



Получена: 17.07.2023 г.

Приета: 20.09.2023 г.

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА УСИЛИЯТА В СТОМАНЕНИ ОБТЕГАЧИ ЧРЕЗ БЕЗРАЗРУШИТЕЛНИ ДИНАМИЧНИ ИЗПИТВАНИЯ

В. Танев<sup>1</sup>, Г. Василев<sup>2</sup>, Б. Белев<sup>3</sup>, Н. Керенчев<sup>4</sup>, Е. Йорданов<sup>5</sup>

*Ключови думи:* метални обтегачи, динамичен анализ, модален анализ, безразрушително изпитване

### РЕЗЮМЕ

Метални обтегачи са използвани в много исторически обекти и сгради от недвижимото културно наследство (НКН) у нас и в чужбина. Тяхното действително напрегнато състояние е важен индикатор за общото конструктивно състояние на сградите. Стоманени обтегачи се използват широко и в съвременното строителство, например в покривните конструкции на зали с големи отвори, козирки на стадиони и др.

За оценка на напрегнатото състояние на такива обтегачи се предпочитат и прилагат безразрушителни методи, като обичайно обследването се провежда в условията на ограничена информация за характеристиките на материала, анкерирането в краищата и действителните опънни усилия в тях. Определянето на опънните усилия в обтегачите чрез безразрушителни динамични изпитвания, т.е. чрез записи на динамичното им реагиране, се влияе от опорните (граничните) условия, за чието отчитане са предложени различни подходи в изследванията на други изследователи по проблема.

---

<sup>1</sup> Вълчо Танев, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [tanev\\_fce@uacg.bg](mailto:tanev_fce@uacg.bg)

<sup>2</sup> Георги Василев, гл. ас. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [vasilev\\_fce@uacg.bg](mailto:vasilev_fce@uacg.bg)

<sup>3</sup> Борислав Белев, проф. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [belev\\_fce@uacg.bg](mailto:belev_fce@uacg.bg)

<sup>4</sup> Николай Керенчев, гл. ас. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [kerenchev@hotmail.com](mailto:kerenchev@hotmail.com)

<sup>5</sup> Емил Йорданов, доц. д-р арх., кат. „История и теория на архитектурата“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [emj\\_far@uacg.bg](mailto:emj_far@uacg.bg)

В рамките на научноизследователски проект към Центъра за научно изследване и проектиране (ЦНИП) при Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ) е проведено експериментално изследване на стоманен обтегач, при което се анализира динамичното му реагиране след импулсно въздействие, приложено в различни точки от дължината на елемента, за различни стойности на опънното усилие. Паралелното числено моделиране и динамично изследване на същия обтегач дава възможност за прогнозиране и контрол на получените експериментални резултати. Направени са изводи за практическото приложение на избрания подход за определяне на опънните усилия в метални обтегачи.

## 1. Въведение

Действителното напрегнато състояние на металните обтегачи е важен индикатор за общото конструктивно състояние на сградите от недвижимото културно наследство (НКН). Коректното определяне на осовите (опънни) усилия в обтегачите е в основата на правилния избор на подход за възстановяване, ремонти и усиление на тези сгради. Мониторингът на опънните усилия може да послужи за ранно откриване на неблагоприятни процеси като напукване на зидарията, слягания на земната основа и др. повреди. Практическото определяне на усилията в обтегачите обичайно е затруднено от променливите размери на напречните им сечения, вариращите якостно-механични характеристики на материала, неясните опорни условия, дефекти и повреди. Специфичният статут на сградите от НКН е определящ за приоритетно използване на безразрушителни методи за изпитване.

При изпълнение на научната програма на проект БН-269/2022 към ЦНИП при УАСГ беше направено проучване на монографии и специализирани публикации за българското архитектурно наследство, в които се съдържа информация за обекти от НКН с метални обтегачи (предимно църкви и манастири). Проучването впоследствие беше разширено за набиране на допълнителна информация от интернет. Поради географската разпръснатост на обектите беше решено архитектурно-конструктивно заснемане и обследване на място на репрезентативни обекти да се проведе в два региона – по един в Северна и Южна България. Обследването на място имаше за цел да изясни какви са основните конструктивни особености, преобладаващите напречни сечения и диапазони на светлите дължини на обтегачите, както и да събере подробен снимков материал, необходим за следващите етапи на изследването.

В Троянския регион беше проведено визуално обследване и заснемане на геометричните размери на металните обтегачи в църквата „Св. Николай Мирликийски“ в с. Гумощник, църквата „Св. Петка Параскева“ в гр. Троян, църквата „Успение Богородично“ на Троянския манастир и църквата „Успение Богородично“ в гр. Ловеч. Втората група обекти беше обследвана от сътрудници по проекта, които посетиха църквата на Лопушанския манастир (до с. Г. Дамяново) и Хана на Хаджи Николи (гр. В. Търново). Третата група обследвани обекти с метални обтегачи включваше катедралния храм „Св. Йоан Предтеча“ и църквата на девическия манастир в гр. Казанлък, църквата „Успение Богородично“ в гр. Пазарджик и църквата „Света Марина“ в гр. Пловдив. За всеки от обектите беше съставен каталог с основните геометрични и конструктивни параметри на обследваните обтегачи в таблична форма и архив с фотодокументация. По-важните резултати и изводи от обследванията на гореизброените обекти са дадени в [1].

При обобщение на чуждестранния опит в изследванията на метални обтегачи в сгради от европейското архитектурно-историческо наследство [2 – 9], може да се направи извод, че поради спецификата на напрегнатото им състояние трябва да се отчита влиянието на огъвната им коравина, опорните условия в краищата и началното напрегнато и деформирано състояние от собственото тегло. Характерна особеност на изследванията, както и на процедурите за практическото определяне на усилията в металните обтегачи, е съчетаването на двата подхода – експериментално изследване на място и числени нелинейни изследвания, обичайно с модели по метода на крайните елементи (МКЕ).

В [10] е представено числено изследване с разработените по проект БН-269/2022 числени модели по МКЕ, с които е проучена зависимостта между собствените честоти и опънните усилия/напрежения в метални обтегачи. Първата част от изследването имаше за цел верифициране на възприетите изчислителни процедури чрез симулиране на описани в литературата [7] лабораторни изпитвания на стоманени обтегачи. В моделите се отчитат положението и масите на монтираните акселерометри, както и приложените опънни сили. Основен метод за изследване на динамичното реагиране е динамичният анализ във времето с отчитане на нелинейните ефекти от собственото тегло на обтегача и опънното усилие в него. Историите на ускоренията, изчислени за възлите, в които са прикрепени акселерометрите, се подлагат на Фуриерова трансформация (FFT), т.е. на анализ в честотната област. Пиковите в получените Фуриерови спектри съответстват на собствените честоти на динамичната система (обтегач + акселерометри). Стойностите на собствените честоти са съпоставени с експериментално определените в [7] и с изчислените по известна в динамиката аналитична формула, отчитаща огъвната коравина и опънното усилие в обтегача. Втората част от изследването е посветена на моделиране и динамичен анализ на един „референтен“ обтегач от обследваните в църквата в с. Гумощник, Троянско. За този обтегач са построени зависимостите „собствена чистота – опънно напрежение“ за първите четири форми на собствени трептения.

Третата важна задача в проекта БН-269/2022 беше да се проектира и изгради експериментална постановка, с която да се реализират безразрушителни динамични изпитвания (БДИ) на стоманени обтегачи при различни нива на опънното усилие в тях и при различни опорни условия (ставно опирание и запъване). Крайната цел от изследванията по гореизложените направления беше създаването на една сравнително бърза, ефективна и „неинвазивна“ методика за определяне на усилията в обтегачите в сгради от нашето НКН.

## 2. Описание на експерименталното изследване

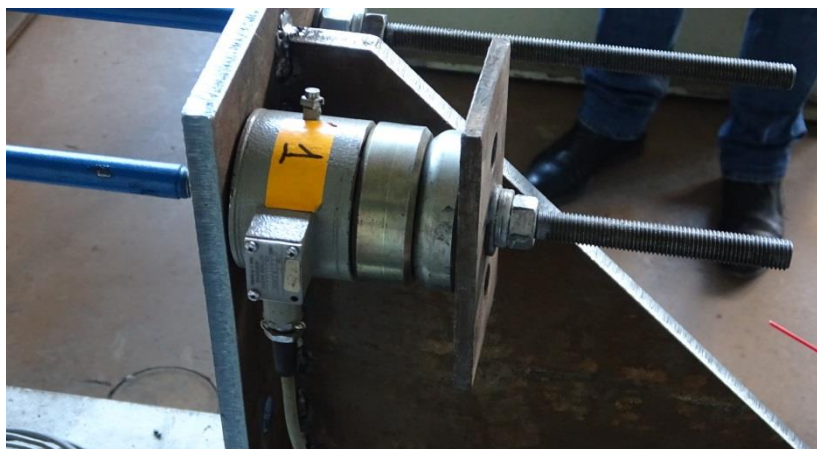
Опитната постановка е реализирана в конструктивната лаборатория на Строителния факултет (СФ) при УАСГ, където е използван универсален стенд като опорна система. Върху него са заварени две стоманени конзоли, към които са закрепени краищата на два стоманени обтегача (фиг. 1). Изследван е единият от обтегачите, който е с кръгло напречно сечение и диаметър 18 mm. В краищата му е направена метрична резба за монтиране на гайки М16. Закрепването на обтегача е посредством гайки, подложни шайби, опорни плочи и сферични стави. В левия си край обтегачът е опрян чрез сферична става директно на конзолата (фиг. 2), а в десния му край е поставена измерителна доза за сила („мес-доза“), фиг. 3. При тази постановка в двата края на пръта са реализирани ставни опори. За симулиране на кораво опирание (запъване) краищата на пръта се оборудват с кубични накрайници 50×50×50 mm, които не позволяват завъртания в опорните зони.



**Фиг. 1.** Общ вид на експерименталната постановка

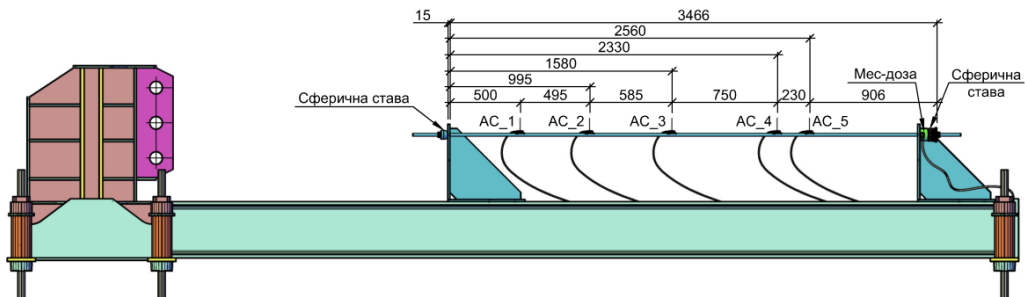


**Фиг. 2.** Ляв опорен край на обтегача със сферична става



**Фиг. 3.** Десен опорен край на обтегача с измерителна доза (поз. 1)

Върху изпитвания обтегач са монтирани пет броя акселерометри, означени съответно (от ляво на дясно) като AC\_1, AC\_2, AC\_3, AC\_4 и AC\_5 (фиг. 4). Местата на акселерометрите по дължината на пръта са избрани така, че положението им да не съвпада със средата, с третина, четвъртина или 1/5 от дължината му. Основните изисквания към акселерометрите са както следва: ниско до средно ниво на шум, в случая  $5 \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ ; обхват до около 4g, в случая 10g; относително ниска маса и подходящо закрепване без собствени честоти в ниските честотни диапазони. Измерените маси на акселерометър с частта от кабела и на закрепващото го устройство са както следва: акселерометър и кабел – 125 g, плочка с U-болтове и болтове за връзка на акселерометър – 141 g. Общата маса на един акселерометър с неговото закрепване е 266 g. Линеината маса на обтегача е  $m = 1,997 \text{ kg/m}$ , а общата маса е 6,66 kg.

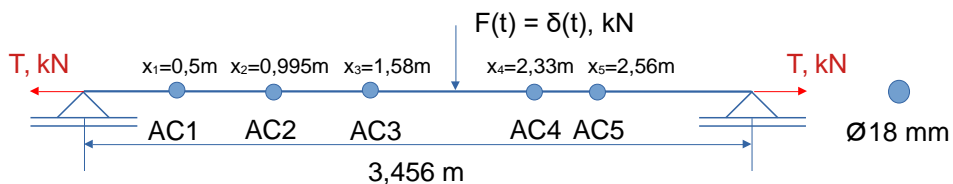


Фиг. 4. Схема за разполагане на акселерометрите по дължина на обтегача

Опънатата сила в обтегача се създава посредством натягане на гайките в двата му края и изчакване до установяване на постоянна сила в пръта преди започване на конкретното измерване. Реализирани са четири степени на натоварване:  $T_1 = 7,73 \text{ kN}$ ,  $T_2 = 13,87 \text{ kN}$ ,  $T_3 = 20,95 \text{ kN}$  и  $T_4 = 24,51 \text{ kN}$ . На тези степени на натоварване съответстват опънни напрежения в напречното сечение на обтегача, равни съответно на 30,4 MPa, 54,5 MPa, 82,3 MPa и 96,3 MPa. Въздействията върху пръта (лек удар с гумен чук или удар с ръка) се прилагат в следните точки: средата ( $L/2$ ), третина ( $L/3$ ) и в четвъртина ( $L/4$ ). За всяка степен на опънното усилие са направени по два опита, като силата на ударите, прилагани за възбуждане на вибрации на обтегача, не е контролирана.

### 3. Описание на числения модел и численото изследване

Изчислителният модел, разработен чрез метода на крайните елементи (МКЕ), е схематично представен на фиг. 5.

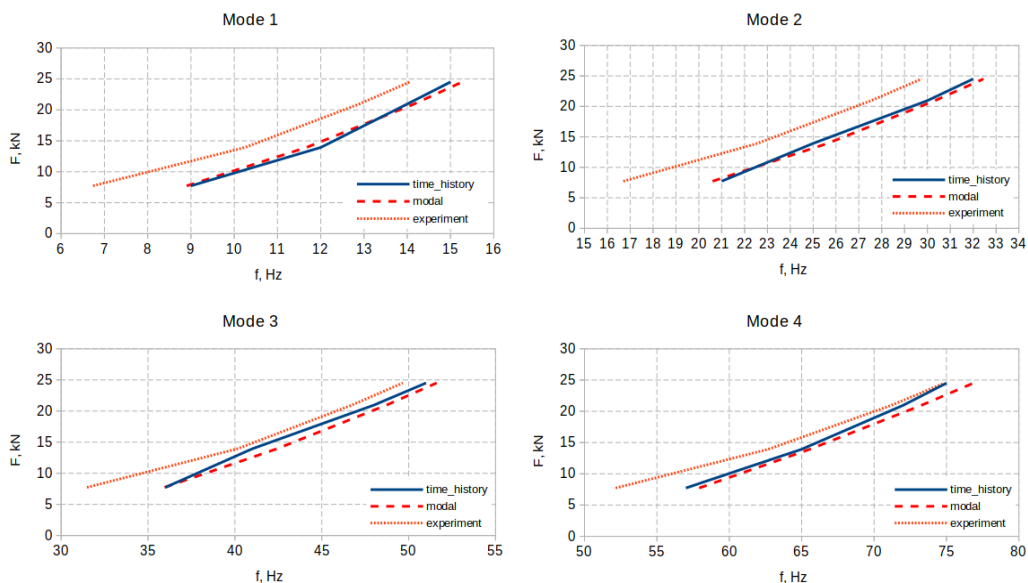


Фиг. 5. Схема на изчислителния модел

Приети са следните характеристики за материала: модул на еластичност  $E = 2,1 \cdot 10^8$  kPa; коефициент на Poisson  $\nu = 0,3$  и обемно тегло  $\gamma = 78,5$  kN/m<sup>3</sup>. Масата на един акселерометър заедно със закрепването му е равна на 266 g.

Дефинират се четири товарни състояния със стойности на опънното усилие, идентични с тези в експерименталното изследване. За всяко едно от тези товарни състояния се провежда модален и времеви анализ. Собствените честоти в модалния анализ се определят след прилагане на опънната сила и натоварването от собствено тегло на обтегача. Времевият анализ се провежда за изследване на реагирането на обтегача, породено от импулсно въздействие  $F(t)$ . Историите на ускоренията, получени с времеви анализ за точките, в които са разположени акселерометрите, се подлагат на Фуриерова трансформация, след което собствените честоти на динамичната система се идентифицират като съответстващи на пиковите в честотния спектър на реагиране. Накрая са построени зависимостите „собствена честота – опънна сила“ за първите четири форми на собствени трептения, представени на фиг. 6. На фиг. 6 са показани следните резултати:

- графики от експеримента в лабораторни условия, обозначени като „experiment“;
- графики от проведен нелинеен анализ във времето („time\_history“);
- графики с резултати от модален анализ („modal“).

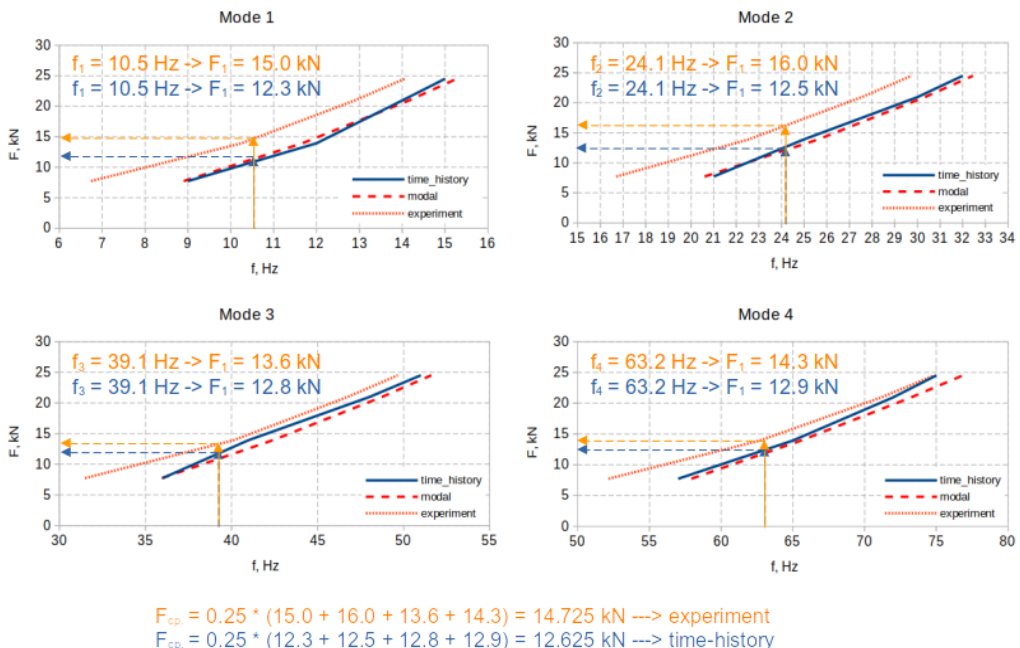


**Фиг. 6. Зависимости „собствена честота – опънна сила“ за първите четири форми на собствени трептения (Mode 1, Mode 2, Mode 3 и Mode 4)**

Резултатите, представени на фиг. 6, показват, че експериментално получените зависимости са отместени наляво (към по-ниските честоти) от кривите, получени в числения експеримент. Отклонението е по-значително при ниските форми, т.е. при по-високите форми на собствени трептения графиките от експеримента и получените с числения модел са с по-малки разлики. Освен това може да се направи извод, че с увеличаване на опънната сила в обтегача резултатите от експеримента и числения модел се доближават съществено. Зависимостите, построени за трета и четвърта форма на собствени трептения, и особено при по-високите опънни усилия, са много близки.

След актуализиране на числения модел въз основа на експериментално получените модални характеристики на обтегача зависимостите „собствена честота – опънна сила“ могат да бъдат използвани за определяне на опънните усилия в обтегачи от реални обекти от НКН. На фиг. 7 е представена примерна процедура за получаване на опънното усилие в такива обтегачи, която включва следните стъпки:

- 1) провежда се серия от измервания с набор от акселерометри, монтирани върху обследвания обтегач и като резултат се записват акселерограмите в съответните точки;
- 2) фуриеровите трансформации на акселерограмите се обработват статистически в честотен интервал и се получава осреднен честотен спектър на реагиране, в който ясно се отличават собствените честоти на обтегача (пиковите във фуриеровия спектър);
- 3) с така получените собствени честоти се влиза в получените с числени симулации зависимости „собствена честота – опънна сила“ за всяка една от изследваните собствени форми (аналогични на представените на фиг. 6) и се отчита опънната сила;
- 4) при приета еднаква тежест на собствените форми се прави осредняване, т.е. опънното усилие в обтегача се приема равно на средно-аритметичната стойност от прогнозните му стойности, получени за всяка от разглежданите форми на собствени трептения.



**Фиг. 7. Схематично представяне на процедурата за определяне на опънното усилие в обследван обтегач**

*Забележка: експерименталните зависимости са добавени за илюстриране на неизбежните неточности при използване на числени методи за анализ.*

#### 4. Анализ на получените резултати

Обобщените резултати от измерванията са представени в табличен вид в табл. 1. В следствие те са сравнени с резултатите от модела по МКЕ. Прието е записването на ускоренията да става с честота на дискретизация 300 Hz. Тази честота на дискретизация е значително по-голяма от най-голямата търсена честота на собствени трептения. Записващата система използва хардуерен модул Quantum MX840В и управляващ софтуер CatmanEasy.

За анализ на честотния състав на сигнала (записа) от всеки акселерометър и всяко ударно въздействие е използвана бърза Фуриерова трансформация (FFT). За определяне на амплитудата при Фуриеровата трансформация е използвано правилото RMS (Root Mean Square – корен квадратен от средната сума на квадратите).

**Таблица 1. Експериментално определени собствени честоти и амплитуди за четирите степени на натоварване на обтегача**

		Сила $F_1=7,730$ kN		Сила $F_2=13,931$ kN		Сила $F_3=20,950$ kN		Сила $F_4=24,505$ kN		
		Честота	Амплитуда	Честота	Амплитуда	Честота	Амплитуда	Честота	Амплитуда	
		(Hz)	RMS	(Hz)	RMS	(Hz)	RMS	(Hz)	RMS	
Собствена форма на трептене	Първа	АС_1	6,738	0,205	10,250	0,767	12,890	0,393	14,060	1,721
		АС_2	6,738	0,431	10,250	1,403	12,890	0,787	14,060	1,834
		АС_3	6,738	0,623	10,250	2,068	12,890	0,996	14,060	2,106
		АС_4	6,738	0,539	10,250	1,744	12,890	0,737	14,060	1,897
		АС_5	6,738	0,469	10,250	1,486	12,890	0,653	14,060	1,708
	Втора	АС_1	16,700	0,013	22,560	0,534	27,540	0,726	29,740	0,345
		АС_2	16,700	0,020	22,560	0,595	27,540	0,983	29,740	0,386
		АС_3	16,700	0,007	22,560	0,225	27,540	0,286	29,740	0,094
		АС_4	16,700	0,539	22,560	0,617	27,540	0,617	29,740	0,300
		АС_5	16,700	0,019	22,560	0,710	27,540	0,767	29,740	0,376
	Трета	АС_1	31,490	0,313	40,140	0,094	46,730	0,670	49,660	0,538
		АС_2	31,490	0,193	40,140	0,037	46,730	0,328	49,660	0,592
		АС_3	31,490	0,276	40,140	0,083	46,730	0,589	49,660	0,939
		АС_4	31,490	0,010	-	-	46,730	0,074	49,660	0,162
		АС_5	31,490	0,206	40,140	0,063	46,730	0,369	49,660	0,821
	Четвърта	АС_1	52,150	0,050	62,700	0,083	71,190	0,041	74,850	0,057
		АС_2	52,150	0,020	62,700	0,024	71,190	0,017	74,850	0,067
		АС_3	52,150	0,025	62,990	0,033	71,190	0,014	74,850	0,048
		АС_4	52,150	0,046	62,700	0,057	71,190	0,018	74,850	0,097
		АС_5	52,150	0,004	-	-	-	-	-	-
	Пета	АС_1	75,590	0,039	87,300	0,265	95,950	0,390	99,900	0,211
		АС_2	75,590	0,044	87,300	0,149	95,950	0,401	99,900	0,244
		АС_3	75,590	0,027	87,300	0,176	95,950	0,281	99,900	0,132
		АС_4	75,590	0,032	87,300	0,181	95,950	0,210	99,900	0,167
		АС_5	75,590	0,030	87,300	0,130	95,950	0,150	99,900	0,120

*Забележка към таблицата: NA означава неидентифицирана собствена честота в съответния запис/честотен спектър.*

За контрол на получените резултати е използвана аналитичната формула, дадена в [2], като опънното усилие  $T$  в изследвания обтегач е изчислено с експериментално определените усреднени собствени честоти  $f_n$  на първите пет форми и при предпоставка за ставно опирание в двата му края. Формулата има вида

$$T = \frac{4\pi^4 n^2}{k^4} f_n^2 mL^2 - \pi^2 n^2 \frac{EI}{L^2}, \quad (1)$$

където  $n$  е номерът на формата на трептене;

$k$  – константа, която дефинира опорните условия ( $k = \pi l$  за ставно подпирание);

$m$  – масата на пръта за метър линеен;

$I$  – инерционен момент на сечението;

$L$  – дължина на обтегача;

$E$  – модул на еластичност;

$f_n$  – собствена честота за  $n$ -тата форма на собствени трептения.

При прилагането на формулата за описаната опитна постановка се получават следните резултати за опънните усилия, представени в табл. 2.

**Таблица 2. Изчислени по формула (1) стойности на опънните усилия в обтегача, изчисления и сравнение със зададените при експеримента**

Форма на собствени трептения		Изчислено по (1) опънно усилие $T$ , kN			
		1	2	3	4
Форма на собствени трептения	1	4,39	11,22	18,25	21,88
	2	4,16	11,12	18,30	21,93
	3	4,74	12,67	19,99	23,61
	4	5,45	14,29	22,05	26,20
	5	4,25	13,15	20,33	23,82
Усреднено опънно усилие	$T$ , kN	4,60	12,49	19,78	23,49
Измерено опънно усилие	$T_{exp}$ , kN	7,73	13,87	20,95	24,51
Разлика	%	40,5	10,0	5,6	4,2

*Забележка: При прилагането на опростената формула масата на акселерометрите е отчетена като равномерно разпределена по дължината на пръта.*

## 5. Изводи и препоръки

Поради чувствителността на динамичната система към геометричните параметри, масите и опорните условия и нейното нелинейно реагиране при изменение на опънното усилие в обтегача, за решението на обратната задача е важно прецизното определяне на геометричните характеристики на елемента (дължини, размери на напречното сечение), огъвната коравина, положенията и големината на присъединените маси (масата на измервателната техника).

При извършване на БДИ в реални обекти от НКН, неопределимостта в опорните (граничните) условия на обтегачите е също съществен фактор, който може да повлияе на точността на определяне на опънните усилия. Необходимо е да се разработи процедура за уточняване на действителните опорни условия с използване на експерименталните данни, с отчитане на големите възможни вариации в тези опорни условия дори и при групи обтегачи с почти идентични дължини и напречни сечения.

При много ниски опънни усилия в обтегачите грешката при експерименталното им определяне може да е значителна. При опънни усилия, пораждащи нормални напрежения над 50 – 60 МРа, и при уточнени опорни условия може да се приеме, че очакваната грешка при определянето на опънните сили е от порядъка на 10 %.

## Благодарности

Авторите изказват своята най-искрена благодарност на целия екип на Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ за предоставеното финансиране по проект БН-269/2022 г. и добрата съвместна работа при изпълнението на проекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Tanev, V., Belev, B., Yordanov, E., Kazakova, E., Simeonova, H.* Studies on cultural heritage buildings with metallic tie-rods. Annual of UACEG, 2023, **56** (in print, in Bulgarian).
2. *Duvnjak, I., Ereiz, S., Damjanovic, D., Bartolac, M.* Determination of axial force in tie Rods of historical buildings using the model-updating technique. Applied Sciences, 10(17): 6036, 2020, <https://doi.org/10.3390/app10176036>.
3. *Lagomarsino, S., Calderini, C.* The dynamical identification of the tensile force in ancient tie-rods. Engineering Structures, **27**(6), 2005, 846-856.
4. *Campagnari S., Matteo F., Manzoni S., Scaccabarozzi M., Vanali M.* Estimation of axial load in tie-rods using experimental and operational modal analysis“. Journal of Vibration and Acoustics **139**(4): 041005, 2017, <https://doi.org/10.1115/1.4036108>.
5. *Rebecchi, G., Tullini, N., Laudiero, F.* Estimate of the axial force in slender beams with unknown boundary conditions using one flexural mode shape. Journal of Sound and Vibration, **332**(18), 2013, 4122 – 4135.
6. *Tullini, N.* Bending tests to estimate the axial force in slender beams with unknown boundary conditions. Mech. Res. Commun. **53**, 2013, 15 – 23.
7. *Luong, H. T. M., Ramos, L. F., Aguilar, F.* Identification of the tensile force in tie-rods of historical constructions. XXIX International Conference on Modal Analysis (IMAC 29), 2011, pp. 71 – 81.
8. *Garziera, R., Amabili, M., Collini, L.* A hybrid method for the nondestructive evaluation of the axial load in structural tie-rods. Nondestructive Testing and Evaluation **26**(2), 2011, 197 – 208.
9. *Amabili, M., Carra, S., Collini, L., Garziera, R., Panno, A.* Estimation of tensile force in tie-rods using a frequency-based identification method. Journal of Sound and Vibration, **329**(11), 2010, 2057 – 2067.
10. *Vasilev, G., Belev, B., Tanev, V., Kerenchev, N.* Estimation of tensile forces in metallic tie-rods based on dynamic response analysis. Annual of UACEG, 2023, **56**(1): 303 – 312 (in Bulgarian).

# ESTIMATION OF FORCES IN STEEL TIE-RODS BASED ON NONDESTRUCTIVE DYNAMIC TESTING

V. Tanev<sup>1</sup>, G. Vasilev<sup>2</sup>, B. Belev<sup>3</sup>, N. Kerenchev<sup>4</sup>, E. Yordanov<sup>5</sup>

*Keywords: metallic tie-rods, dynamic response analysis, modal analysis, nondestructive testing*

## ABSTRACT

Metallic tie-rods can be seen in many historical sites and heritage buildings. Their actual stress-and-strain state is an important indicator for the overall structural condition of the buildings. Steel tie-rods are widely used in the modern construction as well, including roof structures of large-span arenas, stadium grandstands, etc.

Nondestructive methods are preferred for the evaluation of the stress-and-strain state of such tie-rods and typically the condition assessment is carried out in conditions of limited data for the material characteristics, end anchorage of the tie-rods and the true acting tensile forces. The estimation of the tensile forces based on nondestructive dynamic testing is dependent on the boundary conditions, which are taken into account by various approaches proposed in the international research on the topic.

The paper reports on an experimental study on the dynamic response of a steel tie-rod carried out in UACEG under step-wise variation of the applied tensile force. Parallel numerical dynamic analyses are carried out for predicting and controlling of the experimental results. Conclusions and recommendations on the practical implementation of the approach used for the estimation of the tensile forces in metallic tie-rods are provided.

---

<sup>1</sup> Vatyu Tanev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [tanev\\_fce@uacg.bg](mailto:tanev_fce@uacg.bg)

<sup>2</sup> Georgi Vasilev, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Building Materials and Insulations", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [vasilev\\_fce@uacg.bg](mailto:vasilev_fce@uacg.bg)

<sup>3</sup> Borislav Belev, Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [belev\\_fce@uacg.bg](mailto:belev_fce@uacg.bg)

<sup>4</sup> Nikolay Kerenchev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [kerenchev\\_ft@uacg.bg](mailto:kerenchev_ft@uacg.bg)

<sup>5</sup> Emil Yordanov, Assoc. Prof. Dr. Arch., Dept. "History and Theory of Architecture", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [emj\\_far@uacg.bg](mailto:emj_far@uacg.bg)