



Приета: 18.03.2016 г.
Преработена: 11.04.2016 г.
Одобрена: 22.04.2016 г.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПОДХОДИТЕ ПРИ ДЕФИНИРАНЕ НА ПРОЕКТНИ СЕИЗМИЧНИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ С ИЗКУСТВЕНИ АКСЕЛЕРОГРАМИ

Ив. Жеков¹, Г. Моллова²

Ключови думи: сеизмични въздействия, изкуствени акселерограми, програмнен продукт, динамичен нелинеен анализ, сеизмични параметри

РЕЗЮМЕ

В настоящата разработка са представени резултати, получени при генерирането на изкуствени акселерограми чрез два програмни продукта. Единият от тях е утвърдена система за генериране на изкуствени записи, разработена от компанията SeismoSoft. Другият продукт е собствена web-базирана програмна система за обработка и генериране на сеизмични записи. За доказване надеждността на новата програмна система са сравнени сеизмологичните параметри на набори от записи, генерирани с двете системи. Направено е и сравнение на поведението на строителна конструкция под въздействието на тези записи чрез провеждане на динамичен нелинеен анализ на примерен модел на сграда.

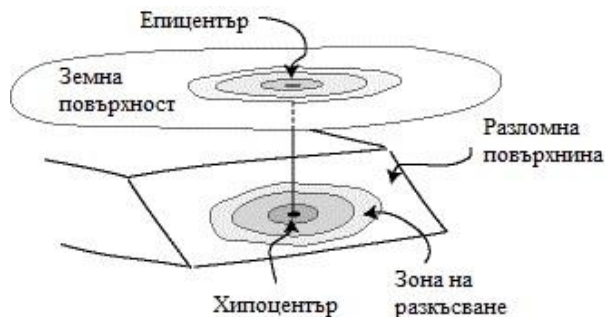
1. Въведение

Едно земетресение може да се определи като сложно движение на земната повърхност в следствие на внезапно разкъсване на земни маси дълбоко в земните недра. Освободената сеизмична енергия се разпространява под формата на сеизмични вълни

¹ Ивайло Жеков, инж., кат. „Автоматизация на инженерния труд“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ivaylozhekov@gmail.com

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

във всички направления от хипоцентъра (фиг. 1). Тъй като тези вълни се разпространяват в реална физична среда, съставена от пластове с различни дебелини и характеристики, част от тях се пречупват, отразяват или забавят. В крайна сметка резултатният набор от сеизмични вълни се усложнява значително и трудно би могъл да се предвиди.



Фиг. 1. Връзка между област на разкъсване, хипоцентър и епицентър

От друга страна, движението на дадена точка от земната повърхност по време на земетресение е комплексен и до голяма степен случаен процес в следствие пристигането на тези сеизмични вълни до тази точка. Ако на даденото място е разположен уред, отчитащ това движение, бихме получили запис – времева серия на стойностите на ускорението за цялата продължителност на сеизмичното събитие. На практика този запис би могъл да се разглежда като сигнал, съставен от множество сеизмични вълни с конкретни характеристики – честотен състав, енергийно съдържание, продължителност, брой цикли, амплитуди и др. Следователно, при изучаването, обработката и генерирането на сеизмични записи биха могли да се приложат добре познатите методи и процедури за обработка на сигнали. Такива са трансформацията на Фурие, методите за филтрация, *wavelet*-трансформация и др.

Нуждата от изучаване, обработка и генериране на записи се поражда от необходимостта от надежден избор на проектни сеизмични въздействия при провеждане на динамични анализи на строителни конструкции чрез набори от акселерограми. В повечето случаи наличните записи, подходящи за директно използване при тези изчисления, са крайно недостатъчни. Решението е използване на обработени реални или изкуствено генерирани записи, които трябва да отговарят и приведат към конкретни сеизмични характеристики.

Настоящата работа представя резултатите от прилагането на нов *wavelet*-алгоритъм за генериране на изкуствени акселерограми, които отговарят на даден еластичен целеви спектър на реагиране. Така генерираните записи, техните характеристики и приложение са сравнени с резултати от акселерограми, генерирани с друг, утвърден програмен продукт, наречен *SeismoArtif* [1].

2. *Wavelet*-алгоритъм – концепция и приложение

Wavelets, или кратки вълни, по дефиниция са добре локализирани във времева и в честотна област функции. Те могат да бъдат използвани за разлагането на непрекъснати във времето функции или сигнали.

Wavelet-трансформацията изисква предварителен избор на така наречената главна вълнова функция – *mother wavelet*. Тя служи за основа на всички производни вълни

(*wavelets*), които ще се използват при трансформацията. Отделните кратки вълни представляват нейни версии с различни параметри – p и s . Параметърът p отговаря на момента от времето или позицията на вълновата версия в сигнала. Параметърът s от своя страна определя мащаба на функцията или, с други думи, отговаря за честотата на конкретната вълнова версия. За това и *wavelet*-трансформацията се определя като дву-параметрична трансформация. Използвайки този подход, всеки сигнал може да се разложи на сума от отделни версии на главната вълна, всяка с двойка параметри p и s . При необходимост сигналът може да бъде обработен чрез манипулация на тези параметри според дадени критерии. След направените корекции се прави реконструкция на обработения сигнал.

Представената процедура може да бъде използвана за постигане на спектрално съответствие към целеви спектър на реагиране при обработка на реални сеизмични записи, както и при генериране на изкуствени акселерограми.

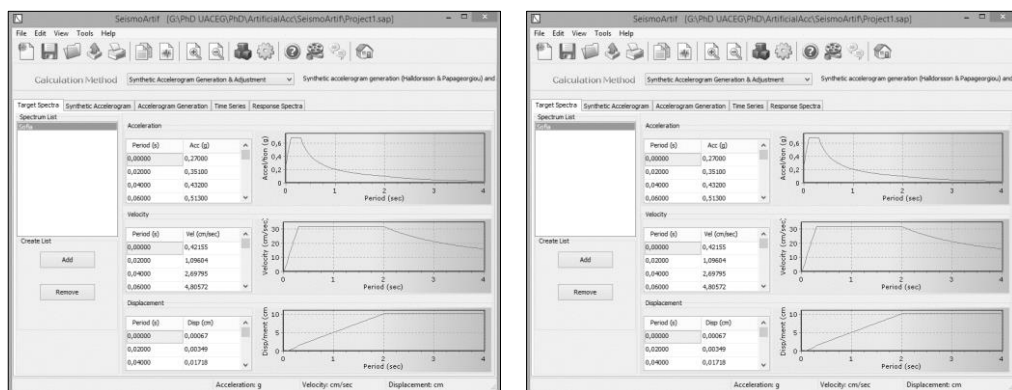
Разработеният алгоритъм за генериране на изкуствени акселерограми, внедрен в новата програмна система, се основава на идеята, че дадено сеизмично въздействие може да се представи като съвкупност от отделни сеизмични вълни, пристигащи до дадена точка от земната повърхност. Тази съвкупност има до голяма степен случаен модел на поведение. Отделните сеизмични вълни се представят като различни компютърно генерирани версии на главната функция. За целта за всяка вълнова версия се генерират стойностите за параметрите p и s на база случайни компютърни процеси. Техните амплитуди са съобразени с целеви спектър на реагиране, а изкуствената акселерограма се получава като сума от тези функции, по подобие на реконструкция на сигнал. Резултатът е напълно случаен запис, съобразен със сеизмологичните параметри за дадена строителна площадка.

3. Преглед на съществуващите програмни пакети за генериране на изкуствени сеизмични записи

Съществуващата система SeismoArtif [1] използва стационарни синусоидални сигнали, модифицирани чрез обвивна функция, за генериране на така наречените синтетични акселерограми. Това е начален стадий при генерирането на запис от програмния алгоритъм. На практика едни и същи входни данни в този начален етап дават идентични синтетични записи. Крайната изкуствена акселерограма се получава след привеждане на синтетичната акселерограма към целевия спектър на реагиране чрез *wavelet*-алгоритъм (фиг. 2).

Програмата дава надеждни резултати, подходящи за използване при дефиниране на проектни сеизмични въздействия при динамичен нелинеен анализ на строителни конструкции чрез истории по време.

Друг добре познат програмен продукт, предназначен за генериране на изкуствени записи, е системата Simqke [2]. Подобно на първия етап при SeismoArtif, тя генерира съвкупност от стационарни синусоидални сигнали, чиито честоти и амплитуди са съобразени с целевия спектър на реагиране чрез спектрална плътност на мощностите. Крайната акселерограма се получава чрез корекция на сумарната стационарната времева серия с обвивна функция. Програмните пакети като BELFAGOR [3] и TARSCTHS [4] прилагат нестационарни стохастични векторни процеси за генериране на изкуствени сеизмични записи. Резултатите от работата на тези програмни системи са проучени и анализирани в редица изследвания [5], [6].



Фиг. 2. Част от програмния интерфейс на системата SeismoArtif

4. Програмна система EquArt и програмен модул за генериране на изкуствени акселерограми

Разработваната нова *web*-базирана програмна система, наречена EquArt, прилага *wavelet*-алгоритъм през целия процес на генериране на записа. Подробно изложение върху подхода за генериране на изкуствени акселерограми е представено от авторите в [7]. Изчислителният процес е разделен на два етапа. Резултатът от първия етап, наречен суров запис, е получен по подобие на реконструкция на сигнал при обратна *wavelet*-трансформация. Записът представлява нестационарна времева серия, получена от сумирането на M на брой версии на главната вълнова функция (*mother wavelet*), които са генерирани на база случайни процеси. Главната вълна е подбрана така, че нейната първа и втора производни да са функции с нулеви начални и крайни стойности за постигане на реалистични графики на скорости и премествания. Амплитудите на отделните нейни производни са съобразени с целевия спектър на реагиране, а моментите време на включване в записа, тоест параметрите p , са генерирани с по-голяма вероятност за попадане в така наречената активна фаза на записа. За разлика от SesimoArtif този първи етап винаги дава уникална и случайна нестационарна времева серия, която има задоволително средно квадратично отклонение δ от целевия спектър на реагиране в рамките на 20 до 50%:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_{Actual}(T_i) - Sa_{Target}(T_i)}{Sa_{Target}(T_i)} \right)^2}. \quad (1)$$

Вторият етап се нарича фина настройка. Той отново използва *wavelet*-алгоритъм, а ефектът от него е по-доброто съвпадение между целевия $Sa_{Target}(T)$ и изчисления $Sa_{Actual}(T)$ спектър на реагиране на записа. Тук средното квадратично отклонение достига стойност $\delta \leq 10\%$, изчислено за целия честотен диапазон.

5. Практическо изследване I. Получаване и сравнение на акселерограми, генерирани с двата програмни продукта

С двата програмни продукта са генерирани по два набора от акселерограми с различни хоризонтални целеви спектри според националните приложения на Еврокод 8. Параметрите на двата спектъра са дадени в табл. 1.

Таблица 1. Параметри на целеви спектри на реагиране

Спектър	Район гр. София	Район гр. Русе
Почва тип	C	D
Спектър тип	I	I
a_g (референтно земно ускорение)	0,23	0,15
ξ (коефициент на относително затихване)	0,05	0,05

В следващите фигури са дадени двата набора акселерограми заедно с техните спектрални криви, сравнени със съответните целеви спектри на реагиране. В табличен вид са обобщени и сравнени техните сеизмологични параметри, изчислени с програмна система SeismoSignal [8]. Продължителността на записите, генерирани с SeismoArtif, е минималната, определена в изискванията на Еврокод 8, а именно 10 s. Въпреки че записите, генерирани с EquArt, са с по-голяма продължителност, тяхната реална активна фаза, както и енергиен състав, са съпоставими с тези, генерирани с другата програмна система.

На фиг. 3 е даден за сравнение наборът от записи, генерирани с двете програмни системи за спектър, характерен за района на гр. София (вж. табл. 1). На фиг. 4 са дадени и техните спектрални криви.

По отношение на сеизмологичните параметри (табл. 2) са избрани група важни параметри, описващи сеизмичното въздействие. Такива са максималните стойности на ускорението (PGA, *Peak Ground Acceleration*), скоростта (PGV, *Peak Ground Velocity*) и преместването (PGD, *Peak Ground Displacement*) на земната основа. При оценката са включени и някои интегрални характеристики, като например средноквадратичните стойности (RMS, *Root Mean Square*) за ускорение, скорост и преместване:

$$arms = \sqrt{\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} [a(t)]^2 dt}; \quad vrms = \sqrt{\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} [v(t)]^2 dt}; \quad drms = \sqrt{\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} [d(t)]^2 dt}, \quad (2)$$

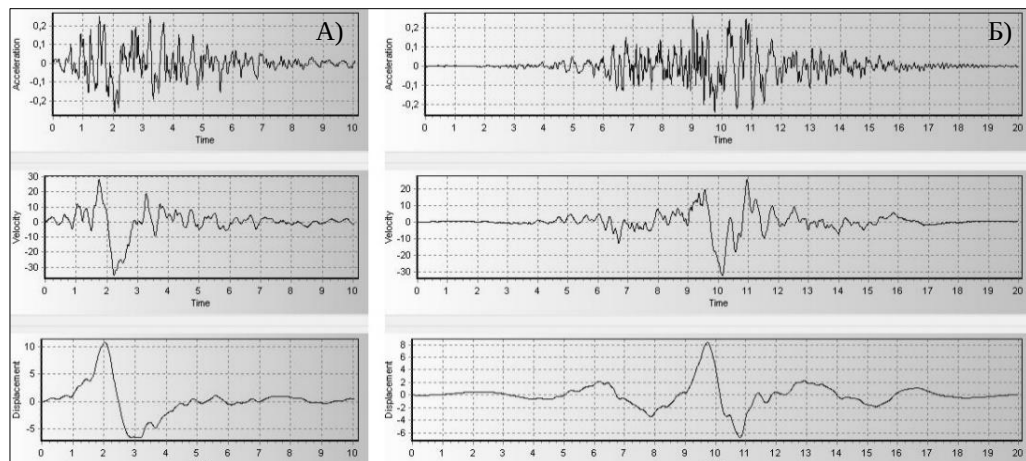
както и параметрите Интензитет (I_a , *Arias Intensity*) и Специфична плътност на енергията (SED, *Specific Energy Density*), които са съществени при оценка на енергийното съдържание на акселерограмите:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_r} [a(t)]^2 dt; \quad SED = \int_0^{t_r} [v(t)]^2 dt. \quad (3)$$

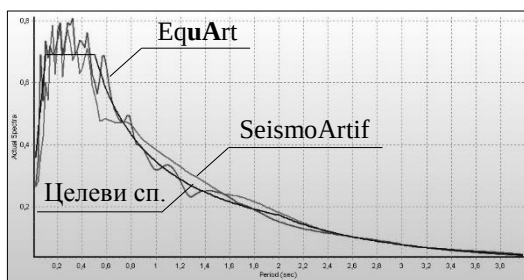
В горните зависимости с t_r е означена продължителността на въздействието. Добавен е и параметър A95, който показва нивото на ускорението, при което се достигат 95% от I_a .

Оценени бяха също стойностите на други два времеви параметъра: (1) Доминиращ период (T_p , *Predominant period*): интервалът време, за който се достига до максимална стойност в спектъра на реагиране по ускорение при 5% демпфериране, и (2) Ефек-

тивна продължителност (TD, *Significant duration*): периодът необходим за акумулиране на определена част (процент) от общия интензитет I_a на събитието (по подразбиране интервалът между прагови нива от 5% до 95%).



Фиг. 3. Изкуствени записи, генерирани за спектр гр. София чрез:
А) SeismoArtif; Б) EquArt

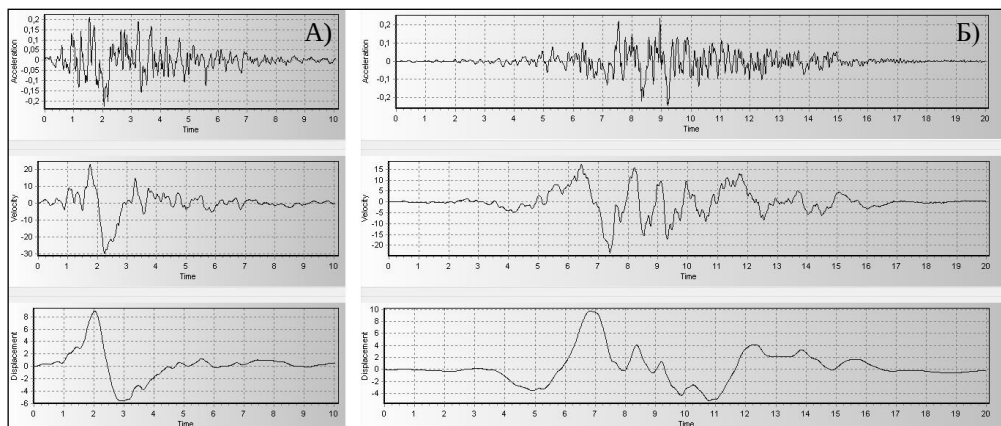


Фиг. 4. Спектрални криви, съпоставени с целевия спектр за района на София

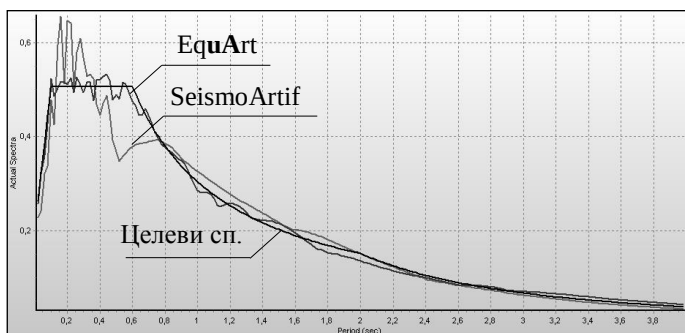
Таблица 2. Сеизмологични параметри на набор записи за спектр гр. София

Параметър	SeismoArtif	EquArt	Параметър	SeismoArtif	EquArt
PGA [g]	0,26	0,26	$drms$ [cm]	3,12	1,86
PGV [cm/sec]	35,49	32,17	I_a [m/sec]	0,78	0,91
PGD [cm]	10,82	8,35	A95	0,257	0,252
PGV/PGA [sec]	0,14	0,13	SED [cm ² /sec]	720,43	654,07
$arms$ [g]	0,071	0,054	T_p [sec]	0,22	0,32
$vrms$ [cm/sec]	8,45	5,72	TD [sec]	4,83	6,76

На фиг. 5 са сравнени графично времевите серии, генерирани с двете програмни системи при зададен целеви спектр за района на гр. Русе. Получените спектрални криви са представени на фиг. 6, а табл. 3 обобщава сеизмологичните параметри.



Фиг. 5. Изкуствени записи, генерирани за спектр гр. Русе чрез:
А) SeismoArtif; Б) EquArt



Фиг. 6. Спектрални криви, съпоставени с целевия спектр за района на Русе

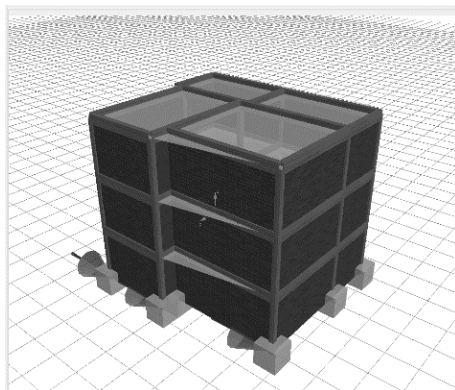
Таблица 3. Сеизмологични параметри на набор записи за спектр гр. Русе

Параметър	SeismoArtif	EquArt	Параметър	SeismoArtif	EquArt
PGA [g]	0,22	0,24	<i>drms</i> [cm]	2,56	2,68
PGV [cm/sec]	29,49	23,59	<i>Ia</i> [m/sec]	0,48	0,61
PGD [cm]	8,91	9,71	A95	0,22	0,24
PGV/PGA [sec]	0,13	0,10	SED [cm ² /sec]	487,78	617,71
<i>arms</i> [g]	0,06	0,04	<i>Tr</i> [sec]	0,16	0,44
<i>vrms</i> [cm/sec]	6,96	5,56	TD [sec]	4,60	6,94

От двата набора със записи се вижда, че по-голямата продължителност на записите, генерирани с новата програмна система, води до по-дълга ефективна продължителност и леко повишение в енергийното съдържание *Ia*. От тук следват и някои от разликите в отчетените параметри. При втория набор от записи – тези генерирани за спектъра на гр. Русе – се вижда, че системата EquArt се е справила по-добре при постигането на спектрално съответствие, от което следва и по-голямото отклонение в доминиращия период *Tr*. В представените резултати няма значителни разлики, което говори за надеждността на представения метод.

6. Практическо изследване II. Изследване на поведението на строителна конструкция чрез динамичен нелинеен анализ

Динамичният анализ е извършен чрез програмна система SeismoStruct [9]. Избран е примерен модел на триетажна стоманобетонова сграда с пълнежна зидария, показан на фиг. 7.



Фиг. 7. Модел на триетажна стоманобетонова конструкция

Моделът е бил използван за доказване на надеждността на програмната система SeismoStruct и е предоставен за употреба за целите на различни изследвания. Всички негови характеристики могат да бъдат намерени в документацията на програмната система.

Извършено е конструктивно изследване на модела, подложен на сеизмичните въздействия, генерирани от двата програмни пакета. Всички времеви серии са приложени по глобално направление Y. Обобщено е поведението на конструкцията чрез изследване на възел от плоча на ниво 3, намиращ се над средна колона.

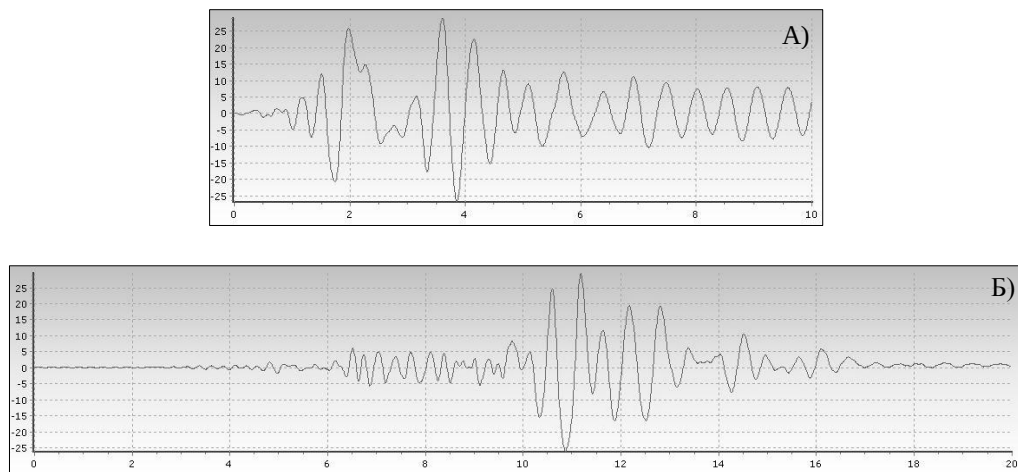
Следващите фигури демонстрират различни параметри в поведението на този възел при различните въздействия. Графично са дадени параметрите на движението – ускорение и преместване, развити във времето на въздействието.

Разгледана е и общата сила при основата при всяко въздействие като оценка на общото поведение на конструкцията.

В следствие на случайните процеси при генерирането на акселерограмите се наблюдават известни разлики в графиките. Това следва да се счита за положителен ефект, тъй като всяко земетресение е уникално и различно. При едно надеждно изследване на дадена конструкция трябва да бъдат покрити всички възможни неблагоприятни ефекти, които могат да възникнат по време на земетресение. При това изследване отново са постигнати близки стойности при максималните отчети на параметрите, получени от двата набора записи.

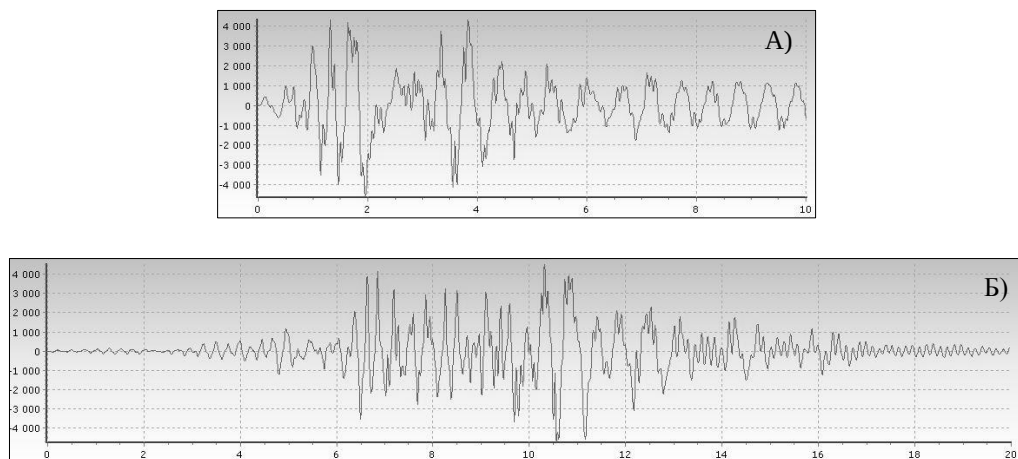
Характеристиките на преместването и ускорението на изследвания възел от конструкцията при въздействие, генерирано за спектър от района на гр. София, са дадени съответно на фиг. 8 и фиг. 9. В този случай максималната стойност на общата

сила при основата, получена при изследваното въздействие чрез SeismoArtif, се равнява на $F = 182,969 \text{ kN}$, а тази, получена при въздействие, генерирано от EquArt, е със стойност $F = 179,671 \text{ kN}$.

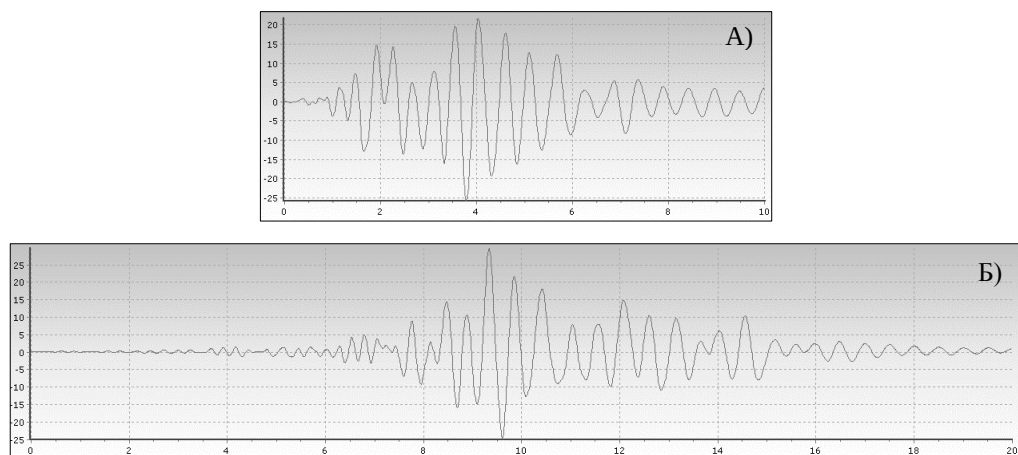


Фиг. 8. Относително преместване на изследвания възел при въздействие, генерирано за спектъра на гр. София чрез: А) SeismoArtif (max = 28,87 mm); Б) EquArt (max = 29,50 mm)

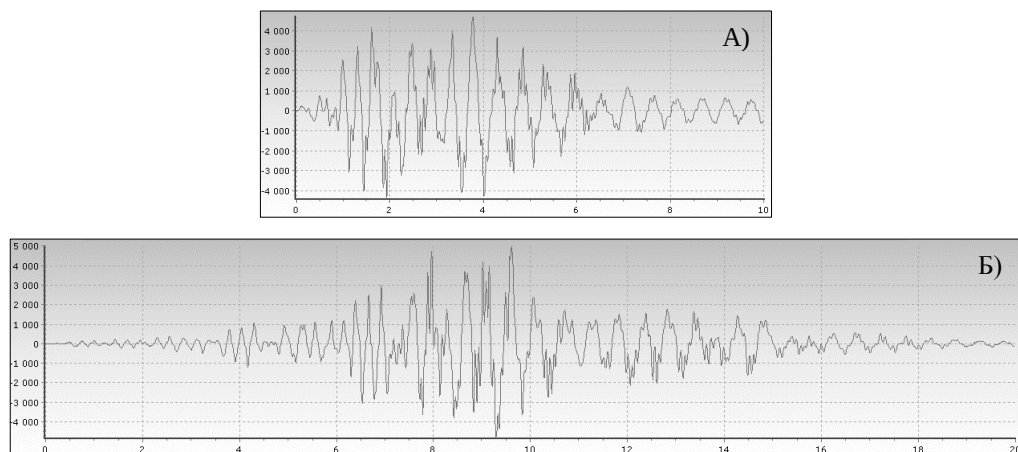
Резултантните характеристики за разглеждания възел при изкуствена акселерограма, генерирана за целеви спектър, характерен за района на гр. Русе, са представени на фиг. 10 и фиг. 11. При това изследване максималната стойност на общата сила при основата, получена при въздействие, генерирано чрез SeismoArtif, е $F = 170,497 \text{ kN}$, а чрез EquArt – $F = 174,528 \text{ kN}$.



Фиг. 9. Абсолютно ускорение на изследвания възел при въздействие, генерирано за спектъра на София чрез: А) SeismoArtif (max = 4592 mm/sec² = 0,469g); Б) EquArt (max = 4706 mm/sec² = 0,480g)



Фиг. 10. Относително преместване на изследвания възел при въздействие, генерирано за спектъра на гр. Русе чрез: А) SeismoArtif (max = 25,10 mm); Б) EquArt (max = 25,81 mm)



Фиг. 11. Абсолютно ускорение на изследвания възел при въздействие, генерирано за спектъра на гр. Русе чрез: А) SeismoArtif (max = 4954 mm/sec² = 0,505g); Б) EquArt (max = 4998 mm/sec² = 0,509g)

7. Обобщение, заключителни бележки и насоки за бъдещи изследвания

От направените сравнения на сеизмологичните параметри на наборите от записи, получени с двата програмни продукта, както и от проведеното конструктивно изследване, може да се направи изводът, че новата програмна система дава едно добро решение на задачата за генериране на изкуствени акселерограми. Интегрираният нов метод генерира винаги уникален и напълно случаен запис, който съответства на желаните сеизмологични особености на строителната площадка. Стойностите на всички

сравнени параметри в това изследване са от един порядък, което говори за надеждността на алгоритъма.

Бъдещите изследвания включват провеждането на още динамични анализи на примерни модели с разнообразни набори от записи с различни характеристики и целеви спектри. С цел пълнота на изследванията, към наборите ще бъдат добавени и реални акселерограми, получени чрез селекция от съществуващи с използване на наличните бази данни с инструментални регистрации.

Ще продължи и работата по разработване и усъвършенстване на програмната система EquArt до окончателното ѝ завършване и пускане на стабилна *web*-базирана версия във вид, удобен за по-нататъшна употреба.

Благодарности

Авторите изказват своята благодарност на ЦНИП при УАСГ – София за оказаната подкрепа при реализация на изследванията по проект БН-71/2014.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.seismosoft.com/seismoartif>
2. *Vanmarcke, E. H., Cornell, C. A. et al.* SIMQKE-I: Simulation of Earthquake Ground Motions, http://dicata.ing.unibs.it/gelfi/software/simqke/simqke_gr.htm
3. *Mucciarelli, M., Spinelli, A., Pacor, F.* Un programma per la generazione di accelerogrami sintetici “fisici” adeguati alla nuova normativa. XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Genova, 2004.
4. <http://civil.eng.buffalo.edu/engseislab/products.htm>
5. *Fahjan, Y., Ozdemir, Z.* Scaling of Earthquake accelerograms for non-linear dynamic analyses to match the earthquake design spectra. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, Beijing, China, 2008.
6. *Moghaddam, S. A., Ghafory-Ashtiany, M.* Evaluation of the dynamic response of the structures to the real, synthetic and modified accelerograms using s-transform. Proc. of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering “Frontiers of Earthquake Engineering”, July, 21-25, 2014, Anchorage, Alaska.
7. *Zhekov, I., Mollova, G.* Computer generation of artificial strong ground motion accelerograms based on the wavelet algorithm. Proc. of the International Scientific Conference Computer Science’2015, pp.88-93, 8-10 Sept. 2015, Durres, Albania.
8. <http://www.seismosoft.com/seismosignal>
9. <http://www.seismosoft.com/seismostruct>

A COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES FOR DEFINING DESIGN SEISMIC ACTIONS WITH ARTIFICIAL ACCELEROGRAMS

Iv. Zhekov¹, G. Mollova²

Keywords: *strong motion records, artificial accelerograms, software product, time-history analysis, seismic parameters*

ABSTRACT

The current work summarizes the results in terms of possibilities for artificial strong motion record generation. Two sets of artificial accelerograms are generated by two different program products. One of these products is well-known and trusted software for artificial accelerograms generation, created by SeismoSoft. The other one is a new web-based program system for strong motion processing and generation, developed by the authors. In order to prove the reliability of the newly developed system a comparison between the seismological parameters obtained from two different cases is made. Furthermore, a time-history structural analysis with an experimental model is conducted to compare the behavior of the structure under the impact of the generated accelerograms.

¹ Ivaylo Zhekov, Eng., Dept. "Computer-Aided Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ivaylozhekov@gmail.com

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