

**А.К. Аврамчук, студ.
А.С. Антонюк, магістр
О.А. Плівак, асист.
Г.К. Якимчук, к.т.н., доц.**

Національний технічний університет України «КПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИЗАЙНЕРСЬКИХ ОТВОРІВ НА ДЕЦІ МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ НА РІВЕНЬ ЇХ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

Результатами досліджень звичайної шестиструнної гітари отримано амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) зміни параметрів звукових коливань в залежності від форми та дизайну корпусу та дека гітари: біля грифу гітари вифрезеровано декілька „отворів” - „Ефи” різної форми. З кожним „отвором” послідовно було знято АЧХ з кожного ладу гітари на кожній з шести струн. За результатами було отримано графіки залежностей „відзвуку” корпусу гітари на коливання струни на кожній з власних частот.

Вступ. Виготовлення та дизайн смичкових струнних інструментів – досить складна задача перед виробниками. Складна тому, що на даний час існують безліч сучасних технологій виготовлення, широкий спектр дизайнерських впроваджень та ідей, виготовлення за нестандартними технологіями тощо. Можливість використання амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) із подальшою обробкою на ПК дає змогу вдосконалювати конструкцію та матеріали інструментів.

Багато типів струнних інструментів може бути об'єднано в типи відповідно до певних характеристик: їх звук утворюється, коли натягнута смужка матеріалу (заввичай проволока, шовк або кишка) починає вібрувати від контакту зі смичком або іншим предметом. Параметри звуку, виданого струною, залежать від довжини, гнучкості і напруженості, їх натяжки. Підсилити та відтворити звукові коливання повинен корпус музичного інструменту – дека.

Викладення основного матеріалу. Для теоретичного дослідження поперечних коливань струн музичних інструментів, використаємо методи дослідження поперечних коливань завчасно розтягнутих ниток [1]. Розглянемо систему, яка представляє собою розтягнуту, не маючу жорсткості на прогин нитку, яка може вільно коливатися в поперечному напрямку. Допускаємо, що розтягуюча сила S нитки залишається сталою при малих коливаннях в площині $xу$. Позначимо через y поперечне переміщення довільної точки нитки, яка знаходиться на відстані

x від лівого кінця. При коливаннях сила інерції врівноважується розтягуючими силами, прикладеними до кінців малого елемента нитки. При невеликих кутах нахилу з умов динамічної рівноваги (рис.1) витікає:

$$S \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \right) - S \frac{\partial y}{\partial x} - m dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 ,$$

де m – маса одиниці довжини нитки. Звідси отримуємо диференційне рівняння руху цієї системи:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} ,$$

де $c = \sqrt{S/m}$ - швидкість розповсюдження поперечних хвиль у вздовжньому напрямку.

Самий простий вид кінцевих умов показаний на рис. 1 а, що потрібен для урахування сили S . Ця теорія придатна для нитки, обидва кінці якої жорстко закріплені. В цьому випадку кінцеві умови будуть виглядати так:

$$(y)_{x=0} = 0;$$

$$(y)_{x=l} = 0$$

На рисунку 1, б показані сили, які діють на малий елемент нитки довжиною dx , при цьому основний інтерес являють собою проекції цих сил на вісь y .

Тоді частоти та нормальні функції мають вигляд:

$$p_i = i \cdot \pi \cdot x/l;$$

$$X_i = p_i \cdot \sin(p_i \cdot x/l),$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

На рисунку 1, в, д показані нормальні функції для першої, другої та третьої форм коливань. Ці коливання збуджують коливання деки та корпусу.

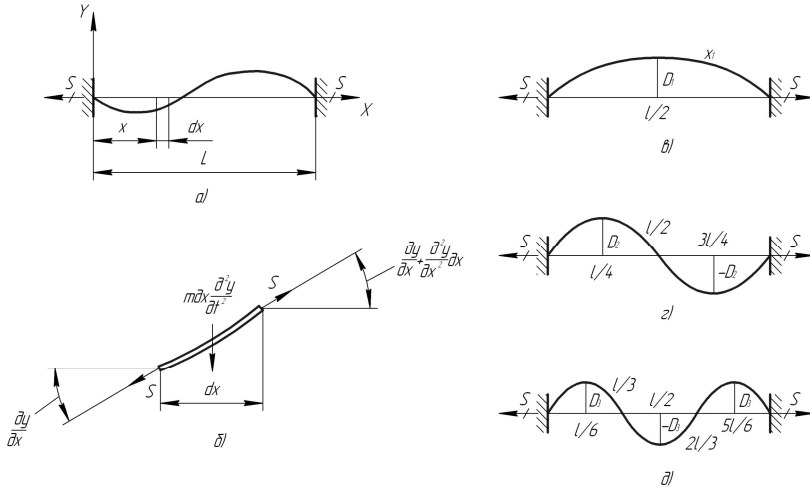


Рис. 1. Схеми коливань струни

Теоретично коливання корпусу гітари та деки можливо розглядати складеними (сумарними) з окремих геометричних фігур. Обґрунтовані та відомі коливання мембран та оболонок різноманітної форми: коло, півколо, трикутник, прямокутник, тощо [1, 2].

Розглянемо спочатку найпростіший випадок коливання кругової мембрани, коли поверхня її прогинів симетрична відносно центра круга. В цьому випадку прогини залежать тільки від відстаней по радіусу r , а граничну умову можливо виразити за допомогою ряду:

$$Z = a_1 \cos(\pi r / 2a) + a_2 \cos(3\pi r / 2a) + \dots, \quad (1)$$

де a – радіус границі Z - полярні координати.

Для зручності скористаємось полярною системою координат, тоді ряд представимо у наступному вигляді:

$$\Delta U_{\max} \approx \frac{S}{2} \int_0^a \left(\frac{\partial Z}{\partial r} \right)^2 2\pi r dr$$

де ΔU - приріст потенційної енергії, S - питоме розтягуюче зусилля

Потім, якщо взяти вираз з коливання пластин для врахування кінетичної енергії маємо:

$$T_{\max} = \frac{\omega}{2g} p^2 \int_0^a Z^2 2\pi r dr$$

де p - частота коливань, ω - вага одиниці площі деки;

тоді рівняння прийме вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial a_n} \int_0^a \left\{ \left(\frac{\partial Z}{\partial r} \right)^2 - \frac{p^2 \omega}{gS} Z^2 \right\} 2\pi r \, dr = 0 \quad (2)$$

Утримавши в ряді (1) тільки один член та підставивши вираз:

$$Z = a_1 \cos(\pi r / 2a)$$

в рівняння (2) отримаємо:

$$\frac{\pi^2}{4a^2} \int_0^a \sin^2 \frac{\pi r}{2a} r \, dr = \frac{p^2 \omega}{gS} \int_0^a \cos^2 \frac{\pi r}{2a} r \, dr$$

звідки витікає:

$$\frac{\pi^2}{4a^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi^2} \right) = \frac{p^2 \omega}{gS} \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2} \right)$$

а частотне рішення:

$$p = \frac{2,415}{a} \sqrt{\frac{gS}{\omega}}$$

Точне рішення в цьому випадку має вигляд [4]:

$$p = \frac{2,404}{a} \sqrt{\frac{gS}{\omega}}$$

Помилка першого наближення не перевищує 0,5%.

Для того щоб отримати більш точне наближення для основної форми коливань та для частот більш високих форм коливань необхідно утримати більше число членів ряду (1). Ці форми коливань будуть мати одну, дві, три і т.д. вузлових кола, на яких прогини при коливанні дорівнюють нулю.

Крім форм коливань симетричних відносно центра, кругова мембрана може мати також такі коливання, при яких утворюються одна, дві, три і т.д. діаметрів кіл, що називаються вузловими діаметрами, на яких прогини при коливанні дорівнюють нулю. Декілька форм коливань кругової мембрани наведені на рис. 2 де вузлові кола та вузлові діаметри зображені штриховими лініями.

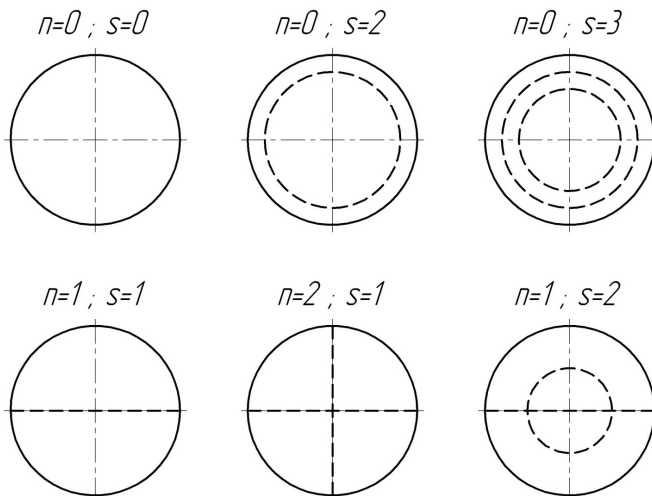


Рис. 2

В усіх випадках величину p_{ns} , що характеризує частоту, можливо виразити:

$$p_{ns} = \frac{\alpha_{ns}}{a} \sqrt{\frac{gS}{\omega}}$$

Значення, що входить в цю формулу α_{ns} приведені в табл. 1, де n - число вузлових діаметрів, s - число вузлових кіл.

Таблиця 1

s	n=0	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
1	2,404	3,832	5,135	6,379	7,586	8,780
2	5,520	7,016	8,417	9,760	11,064	12,339
3	8,654	10,173	11,620	13,017	14,373	15,700
4	11,792	13,323	14,796	16,224	17,616	18,982
5	14,931	16,470	17,960	19,410	20,827	22,220
6	18,071	19,616	21,117	22,583	24,018	25,431
7	21,212	22,760	24,270	25,749	27,200	28,628
8	24,353	25,903	27,421	28,909	30,371	31,813

Цю методику також можливо використовувати в якості рішення інших задач, таких як, мембрани обмежені двома колами або мембрани в формі сектора.

Коли границя мембрани дещо відрізняється від круглої, то частота найнижчої форми коливань мембрани приблизно рівна частоті кругової мембрани, яка має ту саму площу та те ж значення величини gs . В загальному вигляді формула для визначення частоти основної форми коливань мембрани буде мати вигляд:

$$p = \alpha \sqrt{\frac{gS}{\omega F}}$$

де F - площа мембрани.

Далі наведені значення постійної α , що враховує форму границі мембрани.

Коло	$\alpha = 2,404\sqrt{\pi} = 4,261$
Квадрат	$\alpha = \pi\sqrt{2} = 4,443$
Четверта частина кола	$\alpha = \left(5,135\frac{\sqrt{2}}{2}\right)\sqrt{\pi} = 4,551$
Сектор кола 60°	$\alpha = 6,379\sqrt{\frac{\pi}{6}} = 4,616$
Прямокутник (a/b=3/2)	$\alpha = \pi\sqrt{\frac{13}{6}} = 4,624$
Рівносторонній трикутник	$\alpha = 2\pi\sqrt{tg30^\circ} = 4,774$
Половина кола	$\alpha = 3,832\sqrt{\frac{\pi}{2}} = 4,803$
Прямокутник (a/b=2/1)	$\alpha = \pi\sqrt{\frac{5}{2}} = 4,967$
Прямокутник (a/b=3/1)	$\alpha = \pi\sqrt{\frac{10}{3}} = 5,736$

У випадках, коли границя відрізняється від розглянутих, аналіз коливань представляє значні математичні труднощі. Однак для випадку еліптичної границі є точне рішення [5].

В нашому випадку деку гітари можливо представити як сукупність елементарних частин, для яких є рішення (рівняння) частот (рис. 3).

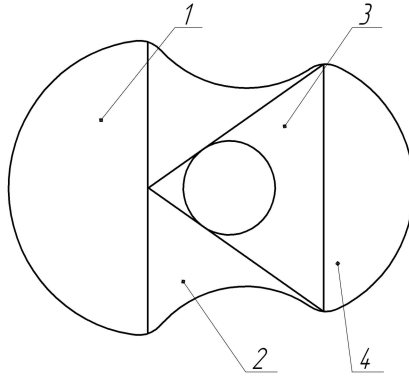


Рис. 3. Розбивка деки гітари на складові пластини (мембрани): 1, 4 – півколо, 2 – трикутники, 3 – трикутник з отвором

З наведених виразів та (рис. 1, $v-d$) видно, що частот коливань на кожному з ладів грифу гітари може бути досить багато.

Так само можуть бути теоретично обґрунтовано дуже широкий спектр коливань корпусу гітари, його деки, дна та оболонки, що також підтверджено складовими АЧХ, записаними від кожного ладу однієї (поспідовно всіх шести) струни.

Оскільки метою роботи є оцінка технічного дизайну музичного інструменту та класичне звучання стандартних корпусів, основною методикою є дослідження зміни АЧХ звукових коливань внаслідок зміни форми деки музичного інструмента.

В дослідженні за результатами оцінки АЧХ деки базової шестиструнної гітари отримані графіки зміни звукових параметрів коливань в залежності від форми та дизайну деки гітари. Ці данні були занесені до ПК для порівняння з даними допрацьованого дизайном корпусу інструмента.

Для покращення дизайну біля грифу гітари було вифрезеровано два дизайнерських фігурних „отвори” різної форми і розмірів. Після обробки „отворів” було знято АЧХ на кожному ладі гітари.

В роботі використано установку, яка складається з маятника (збудження звуку), мікрофона, з’єднаного з підсилювачем та ПК з потрібним програмним забезпеченням (Cool Edit 2000, Spectra Plus). На рисунку 4 зображена схема та фото комплексу для запису та обробки АЧХ.

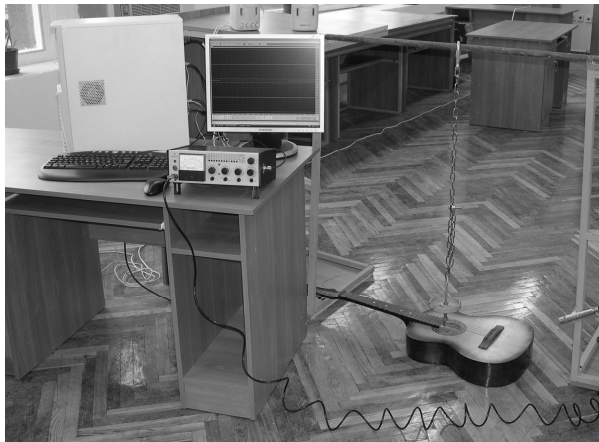
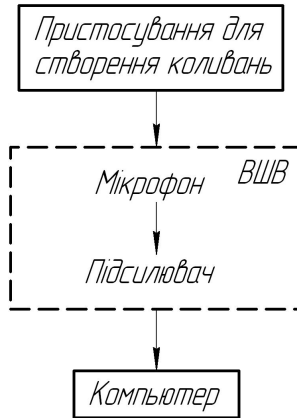


Рис. 4. Схема та фото комплексу для запису АЧХ

Після фрезерування так само було послідовно знято АЧХ шести струн гітари на кожному з 19 ладів. Отримані результати збережено у потрібному форматі для обробки даних. Для цього використано програму “Spectra Plus”. Відкриваючи потрібні файли, проводимо обробку результатів, задаючи потрібні параметри. На рис. 5а приведено деякі АЧХ гітари послідовного коливання однієї струни на 19 ладах та на рис. 5б коливання однієї струни на одному ладу до та після обробки деки.

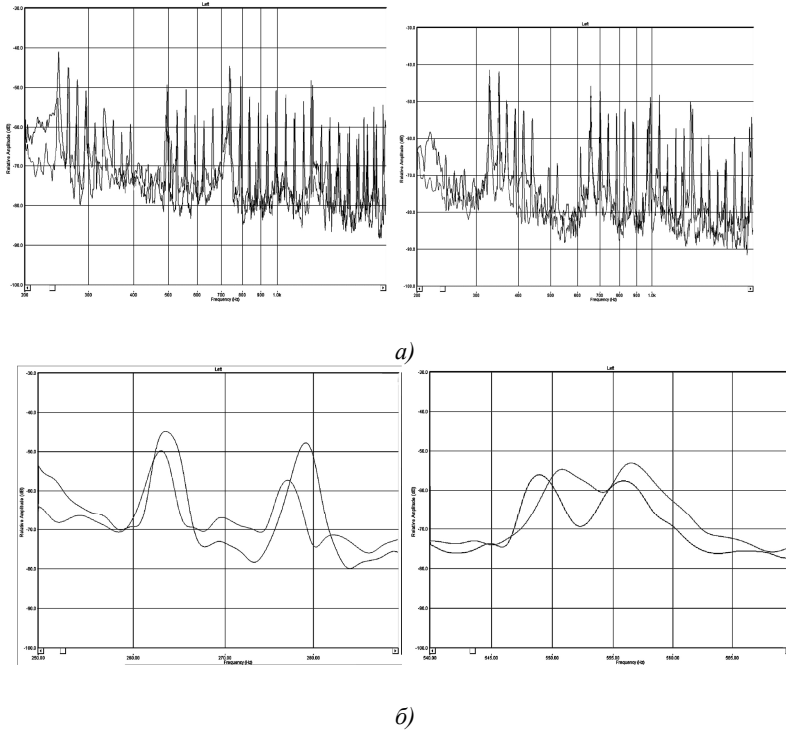


Рис. 5. АЧХ гітари

Висновки:

1. За отриманими графіками (114 варіантів) впливає висновок, що зроблені „отвори” в корпусі гітари змінюють АЧХ музичного інструмента, але мало впливають на спектр частот та амплітуду звукових коливань, що дозволяє формувати його ефективний дизайн.

2. Важливим є також програмне забезпечення для обробки АЧХ на ЕОМ.

3. Визначено, що зміна дизайну гітари двома видами „Ефи”- подібними отворами суттєво не впливають на класичне звучання гітари.

4. Слід більш детально вивчити форми „отворів” – „Ефи” та їх розміри на деці гітари. Це дозволить визначити межі зміни жорсткості деки гітари, зберігаючи її класичне звучання. Також слід вивчити зміни АЧХ різних акордів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / пер. с англ. Л.Г. Корнійчука ; под. ред. Э.И. Григолоука. – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
2. Енс Трампе Броч. Применение измерительных систем фирмы «Брюль и Кьер» для измерения механических колебаний и ударов. Профессор Енс Трампе Броч. Дипломированный инженер Швейцарского высшего технического училища 1973 г.
3. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек : справочник / под ред. А.П. Филиппова. – К. : Наукова думка, 1964. – 288 с.
4. Bourget M.J. Memoire sur mouvement vibratoire des membranes circulaires. – Annales scientifiques de l'ecole normale supérieure, 1866, t. 3. – S. 55–95.
5. Mathieu E. Memoire sur le mouvement vibratoire d'une membrane de forme elliptique // Journal de mathematique pures at appliquees (Liouville), Ser. 2, t. 13, 1869. – P. 137–203.

АВРАМЧУК Антон Костянтинович – студент кафедри інтегровани технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– дослідження звукових характеристик гітари.

Тел.: (097) 929-01-91.

АНТОНЮК Антон Сергійович – магістр кафедри інтегровани технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– системи вимірювання та автоматизації в машинобудуванні.

Тел.: (067) 990-87-10.

E-mail: anton_antonyk@i.ua

ПЛІВАК Олександр Анатолійович – асистент кафедри інтегровани технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– вимірювальна техніка в машинобудуванні;

– технічний дизайн;

– різальний інструмент.

Тел. (044) 454-95-28; (066) 468-20-07.

E-mail: paapl@online.ua

ЯКИМЧУК Георгій Кузьмич – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- стандартизація та метрологія;
- вимірювальні системи.

Тел.: (044) 454-95-28.

E-mail: jgk@online.ua

Подано 16.08.2011

