

---

## МОДЕЛИРАНЕ НА НЕЛИНЕЙНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ И НОРМАТИВНА БАЗА – ПРИЛОЖЕНИЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ

П. Найденов<sup>1</sup>, Ал. Трайков<sup>2</sup>

*Ключови думи:* нелинейно поведение, стоманобетон, строителни норми

*Научна област:* сеизмично инженерство

### РЕЗЮМЕ

Настоящата статия представя начини за моделиране на нелинейното поведение на стоманобетонни конструкции и изисквания за представяне на сеизмичното въздействие според някои съвременни строителни норми, използвани в райони със земетръсна активност. Разгледани са правилници от България, Европейския съюз, Нова Зеландия, Чили, Мексико, САЩ, Япония и Канада.

### 1. Кратък исторически преглед на българските норми за сеизмично изследване на строителни конструкции и отчитане на нелинейното поведение на строителните конструкции в тях

През 1881 г. са издадени „Правила за строеж на частни здания в градовете на Българското Княжество”, първият нормативен документ за строителство след Освобождението.

В правилника за проектиране на стоманобетонни конструкции от 1927 г. сеизмичните сили, действащи върху конструкцията, са определени като статично приложени хоризонтални сили със стойност, пропорционална на вертикалните сили.

През 1947 г. е въведен нов „Правилник за проектиране и строеж на сгради и инженерни съоръжения в земетръсните райони на България“, Указ № 15 на Министерството на обществените сгради, пътищата и благоустройството, публикуван в ДВ

---

<sup>1</sup> Павел Найденов, инж., докторант, кат. „Строителна механика”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски” 1, 1046 София, e-mail: naydenov\_fce@uacg.bg

<sup>2</sup> Александър Трайков, доц., д-р, кат. „Строителна механика”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски” 1, 1046 София, e-mail: alex\_fce@uacg.bg

брой 98/30.04.1947 г. В Правилника преобладават конструктивните изисквания към проектирането и строителството на основните типове сгради и съоръжения и масово използваните за времето си строителни системи и технологии. Отделена е обаче специална глава, озаглавена *Изисквания при статическите изчисления*. В нея се дефинира отразяването на сеизмичните сили като инерционни сили, приложени хоризонтално като статически сили в центъра на тежестта на отделните елементи на конструкцията. Големината на сеизмичните сили се дефинира като част от теглото на елемента плюс натоварването, като тази част зависи от степента на строителния район в сеизмично отношение. Специфични правила за определяне на големината на земетръсните сили са дефинирани за високи съоръжения. Не са посочени други изисквания за методите на изследване.

Следващите норми са от 1957 г. и са „Правилник за проектиране и строеж на сгради и инженерни съоръжения в земетръсните райони на Народна република България“, утвърден от Държавния комитет по строителство и архитектура с протокол № 23 от 12 юни 1957 г., публикуван в Известия на Президиума на народното събрание, бр. 65/13.08.1957. Обособен е специален раздел, озаглавен *Изисквания към статическите изчисления*. Взимането предвид на инерционните сили, пораждани при земетресения, е задължително за най-широк обхват от конструкции, включително за всички жилищни сгради с височина над 3 етажа. В следващите части на Правилника подробно са дефинирани конкретни изисквания от конструктивен характер към отделните типове сгради и съоръжения и различните конструктивни системи, реализирани от различен материал. Инерционните сили се приемат като хоризонтални статично действащи сили  $Z = KQ$ , пропорционални на натоварването на отделните елементи.  $K$  е сеизмичният коефициент на района, където попада сградата или съоръжението. Тези сили следва да бъдат ориентирани в най-неблагоприятната посока за изследвания елемент на конструкцията.

За високи съоръжения като кули, силози, комини, сгради с височина над 6 етажа, високи подпорни стени и други подобни се изчисляват с отчитане и на собствените трептения, като за тези съоръжения включително се ограничава и стойността на първия период на собствени трептения.

Следващите норми, които уреждат изследването и проектирането на строителните конструкции за сеизмични въздействия, са „Правилник за антисеизмично строителство“, Комитет по строителство, протокол № 14 от 06.07.1961. В тези норми се предписва използването на формула за изчисляване на изчислителните сеизмични сили, имаща вида  $Z = \beta \eta k c Q k$ . Отчетени са, теглото, съответстващо на масата на съответното ниво, коефициентът на динамичност, зависещ от периода на собствените трептения на конструкцията, както и формите на собствени трептения. Този начин на определяне на сеизмичните сили се доближава до познатата методика и в актуалните към момента български норми, като периодът и собствените трептения на конструкциите се определят по методите на строителната динамика. Интересна дефиниция е дадена за коравина на вертикална носеща система на дадено ниво – като хоризонтална сила, действаща на това ниво, която предизвиква абсолютно преместване единица на същото ниво. Вертикалната носеща система се разглежда с цялата си височина от фундамента до това ниво.

С нормите за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони от 1987 г. за първи път се отчита нелинейното поведение на конструкциите. Взети са предвид допълнителните усилия от вертикални товари при хоризонтално преместване на вертикалните конструктивни елементи –  $P$ - $\Delta$  ефект, а също така сеизмичните сили се намаляват с коефициент на реагиране  $R$ .

В следващата редакция на нормите за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони – „Наредба № 2 за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони” от 2007 г. са променени единствено първите две глави, касаещи общите положения и определянето на сеизмичните сили. Добавен е член, според който разрезните усилия в конструкциите на сгради могат да се *определят чрез интегриране на диференциалното уравнение на движението, като се отчита развитието на пластичните деформации и ускорението на основата се моделира с реални или изкуствени акселерограми*. Единственото изискване е максималното ускорение на земната основа да се приеме като не по-малко от нормативно определеното за съответния район от приложената карта за сеизмично райониране. Няма изисквания, свързани с подбора на акселерограми.

С цел по-плавно преминаване към строителните норми, разработени от Европейския комитет по стандартизация, през 2012 г. е направена нова редакция на наредбата (*Наредба № РД-02-20-2*), като са добавени част от изискванията на *Еврокод 8 (БДС EN 1998-1)*. Включените в динамичния анализ акселерограми могат да бъдат реални, валидни за съответната строителна площадка, или генерирани от линейните спектри на реагиране за 5% затихване. Остава валидно изискването на предишната наредба за максималното ускорение на земната основа, като не са добавени други изисквания за подбора на акселерограмите.

## 2. Нормативни актове, използвани в чужбина

### 2.1. Еврокод 8 (EN 1998-1:2004)

Общите правила при прилагане на нелинеен метод изискват използването на билинейна зависимост „напряжение–деформация” („сила–деформация” на ниво елемент) като минимум за отчитане на нелинейно поведение. За нови конструкции могат да се използват характеристиките, дадени в отделните части на *Еврокодовете* за съответния строителен материал. Могат да бъдат приети допълнителни опростяващи предпоставки за вида на диаграмата. Определени са два основни вида за нелинеен анализ – статичен нелинеен анализ и динамичен нелинеен анализ с акселерограми.

Статичният нелинеен анализ може да се използва за проверка на поведението на конструкцията. За целта се дефинират строителните материали с техните съответни нелинейни параметри, конструкцията се натоварва с монотонно нарастващи хоризонтални сили и се съставя графика на напречната сила в основата на модела спрямо избрано контролирано преместване, което е обикновено на точка от върха на конструкцията. От графиката се определя т.нар. „целево преместване” и се изчисляват прецизно коефициентът на поведение  $q$  и отношението  $\alpha_n/\alpha_1$ .

При динамичния нелинеен анализ е необходимо да се отчете реалистично поведението на конструктивните елементи при циклично разтоварване и повторно натоварване. Изчислителната стойност на ефект от въздействието може да се получи като най-неблагоприятната възможна от определен брой анализи или в случай, че анализите са 7 или повече – като средна стойност от всичките. Използваните акселерограми трябва да отговарят на изискванията в частта за дефиниране на сеизмичното въздействие:

- използване на **три** едновременно действащи акселерограми – по една за всяко едно от три ортогонални направления, като не може да се използва една и съща акселерограма едновременно по двете хоризонтални направления;

- да се използват минимум три акселерограми и характеристиките на спектралните ускорения от тях да отговарят на определени условия;
- изкуствените акселерограми трябва да отговарят на еластичните спектри на реагиране при 5% вискозно затихване, продължителността им трябва да съответства с магнитуда и минималната продължителност на стационарната част на акселерограмите да бъде 10 секунди;
- регистрирани или числено генерирани чрез моделиране на източника акселерограми могат да се използват, ако са „адекватно квалифицирани” спрямо източника на сеизмичното въздействие и почвените условия на строителната площадка, като стойностите им са мащабираны спрямо разглеждания район.

## 2.2. NZS1170.5-2004 (Нова Зеландия, 2004 г.)

Новозеландските норми имат стриктни изисквания към използването на акселерограми при динамичен нелинеен анализ. Основните изисквания към акселерограмите са:

- като минимум да се използват записи по двете хоризонтални направления, а вертикалният компонент се включва при изследване на конструкции и елементи, върху които би оказал значително влияние (конзоли, оборудване и т.н.);
- използване на фамилия от поне три записа, като при липса на съществуващи за дадена строителна площадка, могат да се използват и симулирани;
- всеки запис се мащабира с коефициент, за да съвпадне характерният за него спектър с проектния спектър;
- всеки запис се мащабира с друг коефициент, за да се осигури, че енергийното съдържание на поне един от записите във фамилията надвишава проектния спектър;
- определя се интервал на интерес за спектъра за всяко направление на сеизмичното въздействие като 40% и 130% от основния трансляционен период за разглежданото направление, но приет не по-малък от 0,4 секунди.

Нелинейният анализ изисква записите да се прилагат едновременно за двете основни (взаимноперпендикулярни) направления. Разглеждат се най-малко два анализа – при единия основният компонент на земетресението е насочен по направление на основния трансляционен период на конструкцията, а при другия – перпендикулярно на него, като коефициентите за мащабиране биха били различни за различната ситуация, понеже зависят от периода в това направление. Така или иначе други анализи с различни направления трябва да се разгледат, за да се определят най-неблагоприятните ефекти за всеки елемент. Има изисквания към избора на големината на времевата стъпка за всеки запис, като тя зависи от периода при първата форма на трептене и вида на анализа. Ако се предвижда удар или повдигане на фундаментите, то стъпката се намалява 10 пъти в сравнение със стандартния анализ. При невъзможност за достигане на сходимост на решението стъпката се намалява два или при нужда повече пъти до достигане на сходимост. Ако относителната разлика в изследвания параметър при два последователни анализа е по-малка от 5%, то се счита, че анализът с по-голямата времева стъпка, явяващ се и по-бърз, е приемлив.

### 2.3. NCh433.Of1996 (Чили, 1996 г. с корекция от 2009 г.)

Чилийските норми за проектиране на жилищни сгради разрешават единствено два варианта на изчисляване на конструкцията чрез статичен анализ – метод на хоризонталните сили и модален спектрален анализ. Те не съдържат клауза за изчисляване на конструкциите чрез динамичен нелинеен анализ. Той обаче е допустим при сеизмично проектиране на индустриални сгради и съоръжения, определено чрез NCh2369.Of2003.

Основните изисквания на наредбата са:

- дуктилността не бива да превишава 2/3 от наличната;
- нелинейният модел може да включва динамичното взаимодействие между земната основа и конструкцията, но влиянието му трябва да бъде ограничено до 75% от резултата при същия нелинеен модел и безкрайно коравата основа;
- срязващата сила в основата не трябва да бъде по-малка от 75% или по-голяма от 125% от срязващата сила, определена от модалния спектрален анализ, или дадена минимална стойност на срязващата сила в основата;
- използване на най-малко три актуални и представителни записа за съответната сеизмична зона, а произтичащите от тях спектри на реагиране се комбинират по правилото „корен квадратен от средното аритметично на квадратите“ за получаване на окончателния спектър, чиито стойности не трябва да бъдат по-малки от стойностите на проектния спектър;
- ако това условие не е изпълнено, то записите се мащабират по такъв начин, че техните спектри да съвпадат с проектния;
- възможно е използването на синтетични записи, като техните спектри трябва да надвишават проектния спектър;
- при анализа се отчитат възможно най-неблагоприятните ефекти от всеки запис, а сеизмичното въздействие се приема за действащо само в едно от главните хоризонтални направления и вертикалното направление;
- продължителността на всеки запис трябва да бъде 120 или повече секунди, освен ако проучване за сеизмичния риск оправдава друга продължителност;
- използва се коефициент на затихване, константа, определен в нормите.

### 2.4. Normas Tecnicas Complementarias para Diseno por Sismo (Мексико сити, 2004 г.)

В Мексико няма единни строителни норми, а всяка община определя свои собствени. Все пак най-често се позовават на „Техническите норми за сеизмично проектиране“ на град Мексико сити. В тях обаче съществува един кратък параграф, касаещ динамичен нелинеен анализ, определен като „анализ стъпка по стъпка“. Могат да се използват реални или симулирани записи, както и комбинация от двата вида. Изискват се най-малко **четири** на брой представителни и независими един от друг записи в хоризонтално направление, които са с подходящ интензитет, а също и отчитане на нелинейното поведение на конструкцията в анализа.

## 2.5. ASCE 7-10 (САЩ, 2010 г.)

Динамичният нелинеен анализ изисква всеки конструктивен елемент да се моделира с хистерезисно поведение, което отговаря на проведени лабораторни тестове и отчита характерни особености на модела като провлачване, понижаване на якост и коравина. Моделът на конструкцията трябва да бъде или със запъване в основата, или характеристиките на земната основа и взаимодействието ѝ с фундаментите да са отчетени по рационален начин чрез принципите на строителната механика. Регулярни конструкции с две обособени взаимноперпендикулярни главни направления могат да се моделират чрез два независими равнинни модела, а за нерегулярни задължително се използва пространствен модел. Комплект от най-малко **три** подходящи записа трябва да се използва в анализа. При анализ с равнинен модел се използват записи на движение на земната основа в хоризонтално направление, като те трябва да съответстват по магнитуд, разстояние до разлома и механизъм на източника на проектното земетресение. Ако не е наличен необходимият брой записи, то могат да се използват и подходящи симулирани движения на земната основа. Записите трябва да се мащабират по такъв начин, че съответстващите на всяка комбинация от записи спектри на реагиране за затихване от 5% да надвишават проектния спектър за строителната площадка в интервал от 20% до 150% от основния период на трептене на конструкцията за разглежданото направление. При анализ на пространствен модел се използват двойки записи в хоризонтално направление. За записите важат същите изисквания като при анализ на равнинен модел. Спектърът, чрез който се определя коефициентът на мащабирание на записите, се определя като корен квадратен от сумата на квадратите на стойностите от спектрите на реагиране за затихване от 5% за всяко направление и трябва да надвишава стойностите от проектния спектър за 5% затихване в интервала от 20% до 150% от основния период на трептене на конструкцията. От всички анализи се използват най-неблагоприятните стойности на изследваните характеристики. В случай че са изследвани поне **седем** записа, то търсената характеристика може да се приеме със стойност, средноаритметична от стойностите при различните анализи.

Нормите изискват и изготвянето на проектна рецензия от независим екип, състоящ се от регистрирани професионалисти в съответните области, както и специалисти по методи за сеизмичен анализ, теория и приложение на нелинеен сеизмичен анализ и поведение на конструкциите при екстремни циклични натоварвания. Рецензията трябва да съдържа следното съдържание, но и да се свежда единствено до него:

- обзор на всякакви специфични за строителната площадка сеизмични критерии, използвани в анализа, включително изработване на специфичния за площадката проектен спектър и акселерограми;
- обзор на критериите за допустимост, използвани да покажат годността на избраните конструктивни елементи и системи за поемане на изчислените усилия и необходимите деформации, включително и лабораторни и други данни, използвани за потвърждаване на тези критерии;
- обзор на предварителното проектиране, включително избора на конструктивна система и разположението на конструктивните елементи;
- обзор на окончателното проектиране на цялата конструктивна система и всички спомагателни анализи.

## 2.6. Building Standard Law (Япония, 2000 г.)

Динамичният нелинеен анализ може да се използва за всички видове конструкции, без ограничение.

За голяма част от сградите японските норми предвиждат проектиране в две фази. При първата фаза сеизмичното въздействие се представя чрез линейни методи, а във втората се използва статичен нелинеен анализ за потвърждаване на определени характеристики, например налична и необходима дуктилност, използвани в първата фаза. В този смисъл статичният нелинеен анализ не се използва за проектиране, а единствено за проверка.

За сгради с височина над 60 метра се предвижда използване на алтернативни методи (динамичен нелинеен анализ) въз основа на експертни оценки. Движението на земната основа трябва да отговаря на следните изисквания:

- спектърът на реагиране за ускорения трябва да удовлетворява определени стойности, посочени в правилника;
- продължителността на сеизмичното въздействие трябва да е над 60 секунди;
- движението на земната основа, независимо дали е дефинирано като ускорение, скорост или преместване, трябва да бъде зададено в цифров вид с подходящи времеви интервали;
- броят на записите трябва да е достатъчен, за да потвърди безопасността на конструкцията при сеизмичното въздействие, като не се посочват конкретни минимални изисквания.

Ако при моделиране на движението на земната основа се вземат предвид влиянието на близко разположени разломи, магнитудът, разстоянието до епицентъра и други характеристики на сеизмичното въздействие, то горните изисквания не е необходимо да бъдат изпълнени.

Движението на земната основа може да бъде представено изкуствено по два начина:

- генериране на акселерограма от спектъра на реагиране в зависимост от магнитуда и разстоянието до епицентъра; при подобно генериране могат да се използват някои характеристики, например фазова разлика от вече записани реални движения на земната основа;
- генериране на акселерограма, като се има предвид местоположението и активността на съществуващите разломи, големината и разпространяването на разломната повърхнина, както и разпространяването на сеизмичните вълни от разлома до избраната строителна площадка.

Нормите не предоставят ограничения за характеристики на материалите, конструктивни размери или методи за изчисляване. Използваните методи и получените резултати трябва да бъдат прегледани от специалисти с достатъчно познания и опит при определяне на движението на земната основа, използване на динамичен анализ и поведение на конструктивните елементи при сеизмични въздействия.

## 2.7. National Building Code of Canada (Канада, 2005 г.)

Динамичен нелинеен анализ с акселерограми може да се използва за значими или нерегулярни конструкции. Изисква се проектните акселерограми да бъдат съвместими с проектния спектър, като не е уточнено в какво точно трябва да се изрази тази съвместимост. Не е уточнен видът на проектните акселерограми – дали става въпрос за

записани реални движения на земната основа или изкуствено генерирани, които удовлетворяват проектния спектър. Няма изискване и за броя на използваните записи.

### 3. Заключение

Отчитането на нелинейното поведение на конструкциите е сложен процес, който е сравнително улеснен със съвременното развитие на изчислителната техника. Определянето на сеизмичното въздействие остава обаче предмет на статистически анализ и подходяща преценка за множество фактори, които оказват значително влияние върху него. Голяма част от разгледаните строителни норми имат препоръчителни указания и насоки, като се осланят главно на личната преценка на проектанта. За съжаление в тях липсва нормативно ограничение, което да предпази проектанта от груби грешки при избор вида на сеизмичното въздействие.

От разгледаните дотук правилници нормите на Нова Зеландия в това отношение се отличават с най-стриктно дефинираните изисквания за моделиране на сеизмичното въздействие. Подобно условие, макар и в неявен вид, се среща и в нормите на САЩ и Япония – необходимостта от одобрение на използваните в проекта методи от независими експерти.

### ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1998-1:2005. Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 1: Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради. 2005.
2. *Игнатиев, Н., П. Сотиров.* История на българските норми за сеизмично изследване на конструкциите и преход към конструктивна система Еврокодове. 2012.
3. Наредба № РД-02-20-2 за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони. София, МРРБ. 2012.
4. *Христосков, Л.* Сеизмология. Част 1: Сеизмични вълни в изотропни среди. 2005.
5. ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. 2010.
6. *Buenrostro, C.* Mexico City's Code of Building Regulations. 2004.
7. *Gutierrez, J.* Seismic Code Evaluation – Mexico. 2003.
8. *Kuramoto, H.* Seismic Design Codes for Buildings in Japan. 2006.
9. *Lin, L., K. Galal.* On the Use of Spectrum-compatible Seismic Excitations in the Design of Reinforced Concrete Buildings. 2012.
10. *Midorikawa, M., I. Okawa, M. Iiba, M. Teshigawara.* Performance-Based Seismic Design Code for Buildings in Japan. 2000.
11. *Naumoski, N., M. Saatcioglu, K. Amiri-Hormozaki.* Effects of Scaling of Earthquake Excitations on the Dynamic Response of Reinforced Concrete Frame Buildings. 2004.
10. NIST GCR 12-917-18 Comparison of U.S. and Chilean Building Code Requirements and Seismic Design Practice 1985–2010. 2012.
11. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. 2004.
12. Norma Chilena NCh433.Of1996 Diseño sísmico de edificios. INN-Chile, 2009.
13. Norma Chilena NCh2369-Of2003 Earthquake-resistant design of industrial structures and facilities, a draft in English. INN-Chile, 2003.
14. NZS 11705:2004. Structural Design Actions, Part 5: Earthquake Actions - New Zealand, 2004.

15. NZS 11705:2004. Structural Design Actions. Part 5: Earthquake Actions - New Zealand - Commentary (Supplement to NZS 1170.5:2004), 2004.
16. *Ordaz, M., Meli, R.* Seismic Design and Codes in Mexico. 2004.
17. *Otani, S.* Japanese Seismic Design of High-Rise Reinforced Concrete Buildings - An Example of Performance-Based Design Code and State of Practices. 2004.
18. *Otani, S., Hiraishi, H., Midorikawa, M, Teshigawara, M.* New Seismic Design Provisions in Japan. 2000.

Постъпила: април 2015 г.

## **NONLINEAR MODELLING OF STRUCTURES AND TECHNICAL REGULATIONS – APPLICATION AND LIMITATIONS**

**P. Naydenov<sup>1</sup>, A. Traykov<sup>2</sup>**

**Keywords:** *nonlinear behaviour, reinforced concrete, building codes*

**Research area:** *earthquake engineering*

### **ABSTRACT**

The paper considers ways of modelling the nonlinear behaviour of reinforced concrete structures and requirements for representing the seismic excitation according to some contemporary building codes used in seismic regions. Regulations from Bulgaria, the European Union, New Zealand, Chile, Mexico, the USA, Japan and Canada are reviewed.

---

<sup>1</sup> Pavel Naydenov, Eng., PhD Student, Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd, Sofia 1046, e-mail: naydenov\_fce@uacg.bg

<sup>2</sup> Alexander Traykov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd, Sofia 1046, e-mail: alex\_fce@uacg.bg

