

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Юбилейна приложна научно-техническа конференция
„65 години Хидротехнически факултет и 15 години немскоезиково обучение”

6–7 ноември 2014
6–7 November 2014

International Jubilee Conference
„65th Anniversary Faculty of Hydraulic Engineering and 15th Anniversary Hydraulic Engineering in German”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

XLVII ^{ТОМ}
vol.

2014

св.
fasc. I-B

ОПТИМИЗИРАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА СТЕНД ЗА МОДУЛНИ ДИНАМИЧНИ ИЗПИТВАНЯ НА КОНСТРУКЦИИ ОТ РАМКОВ ТИП

П. Павлов¹, Д. Евлогиев²

Ключови думи: динамичен модел, динамични характеристики, мащаб и модул

Научна област: механика

РЕЗЮМЕ

В статията са описани някои предварителни механо-математически изчисления по проектирането и конструирането на Стенд за модулни динамични изпитвания на реални конструкции от рамков тип. Последният се моделира на база усреднени физико-механични мащаби – геометрични, инерционни, силови, еластични и др. Стендът ще позволява определяне на собствени и демпфериращи честоти и периоди, получаване на зависимостите на премествания, скорости, ускорения от времето и др. След това с помощта на съответните модули (реципрочните стойности на мащабите) се определят същите честотни и кинематични характеристики на реалните конструкции. Стендът позволява дефиниране на различни по вид силови и кинематични въздействия върху разглежданите модели. Оптимизирането на параметрите на стенда се отнася до геометричните характеристики, т.е. в какви граници да се променят габаритните му размери до еластичните и дисипативните характеристики, т.е. какви пружини и демпфери да ограничават движението му и др. Изследванията в доклада са част от група аналитични, числени и експериментални разработки, свързани с разкриването на нова динамична лаборатория в университета.

¹ Петър Павлов, доц. д-р, кат. „Техническа механика“, УАСГ, бул. Хр. Смирненски 1, 1046 София, e-mail: pdr_mech_fhe@uacg.bg

² Даниел Евлогиев, инж., кат. „Техническа механика“, УАСГ, бул. Хр. Смирненски 1, 1046 София, e-mail: daniel_evlogiev@abv.bg

1. Въведение

Динамичните изследвания са дейности, свързани с решаването на отделните етапи на обратната задача на динамиката на един материален обект или една материална система. Най-важните фази на тази задача са – създаване на динамичен модел, съответстващ на него математичен модел, решение на получените диференциални уравнения, експериментална верификация на резултатите.

Съществен показател за възможностите на едно научно звено, работещо в областта на динамиката, е начинът на решаване на последните два етапа. Това е свързано и с наличието на подходяща лабораторна база. В миналото под лаборатория се разбираше работно помещение с различни експериментални установки, снабдени с аналогови измервателни уреди със собствени екрани за показване на резултатите. Тогава третият от обособените етапи се решаваше ръчно, а експерименталното решение се ползваше когато това е невъзможно, или пък за проверка на ръчното решение. След навлизането на компютърните технологии през последните 25 – 30 години под лаборатория обикновено се разбира компютърна лаборатория – помещение с разнообразен хардуер, осигурен с необходимия за изследванията софтуер. С него се извършва числено решение на диференциалните уравнения, обработват се резултатите, прави се съответният анализ. Обикновено решението на задачата свършва дотук, като се пренебрегва експерименталният етап.

Една амбициозна задача си постави част от колектива на катедра „Техническа механика“ при УАСГ – постепенно да се оборудва динамична лаборатория, където да могат да се решават всичките етапи на обратната задача на динамиката на различни материални обекти и системи. Това, разбира се, е свързано с провеждането на много взаимносвързани дейности по различните компоненти на една такава лаборатория. Трябва да се мисли за материалната база, хардуерно окомплектоване, лицензирано софтуерно осигуряване, експериментално оборудване и др. Последното, естествено, е най-трудно и най-скъпо за закупуване или изпълнение, но същевременно е първото нещо, което привлича вниманието на посетителите на лабораторията (студенти, докторанти, инженери).

Основните дейности на лабораторията, разбира се, са образователните и научните. За нормалното ѝ функциониране, обаче са нужни известни средства извън университетските, които биха се генерирали, ако лабораторията изпълнява и определени комерсиални задачи.

За попълване на експерименталната база на лабораторията и с мисълта за бъдещи комерсиални възможности бе замислено проектирането и изпълнението на стенд за модулни динамични изпитвания на реални конструкции от рамков тип. Идеята е още в ранна, предпроектна фаза да могат да се правят предварителни динамични изследвания на подобни конструкции, които биха подобрили бъдещото проектиране и изпълнение.

Стендът ще бъде съществена част от експерименталното оборудване на лабораторията, разполагаща вече с два стенда. На фиг. 1 са дадени снимки на съществуващите вече два стенда – стенд за изследване на праволинейните трептения на материална точка [1] и стенд за изследване на ъгловите трептения на тяло във вертикалната равнина [2].

Еднаквата визия като форма на двата стенда показва, че всеки следващ, в т.ч. и настоящият трябва да се съобразява с нея, за да има лабораторията атрактивен завършен вид. Освен това при работата по стенда трябва последователно да се следват етапите, следвани при изпълнение на предишните, по-важните от които бяха следните:

- сфера на приложение на стенда, т.е. за динамично изследване на какви реални конструкции е приложим стендът;

- създаване на динамичен модел – идеализирана схема на определен клас реални конструкции;
- създаване на математичен модел за извършване на предварителни изчисления по параметрите на стенда и за съпътстващи експлоатацията на стенда числени експерименти за верификация на резултатите;
- проект на стенда в по-общ или по-детайлен вид за по-лесното му изпълнение;
- изпълнение на стенда като една завършена, но същевременно отворена система за бъдещи иновативни корекции и допълнения;
- експлоатация на стенда.



Фиг. 1. Стенд за изследване праволинейните трептения на материална точка и стенд за на изследване ъгловите трептения на тяло във вертикалната равнина – общ изглед

Чрез стенда за модулни динамични изпитвания на реални конструкции от рамков тип, при отчитане на споменатите ограничения по отношение на формата му, ще може да се извършват равнинни или пространствени динамични изследвания на такива конструкции. В настоящата статия са проведени изследвания по отношение на първите няколко етапа от работата по стенда във вертикалната равнина, приложени за възможно най-проста конструкция – вертикална конзолна колона. Целта е чрез такава просто модулно изследване да се покаже пътят, който ще следва при по-сложни такива.

2. Сфера на приложение на стенда

Наименованието на стенда съдържа отговор на въпроса за сферата на приложението му. Той ще може да се използва за динамични изследвания на равнинни или пространствени, едноетажни или двуетажни, метални, стоманобетонни, дървени, пластмасови и др. рамкови конструкции. Ще може да се прилага при изследване на динамичните характеристики на модели на конструкции, при които са приложени средства за пасивна дисипация на сеизмична енергия „вискозни демпфери”. Ще се правят натурни експерименти за определяне на поведението на съоръженията с тях и без тях със съответните изводи за ефективността от ползването на такива методи при

съответното съоръжение. Отделни динамични изследвания са възможни за неутвърдени в строителната практика конструктивни решения, дефинирани на техните характеристики и динамично поведение. На база сравнение на резултатите от софтуерни динамични изследвания, числени експерименти чрез съответните динамични модели и стендови експерименти ще се получи процентното несъответствие, което трябва да е в определени граници.

На фиг. 2 са дадени подобни конструкции, експерименталното моделиране на които е възможно с бъдещия стенд.

Показаните конструкции в основната равнина на натоварване са равнинни рамки с корави, ставни или смесени възли. Подпирането им също може да се срещне в тези три разновидности.

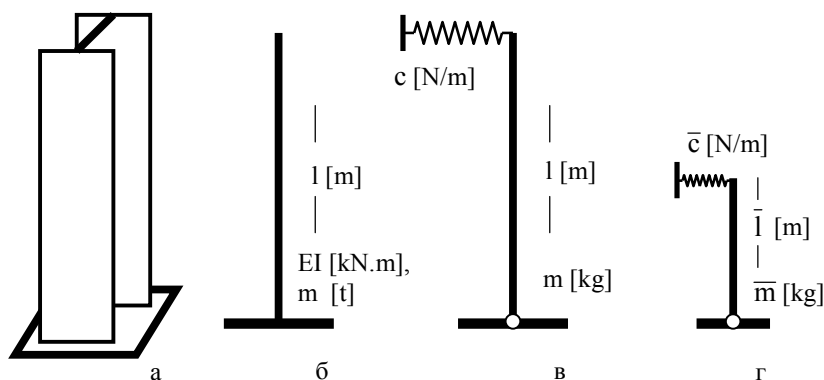


Фиг. 2. Конструкции от рамков тип

3. Динамичен модел на конструкциите

При създаването на динамичния модел трябва да се ползва инструментариумът на теоретичната механика – материалните обекти са абсолютно твърди тела, а връзките са идеални. Освен това трябва да се има предвид и основната динамична характеристика, която ще се получава експериментално, въз основа на което ще се прави заключение посредством съответните модулни зависимости за същата характеристика на реалната конструкция. За такава при повечето динамични изследвания се приема собствената кръгова (по-нататък прилагателното кръгова се пропуска) честота (период), която дава информация за първата собствена честота на последните.

Едно такова елементарно динамично съответствие – за аналитично-числено и експериментално изследване е показано на фиг. 3.



Фиг. 3. Динамични модели на конзолна греда

На фиг. 3б е показан модел за динамично изследване на конзолна греда с методите на строителната механика. Характеристики, които оказват влияние на динамичното поведение на конзолата, са дължината, коравината на огъване и разпределената маса. На фиг. 3в е реализиран еквивалентен модел за динамично изследване с инструментариума на теоретичната механика. За да има движение, тялото трябва да е с определен брой степени на свобода (в случая 1), а тъй като то е абсолютно твърдо, еластичните свойства на предишния модел се реализират с линейна (или ъглова) еластична пружина. Приема се, че геометричните и инерционните характеристики на двата модела са равни. Критерият за еквивалентност е вторият да има собствена честота, равна на първата собствена честота на първия. На фиг. 3г е показан модел за натурно изпитване, който е мащабен модел на модела от фиг. 3в, с характеристики в определени възможни граници.

4. Елементарни математически изчисления по създадените динамични модели

За първият от трите динамични модела квадратът на първата собствената честота се получава по познатата от строителната механика формула

$$\omega_1^2 = \frac{\chi_1^4}{l^4} \cdot \frac{EI}{m} \quad (1)$$

В уравнение (1) $\chi = \beta \cdot l = 1,876$ е първият корен на уравнението $\det(\chi) = 0$, необходимо за получаване на ненулеви решения по отношение на константите, след отчитане на граничните условия на уравнението на движение на конзолата в напречна посока

$$v = \varphi(\chi) = C_1 \cdot \sin(\chi) + C_2 \cdot \cos(\chi) + C_3 \cdot \text{sh}(\chi) + C_4 \cdot \text{ch}(\chi) \quad (2)$$

За получаване на квадрата на честотата при втория модел се ползва уравнението за трептенето на системата по отношение на завъртането на пръта във вертикалната равнина, което има вида

$$A \cdot \ddot{\phi} + C \cdot \phi = 0, \quad (3)$$

$$\omega^2 = \frac{C}{A} = \frac{c \cdot l^2 - m \cdot g \cdot l^2 / 2}{m \cdot l^3 / 3} \approx \frac{c \cdot l^2}{m \cdot l^3 / 3} = \frac{3 \cdot c}{m \cdot l} \quad (4)$$

След приравняване на двете честоти и пренебрегване с пъти по-малкия втори член от числителя на уравнение (4), се получава формулата за коравината на пружината на модела от фиг. 3в.

$$c = \frac{\chi^4}{l^3} \cdot \frac{EI \cdot 1000}{3} \quad (5)$$

В последната формула коравината EI е умножена по 1000, за да се премине от $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ в $\text{N} \cdot \text{m}^2$.

С цел експериментални динамични изследвания трябва да се получи и формулата за квадрата на собствената честота на модела от фиг. 4г. Тя ще бъде като тази от формула (4) с характеристиките на съответната стендова установка.

$$\bar{\omega}^2 = \frac{\bar{C}}{A} = \frac{\bar{c} \cdot \bar{l}^2 - \bar{m} \cdot g \cdot \bar{l}^2 / 2}{\bar{m} \cdot \bar{l}^3 / 3} \approx \frac{\bar{c} \cdot \bar{l}^2}{\bar{m} \cdot \bar{l}^3 / 3} = \frac{3 \cdot \bar{c}}{\bar{m} \cdot \bar{l}}. \quad (6)$$

В последната формула отново е пренебрегнат елементът $\bar{m} \cdot g \cdot \bar{l}^2 / 2$, който дава средно между 30 и 60 пъти по-малко участие в числителя, в сравнение с първия.

Лесно може да се намери и модулната зависимост между честотите на еквивалентния модел от фиг. 3в и стендовия модел от фиг. 3г.

$$\rho_{\omega} = \sqrt{\frac{\omega^2}{\bar{\omega}^2}} = \sqrt{\frac{3 \cdot c}{m \cdot l} \cdot \frac{\bar{m} \cdot \bar{l}}{3 \cdot \bar{c}}}. \quad (7)$$

Въвеждат се понятията геометричен, инерционен и еластичен модул, които дават връзката между съответните характеристики на стендовия и еквивалентния модел. Последните се определят по формулите

$$\rho_l = \frac{l}{\bar{l}}, \quad \rho_m = \frac{m}{\bar{m}}, \quad \rho_c = \frac{c}{\bar{c}}. \quad (8)$$

След заместване на формули (8) в (7) се получава и честотният модул – бездимензионна величина, даваща връзката между честотите на стендовия и еквивалентния модел.

$$\rho_{\omega} = \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_l \cdot \rho_m}}. \quad (9)$$

Тогава, ако експериментално е определена собствената честота по стендовия модел, може да се получи и реалната такава по формулата

$$\omega = \bar{\omega} \cdot \rho_{\omega}. \quad (10)$$

Чрез последната пък може да се съди за собственото динамично поведение на реалната конструкция, тъй като тя е равна на първата собствена честота при разглеждане на елементарната конструкция като прът с разпределена маса.

4. Проверка на предложеното числено и експериментално съответствие

Проверка на честотите и връзката между тях е направена за конзолна стоманобетонна греда с параметри $EI = 13500 \text{ kN.m}^2$, $m = 0,12 \text{ t/m}$, $l = 4 \text{ m}$. По формула (1) се получава първа собствена честота $73,8 \text{ s}^{-1}$, проверена и чрез програмната система SAP2000. За еквивалентния модел от фиг. 3в са приети същата дължина и разпределена маса ($m = 120 \text{ kg}$), а коравината на еквивалентната пружина по формула (5) се получава

$$c = \frac{1,876^4}{4^3} \cdot \frac{13500 \cdot 1000}{3} \approx 870 \cdot 10^3 \text{ N/m}.$$

Лесно по формула (4) може да се получи собствената честота – $73,7 \text{ s}^{-1}$.

За експериментална проверка на зависимостите са ползвани част от възможностите на готовия вече стенд за изследване на ъгловите трептения на тяло във вертикалната равнина [2] – фиг. 4.



Фиг. 4. Експериментално определяне на собствена кръгова честота на стендов модел

На стендовата установка е поставена метална тръба с дължина 1,2 m, разпределена маса 1,3 kg/m, закрепени в горния край на пръта с хоризонтални пружини с обща коравина 220 N/m.

Лесно се смятат инерционният, геометричният и еластичният модули – съответно $\rho_m = 92,30$; $\rho_l = 3,333$; $\rho_c = 3954$, а по формула (9) и честотният модул $\rho_\omega = 3,590$. Задава се елементарно отклонение на пръта спрямо вертикалното равновесно положение, премахва се причината за отклонението и се измерват броят на трептенията за една минута на възникналите свободни незатихващи вибрации. В случая се измериха около 200 трептения/min, което дава период на трептенето 0,3 s. По познатата формула $\bar{\omega} = 2 \cdot \pi / t$ определяме собствената честота – $20,57 \text{ s}^{-1}$. Най накрая се умножава последната по честотния модул и се получава $\omega = 20,57 \cdot 3,590 = 75,2$ – стойност, близка до тази, получена аналитично и чрез програмната система SAP2000.

5. Заключение

Подобен подход в търсене на числено и експериментално съответствие ще се приложи и за споменатите в началото конструкции от рамков тип. Това е обект на бъдещи изследвания, които ще се превърнат и в своеобразна аналитична и числена база за уточняване на параметрите на конструиращия се стенд за модулни динамични изпитвания на реални конструкции от рамков тип. Постепенно ще се търси модулното съответствие освен при инерционните, геометричните и еластичните характеристики, още при дисипативните, силовите и др. и тяхното влияние върху динамичното модулно съответствие между конструкция – динамичен модел – стендова установка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов, П., С. Лилкова-Маркова, Б. Наков, Ю. Кехайова. Прецизиране параметрите на стенд за изследване принудените трептения на материална точка. Известия на Технически университет, Габрово, том 43, 2012, стр. 23–26.

2. Pavlov, P., S. Lilkova-Markova, B. Nakov, J. Dancheva. Application of the new Achievements in the Simulating and Measuring Apparatus for the Construction of a Stand for Study Vibrations of a particle. Сборник на Строително-Архитектурен факултет на Университета в Ниш, бр. 26, 2011, стр. 81–89.

3. Павлов, П., С. Лилкова-Маркова, Б. Наков, Я. Данчева. Стенд за експериментално изследване на праволинейните трептения на материална точка. Сб. доклади МЮНПК УАСГ 2012, том 4, стр. 261–266.

4. Павлов, П., С. Лилкова-Маркова, С. Донева, Б. Наков. Параметри на стенд за изследване на ъгловите трептения на тяло, ротиращо във вертикалната равнина – избор и граници на изменение. Механика на машините (под печат).

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A STAND FOR MODULAR DYNAMIC TESTING OF FRAME TYPE STRUCTURES

P. Pavlov¹, D. Evlogiev²

Keywords: *dynamic model, dynamic characteristics, scale and module*

Research area: *mechanics*

ABSTRACT

This paper describes some preliminary mechanical and mathematical calculations on the design and construction of a Stand for modular dynamic testing of frame type structures. The last is modeled on the basis of average physical and mechanical scales - geometric, inertial, force, elastic, etc. The stand will allow the determination of own and damping frequencies and periods, the dependencies between displacements, velocities, accelerations over time, etc. Then, by using the corresponding modules (the reciprocals of the scales) the same frequency and kinematic characteristics of real structures are set. The stand allows the definition of different types of power and kinematics effects on the considered models. The optimization of the parameters of the bench refers to the geometrical performance, i.e. within the intervals to change the outline dimensions, to the elastic and dissipative performance - i.e. what springs and dampers to restrict its movement, etc. Research in the report is part of a group of analytical, numerical and experimental studies related to the establishment of a new dynamic lab at the university.

¹ Petar Pavlov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dpt. “Technical Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: pdp_mech_fhe@uacg.bg

² Daniel Evlogiev, Eng., Dpt. “Technical Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: daniel_evlogiev@abv.bg