја одредена фреквенција. Филтерот во фреквентен домен има трапезоидна форма (сл. 5.6) и е дефиниран со две кружни фреквенции, фреквенција на пресекување (cut-off), ω_c и фреквенција на прекин, ω_T . Филтерот целосно ги отфрла компонентите на сигналот кои се со кружни фреквенции поголеми од ω_T , целосно ги пропушта компонентите на сигналот кои се со кружни фреквенции помали од ω_c и делумно ги пропушта компонентите на сигналот со кружни фреквенции меѓу ω_c и ω_T .



Слика 5.6 Ормсби филтерот во фреквентен домен

Figure 5.6 Ormsby in frequency domain



Слика 5.7 Ормсби филтерот во временски домен

Figure 5.7 Ormsby in time domain

Во практичните апликации, место кружните фреквенции ω_c и ω_T користиме фреквенции f_c и f_t кои ги добиваме со делење на ω_c и ω_T со $2 \cdot \pi$. Овие фреквенции можеме да ги означиме и како фреквенцијата на завршување со f_t , а фреквенцијата на пресекување со f_c . Филтерот λ_r ќе се пресметува со

$$\lambda_r = \frac{|f_t - f_c|}{f_s}, \quad (5.4)$$

каде за $\Delta t = 0.01 \text{ s}$, $f_s = 100 \text{ Hz}$. Бројот на тежини N се пресметува како $N = \frac{1}{\lambda_r}$. Од тука следува дека $\lambda_r \cdot N = 1$. Колку е поголема фреквенцијата, рампата на филтерот λ_r е помала, а бројот на тежини N е поголем. N и λ_r се обратнопропорционални.

5.1 Пресметување и претставување на микротреморите

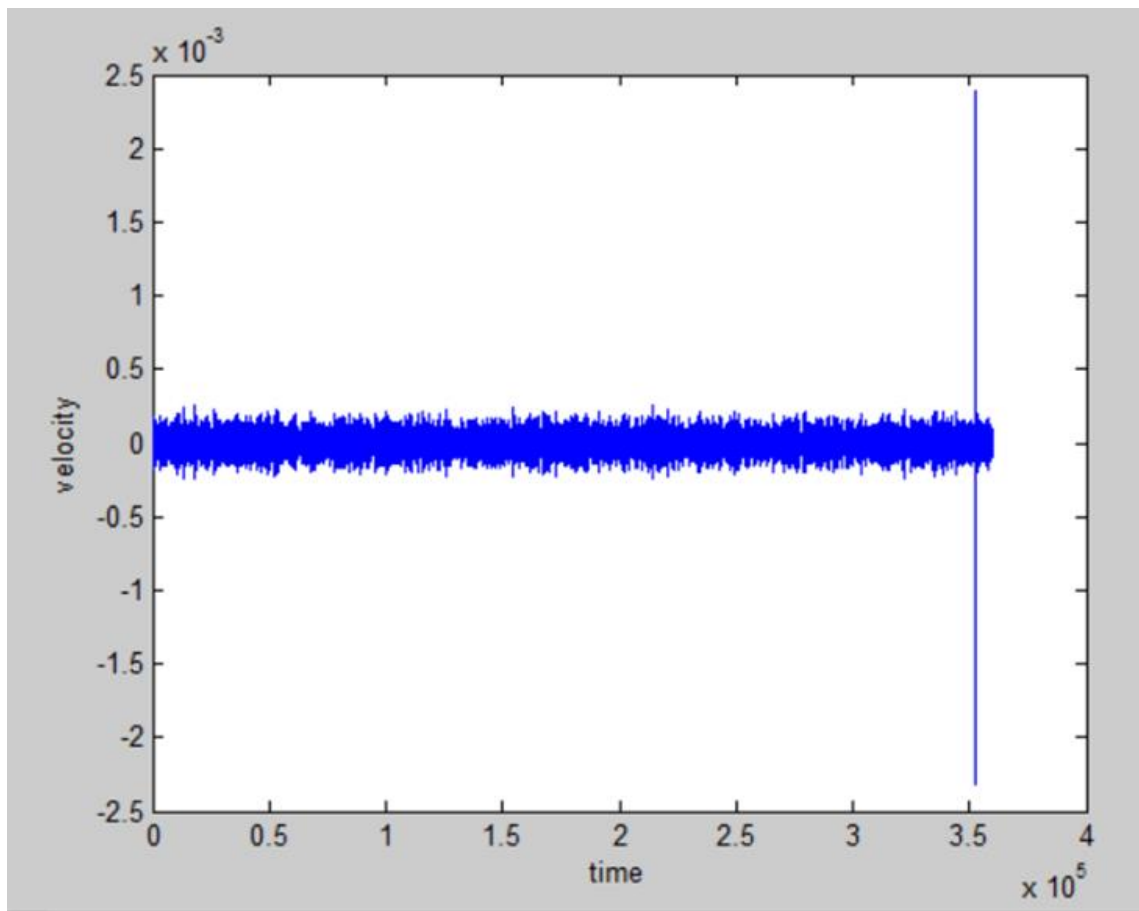
За да ги квантификуваме микротреморите како побуди кои доаѓаат во објектот од тлото преку темелите, постапуваме на следниот начин:

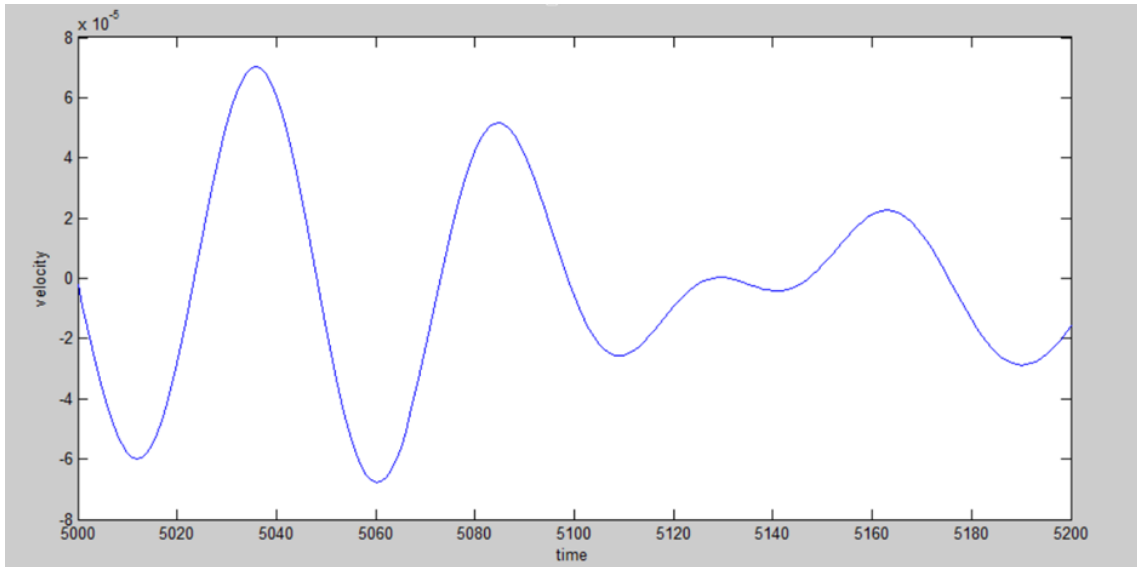
- 1) Го филтрираме измереното забрзување во референтната точка (Slave) во широк фреквентен опсег (1 – 50) Hz и добиваме 360 000 забрзувања.
- 2) Филтрираниот запис од претходната точка го интегрираме со равенката (5.3) при што ги добиваме брзините во 359 999 точки.
- 3) Ги филтрираме брзините добиени во 2) за да се елиминираат нарушувањата од почетните услови и нумеричките шумови со истиот фреквенциски опсег (1 – 50) Hz.
- 4) Филтрираните записи од 3) ги филтрираме повторно со потесен фреквенциски опсег центриран околу фиксна фреквенција (2, 4, 7, 10, 15, 20 Hz).
- 5) Ги пресметуваме разликите помеѓу максималната и минималната амплитуда (peak to peak), за целиот запис.
- 6) Ги пресметуваме средните разлики на peak to peak амплитудите.
- 7) Средната разлика од 6) ја делиме со централната фиксна фреквенција. Овој резултат го зачувуваме.
- 8) Се враќаме на чекор 4) и ја повторуваме постапката за сите централни фиксни фреквенции.

A) прво со централна фреквенција во 2 Hz со $f_t = 1.5$, $f_c = 1.75$ на лево и $f_c = 2.25$, $f_t = 2.5$ на десно.

$$\lambda_r = \frac{|1.5 - 1.75|}{100} = \frac{|2.5 - 2.25|}{100} = \frac{0.25}{100} = 0.0025$$

$$N = \frac{1}{0.0025} = 400.$$





Слика 5.8 Ормсби филтер (2 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)

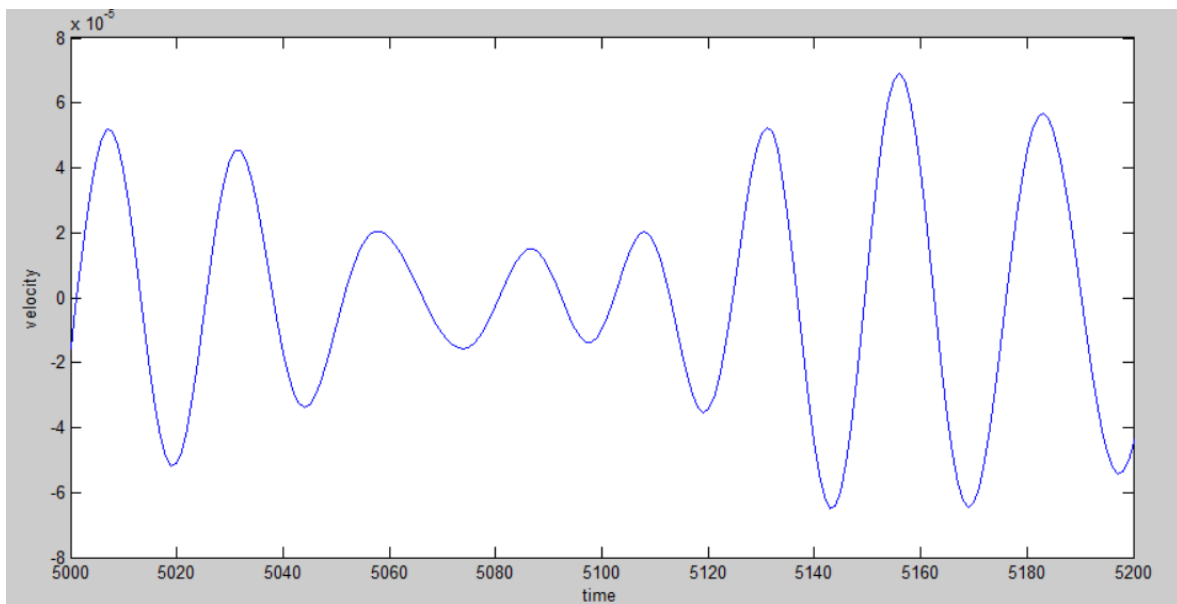
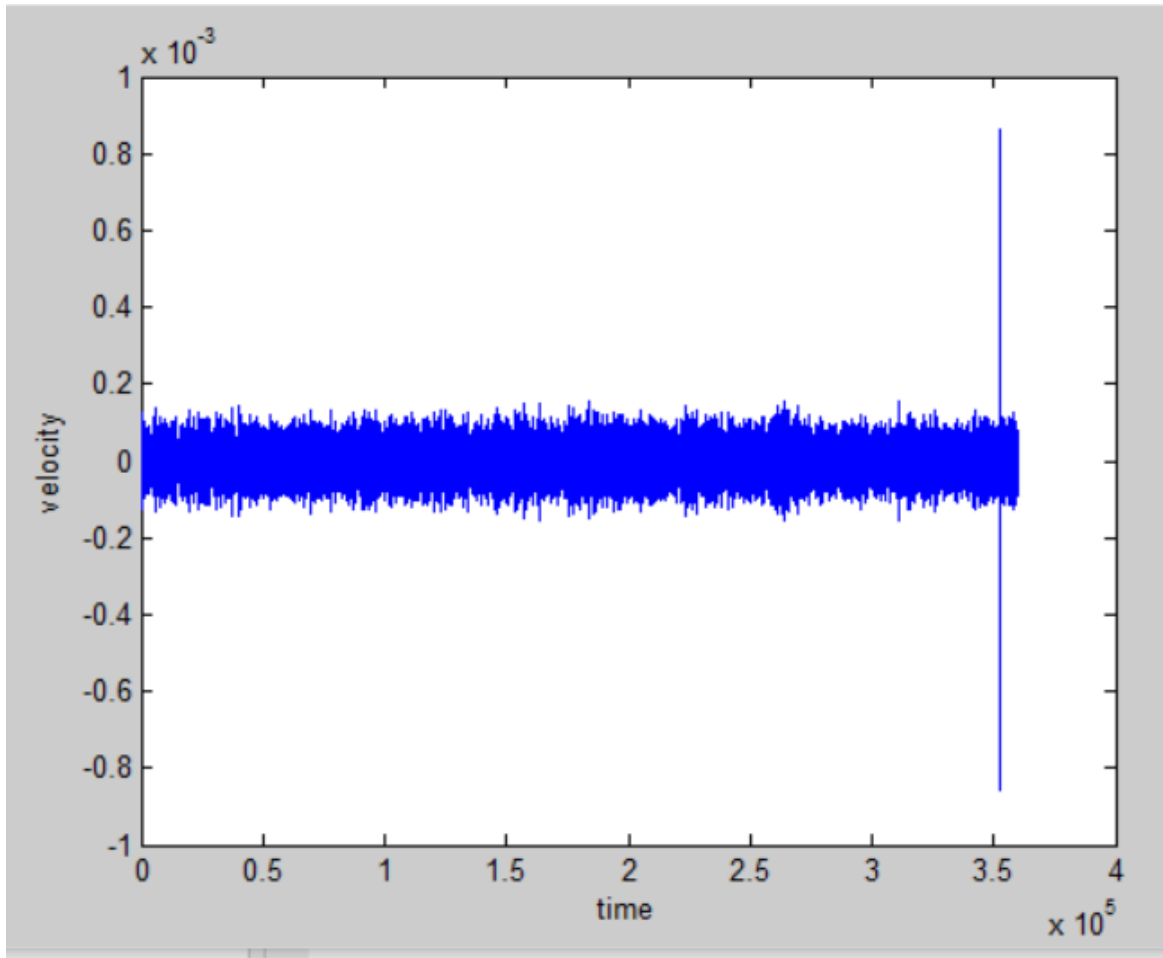
Figure 5.8 Ormsby filter (2 Hz) a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 5200)

На сл. 5.8 под б) се претставени 200 записи (од 5000 до 5200) или 2 секунди од сигналот. Знаеме дека во 1 секунда за 1 Hz има еден период или две амплитуди. За овој дел од записот за 2 Hz имаме 4 периоди или 8 амплитуди.

Б) централна фреквенција во 4 Hz со $f_t = 3.0$, $f_c = 3.5$ на лево и $f_c = 4.5$, $f_t = 5.0$ на десно.

$$\lambda_r = \frac{|3.0 - 3.5|}{100} = \frac{|5.0 - 4.5|}{100} = \frac{0.5}{100} = 0.005$$

$$N = \frac{1}{0.005} = 200.$$



Слика 5.9 Ормсиби филтер (4 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)

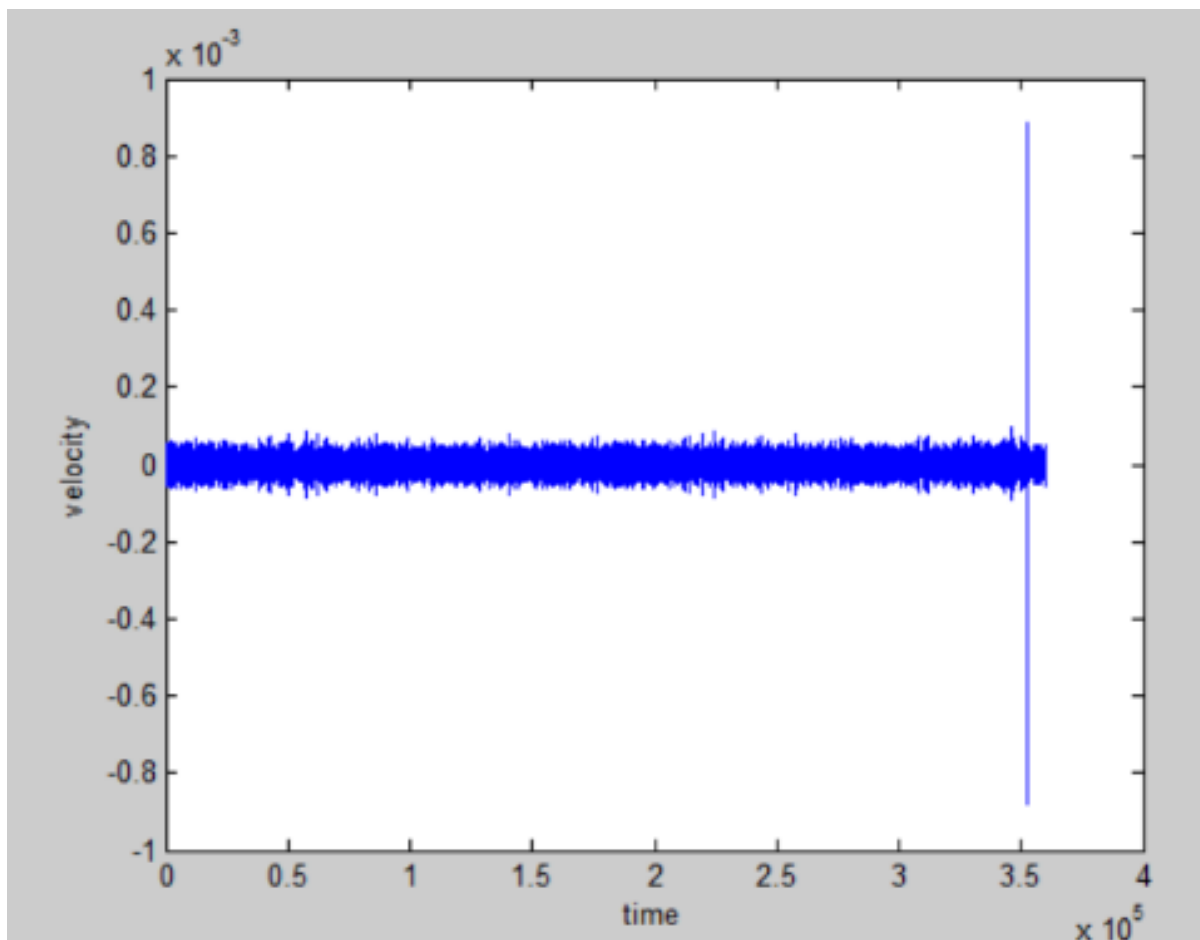
Figure 5.9 Ormsby filter (4 Hz) a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 5200)

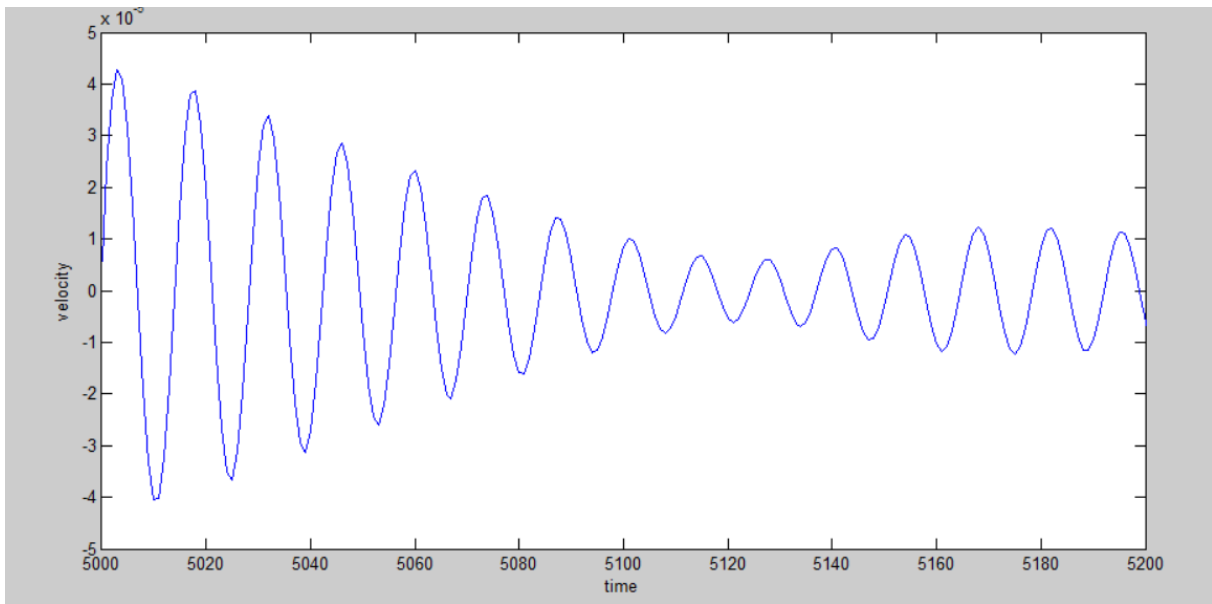
Сл. 5.9 б) се претставени 200 записи (од 5000 до 5200) или 2 секунди од сигналот. Знаеме дека во 1 секунда има 8 амплитуди. За две секунди ќе имаме 16 амплитуди.

В) централна фреквенција во 7 Hz со $f_t = 6.0$, $f_c = 6.5$ на лево и $f_c = 7.5$, $f_t = 8.0$ на десно.

$$\lambda_r = \frac{|6.0 - 6.5|}{100} = \frac{|8.0 - 7.5|}{100} = \frac{0.5}{100} = 0.005$$

$$N = \frac{1}{0.005} = 200.$$





Слика 5.10 Ормсби филтер (7 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)

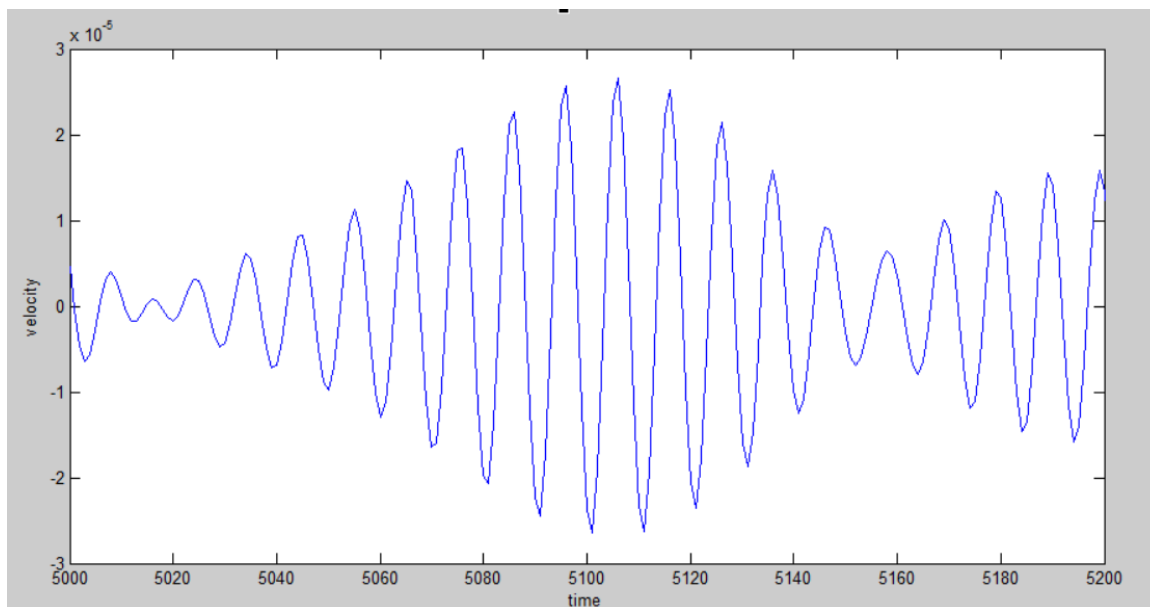
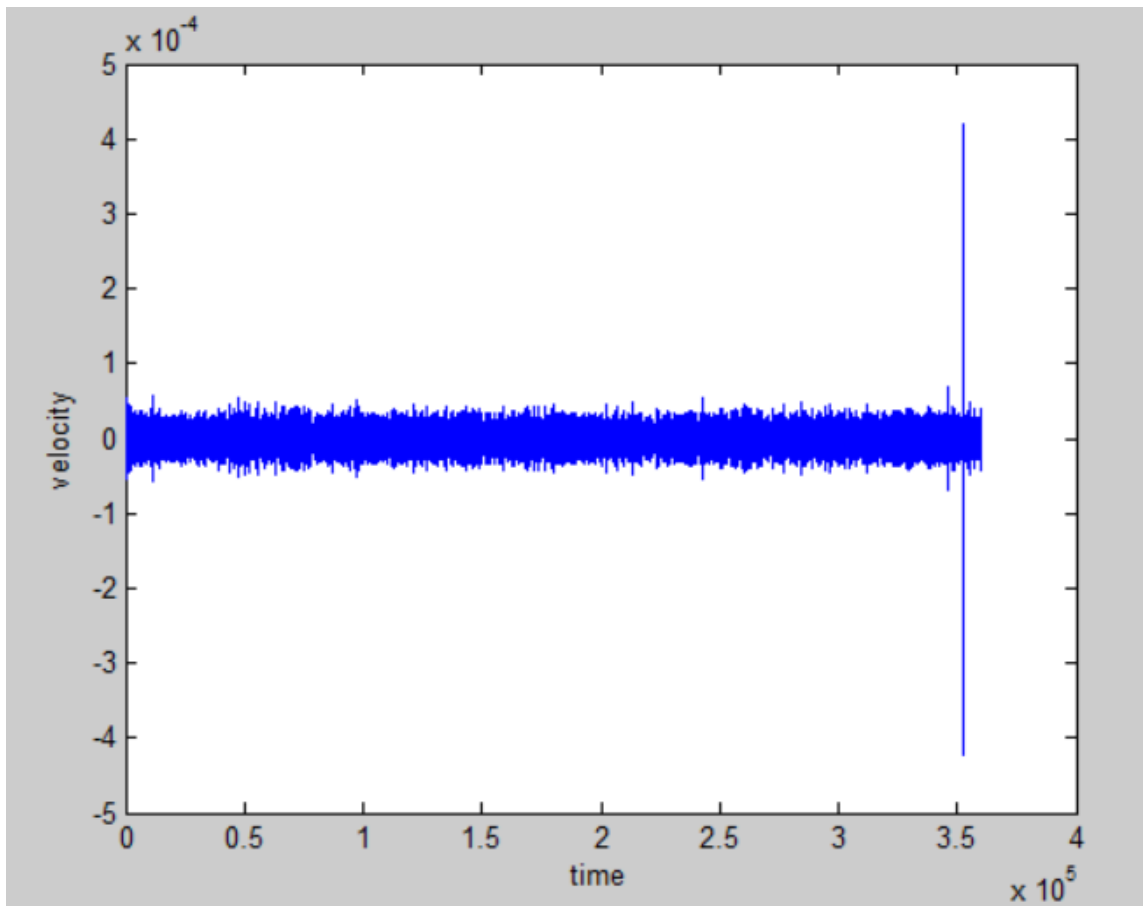
Figure 5.10 Ormsby filter (7 Hz) a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 5200)

Сл. 5.10 б) се претставени 200 записи (од 5000 до 5200) или 2 секунди од сигналот. Знаеме дека во 1 секунда има 14 амплитуди. За две секунди ќе имаме 28 амплитуди.

Г) централна фреквенција во 10 Hz со $f_t = 9.0$, $f_c = 9.5$ на лево и $f_c = 10.5$, $f_t = 11.0$ на десно.

$$\lambda_r = \frac{|9.0 - 9.5|}{100} = \frac{|11.0 - 10.5|}{100} = \frac{0.5}{100} = 0.005$$

$$N = \frac{1}{0.005} = 200.$$



Слика 5.11 Ормсби филтер (10 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)

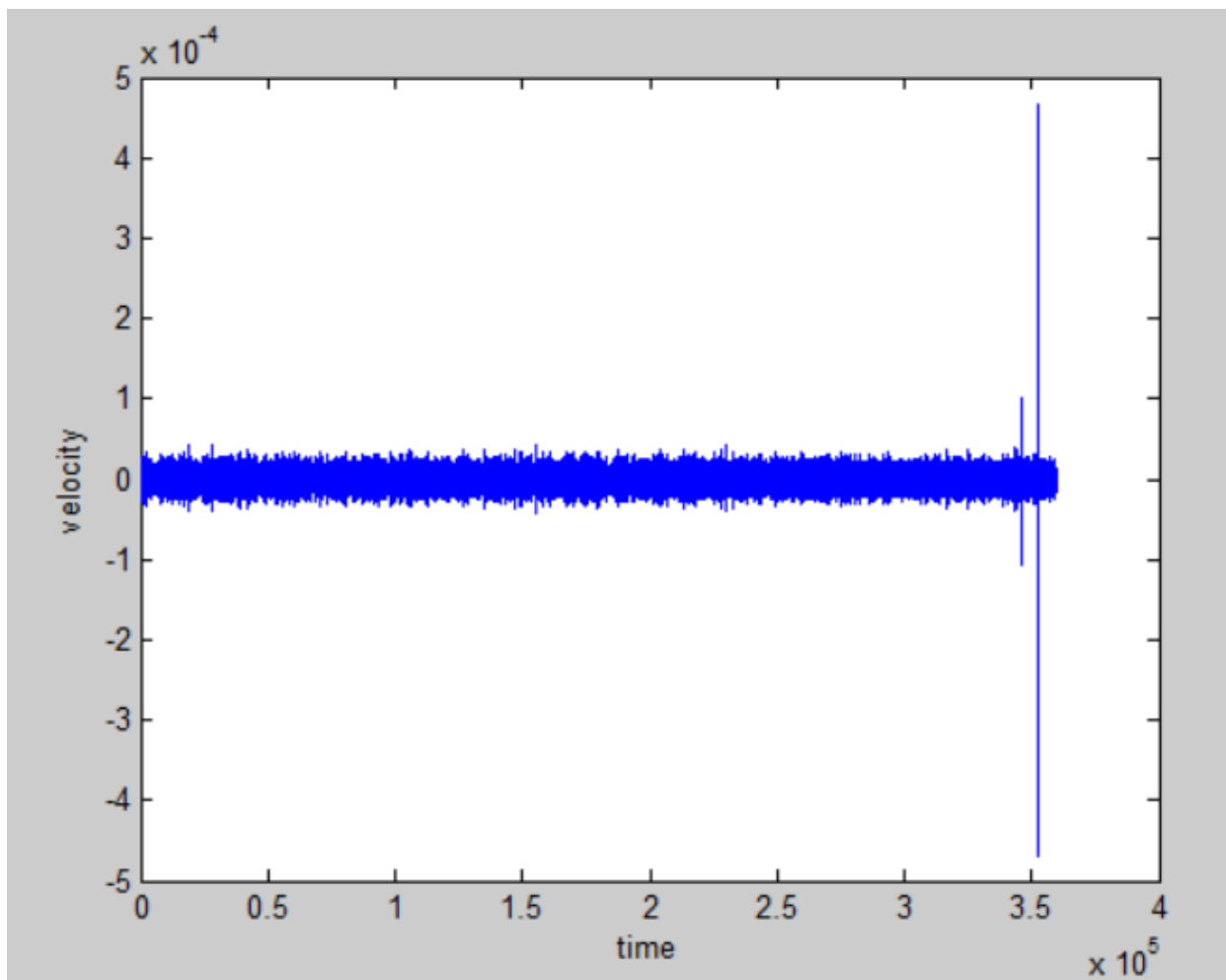
Figure 5.11 Ormsby filter (10 Hz) a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 5200)

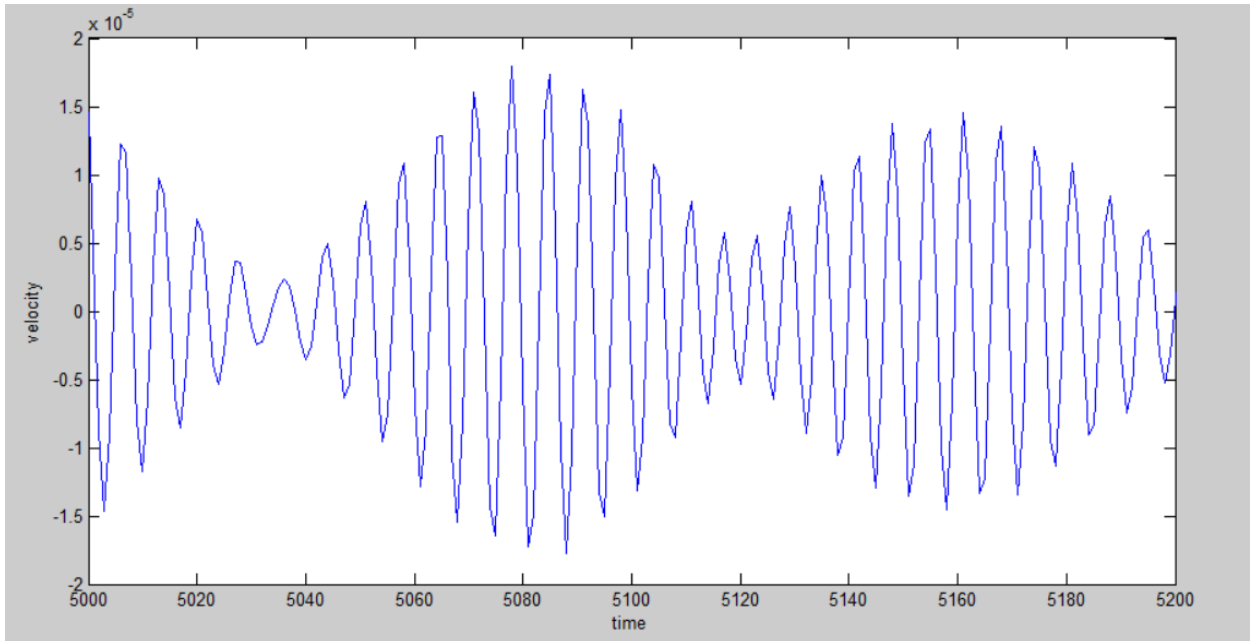
Сл. 5.11 б) се претставени 200 записи (од 5000 до 5200) или 2 секунди од сигналот. Знаеме дека во 1 секунда има 20 амплитуди. За две секунди ќе имаме 40 амплитуди.

Д) централна фреквенција во 15 Hz со $f_t = 13.5$, $f_c = 14.7$ на лево и $f_c = 15.7$, $f_t = 16.5$ на десно.

$$\lambda_r = \frac{|13.5 - 14.7|}{100} = \frac{|16.5 - 15.7|}{100} = \frac{0.8}{100} = 0.008$$

$$N = \frac{1}{0.008} = 125.$$





Слика 5.12 Ормсби филтер (15 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)

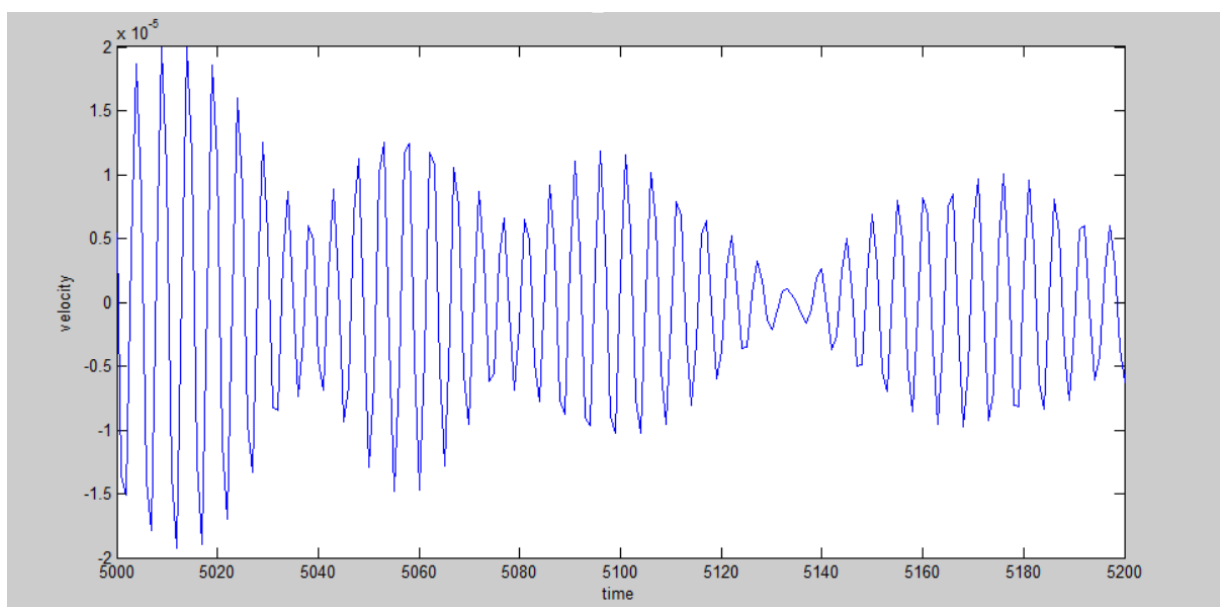
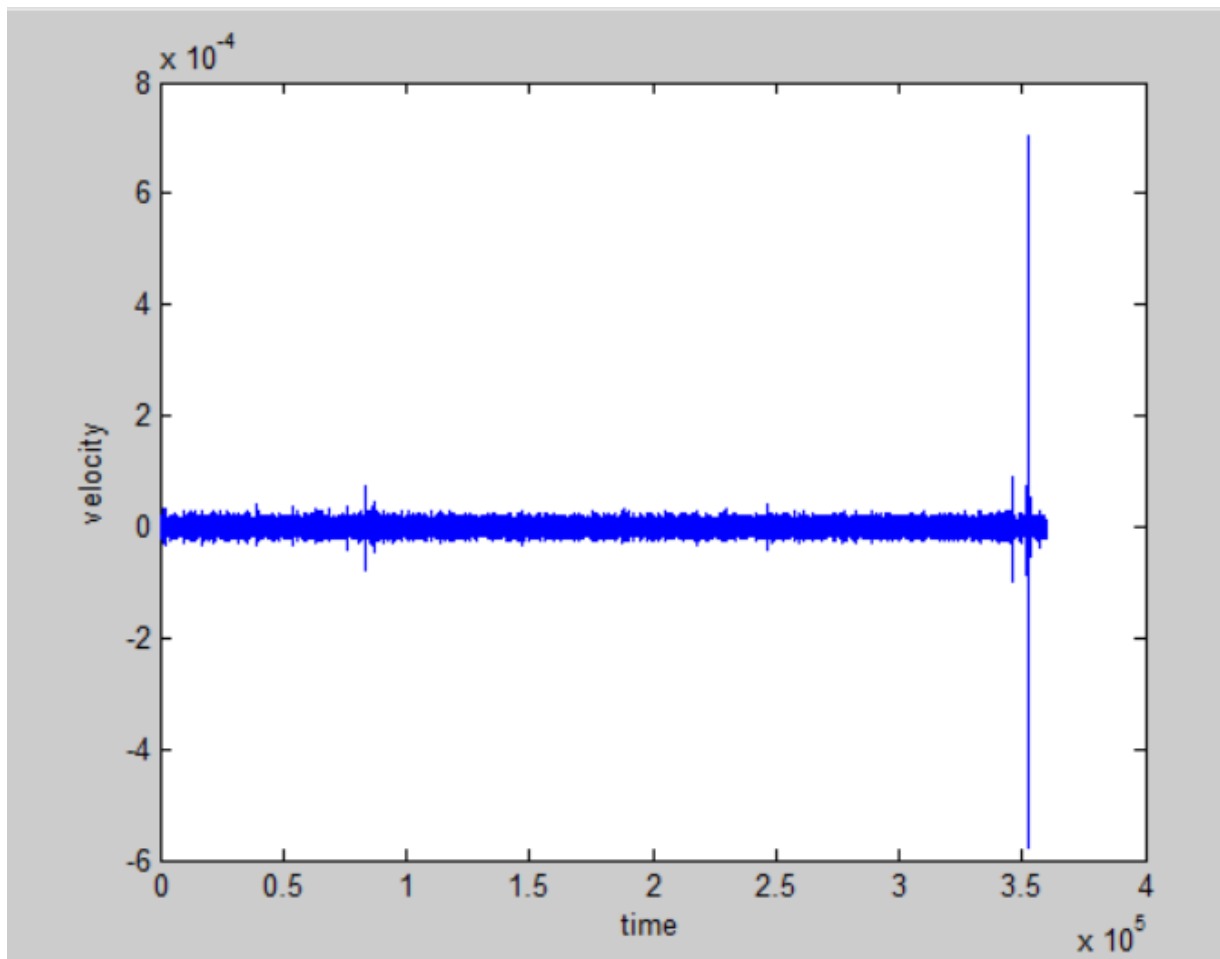
Figure 5.12 Ormsby filter (15 Hz) a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 5200)

Сл. 5.12 б) се претставени 200 записи (од 5000 до 5200) или 2 секунди од сигналот. Знаеме дека во 1 секунда има 30 амплитуди. Аналогно на тоа, за две секунди ќе имаме 60 амплитуди.

Г) централна фреквенција во 20 Hz со $f_t = 18.0$, $f_c = 19.0$ на лево и $f_c = 21.0$, $f_t = 22.0$ на десно.

$$\lambda_r = \frac{|18.0 - 19.0|}{100} = \frac{|22.0 - 21.0|}{100} = \frac{1}{100} = 0.01$$

$$N = \frac{1}{0.01} = 100.$$

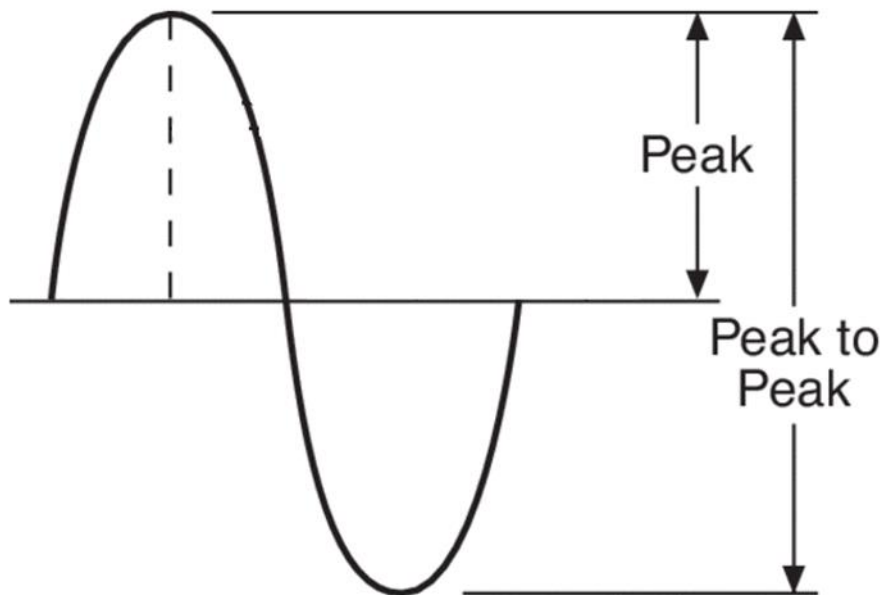


Слика 5.13 Ормсби филтер (20 Hz) а) Приказ на целиот сигнал; б) Приказ на дел од сигналот (од 5000 до 5200 точки од записот)

Figure 5.13 Ormsby filter (20 Hz) a) The hole signal; b) The part of signal (samples from 5000 to 5200)

Сл 5.13 б) се претставени 200 записи (од 5000 до 5200) или 2 секунди од сигналот. Знаеме дека во 1 секунда има 20 периоди или 40 амплитуди. За овој дел од записот имаме 80 амплитуди.

По филтрирањето ја наоѓаме разликата помеѓу максималните и минималните амплитуди (врв до врв амплитуда) за целата должина на сигналот.



Слика 5.14 Врв до врв амплитуда
Figure 5.14 Peak to peak amplitude

Амплитудите ги наоѓаме со разгледување на три соседни точки a_l, a_{l+1}, a_{l+2} кои го исполнуваат условот

$$(a_{l+1} - a_l) \cdot (a_{l+2} - a_{l+1}) < 0 .$$

Позитивните амплитуди A_p се оние каде $a_l < a_{l+1} \ \&\& \ a_{l+1} > a_{l+2}$, а негативните A_n се $a_l > a_{l+1} \ \&\& \ a_{l+1} < a_{l+2}$. Исто така овде правиме проверка дали последователно две амплитуди се позитивни или негативни, ако имаме таков случај првата амплитуда ја игнорираме и продолжуваме со следната. Потребно е разликата помеѓу позитивните и негативните амплитуди да не е поголема од еден.

Разликата помеѓу максималните и минималните амплитуди (врв до врв амплитуда) ја наоѓаме со формулата

$$diff1 = A_p(a_{l+1}) - A_n(a_{l+1})$$

за секој пар позитивна и негативна амплитуда. Наоѓаме средна вредност $average = \frac{\sum diff1}{D}$, каде D е вкупниот број на парови од позитивна и негативна амплитуда. $average$ всушност го прикажува отстапувањето околу нултата оска или брзината на осцилирање околу оската која не се совпаѓа со идеалната оска. Оваа вредност всушност ни ја претставува идеалната оска кога сите амплитуди би биле исти.

Потоа средната вредност ја делиме со централната фреквенција.

$$f_{result} = \frac{average}{f}$$

Претставениот сигнал со фреквенција од 2 Hz има вкупно 14 361 амплитуди или 7181 парни и 7180 непарни. Крајната вредност на врв до врв амплитудата изнесува:

$$f_{result} = \frac{average}{2} = 0.00007921936780$$

Сигналот со фреквенција од 4 Hz има 28726 амплитуди. Ист број на парни и непарни амплитуди (по 14363). Крајниот резултат изнесува:

$$f_{result} = \frac{average}{4} = 0.00002356210280$$

Сигналот со фреквенција од 7 Hz, има 25189 парни и 25188 непарни амплитуди.

$$f_{result} = \frac{average}{7} = 0.00000692503818$$

Истиот овој сигнал со фреквенција од 10 Hz има 35988 позитивни и исто толкав број на негативни амплитуди. За фреквенција од 10 Hz резултатот изнесува:

$$f_{result} = \frac{average}{10} = 0.00000313064129$$

За 15 Hz, овој сигнал има 53966 позитивни и исто толку негативни амплитуди. Крајниот резултат за оваа фреквенција изнесува:

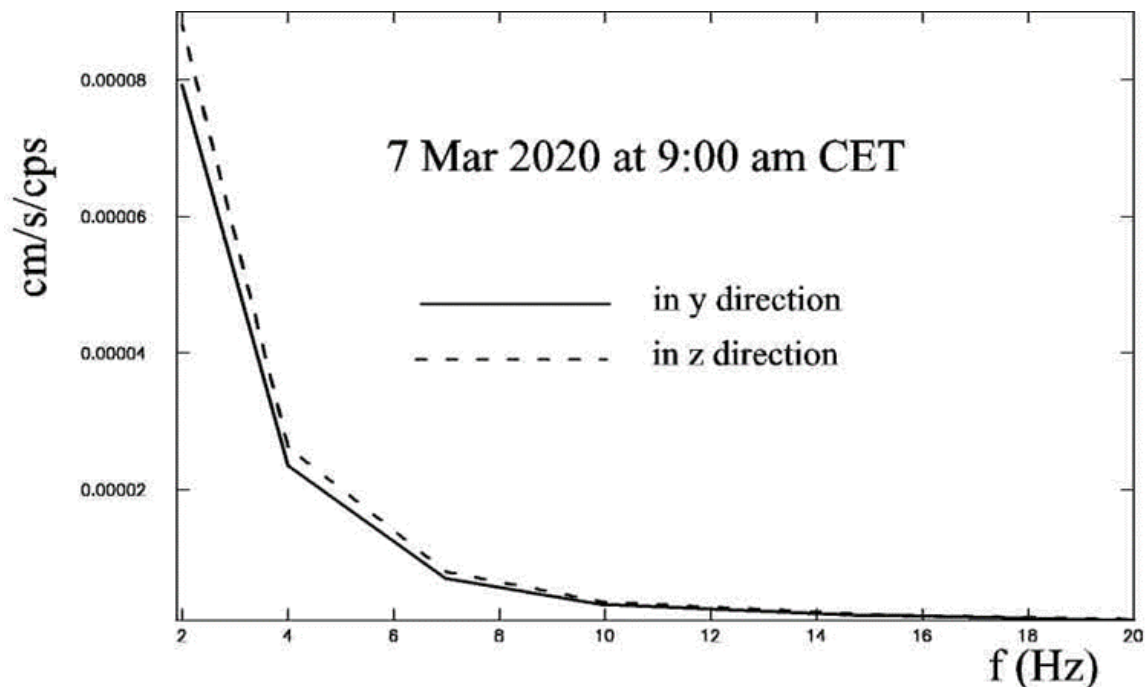
$$f_{result} = \frac{average}{15} = 0.00000156613589$$

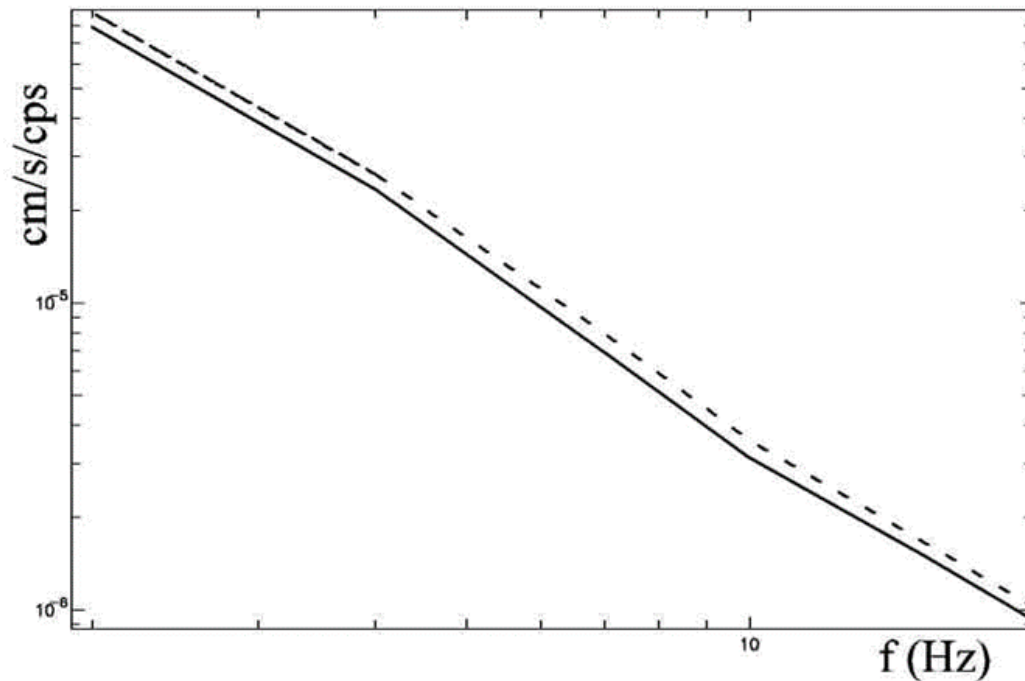
И за крај со фреквенција од 20 Hz сигналот има 143 926 амплитуди. 71963 позитивни и 71963 се негативни. Вредноста на врв до врв амплитудата е:

$$f_{result} = \frac{average}{20} = 0.00000093155847$$

Добиените резултати (f_{result}) ги зачувуваме и нив ги исцртуваме на график. Целата постапка ја повторуваме за 2 различни записи од кои едниот ја претставува у компонентата, а другиот z компонентата добиена од Slave инструментот.

Графикот го цртаме со користење на децимална и логаритамска скала. Логаритамската скала ја користиме за подобар увид на ординатите кај повисоките фреквенции ($f > 10$ Hz).





Слика 5.15 Микротремори (брзина по фреквенција) во куќата во Берово во децимална (горе) и во логаритамска (долу) скала

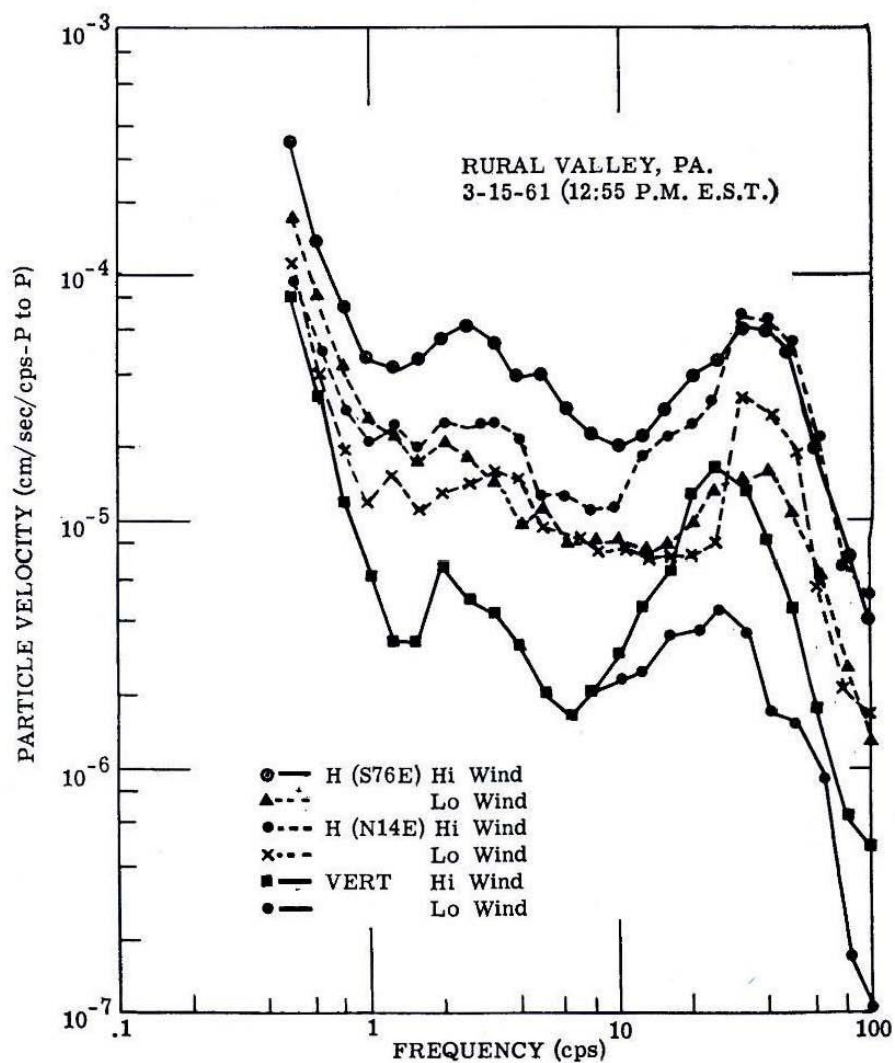
Figure 5.15 Microtremors (velocity per frequency) in Berovo house in decimal (above) and in logarithmic (below) scale

Од горните слики може да се заклучи дека брзините опаѓаат со пораст на фреквенцијата и за хоризонтални брзини опаѓаат од $8 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-7}$ cm/s/Hz, а за вертикални брзини (испрекинати линии) од $9 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-6} cm/s/Hz.

Пресметките во овој дел, како и во целата дисертација се правени со програмски кодови напишани во програмскиот јазик Fortran, а графиците се исцртани со помош на Matlab.

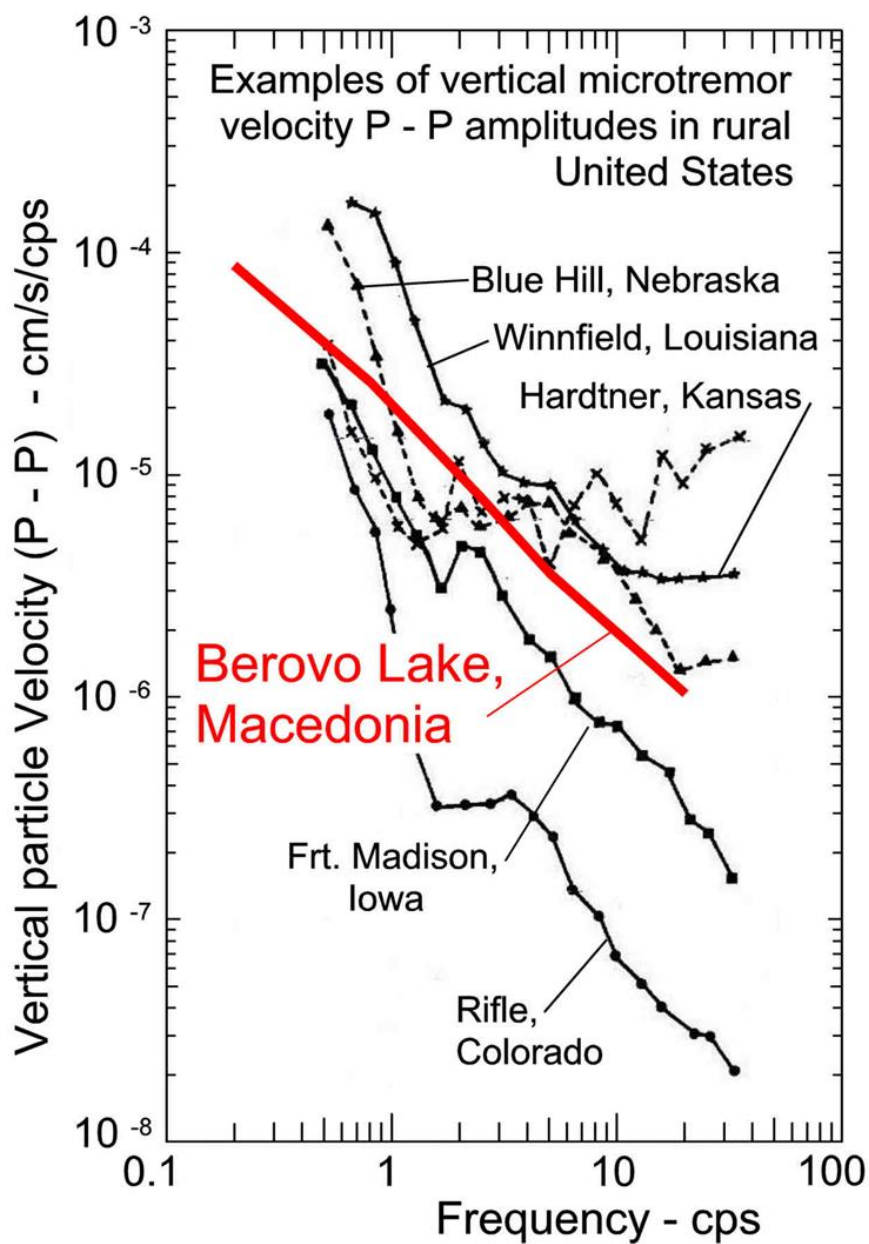
На слика 5.16 се прикажани врв до врв амплитудите на брзините во три ортогонални правци на инструментот индуцирани од микротремори во рурална средина во Пенсилванија, САД. За споредба на резултатите со нашите мерења, ги посматраме брзините во фреквентен опсег од 2 до 20 херци. Може да се забележи дека во овој фреквентен опсег брзините не покажуваат големи варијации во однос на фреквенциите и се движат од 10^{-5} до $8 \cdot 10^{-5}$ cm/s/Hz за хоризонтален правец и од $1.5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-5} cm/s/Hz за вертикален правец.

Ако направиме споредба, може да заклучиме дека вредностите на брзините, посебно оние во хоризонтален правец се слични.



Слика 5.16 Микротремори во Rural Valley во Пансилванија, Америка
Figure 5.16 Microtremor amplitudes in Rural valley, Pansilvania

На крајот од оваа глава, за споредба на микротреморите на локација на куќата на Беровско Езеро и микротреморите на локации во рурални области во САД, на слика 5.17 ги прикажуваме средните разлики на вертикалните брзини од врв до врв нормализирани со централната фреквенција во Hz (cps) или т.н. “P to P” брзини.

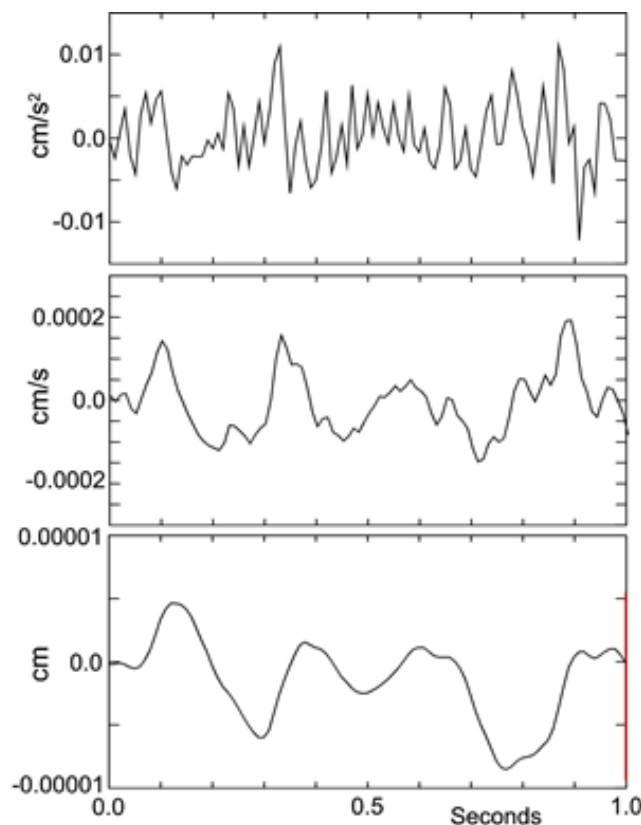


Слика 5.17 Микротремори во Берово наспроти рурални области во САД
 Figure 5.17 Microtremor in Berovo vs in rural United States

Од слика 5.17 ако го разгледаме исто така делот од 2 до 20 херци можеме да забележиме дека во тој фреквентен опсег имаме опаѓање на брзината во нашата Беровска област, како и кај руралните области во САД, т.е. за поголема фреквенција имаме помала брзина.

6. АНАЛИЗА НА ГРЕШКАТА НА ДИСКРЕТИЗАЦИЈА

Нашите мерења во куќата во Берово со EQR120 имаат ниво на прагот на снимање $2.4 \times 10^{-6} g$ ($g = 9.81 \text{ m/s}^2 =$ забрзување заради гравитација) или $2.4 \times 10^{-3} \text{ gal}$, 0.0024 cm/s^2 . Како што покажува сликата 6.1, амплитудите на измерените забрзувања на микротреморите се само 3 до 5 пати поголеми од овој праг.



Слика 6.1 Амплитуден спектар на куќата во Берово

Figure 6.1 Spectral amplitudes at Berovo house

Ова предизвикува грешки од дискретизација во пресметаните Фуриеви спектрални амплитуди и нивните ефекти треба да се измерат. За таа цел е изведен следниот нумерички експеримент.

Прво се генерира синусна функција со амплитуда $a=0.005 \text{ cm/s}^2$, фреквенција $f = 10 \text{ Hz}$ и со времетраење T секунди.

$$g(t) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad , \quad (6.1 \text{ a})$$

за која аналитички се пресметуваат Фуриевите амплитуди.

Со замена за a и f добиваме $g(t) = 0.005 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t)$.

Фуриевите амплитуди за оваа функција ги пресметуваме со помош на Фуриевата трансформација $G(\omega)$.

$$\begin{aligned}
 G(\omega) &= \int_0^T g(t)e^{-i\omega t} dt \\
 &= \int_0^T 0.005 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot t) \cdot e^{-i\omega t} dt \\
 &= 0.005 \cdot \int_0^T \sin(62.8t) \cdot e^{-i\omega t} dt \\
 &= 0.005 \left[\left[\frac{62.8 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(62.8 \cdot t) + \omega \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(62.8 \cdot t)}{\omega^2 - 3943.84} \right]_0^T \right. \\
 &\quad \left. - i \left[\frac{62.8 \cdot \cos(62.8 \cdot t) \cdot \sin(\omega t) - \omega \cdot \sin(62.8 \cdot t) \cdot \cos(\omega t)}{\omega^2 - 3943.84} \right]_0^T \right]
 \end{aligned}$$

(6.2 а)

Како што се гледа од 6.2 а), амплитудите $G(\omega)$ зависат од времетраењето на синусната функција, т.е. горната граница на интегралот, T .

За различни вредности на T , ќе ги пресметаме и нацртаме Фуриевите амплитуди изразени со равенката (6.2 а).

а) за $T=5$ минути = 300 секунди

$$\begin{aligned}
 G(\omega) &= 0.005 \left[\left[\frac{62.8 \cdot \cos(300\omega) \cdot (-0.991413) + \omega \cdot \sin(300\omega) \cdot (0.13076799) - 62.8}{\omega^2 - 3943.84} \right] \right. \\
 &\quad \left. - i \left[\frac{62.8 \cdot (-0.991413) \cdot \sin(300\omega) - \omega \cdot (0.13076799) \cdot \cos(300\omega)}{\omega^2 - 3943.84} \right] \right]
 \end{aligned}$$

б) за $T=10$ минути = 600 секунди

$$\begin{aligned}
 G(\omega) &= 0.005 \left[\left[\frac{62.8 \cdot \cos(600\omega) \cdot (0.96579947) + \omega \cdot \sin(600\omega) \cdot (-0.25929016) - 62.8}{\omega^2 - 3943.84} \right] \right. \\
 &\quad \left. - i \left[\frac{62.8 \cdot (0.96579947) \cdot \sin(600\omega) - \omega \cdot (-0.25929016) \cdot \cos(600\omega)}{\omega^2 - 3943.84} \right] \right]
 \end{aligned}$$

в) за $T=30$ минути = 1800 секунди

$$G(\omega) = 0.005 \left[\left[\frac{62.8 \cdot \cos(1800\omega) \cdot (0.70607131) + \omega \cdot \sin(1800\omega) \cdot (-0.70814074) - 62.8}{\omega^2 - 3943.84} \right] - i \left[\frac{62.8 \cdot (0.70607131) \cdot \sin(1800\omega) - \omega \cdot (-0.70814074) \cdot \cos(1800\omega)}{\omega^2 - 3943.84} \right] \right]$$

г) за $T=60$ минути = 3600 секунди

$$G(\omega) = 0.005 \left[\left[\frac{62.8 \cdot \cos(3600\omega) \cdot (-0.0029266) + \omega \cdot \sin(3600\omega) \cdot (-0.99999572) - 62.8}{\omega^2 - 3943.84} \right] - i \left[\frac{62.8 \cdot (-0.0029266) \cdot \sin(3600\omega) - \omega \cdot (-0.99999572) \cdot \cos(3600\omega)}{\omega^2 - 3943.84} \right] \right]$$

Исто така ја генерираме истата синусна функција

$$g(t) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (6.1 \text{ б})$$

со амплитуда $a=0.005 \text{ cm/s}^2$, фреквенција $f = 2.5 \text{ Hz}$ и со времетраење T секунди и за истата аналитички се пресметуваат Фуриевите амплитуди.

Со замена за a и f добиваме $g(t) = 0.005 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2.5 \cdot t)$.

Фуриевите амплитуди за оваа функција ги пресметуваме со помош на Фуриевата трансформација $G(\omega)$.

$$\begin{aligned} G(\omega) &= \int_0^T g(t) e^{-i\omega t} dt \\ &= \int_0^T 0.005 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 2.5 \cdot t) \cdot e^{-i\omega t} dt \\ &= 0.005 \cdot \int_0^T \sin(15.7t) \cdot e^{-i\omega t} dt \\ &= 0.005 \left[\left[\frac{15.7 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(15.7 \cdot t) + \omega \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(15.7 \cdot t)}{\omega^2 - 246.49} \right] \Big|_0^T \right] \\ &\quad - i \left[\frac{15.7 \cdot \cos(15.7 \cdot t) \cdot \sin(\omega t) - \omega \cdot \sin(15.7 \cdot t) \cdot \cos(\omega t)}{\omega^2 - 246.49} \right] \Big|_0^T \end{aligned} \quad (6.2 \text{ б})$$

Како што се гледа од 6.2 б, амплитудите $G(\omega)$ зависат од времетраењето на синусната функција, т.е. горната граница на интегралот, T .

За различни вредности на T , ќе ги пресметаме и нацртаме Фуриевите амплитуди изразени со равенката (6.2 б).

а) за $T=5$ минути = 300 секунди

$$G(\omega) = 0.005 \left[\left[\frac{15.7 \cdot \cos(300\omega) \cdot (-0.72990575066) + \omega \cdot \sin(300\omega) \cdot (-0.68354780019) - 15.7}{\omega^2 - 246.49} \right] - i \left[\frac{15.7 \cdot (-0.72990575066) \cdot \sin(300\omega) - \omega \cdot (-0.68354780019) \cdot \cos(300\omega)}{\omega^2 - 246.49} \right] \right]$$

б) за $T=10$ минути = 600 секунди

$$G(\omega) = 0.005 \left[\left[\frac{15.7 \cdot \cos(600\omega) \cdot (0.0655248097) + \omega \cdot \sin(600\omega) \cdot (0.99785094042) - 15.7}{\omega^2 - 246.49} \right] - i \left[\frac{15.7 \cdot (0.0655248097) \cdot \sin(600\omega) - \omega \cdot (0.99785094042) \cdot \cos(600\omega)}{\omega^2 - 246.49} \right] \right]$$

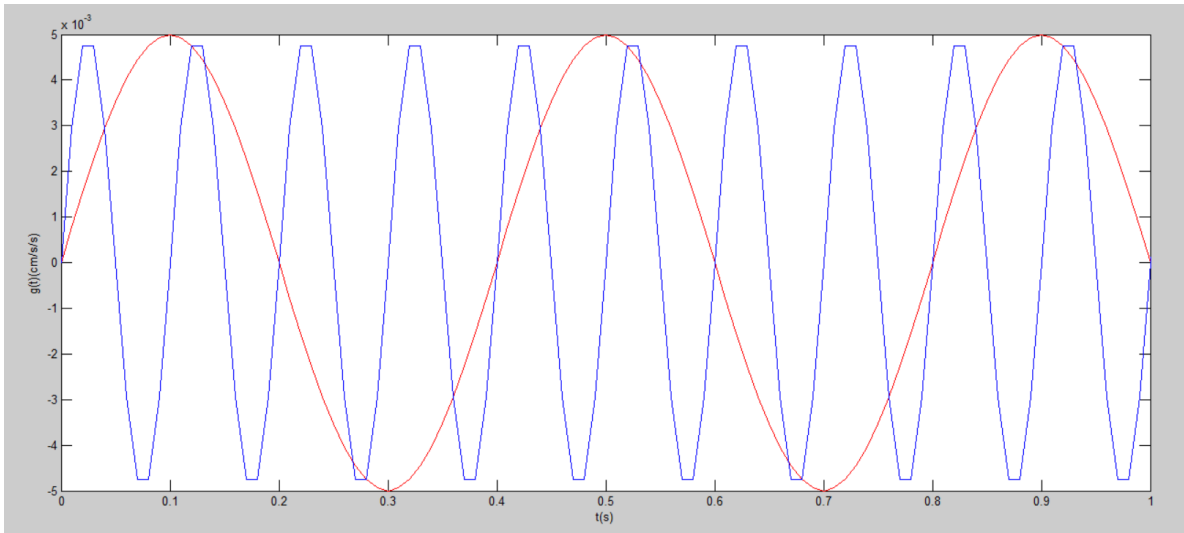
в) за $T=30$ минути = 1800 секунди

$$G(\omega) = 0.005 \left[\left[\frac{15.7 \cdot \cos(1800\omega) \cdot (-0.19544910584) + \omega \cdot \sin(1800\omega) \cdot (-0.98071384563) - 15.7}{\omega^2 - 246.49} \right] - i \left[\frac{15.7 \cdot (-0.19544910584) \cdot \sin(1800\omega) - \omega \cdot (-0.98071384563) \cdot \cos(1800\omega)}{\omega^2 - 246.49} \right] \right]$$

г) за $T=60$ минути = 3600 секунди

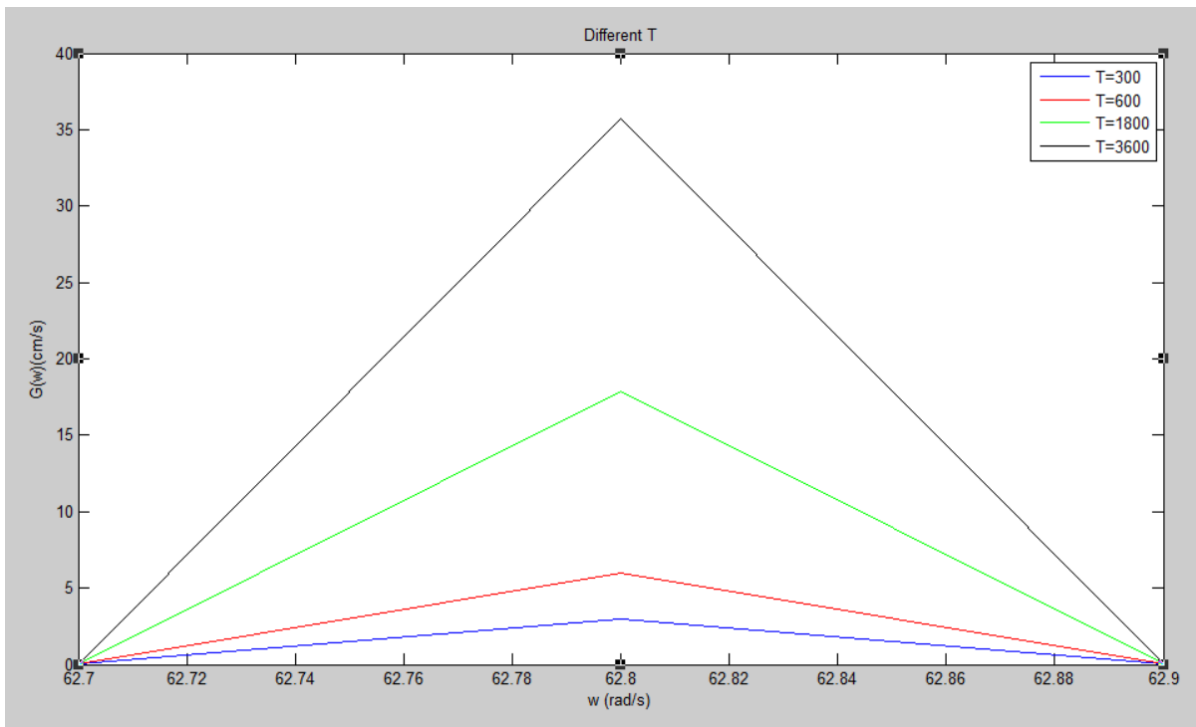
$$G(\omega) = 0.005 \left[\left[\frac{15.7 \cdot \cos(3600\omega) \cdot (-0.92359929405) + \omega \cdot \sin(3600\omega) \cdot (0.38335928843) - 15.7}{\omega^2 - 246.49} \right] - i \left[\frac{15.7 \cdot (-0.92359929405) \cdot \sin(3600\omega) - \omega \cdot (0.38335928843) \cdot \cos(3600\omega)}{\omega^2 - 246.49} \right] \right]$$

Прво ја претставуваме функцијата за 10 и 2.5 херци на временска оска (сл. 6.2). Гледаме дека за 10 херци имаме период 0.1, а за 2.5 херци имаме период 0.4 секунди.

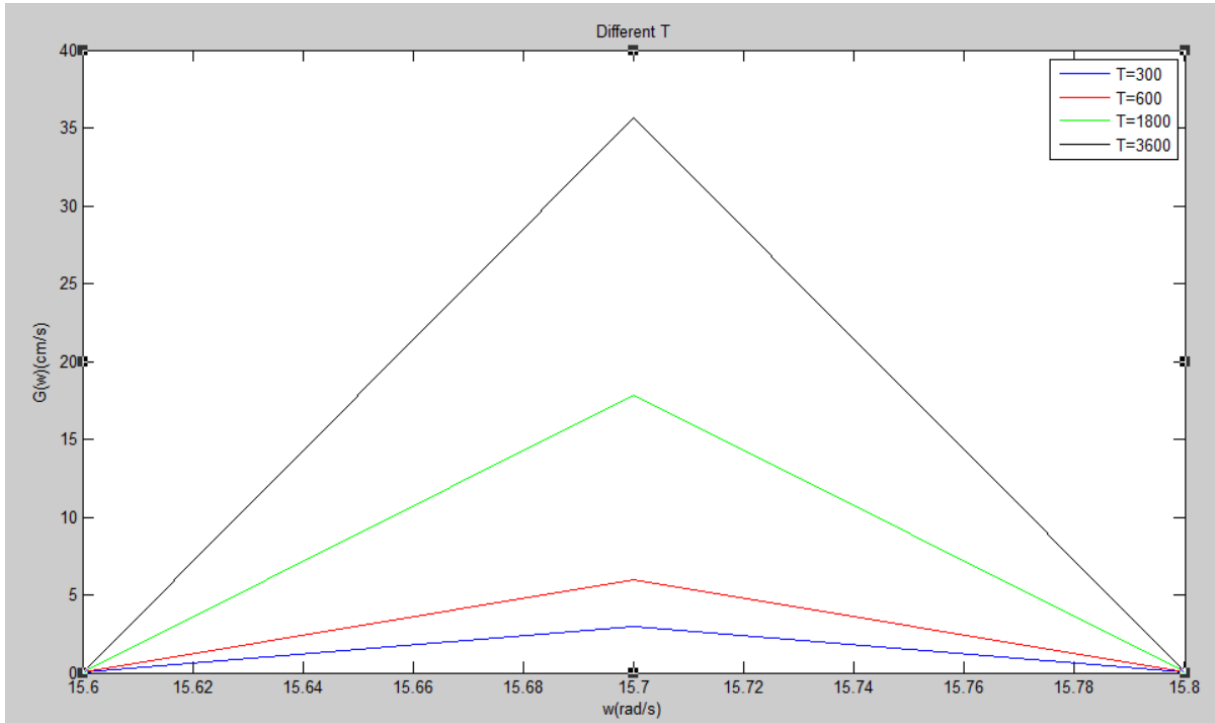


Слика 6.2 Функцијата $g(t)$ за 10 херци (сина боја) и 2.5 херци (црвена боја)
 Figure 6.2 $g(t)$ for 10 Hz (blue color) and 2.5 Hz (red color)

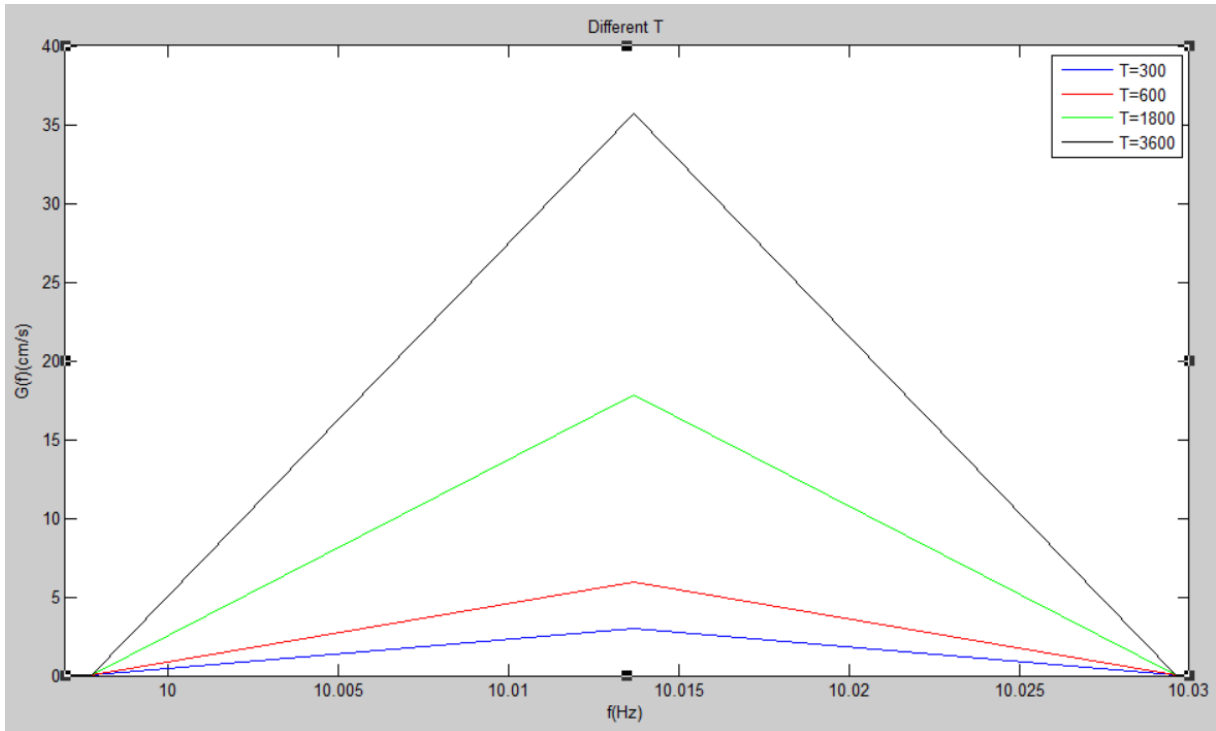
Одговорот во фреквентен домен $G(\omega)$ го цртаме со помош на 1000 точки (слика 6.3 и слика 6.4). Ординатите $G(\omega)$ ги добиваме за интервал на аголната фреквенција ω од 0 до 100 rad/s со прираст 0.1 rad/s. Гледаме дека пикот за сите должини на синусоидата T се јавува кај $\omega = 20 \cdot \pi = 62.8$ rad/s (сл. 6.3) односно кај $\omega = 5 \cdot \pi = 15.71$ rad/s (Сл. 6.4) или кај $f = 10$ Hz (сл. 6.5) односно кај $f = 2.5$ Hz (сл. 6.6).



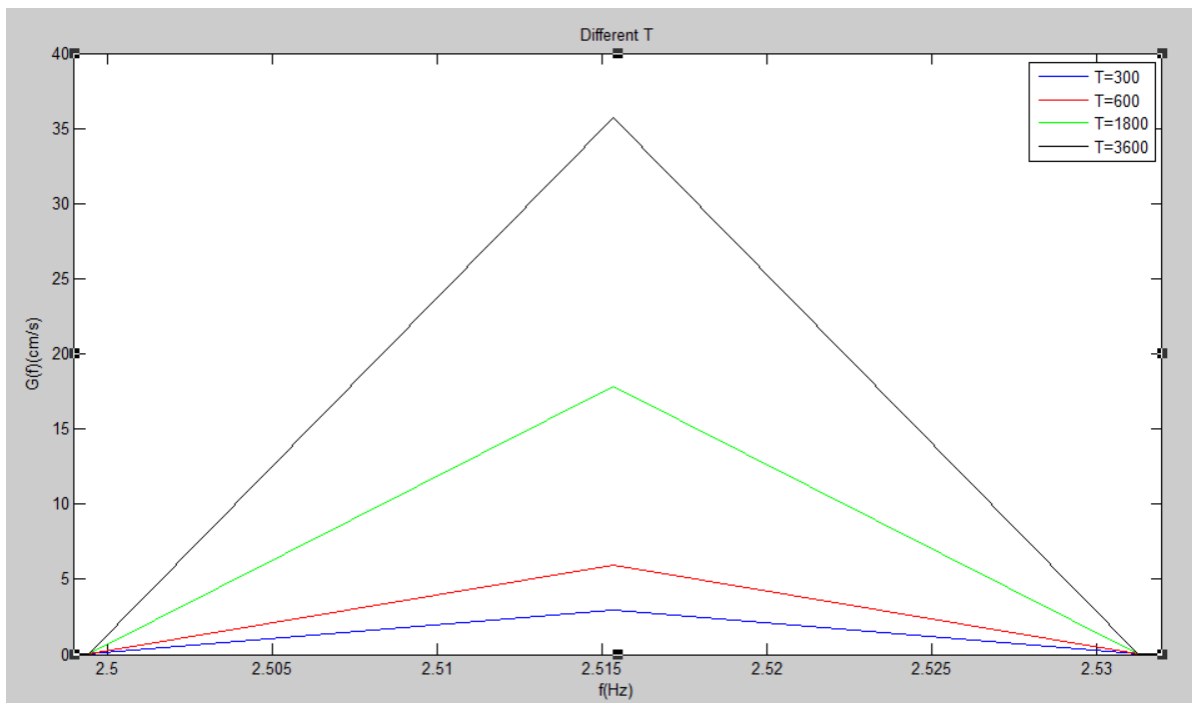
Слика 6.3 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=10$ Hz
 Figure 6.3 Fourier spectral amplitudes for $T=5, 10, 30$ and 60 minutes for $f=10$ Hz



Слика 6.4 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=2.5$ Hz
 Figure 6.4 Fourier spectral amplitudes for $T=5, 10, 30$ and 60 minutes for $f=2.5$ Hz



Слика 6.5 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=10$ Hz
 Figure 6.5 Fourier spectral amplitudes for $T=5, 10, 30$ and 60 minutes for $f=10$ Hz

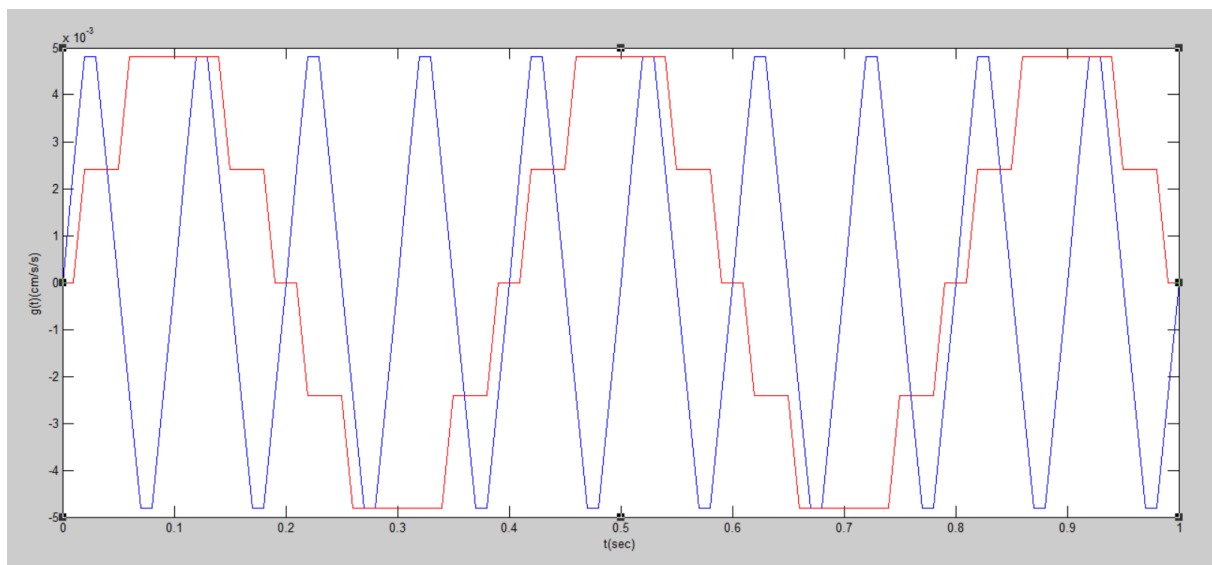


Слика 6.6 Фуријеви спектрални апмлитуди за $T=5, 10, 30$ и 60 минути за $f=2.5$ Hz
 Figure 6.6 Fourier spectral amplitudes for $T=5, 10, 30$ and 60 minutes for $f=2.5$ Hz

Со ова го верификувавме аналитичкото решение (6.1). Прметуваме дека за различно времетраење T , пикот кај $f=10$ Hz и $f=2.5$ Hz има различни вредности и расте како што расте и времетраењето T .

Потоа ја земаме истата синусна функција и ја „дигитализираме“ нумерички со дискретизација на апсциса со фреквенција 100 Hz (т.е. 100 точки во секунда или временски интервал $\Delta t=0.01$ s), но со променливи дискретни нивоа на ордината. Ќе работиме со дискретните нивоа 0.0024 cm / s², 0.001 cm / s², 0.0001 cm / s² и 0.00001 cm / s².

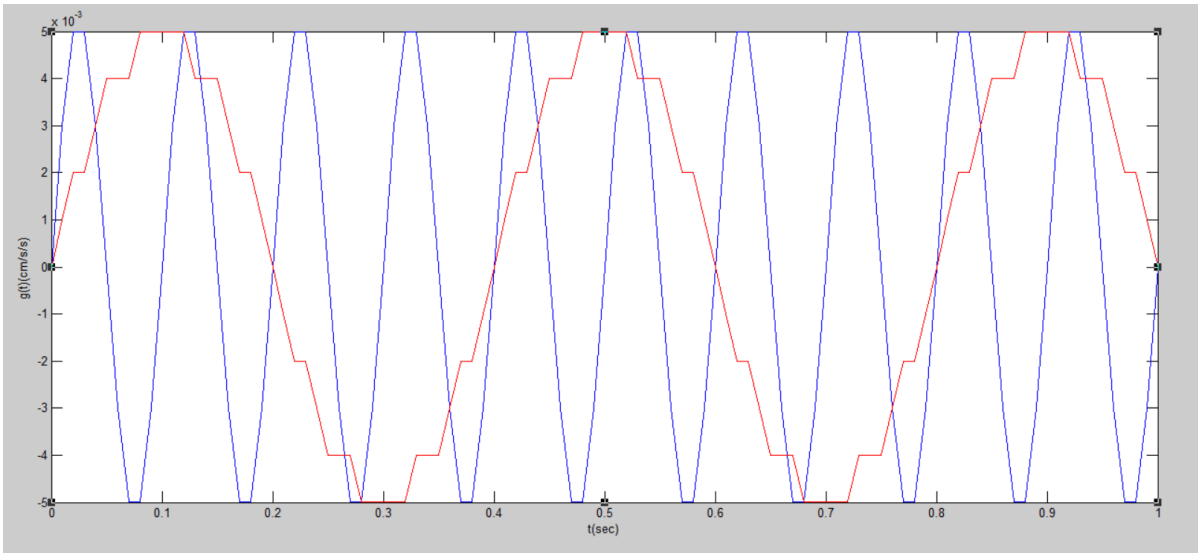
За дискретно ниво 0.0024 cm / s² функцијата го има следниов изглед: (сл. 6.7)



Слика 6.7 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво 0.0024 cm / s² (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)

Figure 6.7 Function $g(t)$ with discrete level 0.0024 cm / s² (blue 10 Hz, red 2.5 Hz)

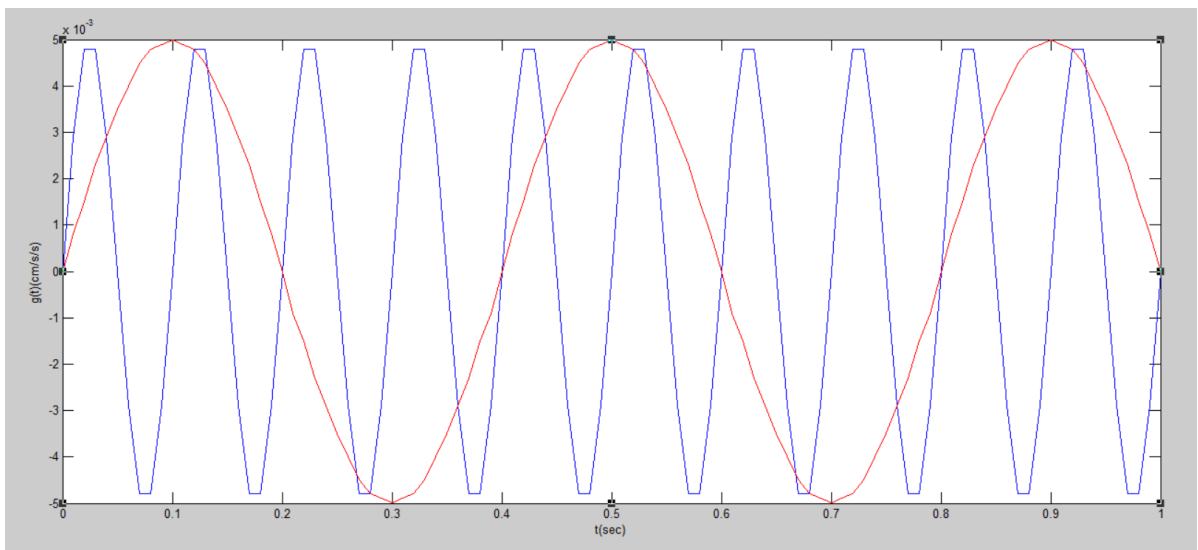
Дискретизирање со дискретно ниво 0.001 cm / s². Функцијата го има следниов изглед (сл. 6.8)



Слика 6.8 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво $0.001 \text{ cm} / \text{s}^2$ (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)

Figure 6.8 Function $g(t)$ with discrete level $0.001 \text{ cm} / \text{s}^2$ (blue 10 Hz, red 2.5 Hz)

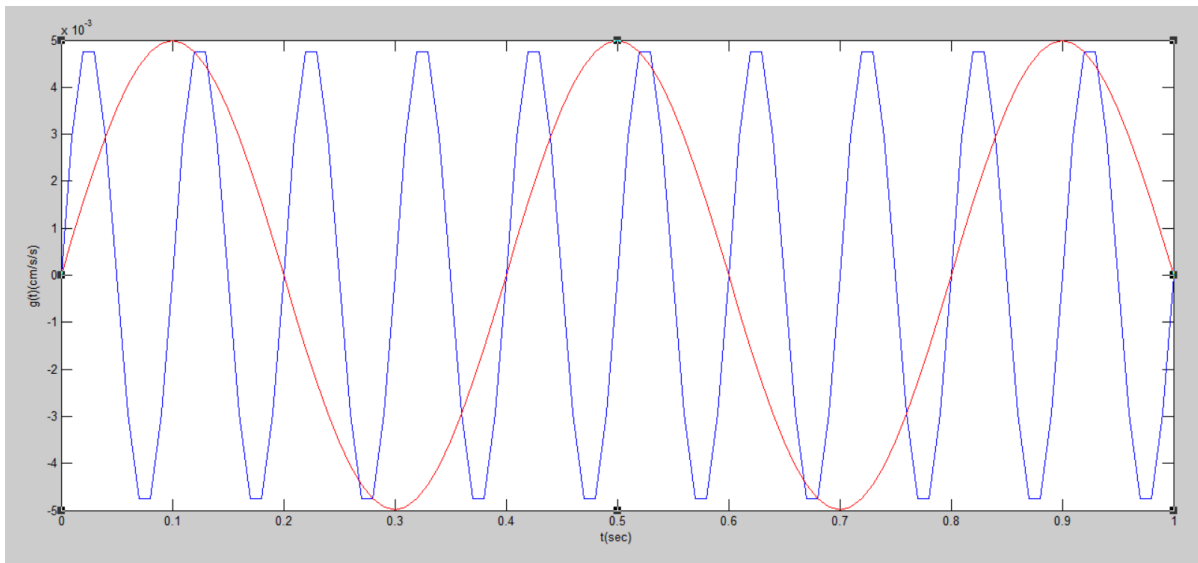
За дискретно ниво $0.0001 \text{ cm} / \text{s}^2$, функцијата го има следниов изглед: (сл. 6.9)



Слика 6.9 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво $0.0001 \text{ cm} / \text{s}^2$ (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)

Figure 6.9 Function $g(t)$ with discrete level $0.0001 \text{ cm} / \text{s}^2$ (blue 10 Hz, red 2.5 Hz)

И за крај за дискретно ниво $0.00001 \text{ cm} / \text{s}^2$ ја имаме сл. 6.10:



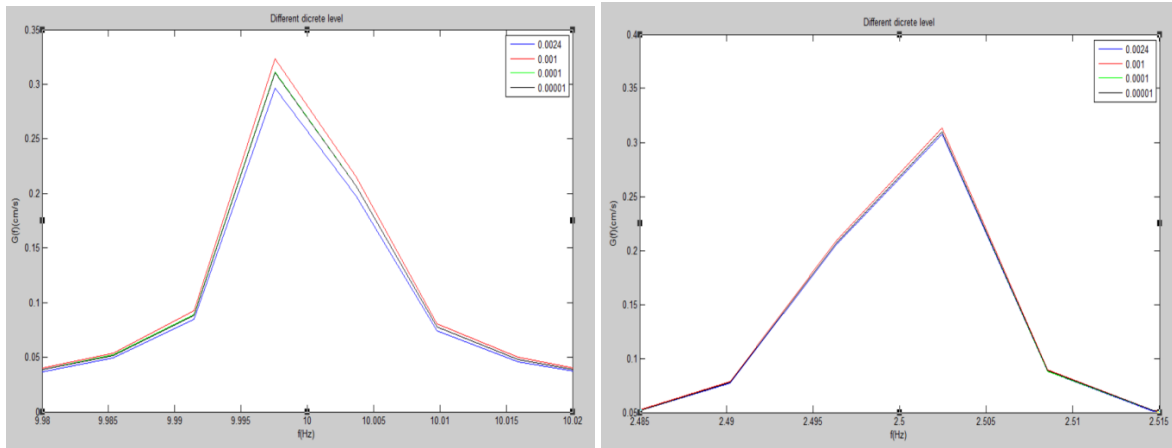
Слика 6.10 Функцијата $g(t)$ со дискретно ниво $0.00001 \text{ cm} / \text{s}^2$ (сино 10 Hz, црвена 2.5 Hz)

Figure 6.10 Function $g(t)$ with discrete level $0.00001 \text{ cm} / \text{s}^2$ (blue 10 Hz, red 2.5 Hz)

Од сликите 6.7 до 6.10 можеме да забележиме дека колку и да е фина дискретизацијата по забрзувањето, бидејќи дискретизацијата по време е груба, не добиваме на точност. Ова посебно се забележува кај високите фреквенции. За пониска фреквенција ова не важи. За фреквенција од 2.5 Hz можеме да забележиме дека колку повеќе точки на дискретизација имаме, толку е поглаток сигналот, односно за најмалото дискретно ниво од $0.00001 \text{ cm} / \text{s}^2$ графикот има најдобар изглед (изгледа скоро исто како на сл. 6.2).

Потоа со FFT рутина ги пресметуваме спектралните амплитуди за $T = 5, 10, 30$ и 60 минути и ги споредуваме со спектрите добиени од аналитичките пресметки.

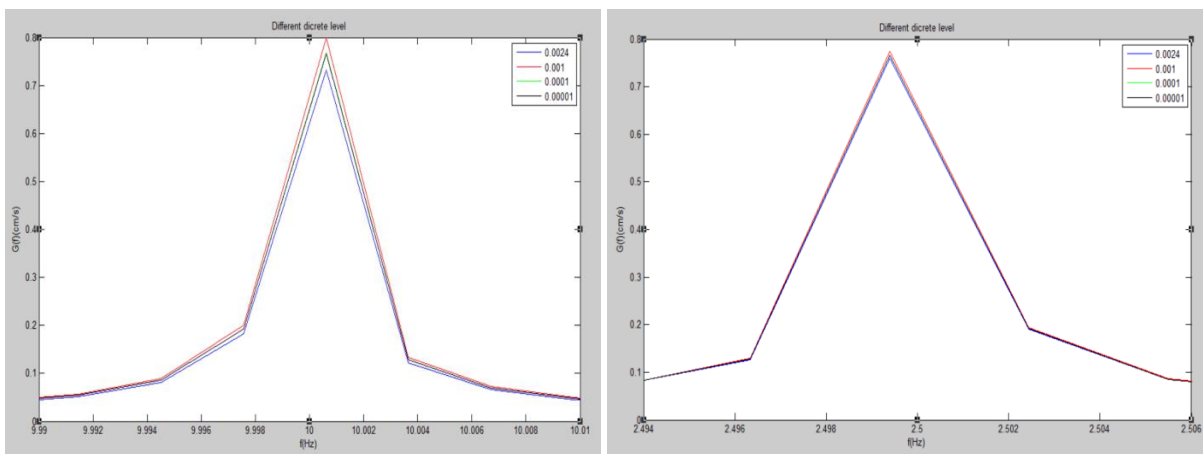
На слика 6.11 а) и б) е претставен групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=5$ минути.



Слика 6.11 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=5$ минути за $f=10$ Hz б) за $f=2.5$ Hz

Figure 6.11 a) Group graph of the four levels of discretization for $T = 5$ minutes for $f=10$ Hz b) for $f=2.5$ Hz

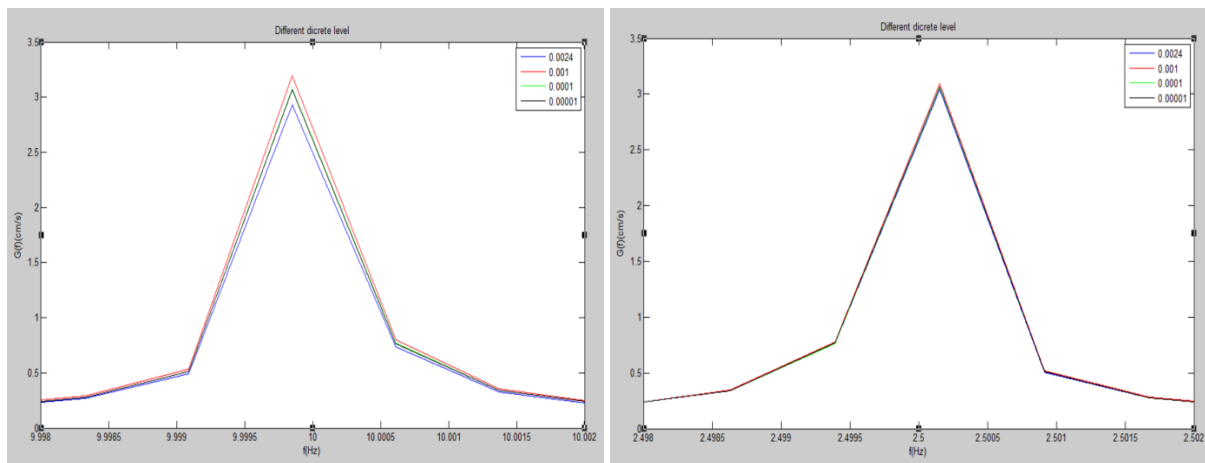
На слика 6.12 е претставен групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=10$ минути.



Слика 6.12 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=10$ минути за $f=10$ Hz б) за $f=2.5$ Hz

Figure 6.12 a) Group graph of the four levels of discretization for $T = 10$ minutes for $f=10$ Hz b) for $f=2.5$ Hz

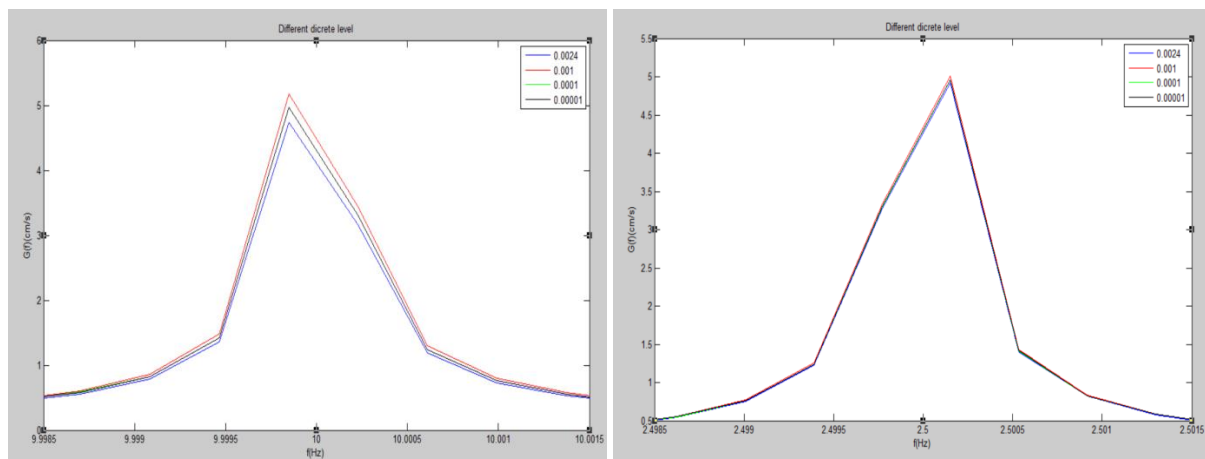
На слика 6.13 е претставен групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=30$ минути.



Слика 6.13 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=30$ минути б) за $f=2.5$ Hz

Figure 6.13 a) Group graph of the four levels of discretization for $T = 30$ minutes for $f=10$ Hz b) for $f=2.5$ Hz

На слика 6.14 е претставен групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=60$ минути.



Слика 6.14 а) Групен график од четирите нивоа на дискретизација за $T=60$ минути за $f=10$ Hz б) за $f=2.5$ Hz

Figure 6.14 a) Group graph of the four levels of discretization for $T = 60$ minutes for $f=10$ Hz b) for $f=2.5$ Hz

Во табелата е претставено нумеричкото решение на проблемот. Како што можеме да видиме од графиците за различно T имаме различна вредност на амплитудата на функцијата за фреквенција од 10 Hz и 2.5 Hz. Така за $T=300$ секунди амплитудата е околу 0.29 и 0.32 цм/с, за $T=600$ изнесува 0.73-0.79 цм/с, за $T=1800$ е во интервалот од 2.9 до 3.1 и за $T=3600$ има вредност поголема од 4.74 цм/с.

За фреквенција од 2.5 Hz за нумеричкото решение, земајќи ги во предвид нивоата на дискретизација имаме исто приближна вредност на амплитудата како кај 10 Hz и тоа за $T=300$ амплитудата е над 0.3 цм/с, за $T=10$ изнесува околу 0.76 цм/с, за $T=1800$ е во интервалот од 3.04 до 3.09 и за $T=3600$ има вредност околу 4.9 и 5.013 цм/с.

Табела 1 Резултати од нумеричкото решение

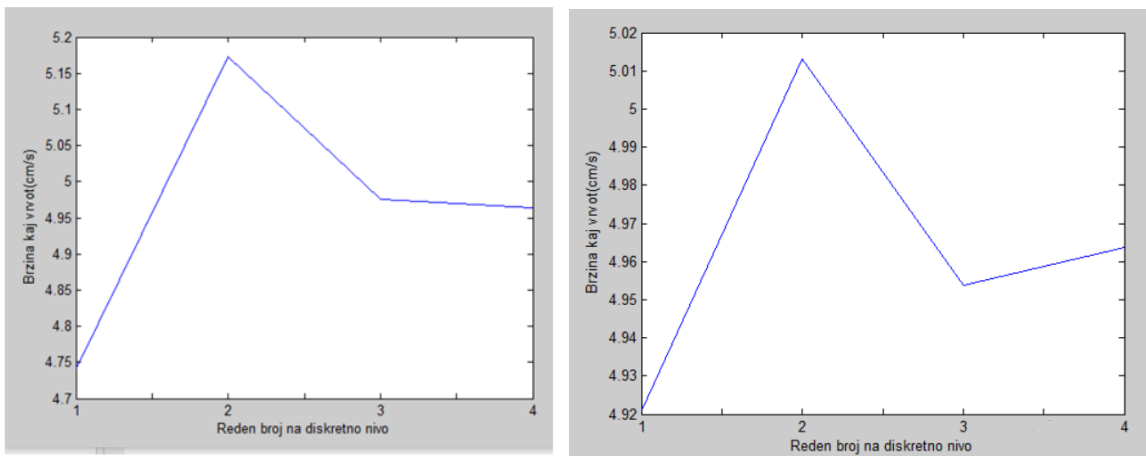
Table 1 Results from numerical solution

Време (сек)	Нумеричко решение (амплитуда) (цм/с) 10 Hz				Нумеричко решение (амплитуда) (цм/с) 2.5 Hz			
	0.0024	0.001	0.0001	0.00001	0.0024	0.001	0.0001	0.00001
300	0.2964	0.3233	0.311	0.31	0.3075	0.3132	0.3095	0.31
600	0.7327	0.7993	0.7688	0.7669	0.7603	0.7745	0.7654	0.7669
1800	2.931	3.197	3.075	3.0679	3.0415	3.0983	3.0618	3.0678
3600	4.7423	5.1731	4.9755	4.964	4.9211	5.013	4.9539	4.9636

Во овој дел од дисертацијата со разгледување на гореприложените слики и табела 1 можеме да заклучиме дека со зголемување на времето T (од 300 на 600, па на 1800 и на крај на 3600 секунди), имаме поизразени пикови во Фуриевиот спектар.

За 10 херци кај дискретно ниво 0.001 вредностите на амплитудата се највисоки и таму расте кривата, па опаѓа за 0.0001 и 0.00001, додека кај 2.5 херци за 0.001 расте, потоа кривата опаѓа и повторно расте. Сите криви за различна вредност на T го имаат истиот облик како слика 6.15.

На слика 6.15 е даден графички приказ на најдолгиот 60 минутен запис. Точките од 1 до 4 ги претставуваат четирите дискретни нивоа.



Слика 6.15 Нумеричко решение за $T=3600$ секунди за различните дискретни нивоа

Figure 6.15 Numerical solution for $T = 3600$ seconds for different discrete levels

7. ЗАКЛУЧОК

Со помош на сензитивни инструменти, нумерички методи, математички трансформации и софтвери за дигитално процесирање, врз база на измерени мали, амбиентални вибрации, можеме да ги најдеме природните карактеристики на зградата. Во овој докторски труд, развивме методологија и постапки за определување на првите две природни фреквенции и нивните соодветни функции на обликот (модални форми) кај објект со многу нерегуларна тродимензионална геометрија.

Мерењата на амбиенталните вибрации треба да се спроведат на густ сет на точки, и на тој начин да се прикажат детални податоци за просторните својства на објектот. Кај високи објекти, каде едната димензија (висина) е многу поголема од другите две (ширина и должина) мерењата во една или две точки, преку анализа на трансфер функцијата на системот или преку спектралната густина (PSD) се доволни за да се определат првите неколку природни фреквенции и нивните соодветни модални форми. За тродимензионални објекти со нерегуларна геометрија, посебно за објекти со приближно исти димензии во три меѓусебно ортогонални правци, неопходни се мерења на што е можно повеќе локации и се препорачува да се користат два инструмента (трансфер функции), наместо еден инструмент (PSD метода). Ова е затоа што преку Фуриевеиот спектрум на референтниот инструмент (Slave) можеме да судиме дали мерењето е успешно.

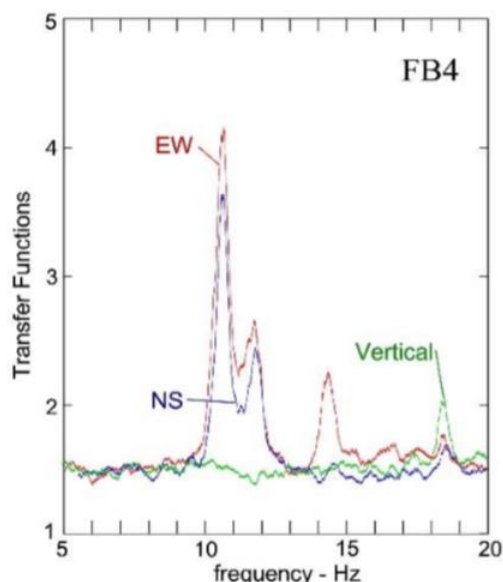
Конечно, тестовите за амбиентални вибрации се „комплетни“, “full scale” експерименти. Дури и внимателно планираните лабораториски експерименти ќе ги претставуваат само оние аспекти на проблемот што дизајнерот на експериментот избрал да ги проучува и ги вклучил во моделот. Најдобрите и најкомплетните лабораториски тестови можат да ги верификуваат и да ги измерат само оние аспекти на проблемот што истражувачот ги знае. Целосните тестови за амбиентални вибрации претставуваат сосема различна ситуација која не може лесно да се контролира. Изградената околина ги содржи сите својства на реалноста. Ние само треба да најдеме мудри начини да ја откриеме, снимаме и толкуваме оваа реалност. Затоа процесирањето на

амбиенталните вибрации и врз основа на нив определувањето на природни фреквенции и модалните форми е на граница меѓу науката и уметноста.

Тродимензионалната вибрација на која било неправилна зграда вклучува вертикални компоненти на движење, и зградата опишана во овој труд не е исклучок. Сепак, од раните фази на дизајнирање на мерната стратегија за оваа анализа, нашата цел е да се фокусираме само на хоризонталните компоненти на движењето. Ова е затоа што структурата со столбови, сидовите на смолкнување и бетонски плочи на подот, ќе има бројни карактеристични фреквенции поврзани со вертикални вибрации на подните плочи, особено при повисоки фреквенции, а тоа може да го отежни толкувањето на резултатите. Како резултат на тоа, ги избравме сите мерни места за мастер инструментот, што е можно поблиску до столбовите. Ова ги намали придонесите од вертикалните вибрации на хоризонталните подни плочи (сл. 7.1). Покрај нивните природни фреквенции, подните плочи ќе бидат изложени на движења поврзани со претежно хоризонтални деформации на зградата. За да се идентификуваат и да се опишат ваквите вертикални движења, ќе биде потребно поставување на мерни станици на средините од плочите каде вибрациите на плочите во вертикален правец се поголеми, отколку блиску до столбовите. Ваквите мерења не беа во план кога ја изработивме стратегијата за мерењата опишана во делот резултати од докторскиот труд, но ќе бидат опфатени во нашата идна работа.

Корисно е да се документираат и интерпретираат сложени и споени форми на структури, особено кога центрите за ротирање спаѓаат во рамките на планските димензии на зградата. Во тие случаи, возбудата од земјотрес ќе резултира во големи торзиони одговори, што може да доведе до прекумерни моменти и смолкнување во структурните елементи (Трифунас и др. 1999). Бидејќи енергијата од земјотрес доаѓа во зградата преку бранови (Gicev & Trifunac, 2007), нерегуларноста на геометријата на објектот и самиот конструктивен систем кој се состои од висок крут темелен сид и скелетен систем зајакнат со армиранобетонски платна, влијае на патот на пропагирање на брановите од тлото до повисоките нивоа на објектот. Ова доведува до комплексност при креирање на тродимензионални математички модели за анализирање на одговорот на вакви објекти на сеизмички побуди. За таа цел,

резултатите во овој труд ќе послужат за идна калибрација на 3Д нумерички модели, за симулација на вибрационите својства на таквите згради, како и за симулации на нивниот одговор при силно движење на тлото при земјотрес.



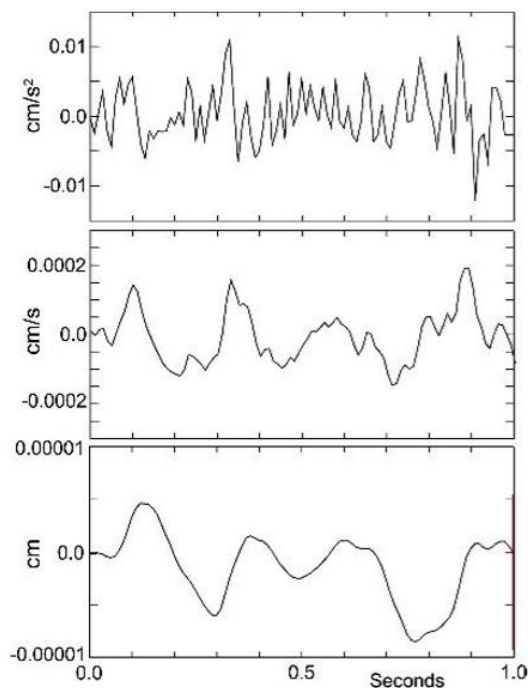
Слика 7.1 Трансфер функции на станицата FB4 (прв кат на колоната Б4, Сл. 2.5) за движења во насоките СЈ, ИЗ и вертикално. Погледнете го врвот на трансфер функцијата за вертикалните движења близу 18.4 Hz.

Figure 7.1 Transfer functions at station FB4 (first floor at column B4, Fig. 2.5) for motions in the NS, EW and Vertical directions. See the peak in the transfer function for vertical motions near 18.4 Hz.

Методот што го користиме во овој труд, за идентификација на сложени облици на поместување во многу точки и потоа нивно толкување во однос на ротација на подниот систем околу точка, е продолжување на методот воведен во тестирањето на амбиентални вибрации во Holiday Inn хотелот во Van Nuys во Калифорнија, кој претрпе штета при земјотресот во Northridge во 1994 година (Трифунац и др. 2000). Овој метод ќе биде корисен во многу идни случаи кога облиците на режимот на неправилни или делумно оштетени структури се тестираат со употреба на бранови од микротремор како извор за вибрациите на зградата. За Holiday Inn хотелот во Van Nuys, овој метод

покажал јасен скок во положбата на центарот на ротирање на подот, под и над силно оштетените столбови, т.е. скок во распределбата на пукнатините предизвикани од земјотресот.

Микротреморите се бранови, кои се шират во близина на површината на земјата и се предизвикани од многу различни стационарни извори (на пр. фабрики) и движења (на пр. сообраќај). Амплитудите на распределување на микротреморите обично се движат од 0,1 до 1 μ ($\mu = 10^{-6}m = 10^{-4} cm$), со брзини во опсег од 0,001 до 0.01 cm/s . Сл. 7.2 покажува дека амплитудите во основата на зградата што ја проучуваме во овој труд се мали, само неколку пати поголеми од нивото на прагот на снимање $2.4 \times 10^{-6}g$ или $2.4 \times 10^{-3}gal$.



Слика 7.2 Забрзување (горе), брзина (средина) и поместување (долу) на сегмент (со должина 1 секунда) на СЈ движење во референтната станица во подрумот (слика 2.3)

Figure 7.2 Acceleration (top), velocity (middle), and displacement (bottom) of a segment (1 s long) of NS the motion at the reference station in the basement (Fig. 2.3)

Во густо населените места, амплитудите на микротреморот имаат тенденција да бидат поголеми во раните попладневни часови и се мали во текот на ноќта. Ние ги претставивме амплитудите на Фуриевиот спектар на снимените микротремори во подрумот на зградата („slave“ сензор), за разни периоди во текот на 24-часовен период. Не најдовме варијации на спектралните амплитуди со времето. Заклучивме дека, на оваа локација, придонесот за микротреморските, со изразито мали амплитуди, се само неколку пати поголеми од долниот праг на регистрирање на инструментот. Исто така забележавме дека во фреквентен домен одговорот на Slave инструментот е скоро константен во широк ранг на фреквенциите од интерес $1 \text{ Hz} < f < 20 \text{ Hz}$ што е близок до бел шум.

Не најдовме врвови во трансфер функциите за мерењата во подрумот и во приземјето. Секако, движењата на приземјето за карактеристични фреквенции на зградата не се нула, но се мали во однос на амплитудите на шумот во земјата. Ќе биде неопходно да се возбуди зградата со големи надворешни сили за спектралните врвови да се појават при движење на приземјето. Движењата во подрумот и во гаражата се благо измазнети микротремски движења во приземната карпа во близина на зградата. Ова измазнување се случува поради големи површини покриени со армиран бетон.

Објаснувањето на векторите на поместување прикажани на сл. 4.5 а, б и 4.6 а, б ќе покажат дека амплитудите и ориентацијата на векторите, како што се нацртани, не се секогаш во добра согласност со нашето толкување на природата на целокупните движења - ротација околу точка источно од северо-источниот агол на зградата слика 4.5 а, б и северо-исток кон југо-запад translација на слика 4.6 а, б. Ова е затоа што, како што веќе забележавме, минливата природа на микротреморските бранови не произведува доволно побудување за време на едновремено мерење, во однос на нивоата на праговите на нашите инструменти за снимање ($2.4 \times 10^{-6}g$ или $2.4 \times 10^{-3}gal.$), за да се донесат целосните амплитуди на врвовите на трансфер функцијата. Во неколку случаи, нашето едновремено мерење не донесе врвови, и во тие случаи ќе треба да ги повториме мерењата.

Секоја зграда има своја природна фреквенција. Нашата следна цел ќе биде да се извршат мерења на зградите во урбани подрачја.

8. ДОДАТОК

8.1. Користени кратенки

RVS	Rapid Visual Screening (брз визуелен скрининг)
PS	performance score (резултат на изведба)
VSM	vulnerability score modifiers (модификатори на резултатот на ранливост)
VS	vulnerability score (резултат на ранливост)
BS	basic score (основен резултат)
RC	reinforced concrete (армирано-бетонски)
FT	fourier transform (Фуриева трансформација)
FFT	fast fourier transform (брза Фуриева трансформација)
DFT	discrete Fourier transform (дискретна Фуриева трансформација)
SNR	Signal to Noise Ratio (сооднос на сигналот со шумот)
PSD	Power spectral density

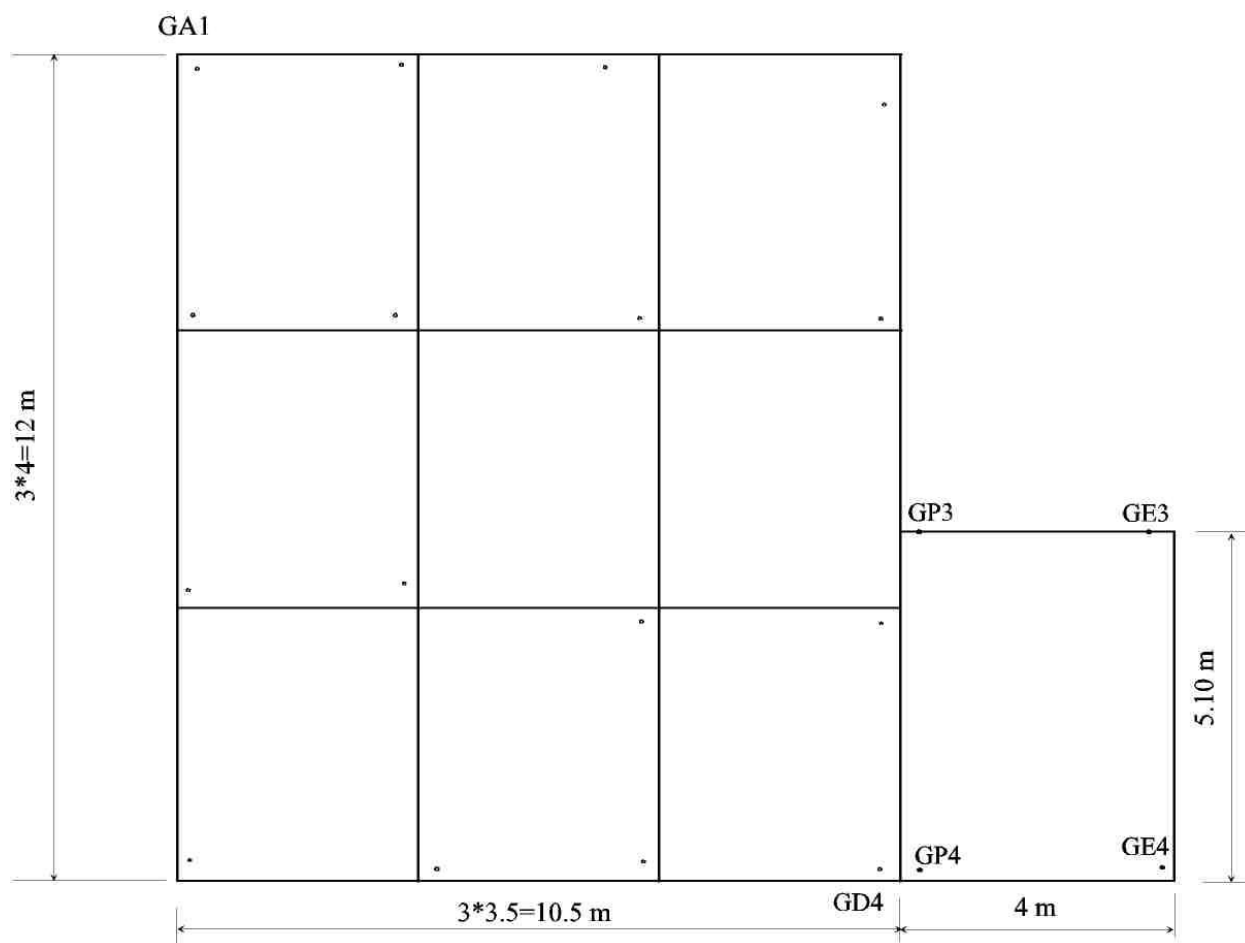
8.2. Спецификација на акцелерометрите

инструмент	EQResponder120 високо сензитивен акцелерометар (4 инструменти)
Тип	3 x uni-axial MEMs servo silicon accelerometers
Ранг	± 4g (vertical axis 1 g offset)
Динамички ранг	128 dB 0.1-20 Hz 120 dB 0.1-100 Hz
Дозволена грешка	< ±0.02% во однос на опсегот на работната температура
Линеарност	< ±0.1%
Здобиена грешка	< ±0.08 % во однос на опсегот на работната температура
А/Д конверзија	
Sampling	Zero skew autonomous sampling
	1ppm time-base (0-60°C)
Anti-Alias	1-pole RC filter (fc = 10kHz)
Влез	3 канали
Излез	50Hz, 100Hz, 200Hz.
А/Д тип	24-bit Σ-Δ A/D

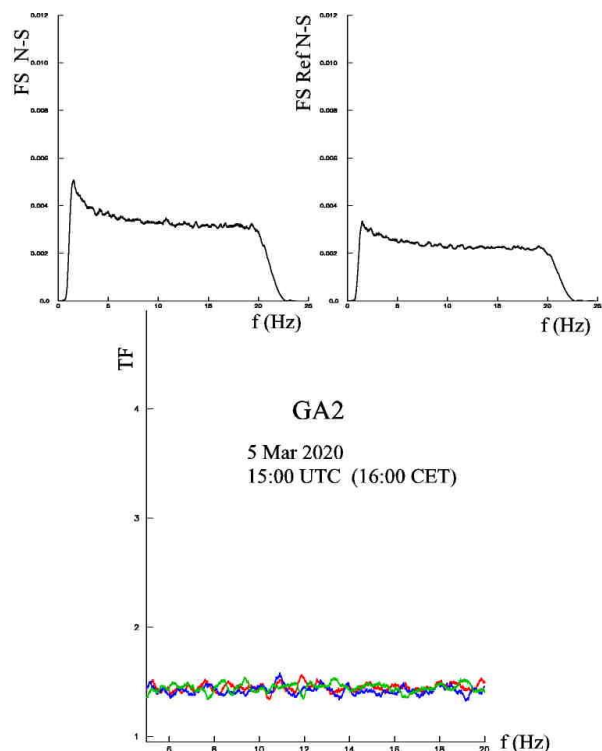
Интегрална не линеарност	< 0.0004% (full range)
Резолуција	31 бит
SNR	130 dB (200Hz) 133dB (100Hz) 136dB (50Hz)
Големина	
Димензии	100 x 80 x 90 mm
Тежина	2.5 kg
Процесирање на сигнали	
Филтрирање	FIR digital anti-alias filter/decimator, Linear phase
Ширина на опсегот за мерење	DC to 20, 40 or 80Hz
Снимен динамички опсег	130dB (80 Hz BW), 133dB (40 Hz BW), 136dB (20 Hz BW)
Комуникација	
Тип	LAN, 3G Cellular modem, WiFi. SSL/SSH encryption
Протокол	TCP-IP, PPP
Услуги	SSL-HTTP web server, FTP, Telnet, SSH, SFTP, RSYNC, SEEDlink. Email/FTP/SFTP transfer-on-event
Активирање	
Тип	STA/LTA <AND> or <OR> absolute level detection. Remote manual trigger from web interface. Remote trigger transmission/reception to/from multiple array management systems
Опции за филтрирање	0.1, 1.0 Hz high - pass. 5.0, 10.0 Hz low pass. 0.1-5.0, 0.1-10.0, 1.0-5.0, 1.0-10.0 Hz band pass
STA/LTA	Independent trigger and dettrigger thresholds on each channel with selectable <AND> or <OR> Thresholds adjustable from 1.1:1 to 200:1. LTA lock-on-trigger for 5–60 seconds. 0.3 to 500 s term lengths
Absolute level	Independent thresholds on each channel, selectable <AND> or <OR> triggering on each channel
Должина пред	10 to 120 seconds in 1-second steps
Должина потоа	10 to 120 seconds in 1-second steps
Зачувување на податоците	
Формат	MiniSEED (Steim 2 compression), ASCII (gzip or uncompressed)
Тип	Flash disk, unique record file names indicating time and unit, PGA, and trigger duration
Време	32 GB Flash disc: Triggered / Continuous data >80 days compressed, SEEDLink Ring Buffer >200 days
Време	
Тип	Синхронизиран со UTC. Internal GPS, NTP network timing, IEEE1588v2 (PTP), backup real-time clock
Точност	Better than 1µs of UTC with GPS lock. 5ms NTP timing (typical). 50ppm with backup real-time clock
Моќност	
Директно снабдување	10.5 – 18.0V DC, 2.6 W typical, 3.6 W max
Батерија/UPS	Supplied as option, 5.8 Ah 24 h. Includes plug-pack 230 VAC – 12 VDC charger

Кориснички интерфејс	
Тип	Web browser, platform independent. Windows / Mac / Linux
Карактеристики	Parameter configuration, raw data access, live data display
Околина	
Температурен опсег	-10 to +60°C standard, non-condensing
Монтирање	Посебна монтажна плоча со прилагодување на ниво, вклучува заштитен капак
Гаранција	
Стандард	1 година
Продолжено	По барање, до 6 дополнителни години

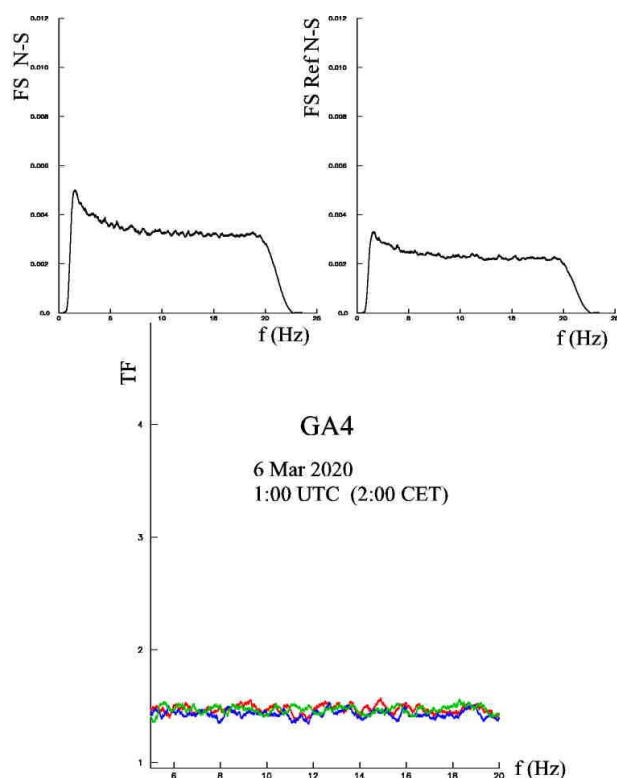
ПРИЛОГ 1- ДЕЛ ОД ТРАНСФЕР ФУНКЦИИТЕ И ФУРИЕВИТЕ СПЕКТРИ НА ПРИЗЕМЈЕТО



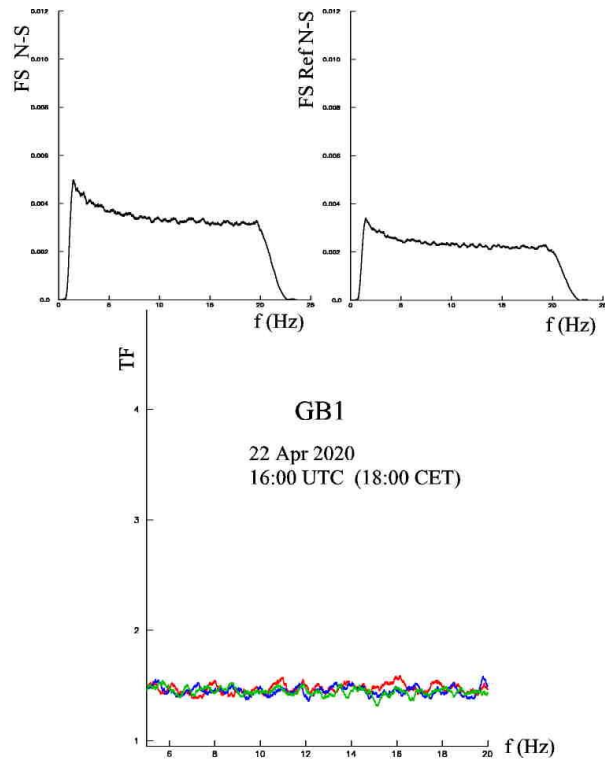
Слика 1. План на приземјето. Дадена е локацијата на инструментите. Пресеците на правите линии се проекции на вертикалната оска на колоните на приземјето



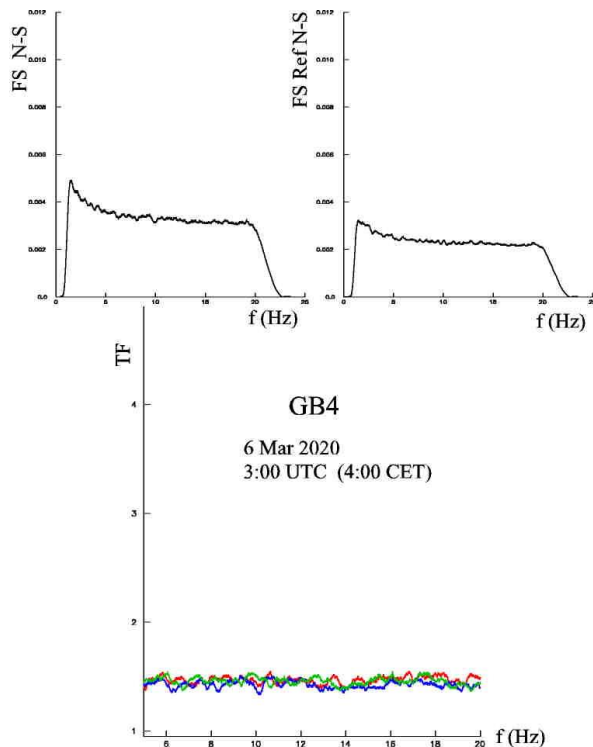
Слика 2. Фуријеви амплитуди кај GA2 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GA2 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



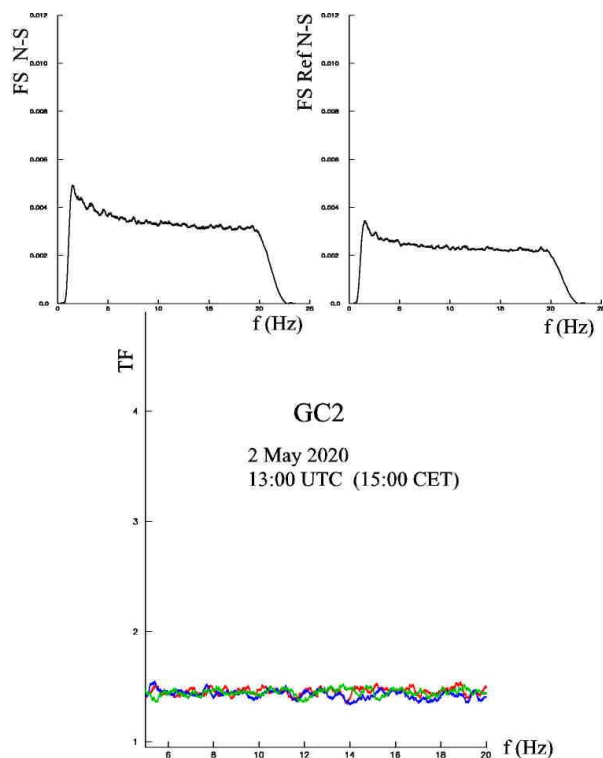
Слика 3. Фуријеви амплитуди кај GA4 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GA4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



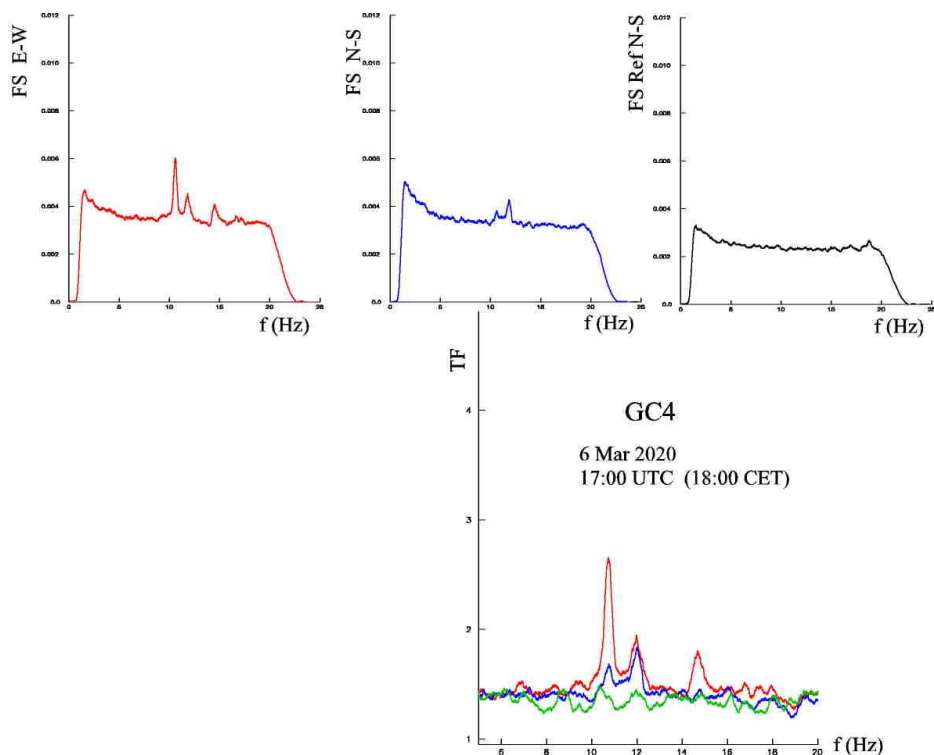
Слика 4. Фуријеви амплитуди кај GB1 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GB1 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



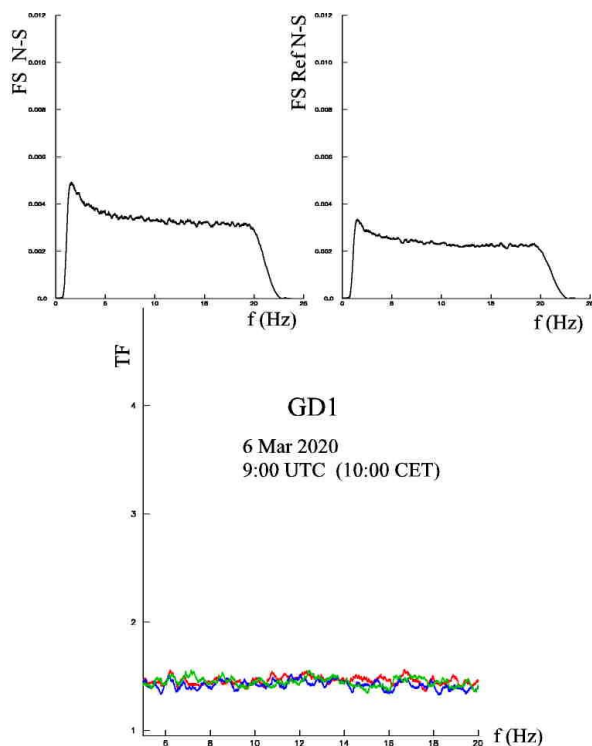
Слика 5. Фуријеви амплитуди кај GB4 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GB4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



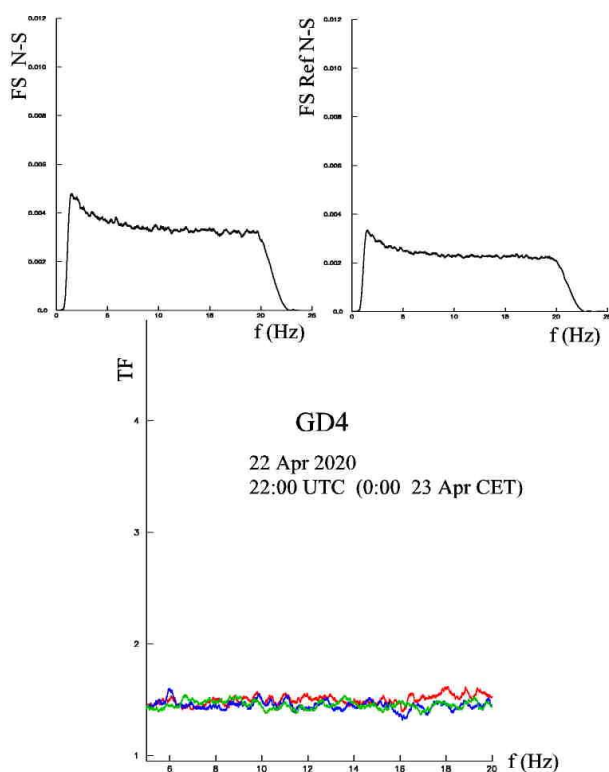
Слика 6. Фуријеви амплитуди кај GC2 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GC2 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



Слика 7. Фуријеви амплитуди кај GC4 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GC4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

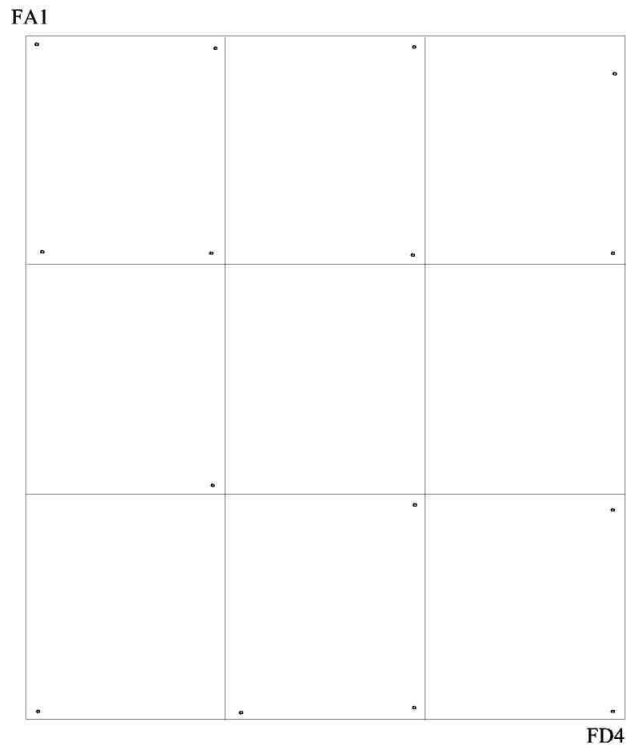


Слика 8. Фуријеви амплитуди кај GD1 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GD1 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

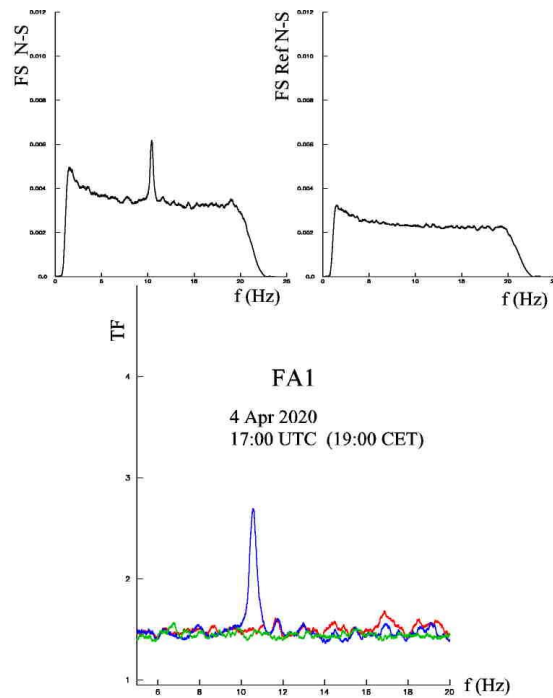


Слика 9. Фуријеви амплитуди кај GD4 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата GD4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

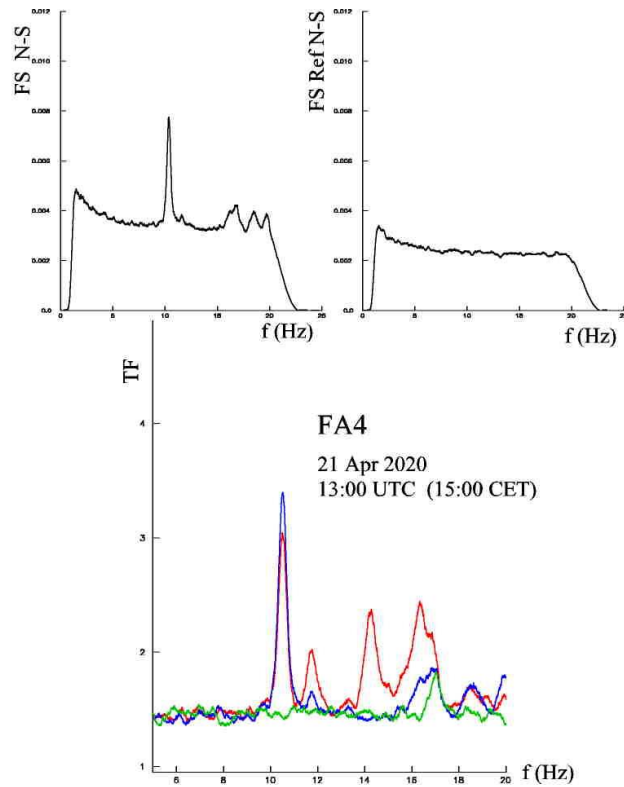
ПРИЛОГ 2- ДЕЛ ОД ТРАНСФЕР ФУНКЦИИТЕ И ФУРИЕВИТЕ СПЕКТРИ НА ПРВИОТ КАТ



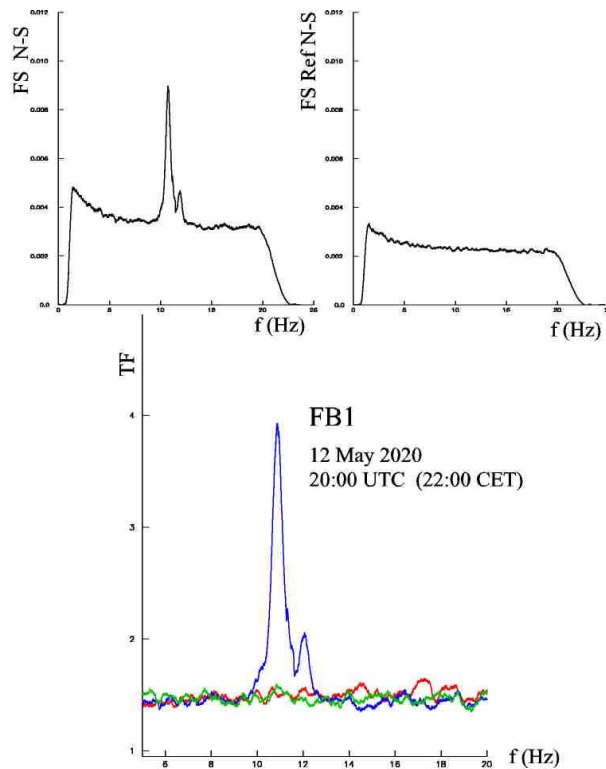
Слика 10. План на првиот кат. Дадена е локацијата на инструментите. Пресеците на правите линии се проекции на вертикалната оска на колоните на првиот кат



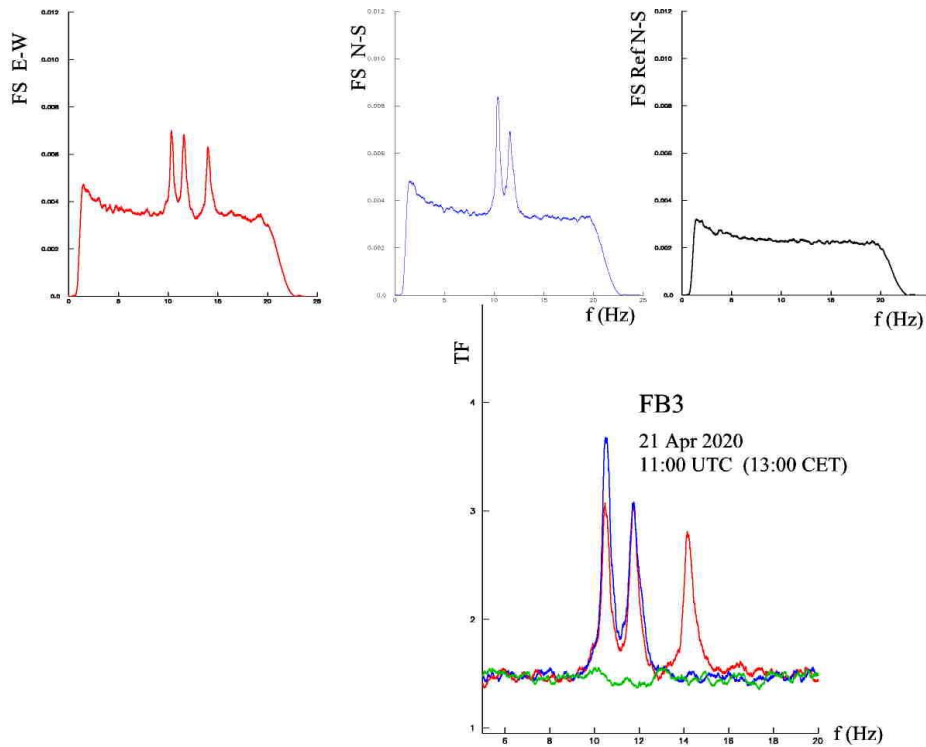
Слика 11. Фуријеви амплитуди кај FA1 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FA1 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



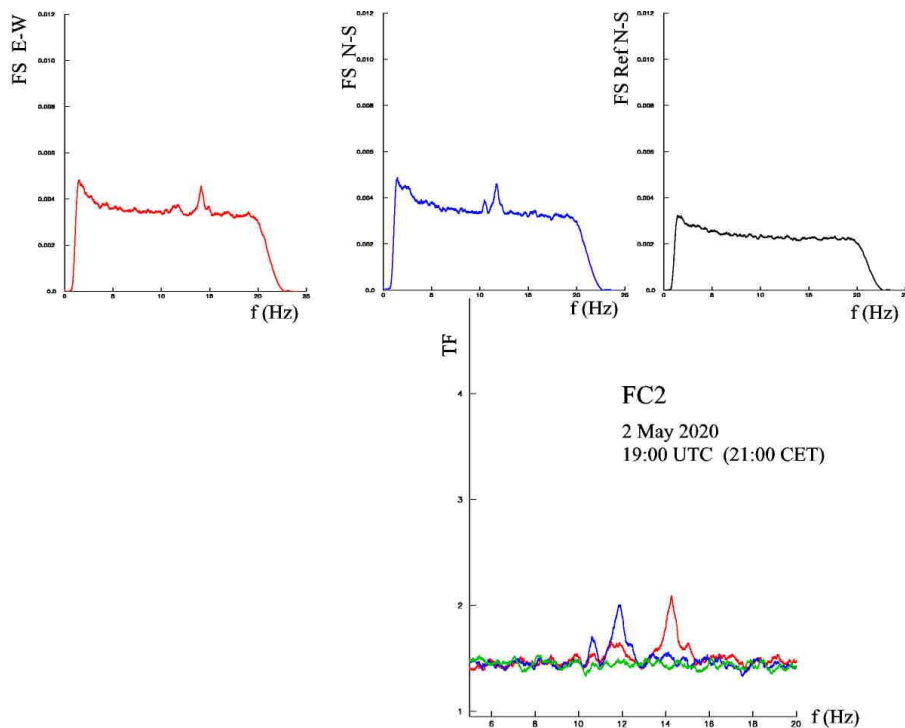
Слика 12. Фуријеви амплитуди кај FA4 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FA4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



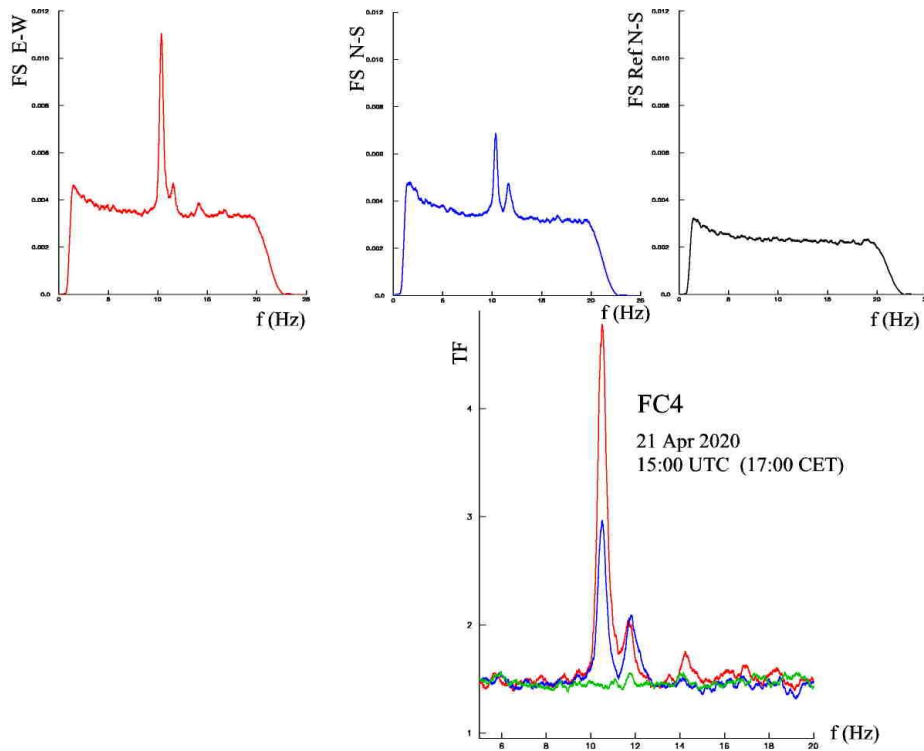
Слика 13. Фуријеви амплитуди кај FB1 во правец С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FB1 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



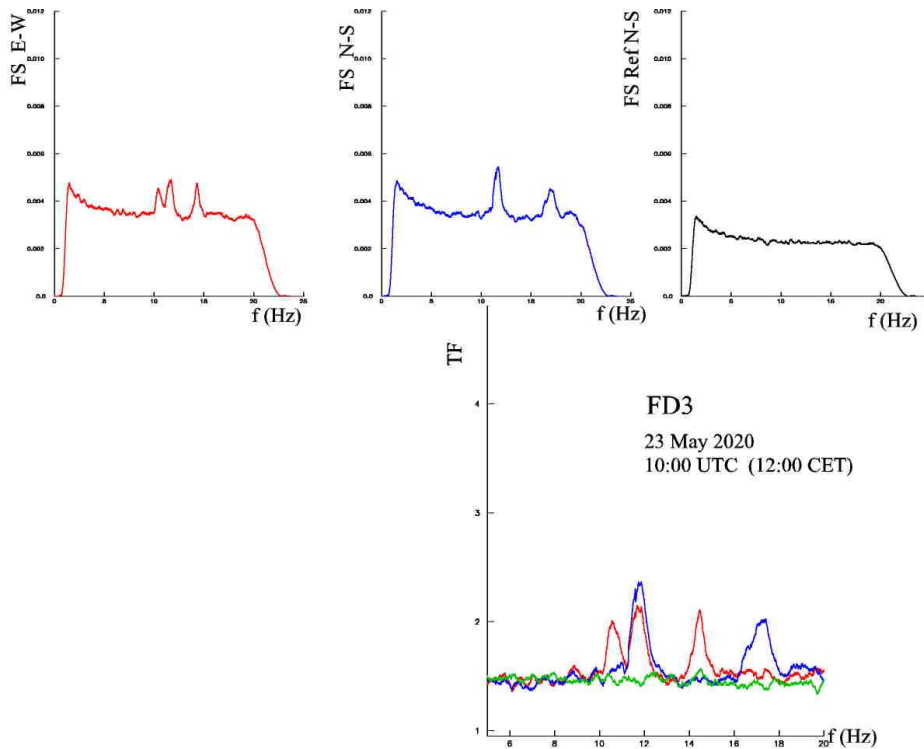
Слика 14. Фуријеви амплитуди кај FB3 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FB3 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



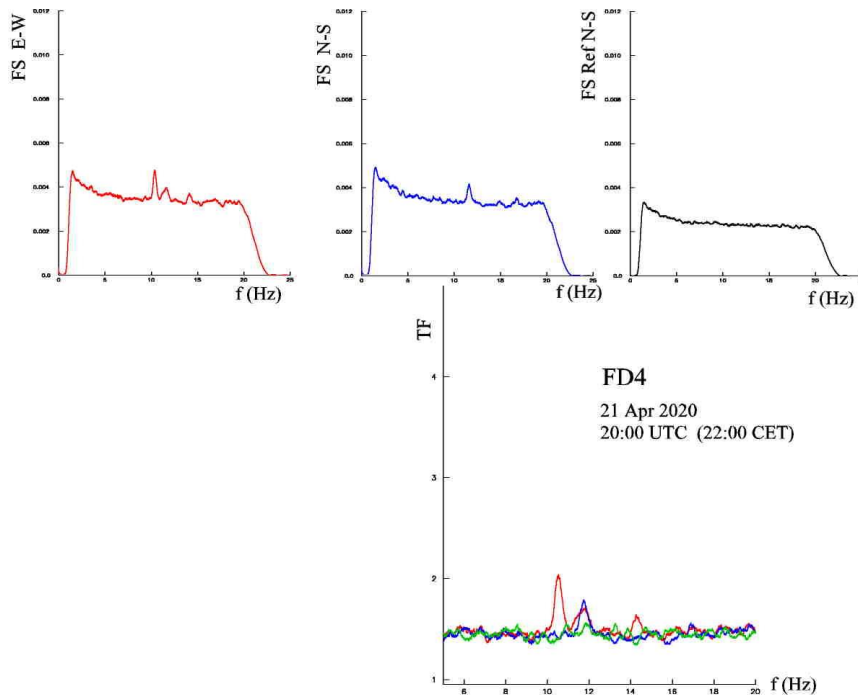
Слика 15. Фуријеви амплитуди кај FC2 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FC2 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



Слика 16. Фуриеви амплитуди кај FC4 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FC4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

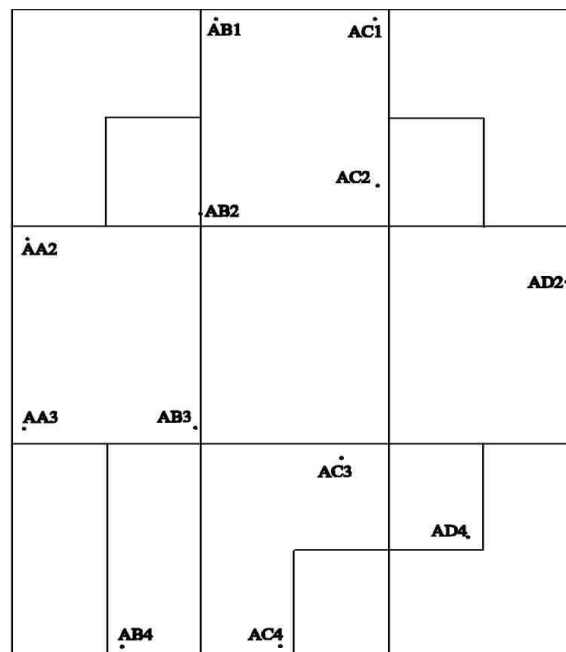


Слика 17. Фуриеви амплитуди кај FD3 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FD3 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

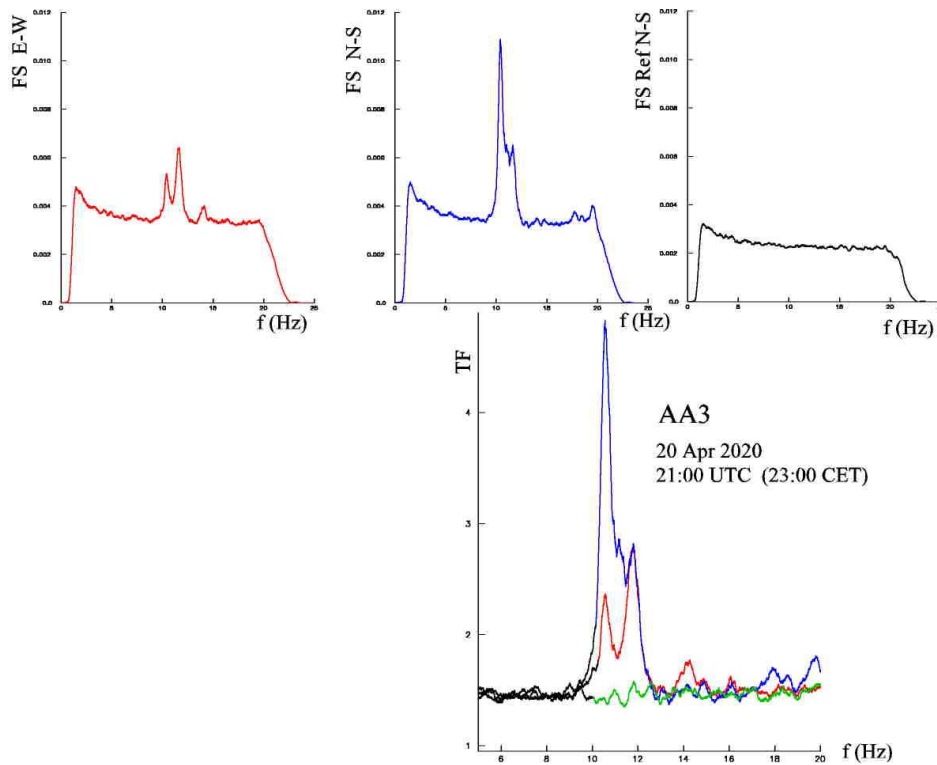


Слика 18. Фуриеви амплитуди кај FD4 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата FD4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

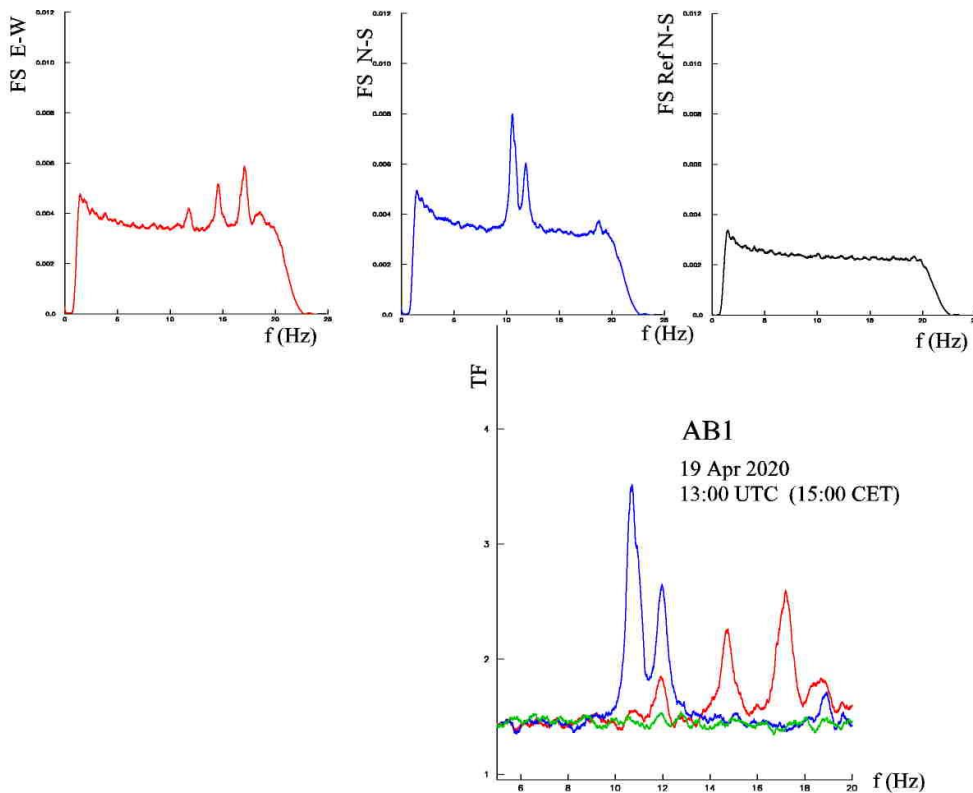
ПРИЛОГ 3- ДЕЛ ОД ТРАНСФЕР ФУНКЦИИТЕ И ФУРИЕВИТЕ СПЕКТРИ НА ПОТКРОВЈЕТО



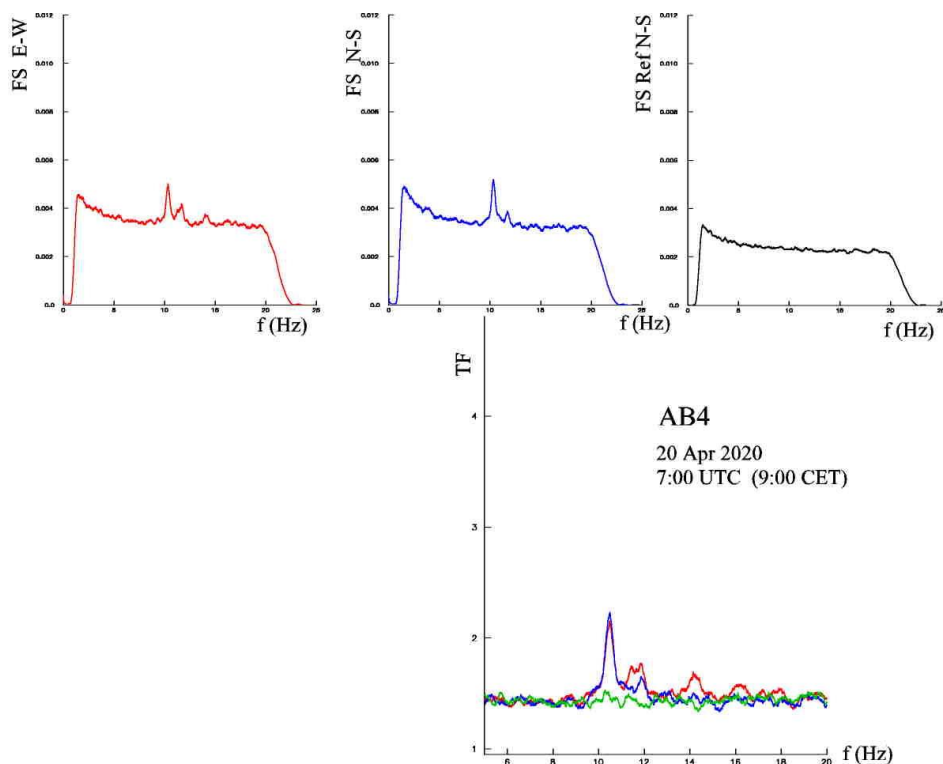
Слика 19. План на поткровјето. Дадена е локацијата на инструментите. Пресеците на правите линии се проекции на вертикалната оска на колоните на поткровјето



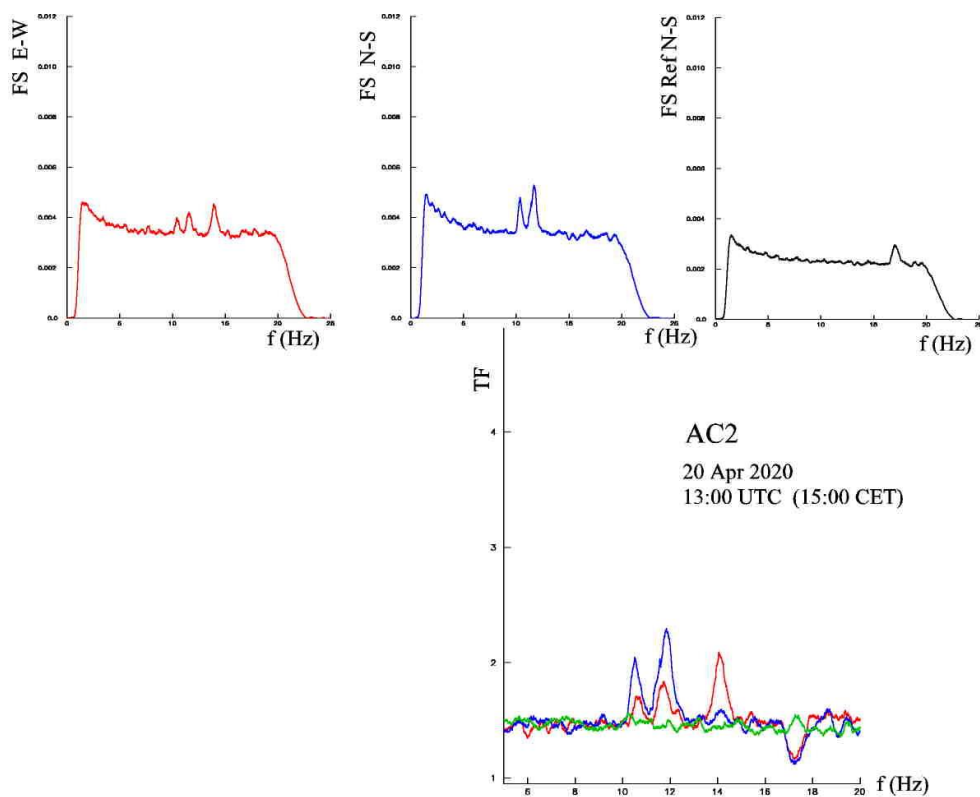
Слика 20. Фуриеви амплитуди кај АА3 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата АА3 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



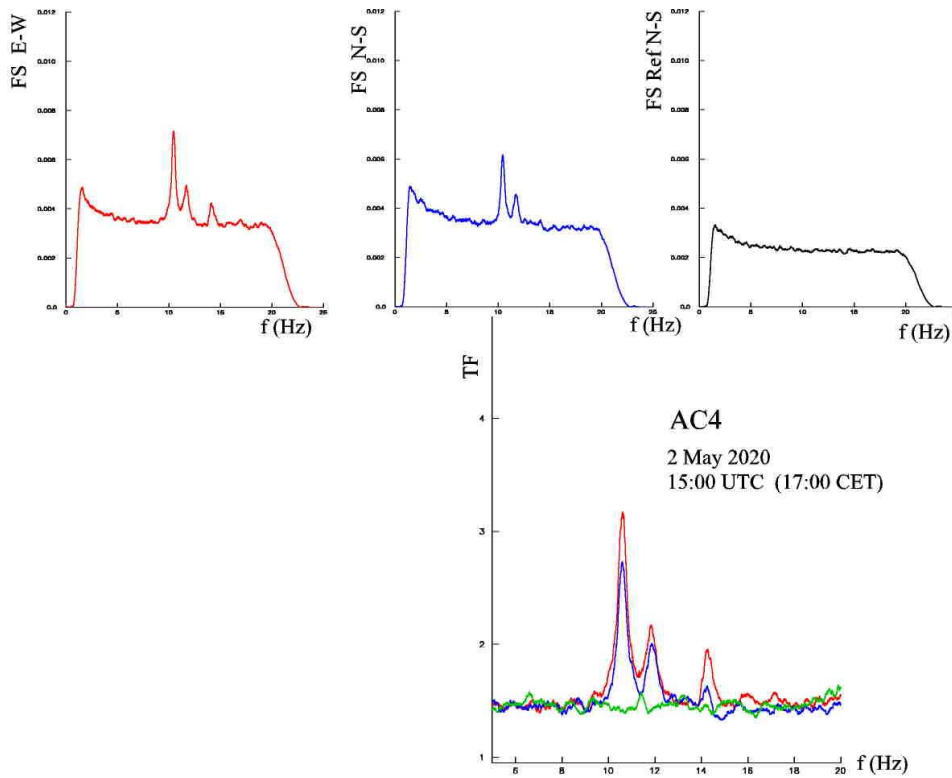
Слика 21. Фуриеви амплитуди кај АВ1 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата АВ1 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



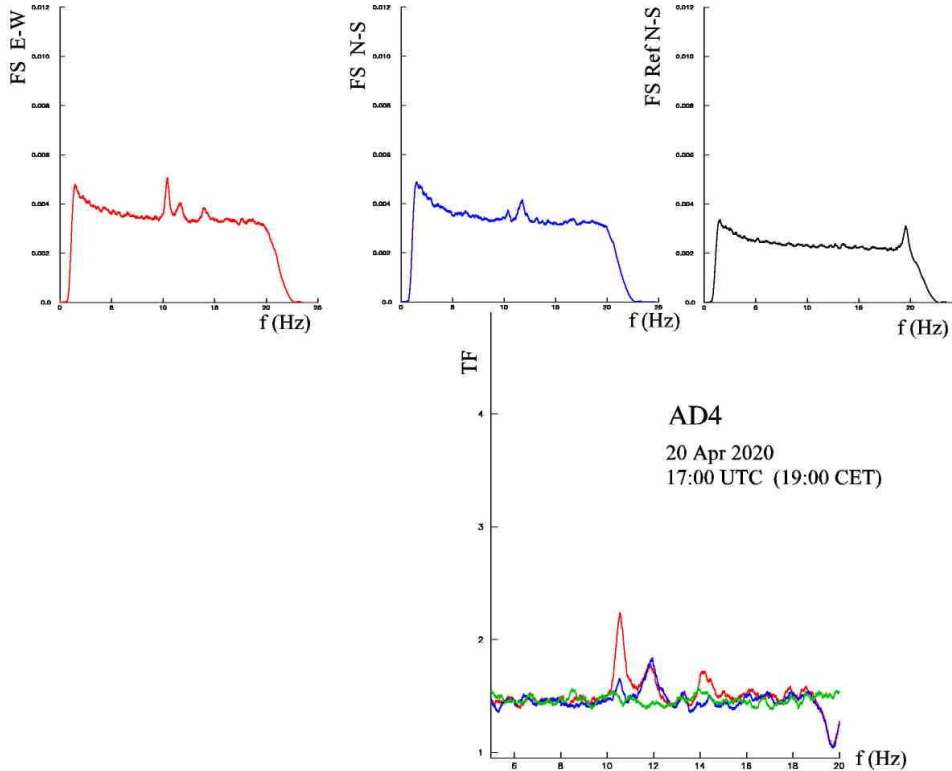
Слика 22. Фуријеви амплитуди кај АВ4 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата АВ4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



Слика 23. Фуријеви амплитуди кај АС2 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата АС2 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



Слика 24. Фуријеви амплитуди кај АС4 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата АС4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец



Слика 25. Фуријеви амплитуди кај АD4 во правец И-З, С-Ј и кај референтната точка во правец С-Ј (горе) и Трансфер функција кај станицата АD4 (долу), црвено – во правец И-З, сино – во правец С-Ј и зелено – во вертикален правец

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- Anand S. Arya. (2006). Rapid Visual Screening of RCC Buildings. In *GOI - UNDP Disaster Risk Management Programme*.
- Boore, D. M. (1989). The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters. *Tectonophysics*. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90200-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90200-X)
- Chun, Y., Yang, J., Chang, K., & Lee, L. (2000). Approximate Estimations of Natural Periods for Apartment Buildings With Shear-Wall Dominant Systems. *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No.*, 1–7.
- Crawford, R., & Ward, H. S. (1964). Determination of the natural periods of buildings. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Erwin Kreyszig. (2011). Advanced Engineering Mathematics 10th Edition. *John Wiley & Sons, INC*. <https://doi.org/10.2307/3612523>
- Foutch, D. A., Luco, J. E., Trifunac, M. D., & Udwadia, F. E. (1975). *Full scale, three-dimensional tests of structural deformations during forced excitation of a nine-story reinforced concrete building*.
- Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y., & Mulargia, F. (1997). Earthquakes cannot be predicted. In *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
- Gicev, V., & Trifunac, M. D. (2007). Energy and power of nonlinear waves in a seven-story reinforced concrete building. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, 44(1), 305–323.
- Gicev, V., Trifunac, M. D., Todorovska, M. I., Kocaleva, M., Stojanova, A., & Kokalanov, V. (2020). *Ambient Vibration Measurements in an Irregular Building*. 1–22.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1998). Period formulas for concrete shear wall buildings. *Journal of Structural Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:4\(426\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:4(426))

- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Instruments, C. S. (2019). *EQResponder: New generation plug-and-play accelerometer from CSI Technical Manual*.
- Ivanovic, S. S., & Trifunac, M. D. (1995). *Ambient vibration surveys of full-scale structures using personal computers-Example for Kaprielian Hall*.
- Ivanović, S. S., Trifunac, M. D., Novikova, E. I., Gladkov, A. A., & Todorovska, M. I. (2000). Ambient vibration tests of a seven-story reinforced concrete building in Van Nuys, California, damaged by the 1994 northridge earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00025-7)
- Ivanovic, S. S., Trifunac, M. D., & Todorovska, M. D. (2001). On identification of Damage in Structures Via Wave Travel Times. In *Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures*. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0696-5_31
- Ivanovic, Sanja, Trifunac, M., & Todorovska, M. (2000). Ambient vibration tests of structures-a review. *ISET Journal of Earthquake Technology*.
- Ivanovic, SS, Trifunac, M., Novikova, E., Gladkov, A., & Todorovska, M. (1999). *Instrumented 7-storey reinforced concrete building in Van Nuys, California: Ambient Vibration survey following the damage from the 1994 Northridge earthquake*. 92.
- Kanamori, H. (1978). Quantification of Earthquakes. In *Nature*. <https://doi.org/10.1038/271411a0>
- Kanamori, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90273-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1)
- Kocaleva, M., & Gicev, V. (2020). Eigenvalues and eigenvectors of a building model as a one-dimensional element. *Balkan Journal of Applied Mathematics and Informatics*, 3(1), 43–54.
- Lee, L. H., Chang, K. K., & Chun, Y. S. (2000). Experimental formula for the fundamental period of RC buildings with shear-wall dominant systems.

Structural Design of Tall Buildings. [https://doi.org/10.1002/1099-1794\(200009\)9:4<295::AID-TAL153>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1794(200009)9:4<295::AID-TAL153>3.0.CO;2-9)

Manohar, A. K., Sengupta, K., G, T., & Gogoi, I. (2012). Earthquake Vulnerability Assessment of Buildings in Guwahati. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 05(03), 618–623.

Modified Mercalli intensity scale of 1931. (1931). *Bulletin of the Seismological Society of America*.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (1997). Numerical Recipes in Fortran 77: the art of scientific computing. In *Numerical Recipes in Fortran 77*.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2010). Numerical Recipes in Fortran 90. In *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*. <https://doi.org/10.1145/1874391.187410>

Rahimian, M., Marzoi, A., Momayez, A., & Jokar, N. (2004). A simplified equation to approximate natural period of layered ground on the elastic bedrock. *13 Th World Conference on Earthquake Engineering*, 1100.

Rahmani, M., & Todorovska, M. I. (2014). 1D System identification of a 54-story steel frame building by seismic interferometry. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe.2364>

Scholz, C. H. (1998). Earthquakes and friction laws. In *Nature*. <https://doi.org/10.1038/34097>

Trifunac, M. D. (1970a). Ambient vibration test of a 39 story steel frame building. *Report EERL 70-02*.

Trifunac, M. D. (1970b). Wind and microtremors induced vibrations of a 22-story steel frame building. *Report EERL 70-011*.

Trifunac, M. D., Ivanović, S. S., Novikova, E. I., & Gladkov, A. A. (1999). Experimental evidence for flexibility of a building foundation supported by concrete friction piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 169–187.

- Trifunac, M. D., Ivanović, S. S., & Todorovska, M. I. (1999). Seven story reinforced concrete building in Van Nuys, California: strong motion data recorded between 7 Feb. 1971 and 9 Dec., 1994, and description of damage following Northridge 17 Jan. 1994 earthquake. *Report CE 99-02*.
- Trifunac, M. D., Ivanović, S. S., & Todorovska, M. I. (2001a). Apparent periods of a building. I: Fourier analysis. *Journal of Structural Engineering*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:5\(517\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:5(517))
- Trifunac, M. D., Ivanović, S. S., & Todorovska, M. I. (2001b). Apparent periods of a building. II: Time-frequency analysis. *Journal of Structural Engineering*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:5\(527\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:5(527))
- Trifunac, M. D., & Todorovska, M. I. (1999). Recording and interpreting earthquake response of full-scale structures. *NATO Workshop on Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures*.
- Trifunac, M. D., & Todorovska, M. I. (2001). Evolution of accelerographs, data processing, strong motion arrays and amplitude and spatial resolution in recording strong earthquake motion. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00013-6)
- Udwadia, F. E., & Trifunac, M. D. (1973). Ambient vibration test of full-scale structure. *5th World Conference on Earthquake Eng.*
- Velani, P. D. ;, & Ramancharla, P. K. (2017a). New empirical formula for fundamental period of tall buildings in india by ambient vibration test. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Velani, P. D. ;, & Ramancharla, P. K. (2017b). New empirical formula for fundamental period of tall buildings in India by ambient vibration test. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Yamin, L. E., Hurtado, A. I., Barbat, A., Bernal, G., & Cardona, O. (2012). Earthquake Vulnerability Assessment of Buildings for Catastrophic Risk Analysis in Urban Areas. *15 WCEE, Lisboa 2012*, 1–10.