



Получена: 27.02.2017 г.

Приета: 17.07.2017 г.

ИНЖЕНЕРЕН АНАЛИЗ НА ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИЗИРАЩИ ЧЕСТОТНОТО И ЕНЕРГИЙНОТО СЪДЪРЖАНИЕ НА СЕЙСМИЧНИ СИГНАЛИ НА БАЗА НА РЕАЛНИ РЕГИСТРАЦИИ

М. Жиков¹, Г. Моллова², М. Кутева-Генчева³

Ключови думи: бърза трансформация на Фурие, Matlab, акселерограми, входяща енергия

РЕЗЮМЕ

Представена е процедура за изчисляване на инженерно-сейсмологични параметри, характеризиращи честотното и енергийното съдържание на записите на сейсмичните сигнали и съответно разработена в работна среда на Matlab. Процедурата е приложена върху набор акселерограми, селектирани съгласно основните изисквания за избор на реални акселерограми за анализ на строителни конструкции, дефинирани в Еврокод 8. Анализирани са три извадки, състоящи се от по седем еднокомпонентни записани акселерограми, оценени са пикови и интегрални характеристики на разглежданите сейсмични сигнали. Представени са изчислителните процедури, придружени от сравнителни графики и таблици. Достоверността на разработения модул е потвърдена чрез сравнение на получените резултати със съответните резултати, получени при обработка на същите набори сейсмични сигнали с утвърден в практиката софтуерен продукт.

¹ Мариян Жиков, инж., кат. „Автоматизация на инженерния труд”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zhikov_fce@uacg.bg

² Гергана Моллова, проф. д-р инж., кат. „Автоматизация на инженерния труд”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: mollova_fce@uacg.bg

³ Михаела Кутева-Генчева, доц. д-р инж., кат. „Автоматизация на инженерния труд”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kouteva_fce@uacg.bg

1. Въведение

Съвременното развитие на компютърните технологии през последните десетилетия предоставя на инженерите възможност за прилагането на множество разнообразни методи за сеизмичен анализ на строителни конструкции. Общоевропейската нормативна база за дефиниране на сеизмичното въздействие върху строителни конструкции (EN 1998-1:2004 т. 3.2.3) дава възможност за алтернативно представяне на движението на земната основа, описано със съответни акселерограми, велосиграми или сеизмограми. В Еврокод 8 се допуска използване на записани акселерограми, при условие, че използваните сигнали са адекватно квалифицирани по отношение на сеизмогенните характеристики на сеизмичните източници и условията на земната основа на конкретната строителна площадка, като съответните стойности се мащабират към референтната стойност на земното ускорение, отчитайки типа земна основа [1]. Основна препоръка е използването на записани акселерограми за моделиране на пространствен модел на сеизмичното въздействие. Записани акселерограми се използват при провеждането на нелинеен динамичен анализ на строителни конструкции – този анализ е изключително важен при оценка на поведението на сгради със специално предназначение (атомни електроцентрали, високи сгради, язовири), реагиране на конструкциите при наличие на демпферни устройства, сеизмична изолация и др. Надеждната оценка на реагирането на строителните конструкции, подложени на сеизмично натоварване, моделирано с реално записани акселерограми, изисква внимателен подбор на записите, така че характеристиките на избраните записи да съответстват на избраната площадка.

2. Избор на реални акселерограми за целите на нелинеен динамичен анализ на конструкции

2.1. Дефиниране на сеизмичното въздействие съгласно Еврокод 8 [1]

В Еврокод 8 [1] е посочено, че за целите на динамичния анализ на строителни конструкции при моделиране на сеизмичното въздействие с акселерограми е необходимо да използваме най-малко три (еднокомпонентни) акселерограми, които да съответстват на ясно дефинирани критерии по отношение на сеизмичната опасност на строителната площадка, конкретните инженерно-геоложки условия и съответните нормативни препоръки за честотно съдържание на сигнала. Земетръсното движение в дадена точка на повърхността се описва чрез еластичен спектър на реагиране за ускорението на земната основа [1]. Хоризонталното сеизмично въздействие се описва с две ортогонални компоненти, приети като независими и представени чрез един и същ спектър на реагиране $S_e(T)$, дефиниран както следва:

$$0 \leq T \leq T_B, \quad S_e(T) = a_g S \left[1 + \frac{T}{T_B} (2,5\eta - 1) \right]; \quad (1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C, \quad S_e(T) = a_g S (2,5\eta); \quad (2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D, \quad S_e(T) = a_g S (2,5\eta) \left(\frac{T_C}{T} \right); \quad (3)$$

$$T_D \leq T \leq T_E \quad S_e(T) = a_g S \left(2,5 \eta \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \right), \quad (4)$$

където S е почвен коефициент, a_g е изчислителното ускорение на земна основа тип A , T е период на свободни трептения на линейна система с една степен на свобода, а η е корекционен коефициент за затихване с референтна стойност $\eta = 1$ при 5% критично вискозно затихване. Параметрите T_B и T_C определят долната и горната граница за периода в участъка с постоянно спектрално ускорение (вж. [1]), стойността на T_D задава началния период на участъка от спектъра с постоянно преместване, а T_E определя края на разглеждания период (обикновено се приема 4 s).

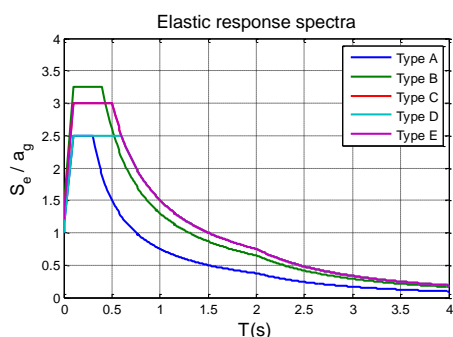
Съгласно Националното приложение към Еврокод 8 [2], за територията на България, в зависимост от географското местоположение на дадена строителна площадка, хоризонталното сеизмично въздействие може да бъде дефинирано чрез два вида спектрални криви, които са описани накратко в табл. 1 и 2. Графично спектрите на реагиране от вид 1 за хоризонтални компоненти (плитки корови земетресения) са представени на фиг. 1. За част от Северна България, в допълнение към спектрите, описани в табл. 1 се прилагат и спектри на реагиране вид 3, характерни за огнище Вранча (вж. табл. 2, фиг. 2).

Таблица 1. Стойности на параметрите, описващи препоръчителните еластични спектри на реагиране, вид 1

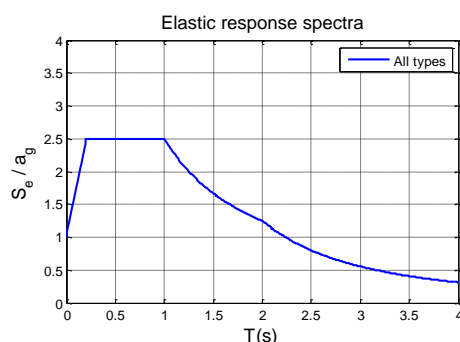
Тип земна основа	S	T_B, s	T_C, s	T_D, s
A	1,00	0,10	0,3	2,0
B	1,30	0,10	0,4	2,0
C	1,20	0,10	0,5	2,0
D	1,00	0,10	0,6	2,0
E	1,20	0,10	0,5	2,0

Таблица 2. Стойности на параметрите, описващи препоръчителните еластични спектри на реагиране, вид 3

Тип земна основа	S	T_B, s	T_C, s	T_D, s
Всички	1,00	0,20	1,00	2,0



Фиг. 1. Препоръчителни еластични спектри на реагиране вид 1 за земна основа типове А до Е (5% затихване)



Фиг. 2. Препоръчителен еластичен спектър на реагиране вид 3 за всички типове земна основа (5% затихване)

2.2. Критерии, използвани за избора на акселерограми

За целите на изследването са селектирани три извадки, състоящи се от по 7 записа с помощта на специализирания програмен продукт REXEL (вж. [3]), който използва записи от базата данни ESD (European Strong-motion Database). Референтният спектър на реагиране е зададен съобразно изискванията на действащите в България нормативни документи – Европейската система за проектиране на строителни конструкции, в частност Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия [1], при отчитане препоръките на Националното приложение към Еврокод 8 [2]. В случая търсенето на подходящи записи от базата данни ESD е извършено при референтно ускорение на земната основа $a_g = 0,23$ за земна основа типове А, В и С. Като критерии при търсенето в REXEL са посочени възможни стойности за моментния магнитуд M_w ($5,5 \leq M_w \leq 7$) и епицентрално разстояние R ($0 \leq R \leq 50$ km) при зададено 10%-но отклонение спрямо референтния еластичен спектър на реагиране (вид 1) в периода от $0,15 \leq T \leq 2,5$ s. Резултатите от търсенето на записи и получените възможни комбинации са обобщени в табл. 3.

Таблица 3. Резултати от търсенето на записи в REXEL

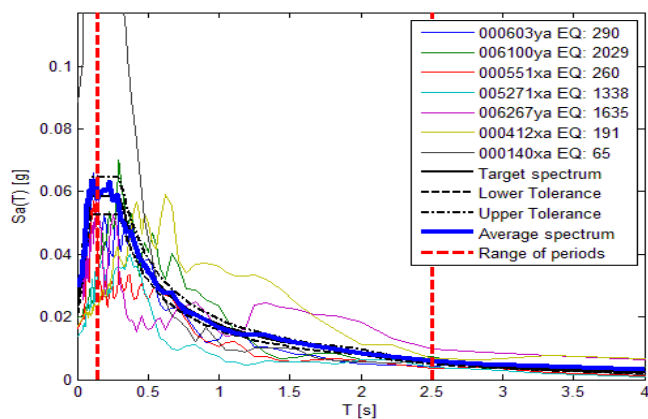
Тип земна основа	Събития	Записи	Комбинации
А	39	2×106	54
В	54	2×130	12
С	37	2×67	3

Избран е по един набор от акселерограми за всеки разглеждан тип земна основа (извадка номер 1 за земна основа тип А, вж. табл. 4, извадка номер 2 за земна основа тип В, вж. табл. 5 и извадка номер 3 за земна основа тип С, вж. табл. 6), състоящ се от седем записа с хоризонтална компонента от базата данни ESD. Спектрите на реагиране за извадките са представени на фиг. 3, фиг. 4 и фиг. 5, като са показани също референтните спектри, границите на 10% толеранс за спектрите и усреднените спектрални криви.

Таблица 4. Параметри на записите от извадка номер 1

/Забележка: участва по 1 хоризонтална компонента от всеки запис – по X или Y/

Номер запис	Име събитие	Дата	M_w	R , km	Фок. дълб., km	Станция	Тип земна основа
290	Umbria Marche	9/26/1997	5,7	35	7	ST225	А
2029	Kozani	5/13/1995	6,5	50	14	ST1315	А
260	Tithorea	11/18/1992	5,9	37	15	ST212	А
1338	Mt. Vatnafjoll	5/25/1987	6,0	42	8	ST2483	А
1635	South Iceland	6/17/2000	6,5	46	15	ST2565	А
191	Golbasi	6/6/1986	5,8	34	11	ST161	А
65	Friuli (aftershock)	9/15/1976	6,0	32	8	ST36	А

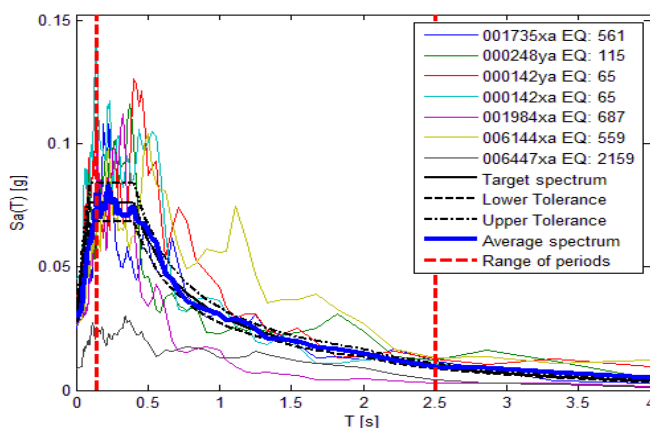


Фиг. 3. Спектри на реагиране на записите от извадка номер 1 (номерацията на записите е дадена в първа колона на табл. 4)

Таблица 5. Параметри на записите от извадка номер 2

/Забележка: участва по 1 хоризонтална компонента от всеки запис – по X или Y/

Номер запис	Име събитие	Дата	M_w	R, km	Фок. дълб., km	Станция	Тип земна основа
561	Adana	06/27/1998	6,3	39	32	ST581	B
115	Valnerina	09/19/1979	5,8	37	4	ST85	B
65	Friuli (aftershock) 1	09/15/1976	6,0	41	5	ST14	B
65	Friuli (aftershock) 2	09/15/1976	6,0	41	5	ST14	B
687	Kefallinia island	1/23/1992	5,6	42	3	ST1353	B
559	Aigion	6/15/1995	6,5	42	10	ST1332	B
2159	Izmit (aftershock)	11/11/1999	5,6	36	8	ST3140	B

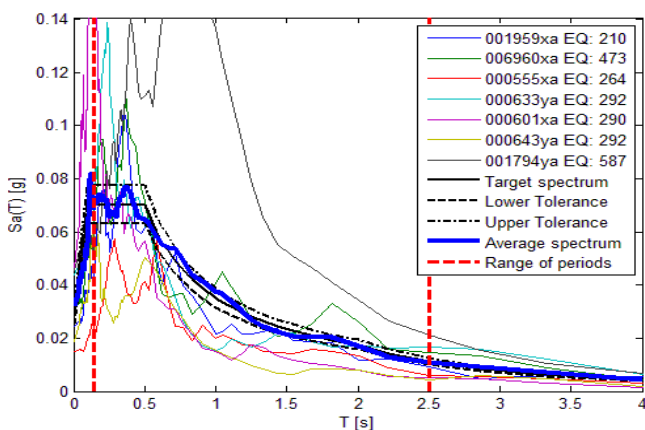


Фиг. 4. Спектри на реагиране на записите от извадка номер 2 (номерацията на записите е дадена в първа колона на табл. 5)

Таблица 6. Параметри на записите от извадка номер 3

/Забележка: участва по 1 хоризонтална компонента от всеки запис – по X или Y/

Номер запис	Име събитие	Дата	M_w	R, km	Фок. дълб. km	Станция	Тип земна основа
210	Kyllini	10/16/1988	5,9	49	4	ST214	C
473	Izmit (aftershock)	9/13/1999	5,8	27	14	ST3266	C
264	Kallithea	3/18/1993	5,8	41	50	ST10	C
292	U. Marche (aftershock) 1	10/14/1997	5,6	40	7	ST227	C
290	Umbria Marche	9/26/1997	5,7	27	7	ST224	C
292	U. Marche (aftershock) 2	10/14/1997	5,6	37	7	ST224	C
587	Cubuklu	4/20/1988	5,5	34	15	ST65	C



Фиг. 5. Спектри на реагиране на записите от извадка номер 3 (номерацията на записите е дадена в първа колона на табл. 6)

3. Инженерен анализ на избраните акселерограми

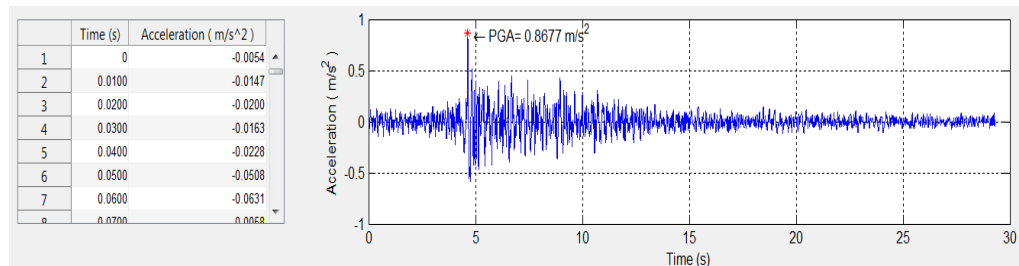
3.1. Пикови параметри – максимални стойности на ускорението, скоростта и преместването

Най-разпространените характеристики на движението на земната основа по време на земетресение са максималните амплитуди на акселерограмите, PGA, велосиграмите, PGV и сеизмограмите, PGD. Обикновено разполагаме с инструментален запис на един вид амплитуди и чрез интегриране или диференциране на записания сигнал получаваме дугите две характеристики. Акселерограмите показват относително по-високофреkwентно съдържание на сеизмичните сигнали, докато велосиграмите и сеизмограмите показват съответно относително по-ниски честоти на земното движение. Пиковите параметри – максимално ускорение, скорост и преместване на земната основа (PGA, PGV и PGD) се дефинират съгласно (5) като:

$$PGA = \max |a(t)| \quad PGV = \max |v(t)| \quad PGD = \max |d(t)|. \quad (5)$$

Максималното ускорение на земната основа, PGA, е често използван параметър в инженерната практика, който обикновено е свързан с нископериодните трептения на конструкциите. Това е удобен параметър с конкретна стойност, който дава възможност за една предварителна оценка на значимостта на записите, но не може да бъде ясна мярка за силата на въздействието върху сградите и съоръженията. Земните движения с високи пикови ускорения са обикновено, но не винаги, по-разрушителни от тези с по-малки максимални ускорения. PGA се контролира от високочестотното съдържание на движението на земната основа и не винаги носи съществена инженерна информация, тъй като записите могат да имат изолирани високоамплитудни пикове с малка продължителност. Освен с пиковите параметри, повредите в сградите са свързани и с други характеристики на земното движение – честотно съдържание, продължителност на сигнала и др. Максималната скорост, PGV, често се счита за по-подходящ параметър за корелация с повредите, тъй като е чувствителна към по-дългопериодни движения в сравнение с максималното ускорение. Правилната оценка на PGV е от значение за ясната ни представа за потенциала за повреди на строителни конструкции, които са по-чувствителни към динамично натоварване в междинен честотен обхват. В задачите на сеизмичното инженерство, PGV обикновено е резултат от цифрова обработка на сигналите. Максималното преместване, PGD, е най-добрият параметър за анализи и проектиране, базирани на оценка на премествания. PGD обикновено са свързани с по-нискочестотните компоненти на земното движение. Този параметър е много силно чувствителен към високочестотните филтри и точното му изчисляване често е доста трудно поради грешките в обработката на сигнала и дългопериодния шум. По тази причина PGD не винаги дава реалистична оценка на преместването на земната основа, за разлика от максималното ускорение, за което, практически, имаме природно физическо ограничение по отношение на честотите. Максималните премествания PGD са по-рядко използвани от другите две пикови характеристики PGA и PGV.

На фиг. 6 е представена акселерограмата за един от записите, включени в извадка 1 (запис Friuli (aftershock) 1976 – $PGA = 0,8677 \text{ m/s}^2$). Резултатите са получени чрез работения Matlab-базирани програмен модул (вж. [4] за общата блок схема на модула). Реализиран е удобен потребителски графичен интерфейс с използване на средата GUIDE на Matlab [5].



Фиг. 6. Извадка 1 – Запис Friuli (aftershock) 1976, Италия: акселерограма – числено и графично представяне

3.2. Параметри, характеризиращи честотното съдържание

Земетресенията предизвикват сложно натоварване в широк честотен диапазон върху строителните конструкции. Основни параметри, характеризиращи честотното съдържание са: (а) Фуриеров амплитуден спектър, (б) спектър на реагиране, (в) спектър на мощностите, (г) енергийни спектри и др.

3.2.1. Фуриеров амплитуден спектър (Fourier amplitude spectrum, FAS)

Амплитудният спектър на Фурие отразява много ясно честотното съдържание на земното движение като показва разпределението на амплитудата на движение по отношение на честотата. Силните земетресения пораждат повече нискочестотни движения, отколкото по-слабите земетресения. Преобразуването на акселерограмата $a(t)$ от времева в честотна област се дефинира от трансформацията на Фурие:

$$F(\omega) = \int_0^{tr} a(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (6)$$

където tr е продължителността на записа, $F(\omega)$ е комплексно число, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ е кръгова честота. Бързата трансформация на Фурие (*Fast Fourier Transform, FFT*) е алгоритъм за ускоряване на изчислителния процес на преобразуването (6), предложен от *Cooley & Tukey* [6]:

$$FFT = \sum_{m=0}^{N-1} a(t) e^{-i \frac{2\pi n m}{N}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, (N-1), \quad (7)$$

при който $N = 2^\gamma$, където γ е цяло число, а N е броят на еднаквите интервали Δt .

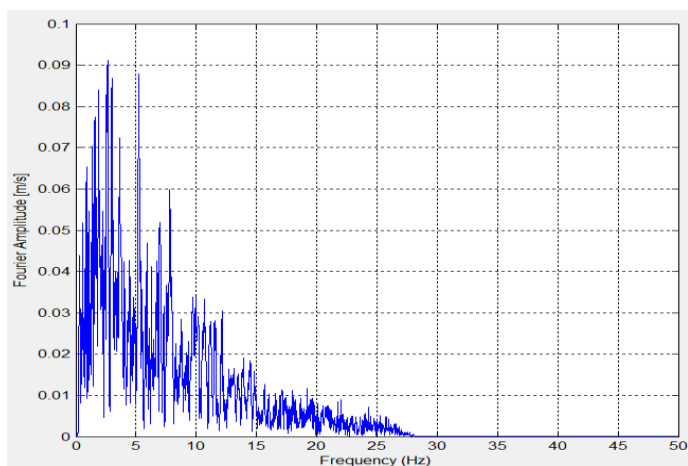
Фуриеровият амплитуден спектър (FAS) на акселерограмите от земетресения е най-често използван като директен метод за описание и оценка на честотното съдържание на силните земни движения. Чрез него се изучават зависимостите между различни параметри, описващи източника на земетресението, пътя на разпространение на вълните и условията на площадката. Амплитудите на този спектър се изчисляват като сума от квадратите на реалната и имагинерната част на $F(\omega)$:

$$FS(\omega) = |F(\omega)| = \sqrt{\left[\int_0^{tr} a(t) \sin \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^{tr} a(t) \cos \omega t dt \right]^2}. \quad (8)$$

Едностранин (single-sided) FAS за конкретен запис е представен графично на фиг. 7.

Програмният код за определяне на FAS в Matlab е съответно:

```
L_fft = length(acc); %Number of points in acceleration vector
NFFT = 2^nextpow2(L_fft); %Next power of 2 from length of acc
df = 1./(NFFT*input_dt); %Frequency spacing
Amp_fft = fft(accft,NFFT); %Fourier series
Ny = (1/input_dt)/2; %Nyquist frequency (highest frequency)
FAS_fft=abs(Amp_fft)*input_dt; %Fourier amplitudes double sided
FAS_freq=(0:df:(1/input_dt)-df); %Double-sided frequencies
FAS_fft1 = FAS_fft(1:Ny/df+1); %Single sided FAS
FAS_freq2 = FAS_freq(1:Ny/df+1); %Single-sided frequencies
```



Фиг. 7. Извадка 1 – Запис Umbria Marche 1997, Италия:
Графично представяне на едностранен (single-sided) Фуриеров амплитуден спектър

3.2.2. Спектрална плътност на мощността (Power spectrum density, PSD); пълнен интензитет I_0 на земното движение с продължителност tr

Спектралната плътност на мощността (PSD) е общоприета характеристика за описание на честотното съдържание на различни сигнали. Чрез нея се описва силата на земното движение като функция на честотата [7].

Пълният интензитет I_0 за земно движение с продължителност tr се изчислява във времевата област чрез израза [7]:

$$I_0 = \int_0^{tr} [a(t)]^2 dt \quad (9)$$

и съответно в честотната област:

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_n} c_n^2 d\omega, \quad (10)$$

където $c_n = c(\omega)$ е амплитудния спектър на Фурие и $\omega_n = \pi / \Delta t$ е честота на Найкуист (най-високата честота в редовете на Фурие). Усредненият интензитет λ_0 и спектърът на мощността (или още спектрална плътност на мощността) $G(\omega)$ могат да се изразят като:

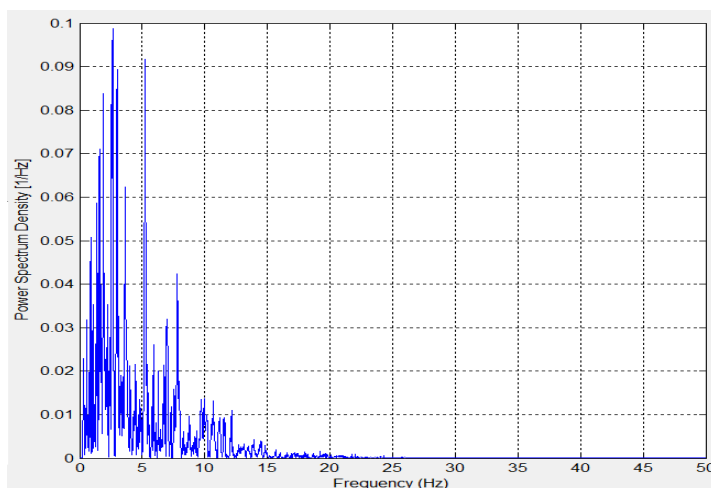
$$\lambda_0 = \frac{1}{tr} \int_0^{tr} [a(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi tr} \int_0^{\omega_n} c_n^2 d\omega \quad (11)$$

$$\lambda_0 = \int_0^{\omega_n} G(\omega) d\omega. \quad (12)$$

Сравнявайки уравнения (11) и (12) и извършвайки нормализация на спектъра на мощността $G(\omega)$, получаваме уравнението (вж. [7]):

$$G^n(\omega) = \frac{1}{\lambda_0} \frac{1}{\pi tr} c_n^2 = \frac{c_n^2}{\pi tr A_{RMS}^2}, \quad (13)$$

където A_{RMS} е средноквадратичната стойност на ускорението [4]. Спектърът на мощността за един от изследваните записи е представен графично на фиг. 8.



Фиг. 8. Извадка 1 – Запис Umbria Marche 1997, Италия:
Графично представяне на едностранен (single-sided) спектър на мощността

3.3. Параметри, характеризиращи енергийното съдържание на сеизмичните сигнали

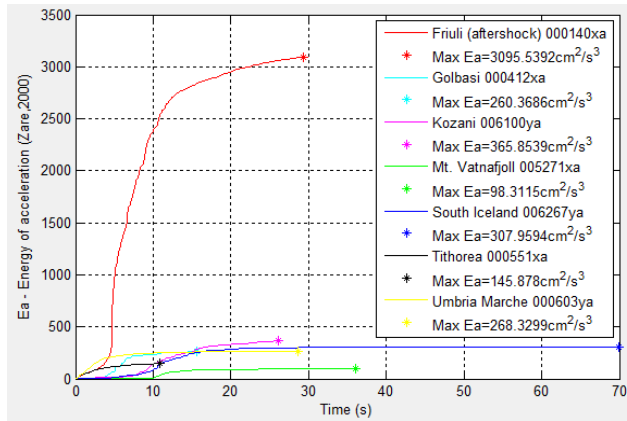
Енергийните параметри на сеизмичното въздействие са пряко свързани с цялостното тълкуване на поведението на строителните конструкции, наблюдавано при разрушителни събития. Методиките за проектиране, свързани с енергийния баланс, се основават на предпоставката, че енергията, предавана от проектното земетресение, трябва да бъде по-малка или равна на абсорбираната и дисипираната енергия от строителната конструкция. Съществен момент в тези методики е прогнозната оценка на входната сеизмична енергия, предадена на конструкциите.

3.3.1. Енергия на ускорението E_a (Energy of acceleration)

Това е важен параметър при определянето на енергийното съдържание, вж. [8], който се определя чрез интегриране на квадрата на ускорението за цялата продължителност на записа:

$$E_a = \int_0^{tr} a^2(t) dt. \quad (14)$$

На фиг. 9 е представена характеристиката на енергията E_a като функция на времето за записите от извадка номер 1 и изчислената максимална стойност (в края на всеки запис).



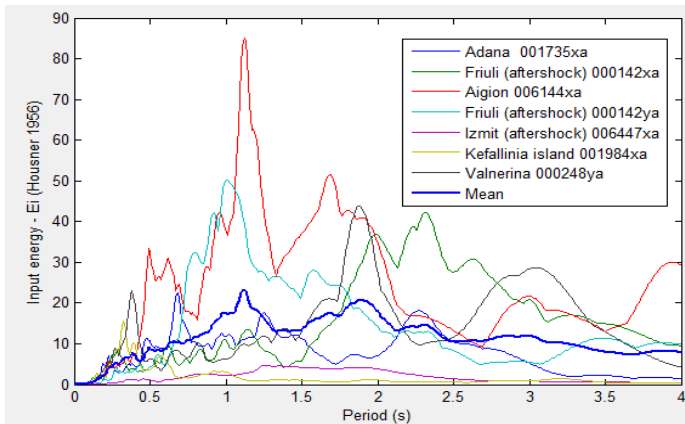
**Фиг. 9. Енергия на ускорението E_a :
Извадка номер 1**

3.3.2. Входяща енергия за единица маса E_{IH} , дефинирана по Хуснър [9]

Входящата енергия за единица маса се определя по формулата:

$$E_{IH} / m = \frac{1}{2} PSV^2 [J], \quad (15)$$

където m е масата, а PSV е спектърът на псевдо-скоростите. Уравнение (15) се използва при изследване на еластично и нееластично поведение на конструкции, вж. [9].



**Фиг. 10. Входяща енергия за единица маса по Хуснър [9]:
Извадка номер 2**

На фиг. 10 са показани сравнителни графични резултати за входящата енергия и нейната усреднена стойност за записите от извадка номер 2 (табл. 5). Забелязва се голямо различие в характеристиките – по-големи стойности за входящата енергия по Хуснър се отчитат при записите Aigion, Friuli (aftershock) и Valnerina.

3.3.3. Входяща енергия за единица маса, представена чрез уравнението за енергиен баланс

Абсолютната входяща енергия за единица маса E_I , представена чрез уравнението за енергиен баланс, се определя от следния израз [10]:

$$E_I = E_k + E_\xi + E_s + E_H, \quad (16)$$

където E_k е кинетичната енергия, E_ξ е енергията на затихването, E_s е еластичната енергия на деформации и E_H е невъзстановяемата хистерезисна енергия (нееластичната енергия на деформации), която може да се свърже директно с повредите.

Уравнението за енергиен баланс (16) се получава чрез преобразуване на уравнението на движение за система с една степен на свобода:

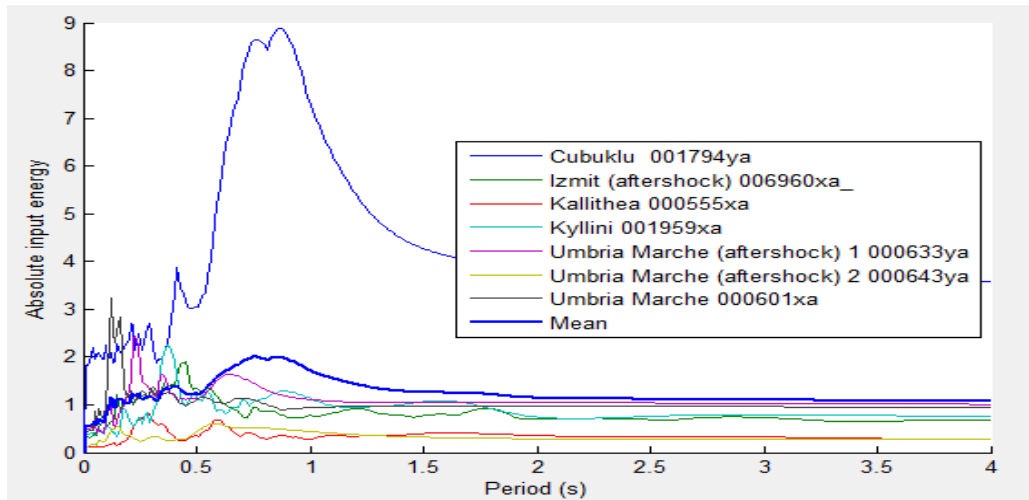
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g, \quad (17)$$

където m е масата, c е затихването, k е коравина на системата, u е относителното преместване спрямо земната основа, \dot{u} е скоростта и \ddot{u}_g е земното ускорение. Получава се следния израз за абсолютната входяща енергия, вж. [11]:

$$E_I / m = \int \ddot{u}_t du_g = \int \ddot{u}_t \dot{u}_g dt, \quad (18)$$

където u_g е преместването на земната основа, предизвикано от земетресение, а $u_t = u + u_g$ е абсолютното преместване на системата.

Получените графики за абсолютната входяща енергия за записите от извадка номер 3 са показани на фиг. 11.



Фиг. 11. Абсолютна входяща енергия за единица маса:
Извадка номер 3

Тук трябва да се отбележат по-големите стойности за абсолютната входяща енергия, които се отчитат при запис Cubuklu.

Резултатите от анализа на акселерограмите и получените инженерно-сеизмологични параметри с разработения Matlab-базиран програмен модул – са обобщени в табл. 7, табл. 8 и табл. 9, съответно за извадки с номера 1, 2 и 3.

Таблица 7. Изчислени инженерно-сеизмологични параметри за извадка 1

Параметри на земното движение	-	Umbria Marche 1997	Kozani 1995	Tithorea 1992	Mt. Vatnafjoll 1987	South Iceland 2000	Golbasi 1986	Friuli (aftershock) 1976
Характеристики във времето								
PGA	[m/s ²]	0,2664	0,1936	0,1599	0,1378	0,2393	0,1667	0,8677
ARMS	[m/s ²]	0,0306	0,0374	0,0366	0,0165	0,0210	0,0409	0,1027
Честотни характеристики								
Макс. стойност - FAS	[m/s]	0,0911	0,1676	0,0918	0,0630	0,1449	0,1620	0,3616
Честота на макс. - FAS	[Hz]	2,6367	1,8066	1,7090	2,6855	0,7568	0,7324	3,9063
Макс. стойност - PSD	[1/ Hz]	0,0985	0,2443	0,1838	0,1285	0,2171	0,3208	0,1344
Честота на макс. - PSD	[Hz]	2,6367	1,8066	1,7090	2,6855	0,7568	0,7324	3,9063
Енергетични характеристики								
Макс. стойност - E_a	[cm ² /s ³]	268,33	365,85	145,88	98,31	307,96	260,37	3095,54
Макс. стойност - E_{II}	[J]x10 ⁻⁴	4,4526	9,0195	3,9366	2,8505	17,0513	22,5050	28,8727
Период на макс. - E_{II}	[s]	0,35	0,68	0,57	2,14	1,94	1,36	0,22
Макс. стойност - E_{Iabs}	[J]x10 ⁻⁴	0,5572	1,1283	0,5596	0,4463	0,9732	1,4128	4,4276
Период на макс. - E_{Iabs}	[s]	0,20	0,30	0,12	0,29	0,29	0,65	0,23

Таблица 8. Изчислени инженерно-сеизмологични параметри за извадка 2

Параметри на земното движение	-	Adana 1998	Valnerina 1979	Friuli (aftershock) 1 1976	Friuli (aftershock) 2 1976	Kefallinia island 1992	Aigion 1995	Izmit (aftershock) 1999
Характеристики във времето								
PGA	[m/s ²]	0,2049	0,3665	0,7006	0,1972	0,2680	0,2608	0,0840
ARMS	[m/s ²]	0,0744	0,0668	0,0569	0,0496	0,0530	0,0786	0,0157
Честотни характеристики								
Макс. стойност - FAS	[m/s]	0,2645	0,2141	0,3008	0,2076	0,2945	0,4909	0,0900
Честота на макс. - FAS	[Hz]	1,5137	0,5371	3,3447	1,0498	3,0029	0,9033	0,5493
Макс. стойност - PSD	[1/ Hz]	0,1855	0,2456	0,2907	0,1829	0,3901	0,4136	0,2489
Честота на макс. - PSD	[Hz]	1,5137	0,5371	3,3447	1,0498	3,0029	0,9033	0,5493

Енергетични характеристики								
Макс. стойност - E_a	[cm ² /s ³]	1199,41	593,76	990,23	749,91	707,66	1853,77	103,63
Макс. стойност - E_{II}	[J]x10 ⁻⁴	22,4713	43,8369	42,2264	50,1467	15,4848	85,1921	4,7917
Период на макс. - E_{II}	[s]	0,68	1,88	2,31	1,01	0,32	1,12	1,27
Макс. стойност - E_{Iabs}	[J]x10 ⁻⁴	1,4004	2,7043	1,3841	1,4574	1,1774	3,1128	0,2053
Период на макс. - E_{Iabs}	[s]	0,19	0,38	0,29	1,38	0,34	1,12	0,74

Таблица 9. Изчислени инженерно-сеизмологични параметри за извадка 3

Параметри на земното движение	-	Kyllini 1988	Izmit (aftershock) 1999	Kallithea 1993	U. Marche (aftershock) 1 1997	Umbria Marche 1997	U. Marche (aftershock) 2 1997	Cubuklu 1988
Характеристики във времето								
PGA	[m/s ²]	0,2419	0,3029	0,1477	0,4312	0,4520	0,1846	0,4439
ARMS	[m/s ²]	0,0549	0,0334	0,0343	0,0519	0,0712	0,0329	0,1482
Честотни характеристики								
Макс. стойност - FAS	[m/s]	0,2247	0,3293	0,2205	0,1667	0,2814	0,1409	0,4839
Честота на макс. - FAS	[Hz]	1,9043	0,9644	1,7090	3,9307	8,1543	1,8799	1,3672
Макс. стойност - PSD	[1/ Hz]	0,1925	0,3184	0,4341	0,1136	0,1745	0,2139	0,3216
Честота на макс. - PSD	[Hz]	1,9043	0,9644	1,7090	3,9307	8,1543	1,8799	1,3672
Енергетични характеристики								
Макс. стойност - E_a	[cm ² /s ³]	834,73	1083,63	356,25	779,05	1444,35	295,41	2315,57
Макс. стойност - E_{II}	[J]x10 ⁻⁴	17,1462	45,3564	13,4183	25,7342	12,1314	8,3933	229,3427
Период на макс. - E_{II}	[s]	0,36	1,86	0,59	2,75	0,12	0,60	0,96
Макс. стойност - E_{Iabs}	[J]x10 ⁻⁴	2,2504	1,9096	0,8116	2,4485	3,2257	0,6011	8,8763
Период на макс. - E_{Iabs}	[s]	0,37	0,45	0,28	0,23	0,12	0,58	0,86

4. Верификация на разработения програмен модул спрямо SeismoSignal по отношение на точността на изчисление на параметрите

Целта на разработения Matlab-модул е да предостави средство за изчисляване на основните инженерно-сеизмологични параметри на база на налични акселерограми, както и изчисляване на някои характеристики, които са важни при оценка на енергийното съдържание на земетресенията.

Може да се изчисли абсолютната грешка ε между изчисления и референтния Фуриеров амплитуден спектър (получен чрез SeismoSignal) по формулата:

$$\varepsilon = \left| x_{SeismoSignal} - x_{Matlab} \right|. \quad (19)$$

Например максималната абсолютна грешка по отношение на FAS за записите Mt. Vatnafjoll, 1987 и Umbria Marche, 1997 от извадка 1 е съответно $\varepsilon = 0,48 \cdot 10^{-4}$ m/s (при честота 3,5889 Hz) и $\varepsilon = 1,38 \cdot 10^{-4}$ m/s (при честота 0,0732 Hz).

Сравнението на получените резултати (по отношение на честотните параметри) при обработка на избран запис Kefallinia island, 1992 (извадка 2) с новоразработения модул и съответните стойности, определени при обработката на сеизмичните сигнали с програмен продукт SeismoSignal [12], е показано в табл. 10. В същата таблица е дадена и относителната грешка Δ между изчислените резултати и тези, получени със SeismoSignal, определена съгласно долната дефиниция:

$$\Delta = \left| \frac{x_{SeismoSignal} - x_{Matlab}}{x_{SeismoSignal}} \right| \cdot 100 [\%]. \quad (20)$$

Таблица 10. Сравнителни резултати: Matlab модул и SeismoSignal
(Извадка номер 2 – запис Kefallinia island 1992)

Честотни параметри	-	Kefallinia island 1992		
		Matlab модул	SeismoSignal	Δ , [%]
Макс. стойност - FAS	[m/s]	0,2945	0,2944	0,03
Честота на макс. - FAS	[Hz]	3,0029	3,0029	0,00
Макс. стойност - PSD	[1/ Hz]	0,3901	0,3897	0,10
Честота на макс. - PSD	[Hz]	3,0029	3,0029	0,00

5. Заключение бележки

Резултатите, представени в т. 4, доказват точността на разработените Matlab-базирани процедури за обработка на акселерограми – на практика нямаме разлика между стойностите на оценяваните параметри чрез прилагане на двете програмни реализации за обработка на сеизмични сигнали. Това доказва валидността на разработените процедури, както и потенциалната възможност за приложението им при инженерни анализи и

изследвания на сеизмични сигнали. Част от представените процедури се припокриват със съществуващи софтуерни приложения (SeismoSignal, Proschema и др.). Като основно допълнение се считат процедурите за изчисляване на параметрите, характеризиращи енергийното съдържание на сеизмичните сигнали. Предстои работа по усъвършенстване на възможностите на разработвания програмен модул и търсене на нови решения за оценка на енергийното съдържание на сеизмични въздействия, подобряване на потребителския интерфейс и др.

Благодарности

Членовете на научния колектив на проект № Д-91/2016 изказват своята благодарност на ЦНИП при УАСГ за оказаната подкрепа при реализация на представените изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1998:2004 Еврокод 8. Проектиране на конструкции за сеизмични въздействия.
2. БДС EN 1998/NA Еврокод 8. Проектиране на конструкции за сеизмични въздействия. Националното приложение.
3. *Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E.* REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 8, pp. 339-362, 2010.
4. *Жиков, М., Моллова, Г., Кутева-Генчева, М.* Инженерен анализ на акселерограми в среда на Matlab. Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, Серия В. Техника и технологии, Том XIV, стр. 53-62, 2017.
5. Mathworks: <https://www.mathworks.com/>.
6. *Cooley, P., Tukey, J.* An algorithm for the machine computation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, vol. 19, No. 4, pp. 297-301, 1965.
7. *Kramer, S. L.* Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, 1996.
8. *Zare, M.* The energy content of the strong ground motions of Iran. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 2000.
9. *Housner, G.* Limit design of structures to resist earthquakes. *Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, CA, USA, 1956.
10. *Decanini, L., Mollaioli, F.* Formulation of elastic earthquake input energy spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 27, pp. 1503-1522, 1998.
11. *Uang, C., Bertero, V.* Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol. 19, pp. 77-90, 1990.
12. SeismoSoft: <http://www.seismosoft.com/>.

ENGINEERING ANALYSIS OF FREQUENCY AND ENERGY CONTENT PARAMETERS OF REAL STRONG GROUND MOTION SIGNALS

M. Zhikov¹, G. Mollova², M. Kouteva-Guentcheva³

Keywords: Fast Fourier Transform, Matlab, accelerograms, input energy

ABSTRACT

A procedure for the calculation of frequency and energy characteristics of accelerograms is presented. It is developed in Matlab workspace. Three sets, each consisting of seven selected one component accelerograms, are analyzed using the new procedure. They are selected according to the Eurocode 8 requirements for real accelerogram selection and structural analysis. Peak and integral characteristics are assessed. Computing procedures, comparative tables and graphical illustration are presented. The obtained results are verified through comparison with corresponding results, obtained by processing the same sets of signals using already established software.

¹ Mariyan Zhikov, Eng. PhD Student, Dept. "Computer-Aided Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: zhikov_fce@uacg.bg

² Guergana Mollova, Prof. Dr. Eng., Dept. "Computer-Aided Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: mollova_fce@uacg.bg

³ Mihaela Kouteva-Guentcheva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Computer-Aided Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: kouteva_fce@uacg.bg