

# Автоматизована система проєктування віброчастотних густиномірів

О. Ю. Олійник<sup>1</sup>, Ю. К. Тараненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Коледж радіоелектроніки, вул. Шмідта, 18, 49000, Дніпро, Україна  
oleinik\_o@ukr.net

<sup>2</sup> ПП "Ліколак", вул. Качалова, 1, 49005, Дніпро, Україна

## Анотація

Статтю присвячено опису розробленої автоматизованої системи проєктування віброчастотних густиномірів із демонстрацією широких функціональних можливостей програми та налаштувань інтерфейсу. Розробка вирішує проблему проєктування віброчастотних густиномірів, розрахунку добротності та чутливості резонаторів, які й забезпечують залежність частоти автоколивань від контрольованої густини. Відсутність чітких методичних рекомендацій градування, методик коригування при різних способах монтажу резонатора суттєво обмежує використання віброчастотних густиномірів.

В основі алгоритму розробленого програмного комплексу лежить розрахунок амплітудно-частотних характеристик трубчастого резонатора з використанням диференціального рівняння для визначення частот і форм згинальних коливань трубчастого резонатора. Програмна реалізація розробленої моделі розрахунку дозволяє не тільки візуалізувати форми, частоту, пучності та вузли коливань резонаторів густиномірів із широкого спектра матеріалів, придатних до експлуатації у завданих виробництвом умовах, але і враховує тип кріплення, чисельне значення жорсткості опори, дозволяє виконати моделювання розподілу чутливості уздовж усього діапазону вимірювання.

Розроблена автоматизована система проєктування має простий і зрозумілий інтерфейс, а відсутність необхідної інсталяції програмного забезпечення і його налаштування роблять продукт більш доступним у промислових умовах невеликих підприємств.

**Ключові слова:** віброчастотний густиномір; резонатор; частота коливань; умови закріплення; пучність; чутливість.

Отримано: 17.12.2020

Відредаговано: 05.02.2021

Схвалено до друку: 12.02.2021

## 1. Вступ

Віброчастотні густиноміри зарекомендували себе як надійні засоби вимірювальної техніки з високою точністю вимірювання в складних умовах експлуатації [1]. Широке застосування приладів цього класу в усіх галузях суттєво обмежується необхідністю градування з подальшим періодичним коригуванням, пов'язаним із конструктивними особливостями резонатора – чутливого елемента давача, його монтажем. Відсутність чітких методичних рекомендацій градування, методик коригування градувальних характеристик при різних способах монтажу резонатора суттєво обмежує використання віброчастотних густиномірів. Розробка автоматизованого комплексу для проєктування віброчастотних густиномірів дозволить вирішити поставлені завдання.

## 2. Аналіз літературних даних

Завдання підвищення добротності та чутливості резонаторів при їх проєктуванні вирішувалося в напрямках пошуку оптимальних умов кріплення резонатора і визначення його конструктивних параметрів, що забезпечують максимум добротності [2, 3].

Недоліком отриманих розрахункових схем резонатора віброчастотних густиномірів є жорстке закріплення кінців трубок в опорі, що, з огляду на їх неідеальну ідентичність, призводить до розсіювання коливань, а отже, до зниження чутливості [4, 5]. Існуючі математичні моделі не дозволяють визначити вузли і пучності коливань резонаторів, а отже, розробники не мають змоги визначити раціональне розташування проміжних опор, які необхідні для налаштування частот.

## 3. Комп'ютерна модель автоматизованої системи проєктування віброчастотних густиномірів

В основі роботи програмного комплексу лежить рішення диференціального рівняння, широко застосованого в ряді робіт [6, 7] для визначення частот і форм згинальних коливань трубчастого резонатора:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + (m_m + m_p) \frac{d^2 y}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

де  $EI$  – жорсткість при згині в площині коливань;  $E$  – модуль пружності матеріалу резонатора;  $I$  – статичний момент інерції поперечного перерізу

трубки щодо осі коливань;  $m_m, m_p$  – маси одиниці довжини трубки і заповнюючої рідини відповідно;  $y$  – відхилення осі трубки як функція часу  $t$  і координати  $x$  вздовж осі трубки.

Структуру алгоритму програмного комплексу для розрахунку амплітудно-частотних характеристик трубчастого резонатора наведено на рис. 1. Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу розробленого програмного комплексу показано на рис. 2.

Робота програмного комплексу починається з ініціалізації необхідних модулів Python (бібліотека PIL (Python Image Library), крок 2 алгоритму) і введення чисельних значень геометричних розмірів резонатора (крок 3). Розрахунок форми і частот коливань резонатора в програмному комплексі (крок 4) реалізовано на основі наведеного співвідношення (1) з використанням виразів для рівняння прогину трубки і її похідних, виражених через функції А.Н. Крилова [7].

Для цього рішення (1) було подано у вигляді [6]:  $y(x) = X(x)T(t)$ , підставивши отримане рішення

в (1), після розподілу змінних отримали таку рівність:

$$\frac{EI}{m} \frac{1}{X(x)} \frac{d^4 X(x)}{dx^4} = - \frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2}.$$

Перетворивши отриману рівність, прирівнявши ліву і праву частини виразу  $-\omega^2$ , отримано систему з двох диференціальних рівнянь четвертого і другого ступеня:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 \cdot T(t) &= 0 \\ \frac{d^4 X(x)}{dx^4} - \frac{m}{EI} \omega^2 \cdot X(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Рішення першого рівняння системи (2) носить коливальний характер із частотою  $\omega$ . Рішення другого рівняння визначає форму коливань:

$$X = C_1 \sin(kx) + C_2 \cos(kx) + C_3 sh(kx) + C_4 ch(kx), \quad (3)$$

де  $X$  – форма коливань, відхилення точок осі резонатора від поздовжньої осі;  $C_1, \dots, C_4$  – коефіцієнти, що визначаються умовами закріплення кінців трубчастого резонатора.

У рівнянні (3) прийняте позначення безрозмірної змінної  $0 \leq x \leq 1$ , тому для  $k$  отримаємо:

$$k^4 = \frac{mL^4}{EI} \omega^2 \quad \text{або} \quad \omega = \frac{k^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (4)$$

де  $k$  – коефіцієнт форми коливань резонатора;  $L$  – довжина резонатора;  $m$  – маса одиниці довжини резонатора;  $EI$  – згинальна жорсткість.

Оскільки циклічна частота визначається як:

$$f = \omega / (2\pi),$$

то вираз (4) можна перетворити до вигляду:

$$f = \frac{k^2}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}}. \quad (5)$$

Застосувавши до (3) функції А. Н. Крилова [7], отримаємо:

$$\begin{aligned} S &= 0,5 [ch(kx) + \cos(kx)] \quad T = 0,5 [sh(kx) + \sin(kx)], \\ U &= 0,5 [ch(kx) - \cos(kx)] \quad V = 0,5 [sh(kx) - \sin(kx)], \end{aligned} \quad (6)$$

з урахуванням того, що відповідно до [7]:

$$\begin{aligned} x = 0; \quad S &= 1; \quad T = V = U = 0; \\ T' &= k \cdot S; \quad U' = k \cdot T; \quad V' = k \cdot U; \quad S' = k \cdot V. \end{aligned}$$

Отримаємо співвідношення для першої, другої і третьої похідних із таким чисельним рішенням трансцендентних рівнянь для частот і форм для обліку початкових і крайових умов (крок 4):

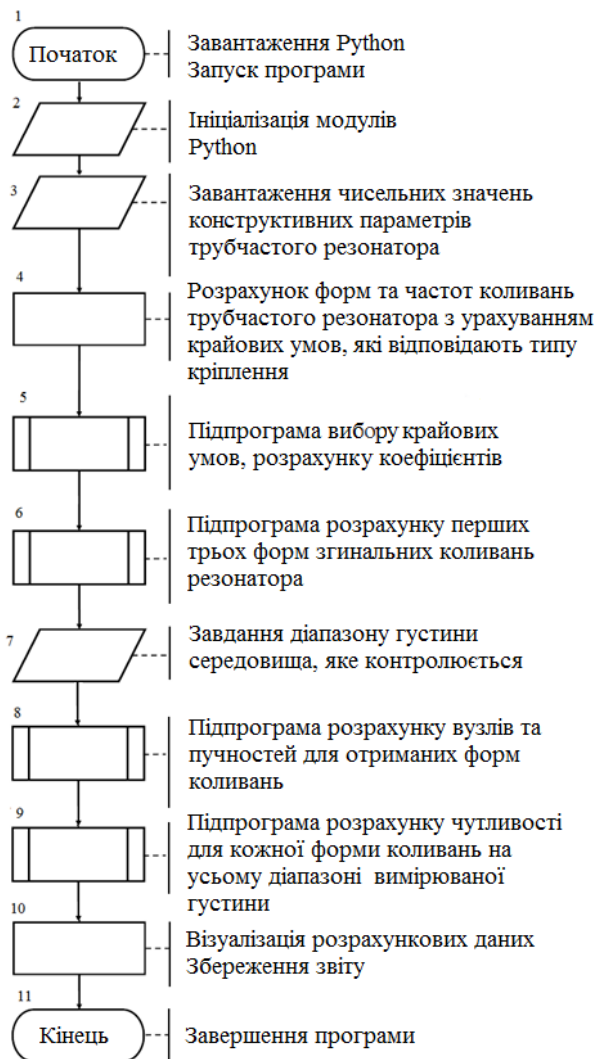


Рис. 1. Алгоритм роботи програмного комплексу для розрахунку амплітудно-частотних характеристик трубчастого резонатора з урахуванням його конструктивних характеристик

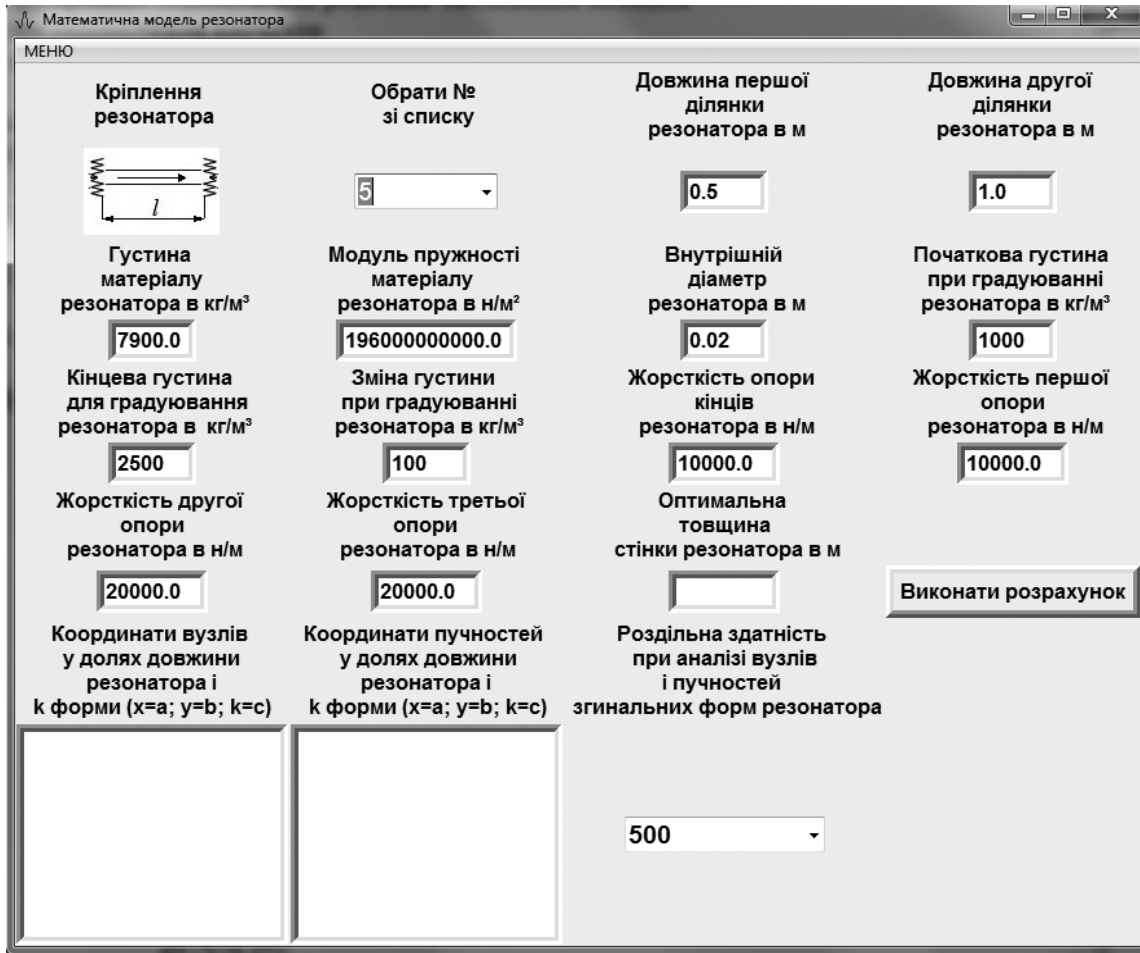


Рис. 2. Зовнішній вигляд інтерфейсу програмного комплексу

$$\left. \begin{aligned} X(x) &= C_1 \cdot S(k \cdot x) + C_2 \cdot T(k \cdot x) + C_3 \cdot U(k \cdot x) + C_4 \cdot V(k \cdot x) \\ X'(x) &= k \cdot (C_1 \cdot V(k \cdot x) + C_2 \cdot S(k \cdot x) + C_3 \cdot T(k \cdot x) + C_4 \cdot U(k \cdot x)) \\ X''(x) &= k^2 \cdot (C_1 \cdot U(k \cdot x) + C_2 \cdot V(k \cdot x) + C_3 \cdot S(k \cdot x) + C_4 \cdot T(k \cdot x)) \\ X'''(x) &= k^3 \cdot (C_1 \cdot T(k \cdot x) + C_2 \cdot U(k \cdot x) + C_3 \cdot V(k \cdot x) + C_4 \cdot S(k \cdot x)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Наприклад, для компонування № 3 з табл. 1 та граничних умов [7]  $X(0) = X'(0) = X''(0) = 0, EJX'''(l) = c_0 X(l)$ , рівняння для коефіцієнта  $k$  форми коливань буде мати вигляд:  $sh(kl) \cos(kl) - sh(kl)ch(kl) = EJ / c_0$ . Користуючись першим рівнянням системи (7), отримуємо форму коливань за допомогою співвідношення (5) частоти резонатора залежно від маси  $m$  резонатора з рідиною.

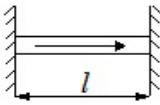

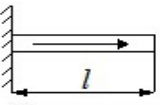
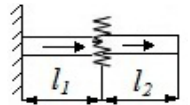
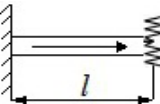
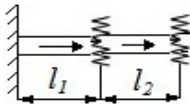
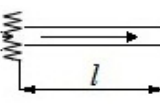
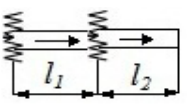
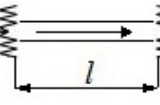
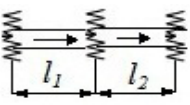
Вибір крайових умов (крок 5) здійснюється відповідно до обраного для розрахунку типу кріплення резонатора. Найбільш повну класифікацію типів кріплень щодо балки наведено в [8] і широко використано в багатьох роботах без урахування геометричних розмірів труб, товщини стінок і густини матеріалу [8]. Для розрахунків у програмному комплексі використано наступні варіанти типів кріплення (табл. 1). Для кожного типу кріплення за довідковими даними [6–8] обрано крайові умови закріплення.

З використанням модуля ComboBox реалізовано вікна з випадваючим списком для вибору типу компонування кріплення, відповідно до прийнятих варіантів типів кріплення (табл. 1). Для зручності

користування в сусідньому вікні відображається схематичне відображення обраної структури компонування опор. Введення чисельних значень конструктивних параметрів резонатора, довжини ділянок резонатора, контрольованого діапазону густини відбувається з використанням вікон меню з полем для введення значення параметра вручну (рис. 3).

Наступним кроком (крок 7) роботи програмного комплексу є завдання введення діапазону густини контрольованого середовища шляхом введення початкової і кінцевої густини рідини. Після введення діапазону густини контрольованого середовища (рис. 3) здійснюється розрахунок коефіцієнтів чутливості  $k$  для трьох форм коливань з урахуванням відношення зовнішнього діаметра трубки резонатора до її внутрішнього діаметра і побудова градувальної характеристики резонатора. На рис. 4 показано функціональні можливості програми при побудові градувальної характеристики резонатора для обраного типу кріплення (компоновання).

Типи кріплення резонатора

№ компонентування	Тип кріплення	№ компонентування	Тип кріплення
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

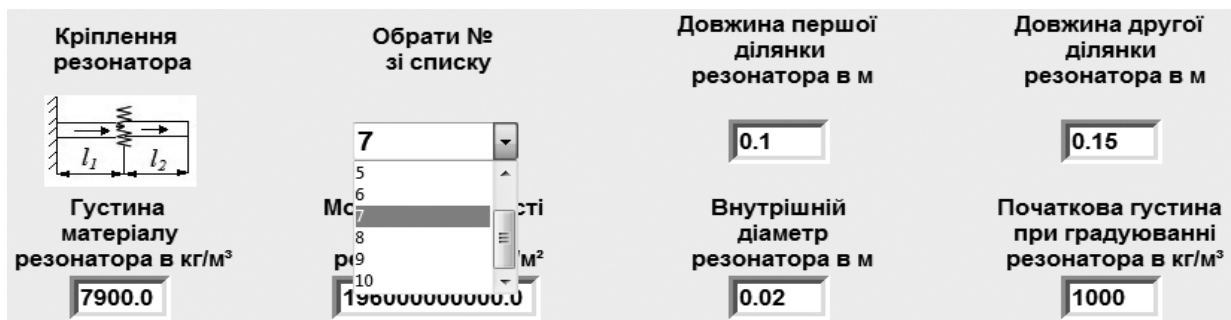


Рис. 3. Реалізація меню задачі вибору типу кріплення і конструктивних характеристик резонатора

#### 4. Робота програмного комплексу на прикладі розрахунку різних резонаторів

Розглянемо дію програмного комплексу на прикладі розрахунку форми і частоти коливань для резонатора такої конструкції: трубка з високолегованої корозійностійкої сталі 12X18H12T, густина матеріалу  $\rho_r = 7900 \text{ кг/м}^3$ , модуль пружності сталі  $E = 196 \times 10^9 \text{ Н/м}^2$ , довжина трубки  $l = 0,1 \text{ м}$ , товщина стінки  $h = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$ . Результати розрахунку наведено на рис. 4.

Геометричні розміри резонатора (в цьому випадку довжина) і тип кріплення суттєво впливають

на частоту і форму коливань резонатора, розподіл пучностей і вузлів.

Отримані градувальні характеристики (рис. 4) відповідають ізотермічним умовам роботи віброчастотних густиномірів, коли відсутні зміни фізичних властивостей вимірюваної речовини і розмірів резонаторів, а також не враховані впливи зміни тиску та швидкості течії рідини через резонатор.

У реальних умовах експлуатації вібраційних густиномірів характеристика (5) описується складною багатofакторною залежністю [9]:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 + K_N N}{1 + K_{\rho_1} \rho_1 + K_{\rho_2} \rho_2}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\alpha_E}{1 + K_N N} - 2\alpha_R \right) - K_{\rho r} \right] \Delta t \sqrt{1 - \left( \frac{1}{2Q^2(\mu)} \right)} \right\}; \quad (8)$$

$$f_0 = \xi \frac{n^2 h}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{E}{6\rho(1-\gamma^2)}}; \quad K_{\rho_1} = \frac{r}{1-\rho_1 n h} \frac{(r/r_6)^{2n} + 1}{(r/r_6)^{2n}}; \quad K_{\rho_2} = \frac{r}{\rho_2 n h} \frac{(r/r_n)^{2n} + 1}{(r/r_n)^{2n} - 1}$$



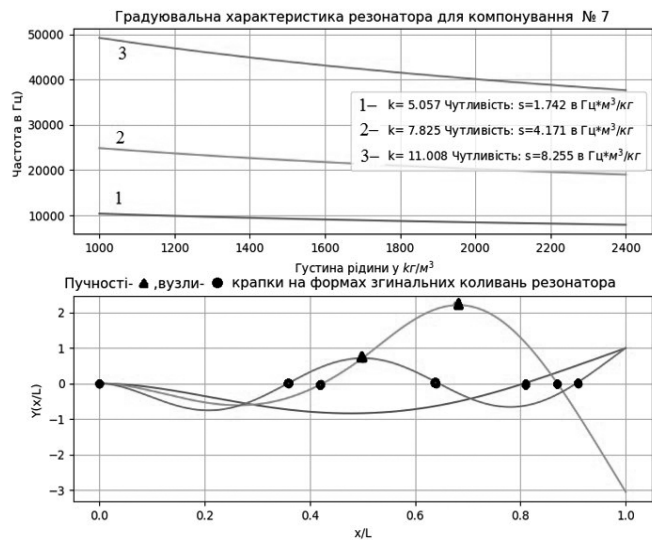
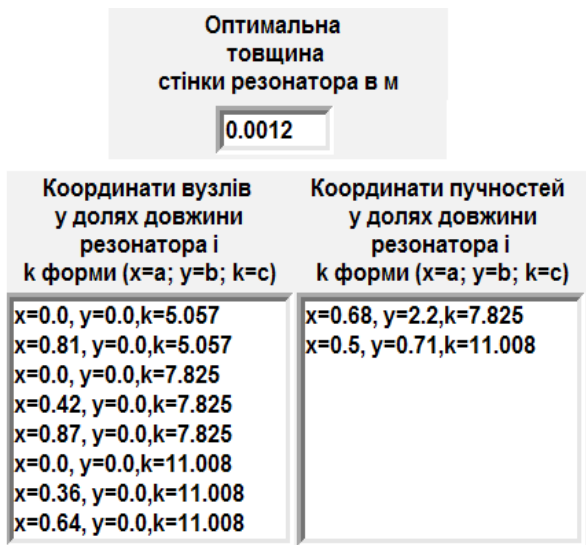


Рис. 4. Вікно меню з результатами розрахунків координат вузлів, пучностей резонатора, оптимальної товщини резонатора і градувальна характеристика, візуалізація форм та частот коливань, вузлів, пучностей резонатора при типі кріплення 7

де  $f_0$  – циклічна частота коливань резонатора у вакуумі;  $K_N$  – коефіцієнт чутливості до поздовжньої сили;  $K_{\rho_1}$ ,  $K_{\rho_2}$  – коефіцієнти чутливості резонатора до густини в середині  $\rho_1$  та зовні резонатора  $\rho_2$ ;  $r$ ,  $r_s$ ,  $r_n$  – радіуси серединної, внутрішньої та зовнішньої поверхонь перерізу трубки резонатора, які змінюються під впливом температури, відповідно;  $\alpha_E$  – температурний коефіцієнт модуля пружності;  $\alpha_R$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу трубки резонатора;  $K_{pt}$  – об’ємний температурний коефіцієнт розширення речовини;  $Q(\mu)$  – добротність резонатора (визначається експериментально як функція від динамічної в’язкості  $\mu$  речовини);  $\xi = 1,3$  – коефіцієнт демпфування для кінців резонатора.

Оскільки більшість перелічених коефіцієнтів (8) визначаються експериментально для реальних умов роботи віброчастотного густиноміра, то на етапі проектування для розрахунків доцільно використовувати спрощений вираз (5).

Розроблений програмний комплекс для проектування механічних резонаторів віброчастотних густиномірів дозволяє візуалізувати форми і частоту коливань для будь-яких геометричних розмірів резонатора, виконаного з великого спектра матеріалів і конструкцій, а також врахувати тип кріплення із зазначенням конкретної жорсткості опори. Крім того, є можливість розрахунку оптимальної товщини стінки резонатора щодо заданої довжини і порівняння чутливості для кожної з трьох форм коливань.

Зручним для використання є те, що змінні можна задавати безпосередньо в меню інтерфейсу перед натисканням кнопки “Виконати розрахунок”, тим самим збільшуючи оперативність розрахунків. Є можливість збереження результатів розрахунку при заданих вихідних даних (функція “Save text”).

## 5. Висновки

1. Отримано загальний вигляд алгоритму роботи програмного комплексу для розрахунку амплітудно-частотних характеристик трубчастого резонатора з можливістю вибору типу кріплення резонатора, що відповідає умовам експлуатації при одночасній візуалізації як форм коливань, так і розподілу чутливості вздовж усього діапазону вимірювання.

2. Запропонований програмний продукт дозволяє урахувати чисельне значення жорсткості опори та візуалізувати розміщення пучностей і вузлів коливань, здійснити коригування розміщення опор, а також моделювати розподіл чутливості вздовж усього діапазону вимірювання.

3. При використанні підпрограми чисельного рішення рівняння вільних коливань струни з урахуванням початкової форми згинальної лінії струни, описаної в ранніх публікаціях, програмний комплекс можна використовувати для проектування струнних механічних резонаторів віброчастотних давачів.

# Автоматизированная система проектирования виброчастотных плотномеров

О. Ю. Олейник<sup>1</sup>, Ю. К. Тараненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Колледж радиоэлектроники, ул. Шмидта, 18, 49000, Днепр, Украина  
oleinik\_o@ukr.net

<sup>2</sup> ЧП "Ликопак", ул. Качалова, 1, 49005, Днепр, Украина

## Аннотация

Статья посвящена описанию разработанной автоматизированной системы проектирования виброчастотных плотномеров с демонстрацией широких функциональных возможностей программы и настройки интерфейса. Разработка решает проблему проектирования виброчастотных плотномеров, расчета добротности и чувствительности резонаторов, которые и обеспечивают зависимость частоты автоколебаний от контролируемой плотности. Отсутствие четких методических рекомендаций градуировки, методик корректировки при разных способах монтажа резонатора существенно ограничивает использование виброчастотных плотномеров.

В основе работы алгоритма разработанного программного комплекса лежит расчет амплитудно-частотных характеристик трубчатого резонатора с использованием дифференциального уравнения для определения частот и форм изгибных колебаний трубчатого резонатора. Программная реализация разработанной модели расчета позволяет не только визуализировать формы, частоту, пучности и узлы колебаний трубчатого резонатора любой конструкции и широкого спектра материалов, но и учитывает тип крепления, численное значение жесткости опоры, позволяет осуществить корректировку размещения опор, отвечающих условиям эксплуатации, выполнить моделирование распределения чувствительности вдоль всего диапазона измерения.

**Ключевые слова:** виброчастотный плотномер; резонатор; амплитуда и частота колебаний; условия закрепления; пучность; чувствительность.

# Computer-aided design system for vibration-frequency density meters

O. Oliynyk<sup>1</sup>, Yu. Taranenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Radio Electronics, Schmidt Str., 18, 49000, Dnipro, Ukraine  
oleinik\_o@ukr.net

<sup>2</sup> Private enterprise "Likopak", Kachalova Str., 1, 49005, Dnipro, Ukraine

## Abstract

The article is devoted to the description of the developed automated design system for vibration-frequency density meters with a demonstration of the wide functionality of the program and interface settings. The development solves the problem of designing vibration-frequency density meters, calculating the quality factor and sensitivity of resonators, which provide the dependence of the frequency of self-oscillations on the controlled density. The lack of clear methodological recommendations for calibration, correction techniques for different methods of mounting the resonator significantly limits the use of vibration-frequency density meters, since the tasks set require special skills, competencies of both developers and personnel during operation.

The algorithm of the developed software package is based on the calculation of the amplitude-frequency characteristics of a tubular resonator using a differential equation to determine the frequencies and forms of bending vibrations of a tubular resonator. The software implementation of the developed calculation model makes it possible not only to visualize the shapes, frequency, antinodes and vibration nodes of a tubular resonator of any design and a wide range of materials, but also takes into account the type of fastening, the numerical value of the support stiffness, makes it possible to adjust the placement of supports that meets the operating conditions while visualizing the shapes oscillations, simulate the distribution of sensitivity along the entire measurement range. The developed computer-aided design system has a simple and clear interface, and the absence of the necessary software installation and settings makes the product more accessible in the industrial environment of small enterprises.

When using a subroutine for the numerical solution of the equation of free vibrations of a string, the software complex can be used to design string mechanical resonators of vibration-frequency sensors.

**Keywords:** vibration-frequency density meter; resonator; amplitude and frequency of oscillations; fixing conditions; antinode; sensitivity.

### Список літератури

1. Schiebl M., Wasylewski S. Temperature robustness of oscillation-type density meters. *Measurement Science and Technology*, 2019, vol. 30, no. 11, p. 115012. doi: 10.1088/1361-6501/ab2842
2. Oliynyk O., Taranenko Y., Losikhin D., Shvachka A. Examining the Kalman filter in the field of noise and interference with the Non-Gaussian distribution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 4, no. 4(94), pp. 36–42. doi:10.15587/1729-4061.2018.140649
3. Олійник О.Ю., Тараненко Ю.К. Добротність коливальної системи камертонного резонатора з урахуванням пружно-гістерезисного тертя. *Український метрологічний журнал*. 2018. № 1. С. 37–42. doi: 10.24027/2306-7039.1.2018.134115
4. Гусейнов Т.К., Абдулова Н.А. Однотрубный резонатор с точечными массами для вибрационно-амплитудного плотномера. *Современные технологии в нефтегазовом деле: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. Уфа, 2017. Т. 1. С. 122–125.*
5. Matta L.M., Szasz G. Vibration and Fatigue Failures at Pipeline Facilities. Proceedings of 12th International Pipeline Conference (September 24–28, 2018), IPC2018-78176; V001T03A036. Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2018. doi: 10.1115/IPC2018-78176
6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. Москва: Высшая школа, 1980. 408 с.
7. Бабаков И.М. Теория колебаний. Москва: Дрофа, 2004. 591 с.
8. Прокофьев А.Б. Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 1999. № 2. С. 335–342.
9. Taranenko Y., Oliynyk O. Multifunctional Vibration-Frequency Measuring Transducer of Force with Cylindrical Resonator. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 7, pp. 704–710. doi:10.1007/s11018-018-1488-0
2. Oliynyk O., Taranenko Y., Losikhin D., Shvachka A. Examining the Kalman filter in the field of noise and interference with the Non-Gaussian distribution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 4, no. 4(94), pp. 36–42. doi:10.15587/1729-4061.2018.140649
3. Oliynyk O.Yu., Taranenko Yu.K. Dobrotnist kolyvalnoi systemy kamertonnoho rezonatora z urakhuvanniam pruzhno-histerezychnoho tertia [Q-factor of the oscillatory system of the tuning fork resonator taking into account the elastic hysteresis friction]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2018, no. 1, pp. 37–42 (in Ukrainian). doi: 10.24027/2306-7039.1.2018.134115
4. Guseynov T.K., Abdulova N.A. Odnotrubnyj rezonator s tochechnymi massami dlya vibracionno-amplitudnogo plotnomera [Single-tube resonator with point masses for vibration-amplitude density meter]. *Sovremennyye tekhnologii v neftegazovom dele [Modern technologies in oil and gas business]*. Proceedings of International Scientific and Technical Conference. Ufa, 2017, vol. 1, pp. 122–125 (in Russian).
5. Matta L.M., Szasz G. Vibration and fatigue failures at pipeline facilities. Proceedings of 12th International Pipeline Conference (September 24–28, 2018), IPC2018-78176; V001T03A036. Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2018. doi:10.1115/IPC2018-78176
6. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebanij [Theory of mechanical vibrations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 408 p. (in Russian).
7. Babakov I.M. Teoriya kolebanij [Theory of oscillations]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 591 p. (in Russian).
8. Prokofyev A.B. Raschet sobstvennykh chastot i form kolebanij truboprovodov s pomoshchyu programmnoho kompleksa [Calculation of natural frequencies and vibration modes of pipelines using a software package]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 1999, no. 2, pp.335–342 (in Russian).
9. Taranenko Y., Oliynyk O. Multifunctional Vibration-Frequency Measuring Transducer of Force with Cylindrical Resonator. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 7, pp. 704–710. doi:10.1007/s11018-018-1488-0

### References

1. Schiebl M., Wasylewski S. Temperature robustness of oscillation-type density meters. *Measurement Science and Technology*, 2019, vol. 30, no. 11, p. 115012. doi: 10.1088/1361-6501/ab2842