



DOI: 10.71167/uaceg.2025.580104

Получена: 07.10.2024 г.

Приета: 22.10.2024 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТАЛНИ ОБТЕГАЧИ В ЦЪРКВАТА „СВ. ПАРАСКЕВА“ В ГР. ТРОЯН ЧРЕЗ БЕЗРАЗРУШИТЕЛНИ ДИНАМИЧНИ ИЗПИТВАНИЯ

В. Танев¹, Б. Белев², Г. Василев³, Н. Керенчев⁴, Е. Йорданов⁵,
Кр. Кирова⁶, П. Парашкевов⁷

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

РЕЗЮМЕ

В много исторически обекти и сгради от недвижимото културно наследство (НКН) са използвани метални обтегачи. Определянето на опънните усилия в обтегачите чрез безразрушителни динамични изпитвания, т.е. с използване на записи на ускоренията от динамичното им реагиране, се усложнява от трудни за дефиниране параметри като опорните (граничните) условия.

Предложена е итерационна методика за определяне на опънните усилия в такива обтегачи, основана на минимизиране на функцията на грешката, т.е. на разликите в стойностите на честотите на собствени трептения, определени по експериментален път и с числени модели. Методиката е приложена за определяне на опънното усилие в един от изследваните обтегачи в църковна сграда.

¹ Вълчо Танев, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1064 София, e-mail: tanev_fce@uacg.bg

² Борислав Белев, проф. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1064 София, e-mail: belev_fce@uacg.bg

³ Георги Василев, гл. ас. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1064 София, e-mail: vasilev_fce@uacg.bg

⁴ Николай Керенчев, доц. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1064 София, e-mail: kerenchev@hotmail.com

⁵ Емил Йорданов, доц. д-р арх., кат. „История и теория на архитектурата“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1164 София, e-mail: emj_far@uacg.bg

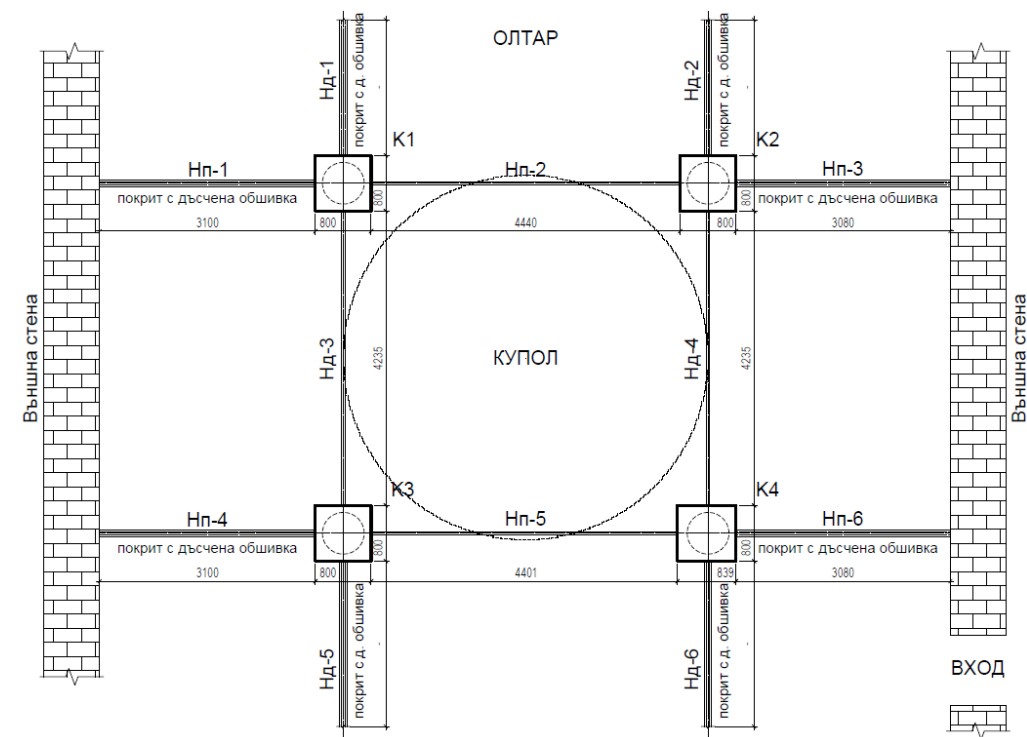
⁶ Кристияна Кирова, студентка, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1064 София

⁷ Пенчо Парашкевов, студент, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1064 София

1. Въведение

При изпълнение на програмата от втория етап на проект БН-269/2022 към Центъра за научно изследване и проектиране (ЦНИП) при Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ) беше проведено експериментално изследване на метални обтегачи в църквата „Св. Параскева – Петка“ в гр. Троян. Основната цел на това изпитване беше прилагане на разработената в проекта процедура за определяне на осовите усилия в метални обтегачи на сгради от недвижимото културно наследство (НКН), която съчетава натурни изпитвания и числени симулации.

Църквата беше един от обектите на НКН, обследвани през Етап 1 на проекта. Тя е изградена през 1835 г. и възстановена през 1879 г. след опожаряването ѝ по време на Руско-турската освободителна война. При проведеното през м. октомври 2023 г. изследване, на безразрушителни динамични изпитвания (БДИ) бяха подложени последователно три от общо четирите метални обтегачи (НП-5, НП-2 и НД-3), разположени непосредствено под купола на църквата (фиг. 1) на височина 5,60 m над нивото на пода. Не са правени изследвания за химическия състав и вида на метала, от който са изработени обтегачите, но въз основа на [1] може да се приеме, че той е ковашко желязо, чиито механични характеристики са близки до тези на съвременните нисковъглеродни стомани. Състоянието на обтегачите е много добро, без следи от значителна корозия. Напречното им сечение е квадратно, с много слабо вариращи размери на сечението по дължината на всеки обтегач. Начинът на закотвяне на обтегачите в техните краища (в зоните на капителите на колоните) е неизвестен.



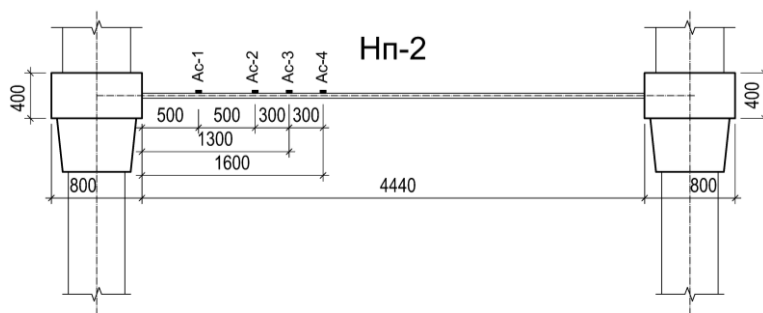
Фиг. 1. Конструктивна схема и означения на обтегачите в зоната на купола

По същество, определянето на опънните усилия в обтегачите чрез оценка на динамичните им характеристики е обратна задача, която се решава в условията на неопределеност, т.е. възможни вариации на стойностите на някои от основните, взаимосвързани конструктивни параметри. Затова при оценката на напрегнатото състояние на такива обтегачи се препоръчва съчетаване на експерименталното изследване на място с числени нелинейни изследвания. Числените симулации се извършват обичайно с модели по метода на крайните елементи (МКЕ).

За уточняване на опорните условия и калибриране на числените модели обичайно се използва подход, основан на минимизиране на функцията на грешката, т.е. на разликите в стойностите на собствените честоти на обтегачите, определени по експериментален и числен път [2 – 4].

2. Експериментално изследване чрез БДИ

Поради отказа на църковните власти да се монтира временно строително скеле, за инсталирането на набор от 4 бр. акселерометри и достъп при генерирането на динамичните въздействия бяха използвани трираменни строителни стълби. Местата на акселерометрите бяха избрани така, че да не съвпадат с точки от обтегачите, които са с нулеви модални премествания в някоя от първите изследвани 5-6 форми на собствени трептения. Разполагането на акселерометрите Ас-1, Ас-2, Ас-3 и Ас-4 по дължината на обтегач Нп-2 е показано на фиг. 2. Измерените размери на капителите, в които са закотвени обтегачите, не дават пълна информация за дефиниране на опорните условия поради факта, че по вертикалните страни на капителите е нанесен дебел слой мазилка (5 до 7 cm) с ниски якостно-механични характеристики. Динамичното въздействие беше прилагано чрез леки удари с гумен чук, нанасяни във вертикално или в хоризонтално направление. Силата на ударите, прилагани за възбуждане на вибрации на изпитвания обтегач, не е контролирана. Опитната постановка за БДИ на обтегач Нп-2 е показана на фиг. 3.



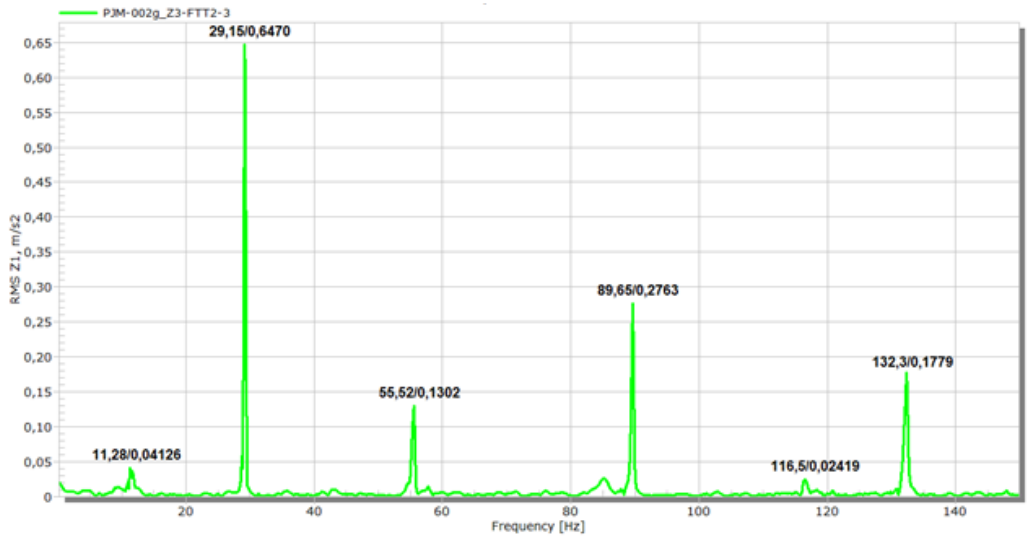
Фиг. 2. Схема на разполагане на акселерометрите върху обтегач Нп-2

За всеки от изследваните обтегачи бяха записани историите на ускоренията в точките (възлите), където са монтирани акселерометрите. Записването на ускоренията е извършено 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. При въздействие във вертикално направление се анализира динамичното реагиране във вертикалната равнина и аналогично, при хоризонтално въздействие, се

анализира реагирането на обтегача в хоризонталната равнина. Записите на ускоренията се подлагат на Фуриеров FFT-анализ (Fast Fourier Transform) с подходящ софтуер, с който се получава динамичното реагиране на обтегача в честотната област. Амплитудата във Фуриеровия спектър е определена по правилото „корен квадратен от средната сума на квадратите“ (RMS). Собствените честоти на динамичната система се идентифицират лесно като съответстващи на пиковете в честотния спектър на реагиране (фиг. 4).

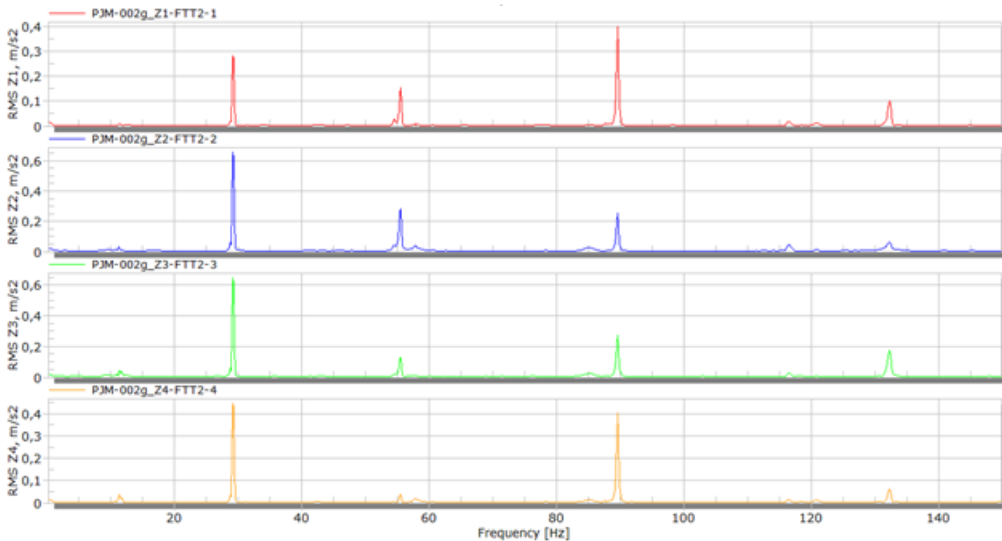


Фиг. 3. Общ вид на опитната постановка за БДИ на обтегач Нп-2



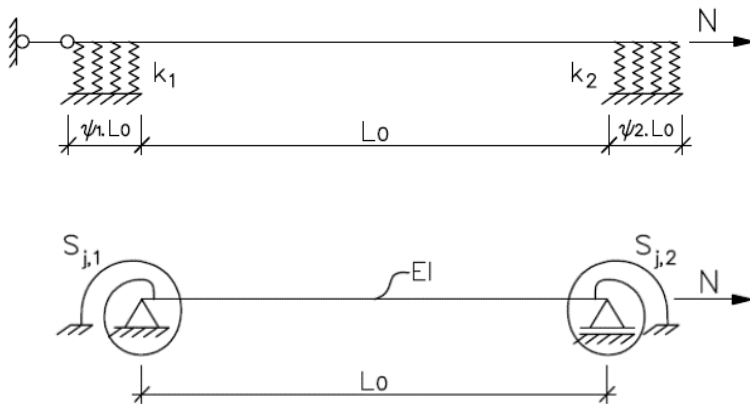
Фиг. 4. Честотен спектър на реагиране за обтегач Нп-5, получен с ускоренията в Ас-3

Съпоставката на Фуриеровите спектри, получени с историите на ускоренията от четирите акселерометри, показва, че те предсказват много близки стойности на собствените честоти на изследвания обтегач (фиг. 5).



Фиг. 5. Честотни спектри на реагиране за обтегач Нп-5, получени от историите на ускоренията в четирите акселерометри

3. Числено моделиране и изследване



Фиг. 6. Моделиране на опорните условия в краищата на обтегача

Въз основа на опита от Етап 1 на този изследователски проект беше преценено, че използването на нелинейни анализи на динамичното реагиране във времето е необосновано времеемко, поради което беше възприет следният подход: първоначално се провежда статично нелинейно изчисляване на обтегача за натоварването от собствено тегло на обтегача и за конкретна стойност на осовата опънна сила, след което се прилага динамичен (модален) анализ за определяне на собствените честоти и форми на

трептения. Основното неизвестно е действителната (действаща в реалния обтегач) опънна сила, но освен нея на динамичните характеристики на елемента влияят и опорните условия в краищата му (също неизвестни). Моделирането на опорните условия (еластично запъване) се извършва чрез въвеждане на участъци в краищата на обтегача, опряни на Винклерова основа, или на ротационни пружини (фиг. 6). За опростяване на задачата винклеровите константи и коравините на ротационните пружини в двата края на елемента могат да се приемат еднакви. Обтегачът се моделира с линейни (прътови) крайни елементи, най-малко десет на брой с еднаква дължина.

Приети са следните характеристики за материала: модул на еластичност $E = 2,0 \cdot 10^8$ kPa; коефициент на Poisson $\nu = 0,3$ и плътност $\rho = 7850$ kg/m³. Масата на акселерометрите е отчетена в модела чрез завишаване на плътността на материала в лявата половина на обтегача, където са разположени те. Поради малката собствена маса на акселерометрите (4×155 g) това завишаване е до 2 %, което означава, че влиянието на собствената маса на акселерометрите е много малко и може да бъде пренебрегнато.

Коравината на ротационните пружини, с които се отчита частичното запъване на обтегача в неговите краища (в разглеждания случай те са скрити в капителите на колоните), може да се представи със зависимостта

$$S_j = kEI/L_0, \quad (1)$$

където I е инерционният момент на напречното сечение на обтегача, L_0 е светлата му дължина, а k – параметър, с който се варира при търсене на действителната степен на частично запъване в опорната конструкция (колони, стени, сводове). При $k = 0$ имаме случай на ставно опирание, а при $k \rightarrow \infty$ (или при много висока стойност на k) – случай на пълно запъване.

4. Методика за определяне на опънните усилия в обтегачите

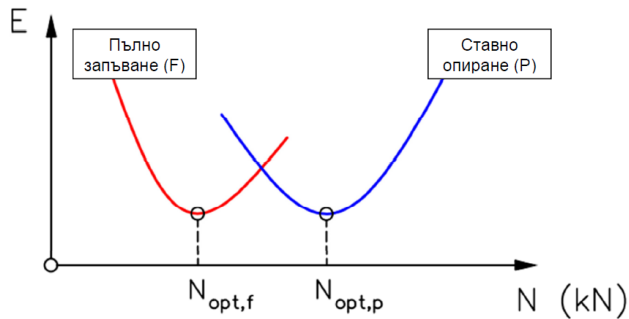
Възприет е подход, аналогичен на изложените в [2 – 4], при който се търси постигане на максимално съответствие между изчислените с модела и определените при натурното изпитване собствени честоти на елемента. Актуализирането на моделите и идентифицирането на опънното усилие и на опорните условия (коравина на ротационните пружини в краищата на обтегача) се извършва с проследяване и минимизиране на грешката (средноквадратичното отклонение на числено определените собствени честоти спрямо експериментално измерените собствени честоти на обтегача). Функцията на грешката E се дефинира чрез зависимостта

$$E = \sqrt{\sum_1^n (f_{i,exp} - f_{i,num})^2}, \quad (2)$$

където $f_{i,exp}$ е собствената честота за i -та форма на трептения, определена експериментално с БДИ, $f_{i,num}$ – собствената честота за i -та форма на трептения, определена с числения модел по МКЕ, а n е броят на включените в оценката на грешката собствени честоти. Съгласно (2) всички отчитани собствени честоти имат еднаква тежест, но при необходимост могат да се въведат различни по стойност тежестни коефициенти.

Търсеното опънно усилие в обтегача съответства на стойността N_{opt} , при която се достига до минимум на функцията на грешката E . Решението е итерационно. Очакваната

стойност на N_{opt} ще бъде между долната и горната граница, получена за случаите на пълно запъване и ставно опирание (фиг. 7).



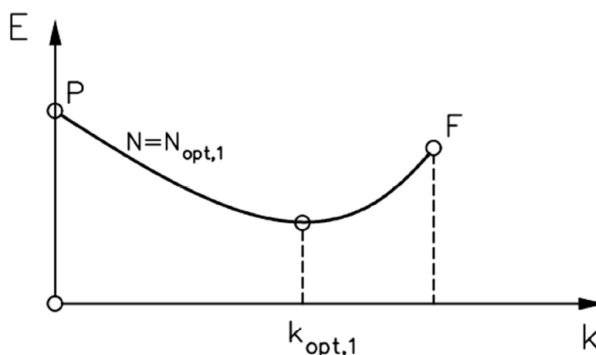
Фиг. 7. Схематично представяне на функциите на грешката за граничните случаи на пълно запъване и ставно опирание

Затова началната стойност на търсеното опънно усилие в първата итерация се определя по формулата

$$N_{opt,1} = 0,5(N_{opt,f} + N_{opt,p}), \quad (3)$$

където $N_{opt,f}$ и $N_{opt,p}$ са дефинирани на фиг. 7.

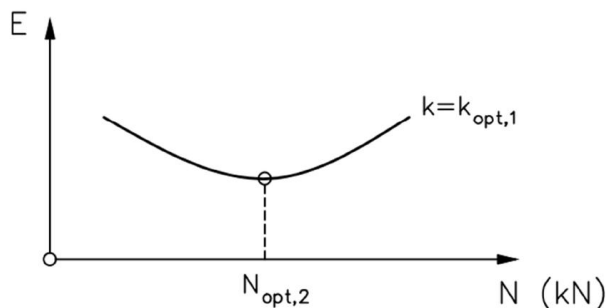
За определената по (3) начална стойност на опънното усилие се прави оценка на грешката по (2) при вариране на коравината на ротационните пружини в краищата на обтегача. Провежда се серия от решения с числения модел по МКЕ (1), като стойностите на параметъра k от (1) обичайно варират в диапазона от 50 до 200. При $k > 200$ може да се приеме, че коравината на ротационната пружина се доближава до случая на пълно запъване. Прогнозната начална стойност на $k = k_{opt,1}$ съответства на минимума на функцията на грешката E (фиг. 8). Според изследването [5] влиянието на опорните условия е най-голямо върху първите 1-2 форми на собствени трептения. Затова при оценка на грешката ще се отчитат стойностите на собствените честоти само за първа и втора форма на трептения на обтегача.



Фиг. 8. Схематично представяне на подхода за определяне на началната ротационна коравина на опорите (P = ставно опирание, F = пълно запъване)

С приетата стойност на параметъра $k_{opt,1}$ започва втората итерация, при която се провежда серия от числени решения на модела по МКЕ за дискретни стойности на опънното усилие в обтегача, при което се определя стойността $N_{opt,2}$ (фиг. 9). Според [5] влиянието на опорните условия е незначително върху по-високите форми на собствени трептения. Затова при оценка на грешката в тази стъпка на методиката ще се отчитат стойностите на собствените честоти само за трета и четвърта форма на трептения на обтегача.

За тази стойност на опънното усилие се повтаря решението за уточняване на ротационната коравина на опорите (стойност на параметъра k).



Фиг. 9. Схематично представяне на подхода за определяне на опънното усилие в обтегача с уточнената ротационна коравина на опорите

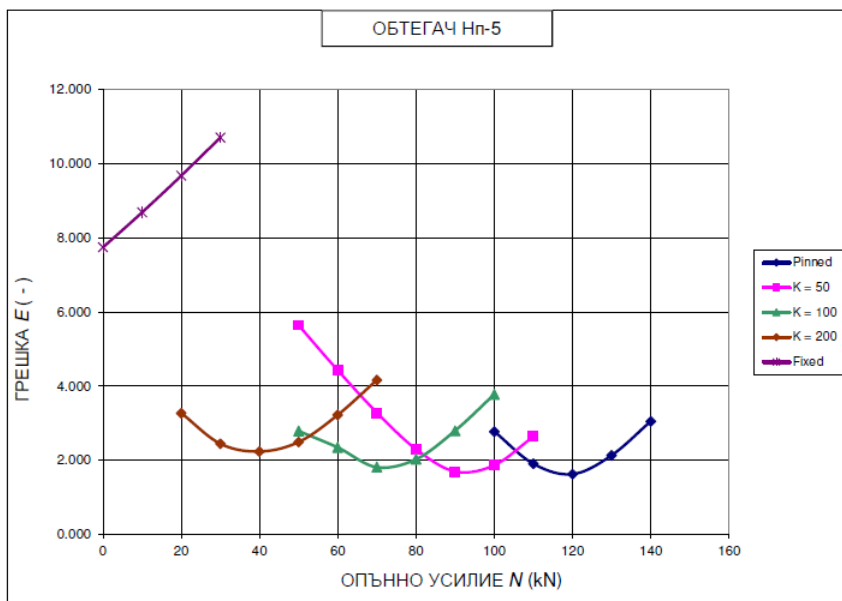
Без да е представено строго математическо доказателство за сходимост на процеса, проведените досега числени решения по предложената методика показват, че обикновено са достатъчни няколко итерации за определянето на опънното усилие в обтегача. За пълно верифициране на методиката обаче е необходимо да се направи сравнение на прогнозните стойности на опънните усилия в метални обтегачи с действителните, които са контролирани в лабораторни условия, т.е. провеждане на изследване от типа “Blind testing/Blind analysis/Blind prediction” [6, 7].

Описаната по-горе методика е приложена за прогнозно определяне на опънното усилие в обтегача Нп-5 с напречно сечение 44×44 mm и светла дължина 4400 mm. При монтирането на акселерометрите и нанасянето на леки удари с гумен чук за генериране на вибрации беше установено, че обтегачът няма видими провисвания (огъвни деформации) и е натоварен действително на опън. Това е обичайното напрегнато състояние на повечето обследвани от авторите метални обтегачи в обекти от НКН, но при евентуални слягания на земната основа или настъпили повреди в главната носеща конструкция може да настъпят аномалии в напрегнатото състояние – обтегачът да е отпуснат, с видими провисвания и натисково усилие в него вместо опън. В много редки случаи може да се достигне и до изкълчване на обтегача, което обезсмисля неговата функция в конструктивната система. С Фуриеров анализ на записите на ускоренията в акселерометрите, получени при БДИ, бяха получени следните собствени честоти за първите четири форми на трептения: $f_1 = 11,28$ Hz; $f_2 = 29,15$ Hz; $f_3 = 55,52$ Hz и $f_4 = 89,65$ Hz.

За начална оценка на опънното усилие е извършен числен анализ на модела по МКЕ с вариране на опорните условия, като, освен двата гранични случая на ставно опирание и пълно запъване, са разгледани и случаите с приети стойности на параметъра k съответно 50, 100 и 200. След изчисляване на функциите на грешката с включване на първите четири собствени честоти за горните случаи на опорни условия е направен

извод, че търсеното опънно усилие е в диапазона от 40 до 120 kN (фиг. 10), и съгласно (3) $N_{opt,1} = 80$ kN.

С приетото усилие $N_{opt,1} = 80$ kN се извършва серия от динамични анализи с модела на обтегача при вариране на коравината на ротационните пружини в краищата на елемента. Въз основа на получените резултати за оценка на грешката (фиг. 11) може да се приеме, че $k_{opt,1} = 100$. С последваща серия динамични анализи се достига до опънното усилие в обтегача $N_{opt,2} = 70$ kN, което съответства на минимума на функцията на грешката (фиг. 12). По-точни стойности на търсените във всяка итерация параметри могат да бъдат определени чрез аналитично решение за минимума на апроксимиращата функция на грешката, получена в MS Excel чрез нейните дискретни стойности.



Фиг. 10. Определяне на диапазона на търсеното опънно усилие N (случаите “Pinned” и “Fixed” отговарят съответно на ставно опирание и пълно запъване)

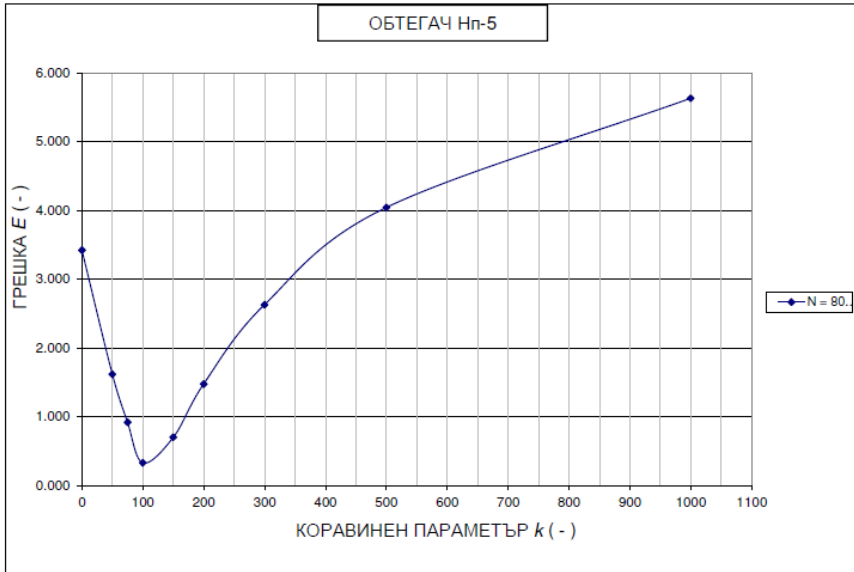
5. Изводи и препоръки

Въз основа на проведените изследвания на обтегачите в църквата „Св. Параскева – Петка“ в гр. Троян могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

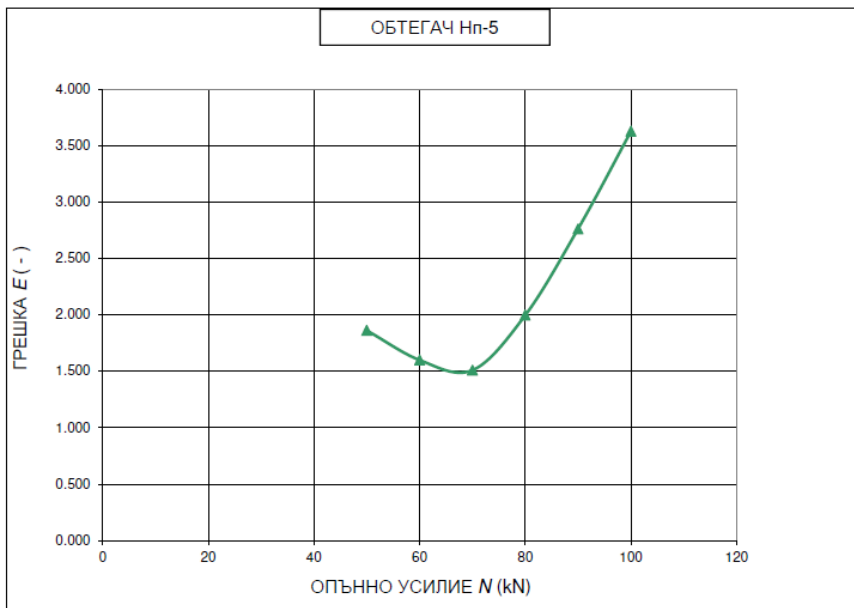
1) Определянето на опънните усилия в метални обтегачи в сгради от НКН е сложна обратна задача с неточно дефинирани изходни параметри (например граничните условия в краищата), чието решаване е възможно при комбиниране на натурни БДИ и числено моделиране;

2) Използването на критерия за минимизиране на грешката (т.е. на отклонението на числено определените спрямо измерените при БДИ собствени честоти на трептения) и итерационна процедура с последователни приближения дават възможност да се стесни диапазонът, в който се намира действителната стойност на търсеното опънно усилие;

3) За по-точно идентифициране на опорните условия в краищата на обтегачите може да се препоръча включване на допълнителен критерий, с който се минимизира грешката на изчисленияте с динамичен анализ по МКЕ форми на собствени трептения спрямо формите, получени от записаните при натурните БДИ истории на ускоренията.



Фиг. 11. Определяне на началната ротационна коравина на опорите



Фиг. 12. Втора итерация за определяне на опънното усилие в обтегача с уточнената ротационна коравина на опорите

Благодарности

Авторите изказват своята най-искрена благодарност на целия екип на Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ за предоставеното финансиране на Етап 2 от 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**(1) (in Bulgarian).
2. *Riabova, K., Collini, L., Garziera, R.* Numerical method for estimation of tensile load in tie-rods. Acta Polytechnica, CTU Proceedings, 2016, **3**, 60 – 64.
3. *Resta, C., Chellini, G., De Falco, A.* Dynamic assessment of axial load in tie-rods by means of acoustic measurements. Buildings, 2020, **10**(2): 23.
4. *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, 2010, 329(**11**), 2057 – 2067.
5. *De Falco, A., Resta, C., Sevieri, G.* Sensitivity analysis of frequency-based tie-rod axial load evaluation methods. Engineering Structures, 2021, **229**, 111568.
6. *Pavan, A., Pinho, R., Antoniou, S.* Blind prediction of a full-scale 3D steel frame tested under dynamic conditions. 14 WCEE, Beijing, 2008, paper S17-01-009.
7. *Black, C. J., Ventura, C. E.* Blind test on damage detection of a steel frame structure. Proceedings of SPIE, 1998, 623 – 629.

INVESTIGATION OF METALLIC TIE-RODS IN ST. PARASKEVA CHURCH IN THE TOWN OF TROYAN BASED ON NONDESTRUCTIVE DYNAMIC TESTING

V. Tanev¹, B. Belev², G. Vasilev³, N. Kerenchev⁴, E. Yordanov⁵, K. Kirova⁶,
P. Parashkevov⁷

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

ABSTRACT

Metallic tie-rods have been used in many historical sites and heritage buildings. The assessment of the tensile forces acting in the tie-rods based on nondestructive dynamic testing, i.e. by using acceleration time histories recorded from their dynamic response, is complicated due to imprecisely defined parameters such as boundary (support) conditions.

The paper presents an iterative procedure for estimating the tension forces in such tie-rods based on minimizing the error function, i.e. the deviation of the values of the numerically computed eigen-frequencies from those determined by nondestructive testing.

The procedure was applied for predicting the tension force value in a tie-rod located in a church building.

¹ Vatyu Tanev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tanev_fce@uacg.bg

² Borislav Belev, Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: belev_fce@uacg.bg

³ Georgi Vasilev, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vasilev_fce@uacg.bg

⁴ Nikolay Kerenchev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kerenchev_fte@uacg.bg

⁵ Emil Yordanov, Assoc. Prof. Dr. Arch., Dept. “History and Theory of Architecture”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: emj_far@uacg.bg

⁶ Kristiana Kirova, student, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046

⁷ Pencho Parashkevov, student, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046