

ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЦИЛИНДРИЧНИ ОБРАЗЦИ С КОНСТРУКТИВНИ ОСОБЕНОСТИ

Иван Коларов
ikolarov@vtu.bg

**ВТУ "Тодор Каблешков", София, ул. "Гео Милев" № 158
БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** теоретично и експериментално определяне на собствени честоти на цилиндричен образец с едностранно скосяване*

***Резюме:** Задача на настоящата работа е да направи вибро-акустическо изследване на цилиндричен образец с конструктивна особености и установяване на динамичното поведение при възбуждане на резонанс.*

Задачата се изпълнява чрез теоретично и експериментално определяне на собствените честоти на десет цилиндрични образци с еднаква конструкция и с едностранно скосяване за монтаж на шпонка. Проведени са серия от експерименти и е направен статистически анализ на точността на измерване. Получено е разсейване на резултатите, съпоставимо с това на точността на дискретизация на честотата. Образците са моделирани по точен размер посредством инженерни софтуерни продукти и са получени теоретичните стойности на техните собствени честоти. Доказано е вибро-акустическото поведение на машинни елементи с цилиндрична форма при възбуждане на напречни моди. Възникват две честоти на вибрации, които се променят от размерите на конструктивните особености. Честотната разлика между тях може да се използва като информационна характеристика за диагностика на нецялостности в еластичната среда аналогично при конструкции без скосяване. Установено е съответствие между експериментални резултати за честотите на модите и теоретични данни, получени чрез симулация. Следователно чрез тези инженерни продукти може да се създават критерии за охарактеризиране на нецялостности в детайли с различни конструктивни особености.

Получените резултати ще бъдат използвани за създаване на модел за вибро-акустическо охарактеризиране на технически отклонения в машинни елементи с цилиндрична форма.

УВОД

Вибро-акустическият метод за диагностика се основава на изследване на резонансни явления, възникващи в телата при тяхното динамично извеждане от равновесие. Въпреки, че е един от установените методи за диагностика, то и в наши дни той е обект на теоретични обосновки и е налице разширяване на неговото приложение [1, 2, 3]. Чрез провеждане на многобройни експерименти на образци с ротационна форма е потвърдено динамичното поведение на тела с подобна форма при възбуждане на напречните моди: те трептят в ортогонални направления, едното от които е

ориентирано в направление, обуславящо минимална енергия на деформация [2]. Наличието на нецялостност в детайлите променя коравината на образците, респективно, резонансните честоти в тези направления в зависимост от размера на нецялостността. За охарактеризиране на еквивалентния размер на нецялостността се въвежда нова характеристика Δf_n , основаваща се на разликата на тези честоти. В резултат чрез измерване на честотната разлика Δf_n за подходящи напречни моди с успех се охарактеризират нецялостности с размер в рамките на 0.3 – 1 mm в различни машинни елементи с ротационна форма [3,4] чрез използване на инженерни методи [5].

Често пъти машинните елементи с ротационна форма имат допълнителни конструктивни особености от вида „шпонков канал”, „скосяване” и др. Тези особености подобно на нецялостности намаляват напречното сечение. Проведени са предварителни експерименти за установяване на резонансните честоти на подобни изделия без дефекти и са установени значителен брой амплитуди в спектрограмата на регистрираните сигнали. Това налага изясняване произхода на тези амплитуди, тяхното отчитане в процеса на диагностика, а така също и апробиране на научно-приложен инженерен метод за създаване на критерии за оценяване на техническото състояние на машинните елементи.

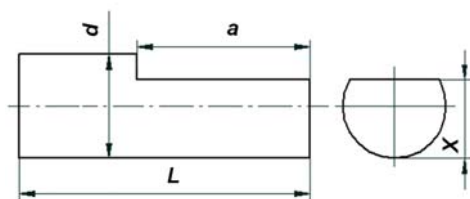
При малко вътрешно триене собствените честоти експериментално се определят чрез измерване на резонансните честоти [2]. Тъй като процесът на измерване е свързан с регистрация на честоти в широк честотен спектър и са възможни регистрация на неинформативни амплитуди, то е необходимо предварително уточняване на измервателния процес. За доказване на произхода на амплитудите и доверителните интервали на техните честоти се използва статистически анализ на данните [6].

Задача на настоящата работа е вибро-акустическо изследване на машинни елементи с ротационна форма при наличие на несиметрични конструктивни особености и апробиране на научно-приложен метод за създаване на критерии за оценка на техническото състояние.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СОБСТВЕНИТЕ ЧЕСТОТИ

За изследване на собствените честоти са изработени десет цилиндрични образци с шпонков изрез за монтаж на плоска шпонка. Те са изработени от никовъглеродна стомана с конструкция, показана на фиг. 1, а в табл. 1 са изложени измерените им размери. Установено е значително геометрично разсейване. Дължината L образците с номера 7 и 8 е извън допустимите стойности, задавани от 14 (15) клас на точност. Подобни изводи могат да бъдат направени по отношение и на другите размери, като е налице частично групиране на някои от тях. За всички образци са установени отклоненията на цилиндричната повърхнина: конусност до 0.1 mm, овалност до 0.022 mm и огънатост до 0.02 mm. Проведени са серии от експерименти и теоретични изследвания за установяване на вибрационното поведение на образците при възбуждане на резонанс.

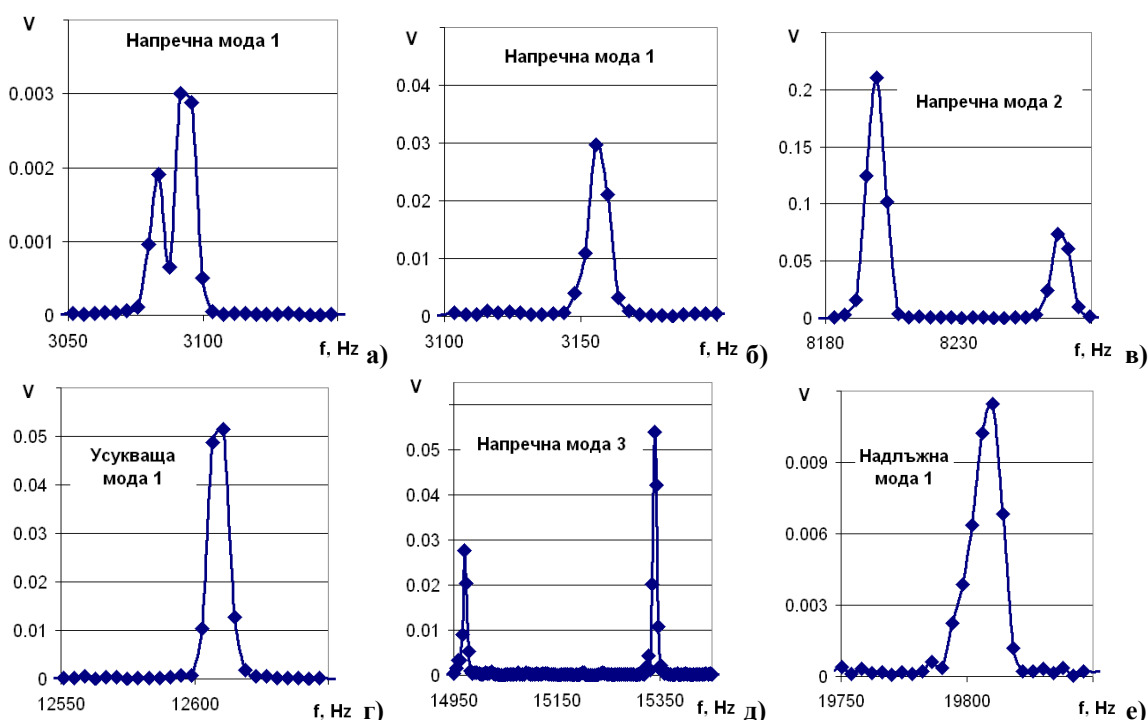
Измерени са резонансните честоти чрез акустическа система, състояща се от керамичен микрофон, хардуер за регистрация и преобразуване на аналогови сигнал в цифрови в честотен диапазон от 20 Hz до 22 kHz и с честота на дискретизация на честотата в рамките на 3 (до 4) Hz. Експериментите са проведени в акустическо изолирано пространство. Образците са окачвани на идеално гъвкава и неразтеглива нишка и в тях са възбуждани вибрации чрез прилагане на импулс чрез друго твърдо тяло. Регистрирана е акустическата емисия на разстояние в рамките на 150 – 200 mm от окачените образци. Времето за регистриране на сигналите е 0.5 s. Резонансните честоти са определени чрез софтуер за амплитудно-честотен (Фурие) анализ и са направени цифрови записи на спектрограмите.



Фиг. 1. Конструкция на образец.

Табл. 1. Размери на опитните образци, mm

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d	12.028	12.027	12.187	12.087	12.125	12.08	12.159	12.113	12.08	11.955
L	135	135	135	134.8	134.6	135.1	134.4	135.8	135.3	134.9
X	9.037	9.1	9.179	9.094	9.132	9.147	9.126	9.12	9.124	9.077
a	21.3	19.6	20.3	19.7	18.8	20.3	19.4	18.8	19.7	20.9



Фиг. 2. Детайлни изображения на някои амплитуди от спектрограми при изследване на образец 1 (а), на образец 3 (б - д) и за образец 5 (е).

Образците са моделирани от ниско въглеродна стомана по измерен размер в CAD среда и чрез симулации (чрез FEA [5]) са определени собствените честоти за модите в честотния диапазон на измерване. Направено е сравнение на теоретичните и експериментално получените резонансни честоти за образците. Чрез получените в компютърна среда деформации е установен вида на деформационните моди.

Типични характерни изображения, получени чрез обработка на цифровите записи в средата на Excel са показани на фиг. 2. При изследване на динамичното поведение при напречна мода 1 са установени две амплитуди за образец 1 (фиг. 2 а) и една амплитуда (фиг. 2 б) за останалите образци. Този факт се обяснява с близки честоти на вибрациите при първа мода 1, които се наслагват. Ясно се регистрират вибрации на напречните моди 2 и 3, а така също и на усукващата мода 1 (фиг. 2 в, г, д). По-трудно се забелязват напречна мода 4 и надлъжна мода 1 (фиг. 2 е, ж); те се намират

в близък честотен диапазон и е възможно да не се разчетат правилно от спектрограмата.

Направена е статистическа оценка на точността на регистриране на честотите на установените моди чрез изследване на образец 1. В табл. 2 са показани статистически резултати за напречни моди 1, 2, 3, 4 ($f_{n,1}$, $f_{n,2}$, $f_{n,3}$, $f_{n,4}$), за усукваща мода 1 ($f_{t,1}$) и за надлъжна мода 1 ($f_{l,1}$), получени след анализ на извадка от 12 експеримента при 95% вероятност по [6]. Тук с \bar{x} е означено средна стойност на величината, s – стандартно отклонение, \bar{V} - коефициент на вариация, σ – средно квадратична грешка на измерване. Установено е разсейване на експерименталните данни съпоставимо с честотата на дискретизация при създаване на спектрограмата. Това дава основание да се смята, че тези честоти, в т.ч. стойностите Δf_n , определени за напречните моди, могат да се използват като реперни стойности за охарактеризиране на техническото състояние на детайлите.

Табл. 2. Резултати от статистически анализ на експерименталните резултати при изследване на образца, направен за 95% вероятност,

	$f_{n,1}$		$f_{n,2}$		$f_{t,1}$	$f_{n,3}$		$f_{l,1}$	$f_{n,4}$	
s	3.13	1.78	0.65	0.81	1.24	0.81	0.979	1.323	1.585	2.27
\bar{V}	0.10	0.057	0.008	0.01	0.009	0.005	0.006	0.006	0.007	0.01
σ	2.0	1.1	0.4	0.5	0.8	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5

Табл. 3. Теоретични и експериментални резултати за честотите на регистрираните моди за образец 1, Hz

Резул- тат	Честоти на моди, Hz									
	$f_{n,1}$		$f_{n,2}$		$f_{t,1}$	$f_{n,3}$		$f_{l,1}$	$f_{n,4}$	
Теор.	3070	3080	7960	8070	12465	14506	15000	19709	23441	24331
Експ.	3085	3096	7999	8104	12581	14574	15049	19789	20593	21591
Δf_n теор	10		110		-	494		-	890	
Δf_n експ	9.7		105		-	475		-	998	

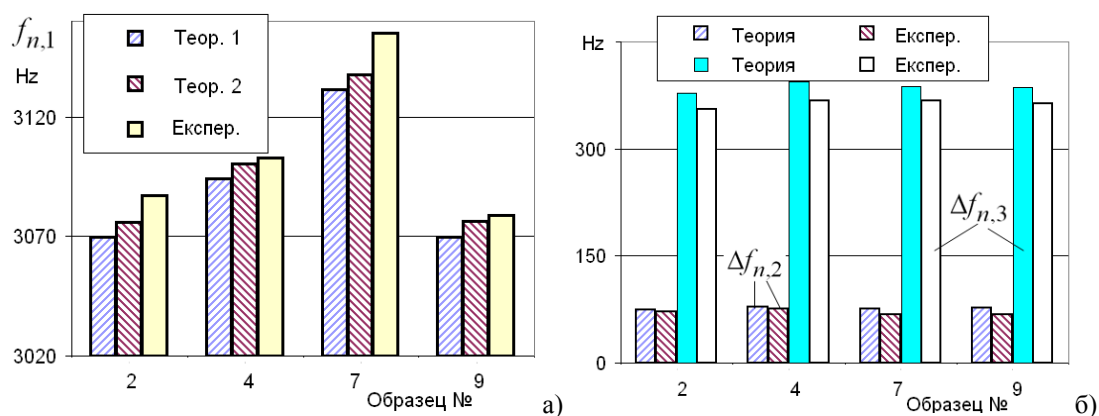
Направено е сравнение на теоретични и експериментални резултати за честотите на регистрираните моди и за честотната разлика Δf_n за напречните моди за образец 1. В табл.3 са показани техните данни. За всички без $f_{n,4}$ е налице съответствие между данните, като експерименталните стойности на честотите са с 0.3-0.4% по-високи, а тези за Δf_n - с 3-4% по-ниски. Това разсейване е незначително предвид възможните отклонения в еластичните характеристики на материала и на грубата изработка. Значително по-голямо е разсейването за четвърта напречна мода, което се дължи на грешки в теоретичния модел при определяне на собствени честоти от по-висок характер [1].

Направено е сравнение между регистрираните честоти на модите $f_{n,1}$, $f_{n,2}$, $f_{t,1}$ и $f_{n,3}$ и стойностите за $\Delta f_{n,2}$ и $\Delta f_{n,3}$ за образци с номера от 2 до 10. Данните са показани в табл. 4. Поради честотно наслагване при тези образци е измерена една честота за напречна мода 1 (случаят е илюстриран на фиг. 2 б). Налице е значително

разсейване на честотите на модите и на честотните разлики $\Delta f_{n,2}$ и $\Delta f_{n,3}$. Забелязва се групиране на Δf_n за образци 2, 4, 7 и 9, при които размерът a се изменя в по-малък диапазон (от 19.4 до 19.7 mm). Разсейването на данните може да се обясни с установените вече отклонения на линейните размери. За потвърждаване на това предположение са моделирани образци 2, 4, 7 и 9 по размери, показани в табл. 1 и са получени техните собствени честоти. Резултатите са показани на фиг. 2. Наблюдава се установена в табл. 3 закономерност при разсейване на данните и се потвърждават установени вече факти.

Табл. 4. Експериментални резултати за честотите на някои моди и честотните разлики Δf_n за напречни моди 2 и 3 за образци с номера от 2 до 10, Hz.

Мода	Образец								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{n,1}$	3087	3123	3103	3143	3071	3155	3095	3079	3055
$f_{n,2}$	8035	8099	8067	8175	7971	8199	8067	8015	7931
	8107	8183	8143	8235	8055	8267	8123	8083	8023
$f_{t,1}$	12534	12574	12554	12586	12514	12610	12522	12506	12558
$f_{n,3}$	14698	14766	14742	14946	14574	14970	14770	14650	14486
	15054	15178	15110	15274	14970	15338	15086	15014	14926
$\Delta f_{n,2}$	72	84	76	60	84	68	56	68	92
$\Delta f_{n,3}$	356	412	368	328	396	368	316	364	440



Фиг. 2. Теоретични и експериментални резултати за $f_{n,1}$ (а) и за Δf_n , получени за втора и трета напречни моди (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на получените резултати могат да бъдат направени следните изводи:

- При резонанс на ротационни образци в областта на напречните моди динамичното поведение се самоорганизира. Възникват вибрации в две ортогонални направления, ориентацията на които зависи от особеностите на конструкцията.

- Честотната разлика на вибрациите при възбуждане на напречна мода може да се използва като информационна характеристика за действителните размери на конструктивното изменение. Тя може да бъде използвана и за характеристика при диагностика на нецялостности в еластичната среда, като чувствителността на метода трябва да бъде съобразена с граничните размери на конструктивните особености.

- Установено е съответствие между експериментални резултати за честотите на модите и теоретични данни, получени чрез симулация в компютърна среда

посредством инженерни софтуерни продукти. Следователно чрез тези продукти може да се създават критерии за оценка на техническото състояние на детайли, като се моделират различни конструктивни особености.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Shatalov M., J. Marais, I. Fedotov and M. Tenkam. Longitudinal Vibration of Isotropic Solid Rods: From Classical to Modern Theories. Advances in Computer Science and Engineering, Dr. Matthias Schmidt (Ed.) InTech, 2011. ISBN: 978-953-307-173-2.

[2] Harris' shock and vibration handbook. Allan G. Piersol, editor.—5th ed. McGRAW-HILL. 2002. ISBN 0-07-137081-1.

[3] Коларов И. Диагностика на повреди в машинни елементи чрез модален анализ. Стр. 138, София, 2015 г. ISBN 978-619-90083-4-8.

[4] Коларов И. Вибро-акустическа диагностика на клапани от двигатели с вътрешно горене – възможност за подобряване на чувствителността при диагностика. Национална научно-техническа конференция „Акустика 2015” . (ISSN 1312-4897)

[5] NX Nastran. Basic Dynamic Analysis User's Guide. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 2008.

[6] Лефтеров Л. и кол. Ръководство за лабораторни упражнения по машинни елементи. „Техника”, София, 1984.

БЛАГОДАРНОСТИ: Този доклад е създаден в рамките на договор 1225/11.05.2016 г., проект „Вибро-акустическо охарактеризиране на технически отклонения в машинни елементи от транспортното машиностроене”, финансиран от Висшето транспортно училище „Тодор Каблешков”.

VIBRO-ACOUSTIC STUDY OF CYLINDRICAL SPECIMENS WITH DESIGN FEATURES

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

*Todor Kableshkov University of Transport, Sofia, „Geo Milev” Str. № 158
BULGARIA*

Key words: *theoretical and experimental study of natural frequencies of cylindrical model with unilaterally bevel*

Abstract: *The aim of this work is to present a vibro-acoustic study of ten identical cylindrical shaped samples with retaining feature and determine the dynamic behavior when resonance is excited. A cylindrical sample with one-sided bevel for spline was studied. Experiments for natural frequencies determination were carried out and statistical analysis was implemented. Dispersion of results, which is comparable to the accuracy of the sampling frequency is obtained. The samples are modeled in accurate dimensions by CAD and the natural frequencies are obtained by FEA. The vibro-acoustic behavior when the transverse modes are excited is established by comparison of results. Two frequencies appear, that change of dimensions of the feature. Therefore the frequency difference between them may be used as a parameter for diagnostics of imperfections in the elastic medium. Correlation between experimental and theoretical data is obtained. Therefore, criteria for characterization of imperfections in machine parts with design features can be created by FEA.*

These results can be implemented in a model for vibro-acoustic characterization of technical deviation in cylindrical machine parts.