

## МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ВИБРАЦИОННИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ВЕРТИКАЛНА ВИБРО – ИМПУЛСНА МЕЛНИЦА

**Петко Недялков**

*Технически Университет – София, Машиностроителен Факултет, e-mail: nedpetko@tu-sofia.bg*

**РЕЗЮМЕ:** В работата се дава обзор на използваната методика и техническите средства за измерване на вибрационни параметри на Вертикална Вибро – Импулсна Мелница /ВВИМ/. Създадената методика и алгоритъмът за анализ на резултатите са имплементирани в компютърна програма. Компютърният анализ е базиран на Бързото Преобразуване на Фурие /БПФ, FFT/. Получените резултати служат за оптимизация и пренастройване на ВВИМ. Резултатите от разработката ще послужат също така и за усъвършенстване на измерителната система и методологията на работа по изследване на пространствени вибрационни параметри.

**КЛЮЧОВИ ДУМИ:** *вибрационни параметри, вибро - измерване, Бързо Преобразуване на Фурие, амплитудно – честотен спектър, спектрален анализ*

### EXPERIMENTAL STUDY METODICS AND ANALYSIS OF THE VIBRATION PARAMETERS OF VERTICAL VIBRO – IMPULSE COMMINATION MILL

**Petko Nedyalkov**

*Technical University – Sofia, Faculty of Mechanical Engineering, E-mail, nedpetko@tu-sofia.bg*

**ABSTRACT:** This feature study analyses and surveys the methodic and technical equipment used for vibration parameters measurement of one Vertical Vibro – Impulse Comminution Mill /VVIM/. The methodic and analysis algorithm are implemented into a computer program code. The computer analysis uses Fast Fourier Transform /FFT/ algorithms. The achieved results are used for optimization and adjustments of the VVIM. Also the results are used to improve measurement system and methodology of the spatial vibration parameters research.

**KEYWORDS:** *vibration parameters, vibration measurements, Fast Fourier Transform, amplitude – frequency spectrum, spectrum analysis.*

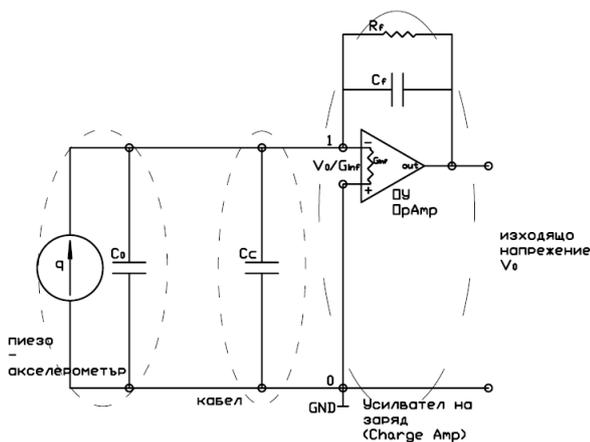
### ВЪВЕДЕНИЕ

Изследването на вибрационни параметри на пространствен обект е комплексна задача съдържаща в себе си проблеми свързани с измерването на кинематични параметри на трептенията, записване, обработка на данните и анализ на резултатите. Измерителната система за вибросигнали в конкретния случай е изградена от пиезо – електрични акселерометри, предусилвател – усилвател на заряд и усилвателно стъпало. Записът на данни от измерителната система се извършва чрез аналого – цифров преобразувател /АЦП/ свързан със записващ персонален компютър. Основното удобство на компютърните записи е улеснената обработка на данните и възможността за решаване на нетипични изследователски задачи, каквито възможности не са вградени в повечето универсални виброизмерителни апаратури. Предизвикателството идва от отнасянето на измерените параметри към конкретната машина обект на изследването – Вертикална Вибро – Импулсна Мелница /ВВИМ/. Устройството и принципа на действие на ВВИМ са описани в предхождащи разработки (Недялков и Асенов – 2003, 2004, 2005). Накратко ВВИМ се състои от вертикален корпус свързан с еластични елементи към рамата, вертикален вибровъзбудител свързан с еластични

елементи към корпуса и електромагнитни възбудители въздействащи между корпуса и вибровъзбудителя. В пространството между корпуса и вибровъзбудителя е оформена мелнична камера в която се поставят смилаци тела и материал.

### ИЗМЕРИТЕЛНА СИСТЕМА ЗА ВИБРОСИГНАЛИ

Измерителната система за вибро сигнали е изградена по класическата схема със пиезо – електрични преобразуватели, предусилвател – в конкретния случай заряден усилвател /Charge Amp/ и усилвателно стъпало от инструментални усилватели /Inst Amp/. В литературните източници, (de Silva) и (Минчев), са разгледани подобни схеми за изграждане на виброизмерителни системи и са описани основните им характеристики. Показаната на фиг.1, предусилвателна група е нелинейно звено, чиито характеристики зависят от честотата на измерваното ускорение. За да се определи поведението на групата предусилвател – датчик се съставя предавателна функция.



Фиг. 1. Предусилвателна група - схема на пиезо – акселерометър, свързан с усилвател на заряд.

Математичният модел на групата предусилвател – датчик е диференциалното уравнение за сумата от токовете за възела 1, произтичащо от свойствата операционния усилвател, и имащо следния вид:

$$(1) \quad \dot{q} + C \frac{\dot{V}_0}{G_{inf}} + C_f \left( \dot{V}_0 + \frac{\dot{V}_0}{G_{inf}} \right) + \frac{1}{R_f} \left( V_0 + \frac{V_0}{G_{inf}} \right) = 0$$

, където

$V_0 = V_0(t)$ ,  $(V)$  – изходящо напрежение на системата датчик предусилвател;

$q(t)$ ,  $(C)$  – променлив заряд на датчика;

$\dot{q}(t) = i(t)$ ,  $(A)$  – ток протичащ през датчика;

$C_0$ ,  $(pF)$  – собствен капацитет на датчика;

$C_c$ ,  $(pF)$  – собствен капацитет на свързващия кабел;

$C = C_0 + C_c$ ,  $(pF)$  – сумарен капацитет на датчика и кабела;

$G_{inf}$  – вътрешен коефициент на усилване на ОУ;

$C_f$ ,  $(pF)$  – кондензатор на обратната връзка;

$R_f$ ,  $(M\Omega)$  – съпротивление на обратната връзка;

Основното допускане за съставяне на гореописания математичен модел е, че входното напрежение на ОУ е  $V_0/G_{inf}$ , откъдето идва ограничението за използвания тип на ОУ. Препоръчва се използваният тип на ОУ да бъде с чисто полеви транзистори на входа, големи входни съпротивления  $10^{12} \div 10^{13} \Omega$  и пренебрежимо малък входен ток  $1 \div 5 pA$ .

От свойствата на пиезо - електричния акселерометър се знае:

$$(2) \quad q(t) = k_a * a(t), \quad (C), \quad \text{където:}$$

$k_a$ ,  $(pC/m s^{-2})$  – коефициент на предаване на заряда (чувствителност по заряд) на пиезо – датчика;

$a$ ,  $(m s^{-2})$  – ускорение на датчика (измервано ускорение)

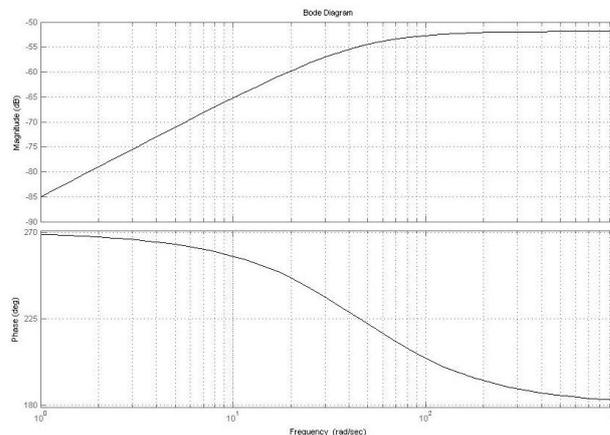
Прилагайки трансформацията на Лаплас към математичния модел на системата - ур. (1), при нулеви начални условия, и замествайки (2) в (1) се получава:

$$(3) \quad k_a * p * q(p) + \left[ \left( \frac{C}{G_{inf}} + C_f \left( 1 + \frac{1}{G_{inf}} \right) \right) p + \frac{1}{R_f} \left( 1 + \frac{1}{G_{inf}} \right) \right] V_0(p) = 0$$

Съответната предавателна функция за системата е:

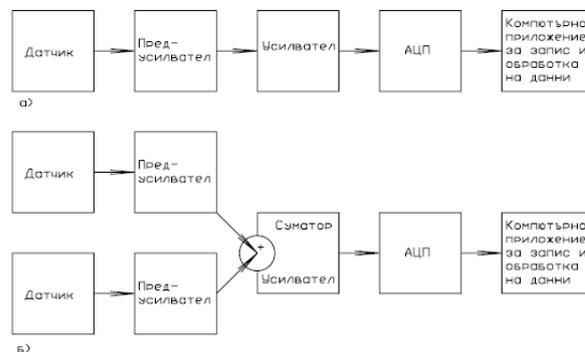
$$(4) \quad W(p) = \frac{V_0(p)}{a(p)} = \frac{-k_a * p}{\left[ \frac{C}{G_{inf}} + C_f \left( 1 + \frac{1}{G_{inf}} \right) \right] * p + \frac{1}{R_f} \left( 1 + \frac{1}{G_{inf}} \right)}$$

Също така предавателната функция на групата е използвана за синтез на основните параметри на предусилвателното звено. Основните елементи с които може да се влияе върху системата са елементите от обратната връзка на усилвателя на заряд. Съпротивителната обратна връзка е линейно звено, т.е. върху параметрите на системата може да се влияе само с големината на кондензатора в обратната връзка. Критериите, спрямо които е оптимизирана предусилвателната група са линейност на характеристиката при ниски честоти и коефициент на усилване в границите  $G_{PA} = -60 \div -50 dB$ . Симулацията на поведението на системата в MATLAB® или GNU Octave с вградената функция (MATLAB® Help) за разпечатване графиката Бодe /Bode diagram/, показани на фиг. 2, дава необходимата информация за коефициента на усилване на системата. От формата на кривата на усилване отчитаме началото на линейната зона, а може да се отчете и фазовото отместване.



Фиг. 2. Диаграма на Бодe – големина и фаза, в зависимост от честотата на ускорението измервано с пиезо - акселерометъра.

Така конфигурираните предусилвателни стъпала се свързват като електронна схема в подходящи блокове.



Фиг. 3. Блок схема на свързване на измервателната система към компютър за запис и обработка на данните.

На фиг. 3. са показани двете възможни конфигурации на системата за измерване на вибрационни параметри. Фиг. 3.а) е с проста конфигурация и всеки единичен канал на измерителната система се записва с компютърната програма. Фиг. 3.б) е с усложнена конструкция на електронната система, но сдвоените суматор – усилватели упростяват системата за обработка на данните.

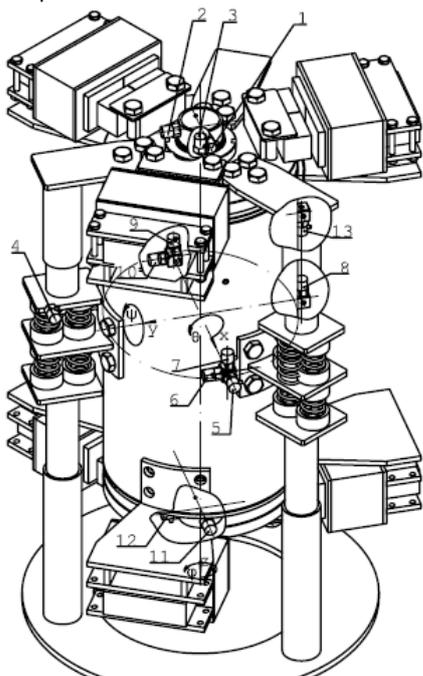
## ИЗМЕРВАНЕ НА ПРОСТРАНСТВЕНИ ВИБРАЦИОННИ ПАРАМЕТРИ

Пространствените вибрационни параметри на ВВИМ се представят чрез разделяне на движението на съставните му компоненти – три премествания  $x, y, z$  по съответните три оси на Декартовата координатна система  $Oxuz$  и съответстващите им три завъртания спрямо осите  $Ox \rightarrow \theta, Oy \rightarrow \psi, Oz \rightarrow \varphi$ . Ъгловите координати са приети като „Фиксирани ъгли“ на завъртане на Декартовата координатна система (Craig) спрямо трите си оси. Това представяне е идеологически най – близко до реалната работа на ВВИМ.

Проблем при пространственото измерване на вибрации е измерването на ъглите на завъртане в системата. Пиезо – акселерометрите са датчици за линейно преместване, като измервателният сигнал се взема от надлъжната им ос. Чувствителността в напречната ос е каталожен параметър и за целите на инженерните изследвания може да се пренебрегне.

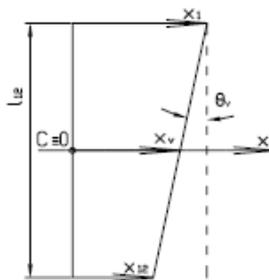
Системата на свързване на датчиците използвана за настоящото изследване е тази от фиг. 3а. По този начин се записва по системата – датчик канал. Подобно свързване е подходящо за изследване на самостоятелните вибрации на отдалечени точки и бе сметено за подходящо при предварителното изследване.

Схема на разположение на датчиците върху ВВИМ е показана на фиг. 4.



Фиг. 4. Схема на разположение на пиезо – акселерометрите върху корпуса и вибровъзбудителя на ВВИМ.

Сигналите на датчиците поставени по тази схема /фиг.4/ са смесени – в сигнала от един датчик има компонента от линейното преместване и компонента от ъгловото завъртане на точката на окачване на датчика, както е показано на фиг. 5.



Фиг. 5. Компоненти на вибросигнала за преместването по оста  $Ox$  на вибровъзбудителя.

От фиг. 5 са изведени следните зависимости:

$$(5) \quad x_v = \frac{x_1 + x_{11}}{2}, m \text{ и } \theta_v = \frac{y_2 - y_{12}}{l_{1-12}}, rad,$$

Условието, за да се приемат тези зависимости за верни е да имаме ъглови завъртания в границите до 6 deg. Тогава зависимостта:

$$(6) \quad \theta_v = arctg\left(\frac{y_2 - y_{12}}{l_{1-12}}\right), rad \text{ се свежда до } \theta_v = \frac{y_2 - y_{12}}{l_{1-12}}, rad$$

Аналогично за останалите точки на разположение на вибродатчиците по корпуса и вибровъзбудителя на ВВИМ са изведени следните зависимости:

$$(7) \quad y_v = \frac{y_2 + y_{12}}{2}, m \text{ и } \psi_v = \frac{x_1 - x_{11}}{l_{1-12}}, rad;$$

$$(8) \quad z_v = z_3, m \text{ и } \varphi_v = \frac{x_4 - x_v}{l_{0-4}}, rad;$$

$$(9) \quad x_k = x_5, m \text{ и } \theta_k = \frac{z_8 - z_k}{l_{0-8}}, rad;$$

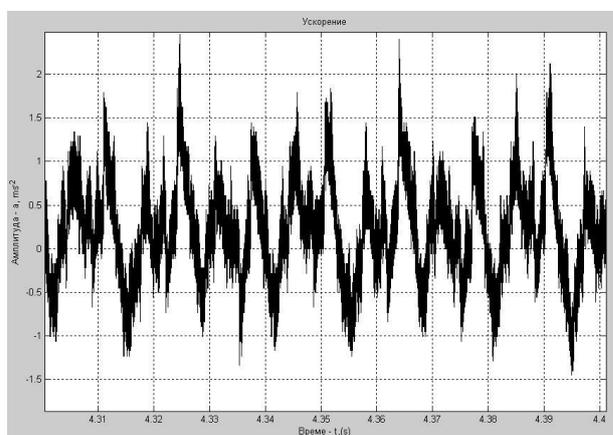
$$(10) \quad y_k = \frac{y_6 + y_{10}}{2}, m \text{ и } \psi_k = \frac{z_7 - z_9}{l_{11-8}}, rad;$$

$$(11) \quad z_v = \frac{z_7 + z_9}{2}, m \text{ и } \varphi_v = \frac{y_6 - y_{10}}{l_{6-10}}, rad;$$

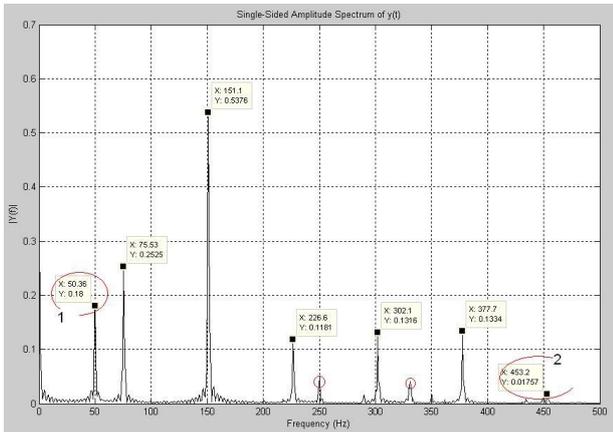
Геометричните пропорции изведени по – горе са използвани и за скоростите и за ускоренията на тялото, на базата на основното допускане за пренебрежимо малката стойност на ъгловите компоненти на преместването.

## ОБРАБОТКА НА ДАННИТЕ

Компютърно записаният сигнал се нуждае от обработка за извличане на необходимата информация. На фиг. 6 е показан записан сигнал от един измервателните канали при възбуждаща честота на електромагнитите 76 Hz, а на фиг. 7 – амплитудният му спектър.



Фиг. 6. Запис на виброускорения от 3<sup>ти</sup> канал.



Фиг. 7. Амплитуден спектър на виброускоренията (фиг. 6а).

Амплитудният спектър /фиг. 7/ на виброускоренията /фиг.6/ е получен при използване на Бързото Преобразуване на Фурие /БПФ/ за записания сигнал. Спектърът на ускоренията е показан до 500 Hz поради факта, че трептенията с по – високи честоти са с много малки амплитуди на вибропреместването, т.е. това са звукови трептения а не механични.

За целите на анализа на вибрационни параметри е необходимо да се познават и другите две кинематични характеристики – виброскорост и вибропреместване. Може да се приеме, че във ВВИМ материалът се задвижва и размества от директното действие на ускоренията, но дистанцията на която се премества средата има решаващо значение за пропускателната способност и производителността на машината.

Ускоренията имат завишени амплитудни стойности на спектралните линии във високите честоти. От спектралният анализ на ускоренията може да се съди за действащите сили заради връзката – сила – ускорение. Пример за това е посоченият с овал 2 /фиг. 7/ прекалено нисък и потиснат спектрален пик – на това място е логично присъствието на 6 кратната компонента от действието на електромагнитните вибровъзбудители, т. е. в работата на посоченият електромагнит има съществен проблем. Другите указани с овали спектрални линии са паразитни шумове.

Обработка на сигналите се налага и заради необходимостта от филтриране и корекция на паразитни нива и шумове. При интегрирането на съставните шумове и началното отместване се интегрират като постоянно ниво на ускорението и създават невярна картина на виброскоростите и вибропреместванията.

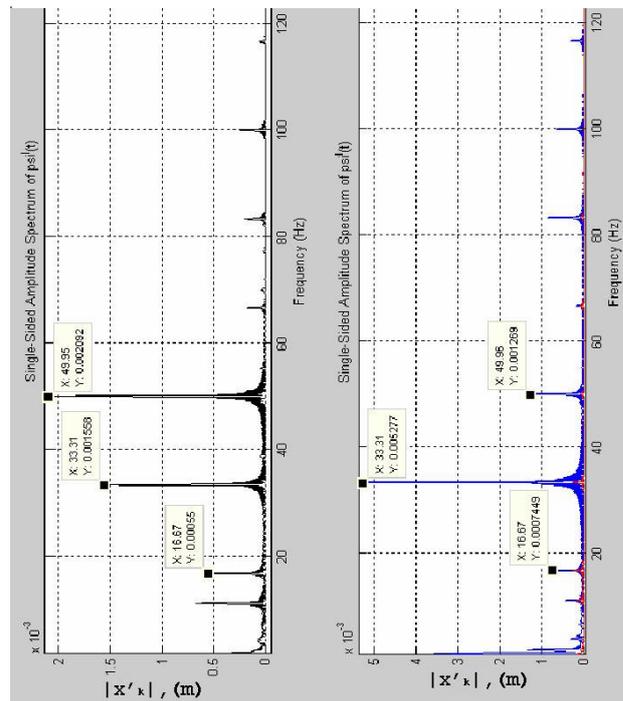
Алгоритъмът за обработка на записаните сигнали е изграден по последователността на блок схемата от фиг. 8. Създаден е и съответният програмен код за използване на гореописаният алгоритъм в компютърно приложение на MatLab или GNU Octave.

Изграденият програмен алгоритъм позволява индивидуална филтрация за всеки от единичните измерителни канали. При ВВИМ трептенията са смесени, тъй като мелницата е многомерна и многомасова система и не е възможно измерването и изследването на единично съставени трептения. Чрез тясно лентовото филтриране на сигнала е възможно изследването на конкретна собствена честота, която е очаквана или предварително теоретично изчислена.



Фиг. 8. Блок схема на методиката за обработка на сигнали и визуализация на резултати .

## АНАЛИЗ НА ВИБРАЦИОННИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ВВИМ



Фиг. 9. Сравнение между амплитуден спектър при работа на мелницата на празен ход и с 5kg материал+1kg смилащи тела (топки)

Разгледаните в предходната точка методика и програмен алгоритъм са използвани за анализ на вибрационните параметри на ВВИМ. От посочената на фиг. 9. диаграма за амплитудният спектър на виброскоростите по обобщената координата  $x_k$  при наличие на материал (черен цвят) и при липса на материал в мелничната камера се виждат следните взаимовръзки:

- използваното високочестотно електромагнитно възбуждане няма достатъчна принуждаваща сила за да причини чисто принудени трептения на системата – за сравнение виж спектъра на ускоренията /фиг.7/ и спектъра на скоростите /фиг. 9/, при тази разлика в изявените спектрални честоти принуждаващата сила само възбужда свободни трептения по обобщените координати;

- наличието на материал не измества изявените спектрални линии – показателно е за доказателство на основното допускане за преобладаващо линейния характер на механичната система на ВВИМ;

- наличието на материал е причинило намаляването на амплитудите – материалът внесен в камерата има изявено дисипативно действие – оказва съпротивление на движението изразяващо се в намаляване на амплитудите на движение.

На базата на тези разсъждения се дефинират основните изследователски задачи за експерименталното изследване на вибрационните параметри на ВВИМ:

- изследване на собствените и принудените честоти на ВВИМ при:

\* различни по големина и честота възбуждащи сили;

\* различни запълвания с материал и смилаци тела на мелничната камера;

- изследване на коефициентите на демпфиране при различно запълване на мелничната камера;

- изследване на мощността за задвижване на ВВИМ при различни възбуждащи честоти.

За целите на анализа на вибрационни параметри е много важно да се познават коефициентите на демпфиране на системата. При малки коефициенти на демпфиране разликата между реалната честота на трептене на системата и собствената и честота е много малка и може да се пренебрегне. С увеличаване на коефициента на демпфиране тази идеализация не може да се използва. Поради тази причина и поради зависимостта между демпфиране и консумирана мощност познаването на коефициента на демпфиране е от особена важност.

За целите на първичния анализ на поведението на системата коефициента на демпфиране може да се изведе от логаритмичния декремент на затихване:

$$(12) \quad \delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{A(t)}{A(t+n \cdot T)} \quad \text{където } A(t) \text{ и } A(t+n \cdot T) \text{ са}$$

последователни амплитуди от сигнала разделени от "n" периода. От следната зависимост може да се пресметне (de Silva) относителният коефициент на демпфиране за изследваната обобщена координата на движение:

$$(13) \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi}{\delta}\right)^2}}, \quad \text{където } \xi \text{ е относителният}$$

коефициент на демпфиране заложен в закона за движение на системата:

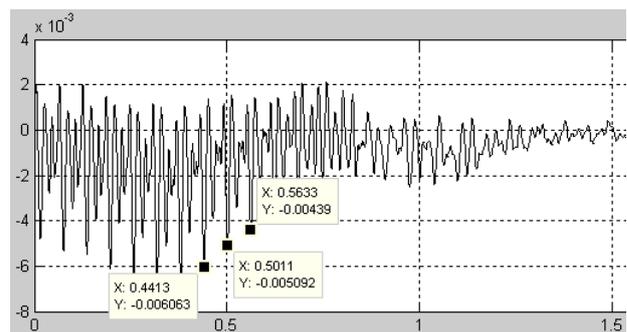
$$(14) \quad q(t) = q_0 \cdot e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot t} \cdot \sin(\omega_d \cdot t + \varphi_0), \quad \text{и използван за}$$

вързката между „демпфирана собствена честота“  $\omega_d$  и „недемпфирана“ собствена честота  $\omega_n$ :

$$(15) \quad \omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}.$$

Разглеждайки движението на системата с наличие на материал в мелничната камера и без наличие на такъв по описаните по – горе зависимости и съгласно фигура 10 са

пресметнати следните стойности за относителния коефициент на демпфиране на системата показани в таблица 1.



Фиг. 10. Визуализация на амплитудни стойности за пресмятане на относителния коефициент на демпфиране на системата.

Таблица 1.

Пресметнати стойности за относителния коефициент на демпфиране по изследваната обобщена координата.

Опит	Относителен коефициент на демпфиране
Без материал	$\xi = 1.564 \%$
4 kg пясък	$\xi = 2.1 \%$
5 kg пясък + 1 kg стоманени топки	$\xi = 2.684 \%$

## ИЗВОДИ

1. Предложена е методика за изследване и анализ на пространствени вибрационни параметри на сложен многомерен обект.

2. На базата на създадената методика е синтезиран програмен алгоритъм за анализ на динамични параметри характеризиращи работата на ВВИМ.

3. От първоначалното експериментално изследване са получени стойности за относителните коефициенти на демпфиране и собствените честоти на ВВИМ.

## ЛИТЕРАТУРА

Craig John J. "Introduction to robotics: mechanics and control" 2nd ed. ISBN 0-201-09528-9 (pp. 462) Addison Wesley Longman (1989)

de Silva Clarence W., "VIBRATION: fundamentals and practice", ISBN 0-8493-1808-4, pp. 957 CRC Press Boca-Raton-London-New York-Washington D.C., USA (2000)

MATLAB® Help

Минчев Н. и В. Григоров. „Вибродиагностика на ротационни и бутални машини“. ДИ „Техника“, София (1988)

Недялков П. и Е. Асенов, "Изследване на кинематичните характеристики на Вибро - Импулсна Мелница". НТС по Машиностроене – Научни Известия - Автоматизация на Дискретното Производство "АДП 2003", София 2003г.

Асенов Е. & П. Недялков, "Кинематичен и динамичен анализ на параметрите на Вибро - Импулсна мелница". Сборник на научна конференция "50 години Катедра Машинни елементи – Ноември 2004", ТУ - София 2004г.

Nedyalkov P. & E. Assenov, *"Dynamics of the multi-mass three dimensional model of the Vibro-Impulse Comminution Mill VIM"* pp. 146 -149. Proceedings of the third international

conference on "Challenges in Higher Education and Research in the XXI Century". Sozopol Bulgaria 2005.

Препоръчана за публикуване  
Рецензент: доц. д-р Цв. Дамянов