

ВІРЧЕНКО Г. А., д.т.н., доц.; КОЛОСОВА О. П., ас.
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ВАРІАНТНЕ ПАРАМЕТРИЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ КОНЦЕНТРАТОРІВ

Запропоновано методику варіантного конструювання акустичних концентраторів ультразвукового технологічного обладнання. Напрацьовані прийоми раціонального автоматизованого проектування спираються на використання комп'ютерних геометричних моделей, що відображають існуючі варіаційні взаємозв'язки між параметрами форми та розмірів виробів. Розглянуто питання забезпечення ефективної взаємодії геометричних та інших розрахункових моделей для створюваних технічних об'єктів.

Ключові слова: автоматизоване проектування, акустичні концентратори, варіантне параметричне конструювання, комп'ютерні геометричні моделі, ультразвукове технологічне обладнання.

© Вірченко Г. А., Колосова О. П., 2014.

Постановка проблеми. Розробка оптимальних технічних систем уже кілька століть становить важливу сферу діяльності людства. Особливо актуальні ці задачі нині у зв'язку з постійним ускладненням і розширенням номенклатури промислової продукції. Не виключенням у зазначеному плані є ультразвукове (УЗ) технологічне обладнання, що застосовують у різних галузях промисловості. Один із прогресивних напрямків його удосконалення полягає в раціональному конструюванні акустичних хвилеводів-концентраторів, що є робочими інструментами УЗ-обладнання.

Аналіз досліджень і публікацій. У праці [1] систематизовано викладено базові відомості про принципи функціонування та будову різноманітного УЗ-технологічного обладнання для роботи в рідинах, газах і з твердими речовинами. Складовими елементами таких систем є стрижні змінної жорсткості (акустичні концентратори), призначені передавати поздовжні коливання від УЗ-генератора до зони застосування, одночасно збільшуючи їх амплітуду. Найпоширеніші концентратори – стрижні змінного діаметра. У дослідженні [2] наведено математичні залежності для розрахунку технічних параметрів простих та комбінованих концентраторів. При цьому закон зміни площі їх поперечних перерізів обирається так, щоб забезпечити максимальне збільшення амплітуди коливань при дотриманні належних умов міцності. У публікаціях [3–5] описано загальні положення структурно-параметричного формоутворення, його можливості щодо комп'ютерного геометричного моделювання об'єктів машинобудування та проведення їх комплексної оптимізації.

Цілі статті. Головна мета цієї праці полягає в розробленні методики варіантного конструювання акустичних концентраторів, що спирається на структурно-параметричний підхід та сприяє здійсненню їх багатокритеріальної оптимізації.

Основні матеріали дослідження. Декілька найбільш розповсюджених акустичних концентраторів показано на рис. 1, де другий та шостий типи мають комбіновану форму.

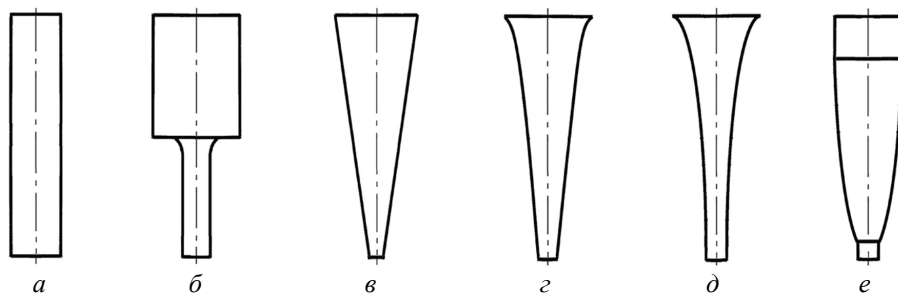


Рис. 1 – Типи півхвильових акустичних концентраторів: а – циліндричний; б – циліндричний двоступінчастий; в – конічний; г – експонентний; д – катеноїдальний; е – краплеподібний

Перший етап запропонованої методики конструювання полягає у визначенні множини K досліджуваних типів концентраторів. Відповідно до рис. 1, отримуємо такий кортеж

$$K = (K_i)_1^6, \quad (1)$$

де $K_1 = \{\text{циліндричний}\}$; $K_2 = \{\text{циліндричний двоступінчастий}\}$; $K_3 = \{\text{конічний}\}$; $K_4 = \{\text{експонентний}\}$; $K_5 = \{\text{катеноїдальний}\}$; $K_6 = \{\text{краплеподібний}\}$.

На другому етапі формується масив матеріалів для виготовлення концентраторів. Нехай, наприклад, він має вигляд табл. 1, дані якої упорядковані за зростанням швидкості звуку.

Таблиця 1 – Властивості матеріалів УЗ-концентраторів

Матеріал	Густина ρ , кг/м ³	Швидкість звуку c , м/с	Модуль пружності E , 10 ⁵ МПа	Міцність на розрив, σ_B , МПа
Латунь	8600	3300	1,0	320...500
Мідь	8900	3700	1,2	210...280
Титан	4500	4900	1,1	500
Нікель	8900	5000	2,0	220
Алюміній	2800	5100	0,72	100
Сталь	7900	5200	2,1	400...500

Під час *третього етапу* створюють кортеж робочих частот f УЗ-коливань. Вважатимемо, що

$$f = (f_i)_1^5 = (16 \text{ кГц}, 18 \text{ кГц}, 20 \text{ кГц}, 22 \text{ кГц}, 24 \text{ кГц}). \quad (2)$$

Досліджуваний спектр частот f пов'язаний як з варіюванням паспортних (робочих) характеристик УЗ-генератора (частоти, потужності тощо), так і з необхідністю дотримання умов техніки безпеки, які висуваються до величини припустимих рівнів звукового і УЗ-тиску на робочих місцях.

На *четвертому етапі* для концентраторів множини (1) шляхом варіювання властивостей матеріалу з табл. 1 і частоти f з кортежу (2) за наявними в літературних джерелах формулами, зокрема наведеними в працях [1, 2], виконують оптимізаційні розрахунки початкового D_1 та кінцевого D_2 діаметрів, довжини l , площі S_2 випромінювального торця, коефіцієнта k підсилення амплітуди тощо. При цьому застосовують графічне відображення досліджуваних аналітичних залежностей, щоб забезпечити наочність і зручність аналізу.

Під час оптимізації як показники використовують не лише максимальну величину коефіцієнта k підсилення амплітуди коливань, але й значення площі S_2 випромінювального торця, мінімальну масу m концентратора, його стійкість і надійність під час експлуатації, простоту виготовлення. Зазначимо, що обов'язково беруть до уваги обмеження, зокрема за міцністю, максимальною амплітудою коливань тощо.

Під час *п'ятого етапу*, відповідно до обчислених раціональних параметрів спроектованого акустичного концентратора, будують його твердотільну комп'ютерну геометричну модель у середовищі певної системи автоматизованого проектування.

Проілюструємо описану методику на прикладі формоутворення півхвильового експонентного концентратора. Для цього використовуватимемо подані в публікації [2] математичні співвідношення:

$$S_x = S_1 e^{-ax}, \quad (3)$$

де S_x і S_1 – відповідно поточне та початкове значення площі поперечного перерізу концентратора (вздовж його осі x); a – величина, яка розраховується за формулою

$$a = 2 \ln k / l, \quad (4)$$

де $k = \sqrt{S_1/S_2} = D_1/D_2$ – коефіцієнт підсилення амплітуди коливань; S_2 – площа випромінювального торця концентратора; D_1, D_2, l – початковий і кінцевий його діаметри й довжина

$$l = \frac{C}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln k}{\pi}\right)^2}, \quad (5)$$

де C і f – швидкість та частота УЗ у матеріалі стрижня.

Уявлення про характер співвідношень (3) і (4) дають наведені на рис. 2 графіки. З останніх, зокрема, видно, що масиву $S_x/S_1 = (0,08; 0,04; 0,01)$, тобто кортежу $k = (\sqrt{1/0,08}; \sqrt{1/0,04}; \sqrt{1/0,01}) = (3,54; 5; 10)$, відповідають довжини l для конкретних значень a .

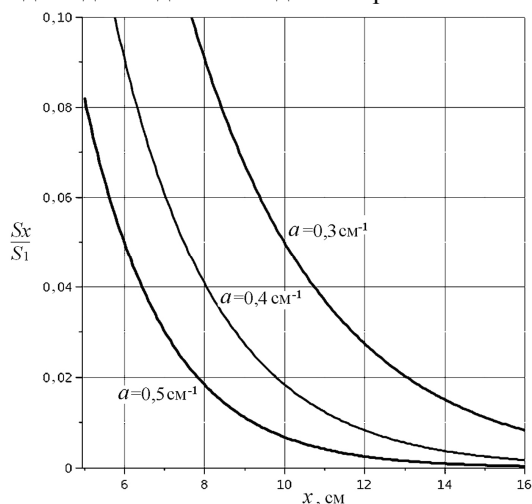


Рис. 2 – Візуалізація залежності (3)

Приклад автоматизованих розрахунків, які виконуються в середовищі електронних таблиць OpenOffice Calc за формулою (5), наведено на рис. 3. При

цьому варіюють швидкість звуку у стрижні (вибором матеріалу), робочу частоту коливань генератора, початковий і кінцевий діаметри поперечних перерізів досліджуваного експонентного концентратора.

Деякі результати подано на рис. 4. У табл. 2 рис. 4 наведено розрахунки для міді ($c = 3700$ м/с), УЗ-частоти $f = 20$ кГц і діаметра $D_1 = 7$ см. При цьому бажано було одержати k не менше 8 і найбільш можливу S_2 . Тенденцію зростання діаметра D_2 , тобто збільшення площі S_2 відображають другий і третій стовпчики. Належне зменшення коефіцієнта k бачимо в його рядку. Зроблені корегування відтворює останній стовпчик.

Під час реалізації описаних процедур використано той факт, що зростання діаметра D_2 пропорційно зменшує коефіцієнт підсилення амплітуди коливань і квадратичного збільшення площі S_2 . Табл. 3 рис. 4, порівняно з попередньою, ілюструє вплив підвищення частоти генератора f на скорочення довжини l опрацьовуваного акустичного концентратора. У табл. 4 рис. 4 показано можливість зменшення діаметра D_1 і довжини l за потреби меншої, ніж проаналізована вище, величини коефіцієнта k . Коли, наприклад, це значення $k = 7$, то в таблиці, що розглядається, як конструктивні параметри концентратора варто обрати другий її стовпчик. За неприйнятною довжини l доречно застосувати більшу робочу УЗ-частоту (табл. 5 рис. 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	<i>Параметричні розрахунки експонентного акустичного концентратора</i>									
2	Вхідні дані:									
3			Латунь	Мідь	Титан	Нікель	Алюміній	Сталь		Значення
4	Швидкість звуку	C, м/с	3300	3700	4900	5000	5100	5200		3700
5										
6	Частота робоча	f, Гц	16000	18000	20000	22000	24000			20000
7										
8	Діаметр початковий	D ₁ , см	min	2,0	max	7,0				6,00
9	Діаметр кінцевий	D ₂ , см	min	0,3	max	1,0				0,80
10										
11	Обчислені величини:									
12	Коефіцієнт підсилення	k	7,50		min	4,0	max	16,0		
13	Площа торця	S ₂ , см ²	0,50		min	0,2	max	1,0		
14	Довжина концентратора	L, см	10,99		min	5,0	max	12,0		
15										

Рис. 3 – Обчислення конструктивних параметрів концентратора

Вплив заміни матеріалу відтворює табл. 6 рис. 4. У табл. 7 показано варіювання діаметрами D_1 і D_2 при забезпеченні сталих значень коефіцієнта k і довжини l .

Примітка. Деякі відхилення числових величин у третьому та п'ятому рядках останньої таблиці обумовлені лише округленням до сотих діаметрів D_1 і D_2 .

Під час варіантного параметричного конструювання експонентного концентратора застосовували отриману на підставі залежності (5) формулу

$$D_2 = \frac{D_1}{\exp\left[\pi\sqrt{(2lf/c)^2 - 1}\right]} \quad (6)$$

Вираз (6) засвідчує лінійний зв'язок між D_1 і D_2 за сталого значення частки добутку довжини l , частоти f і швидкості звуку c . Ця залежність може бути використана для забезпечення потрібного прогнозованого характеру змінювання конструктивних параметрів створюваного концентратора.

На рис. 5 наведено приклад візуалізації проаналізованого співвідношення.

Таблиця 2
Мідь, $f = 20$ кГц

D_1 , см	7	7	7	7
D_2 , см	0,8	0,85	0,9	0,87
k	8,75	8,24	7,78	8,05
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,64	0,59
l , см	11,24	11,14	11,05	11,10

Таблиця 3
Мідь, $f = 24$ кГц

D_1 , см	7	7	7	7
D_2 , см	0,8	0,85	0,9	0,87
k	8,75	8,24	7,78	8,05
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,64	0,59
l , см	9,37	9,28	9,21	9,25

Таблиця 4
Мідь, $f = 20$ кГц

D_1 , см	6	6	6	6
D_2 , см	0,8	0,85	0,9	0,87

Таблиця 5
Мідь, $f = 24$ кГц

D_1 , см	6	6	6	6
D_2 , см	0,8	0,85	0,9	0,87

k	7,5	7,06	6,67	6,9
$S_2, \text{см}^2$	0,50	0,57	0,64	0,59
$l, \text{см}$	10,99	10,89	10,81	10,86

Таблиця 6
Латунь $f = 20 \text{ кГц}$

$D_1, \text{см}$	7	7	7	7
$D_2, \text{см}$	0,8	0,85	0,9	0,87
k	8,75	8,24	7,78	8,05
$S_2, \text{см}^2$	0,50	0,57	0,64	0,59
$l, \text{см}$	10,03	9,94	9,85	9,9

k	7,5	7,06	6,67	6,9
$S_2, \text{см}^2$	0,50	0,57	0,64	0,59
$l, \text{см}$	9,16	9,08	9,0	9,05

Таблиця 7
Мідь, $f = 24 \text{ кГц}$

$D_1, \text{см}$	7	6,67	6,3	5,59
$D_2, \text{см}$	0,87	0,83	0,78	0,69
k	8,05	8,04	8,08	8,10
$S_2, \text{см}^2$	0,59	0,54	0,48	0,37
$l, \text{см}$	9,25	9,25	9,26	9,26

Рис. 4 – Приклади варіювання параметрів концентратора

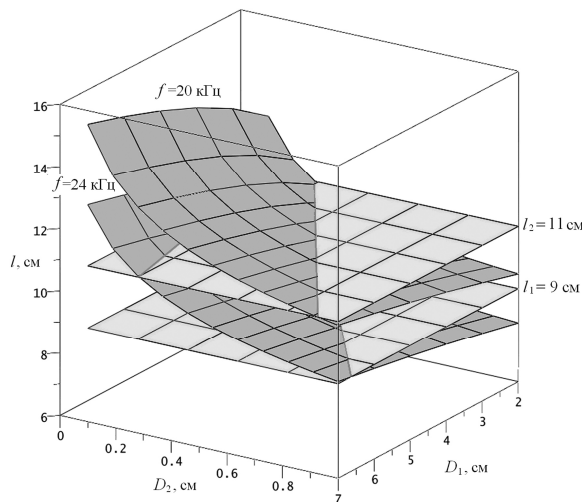


Рис. 5 – Відтворення комп'ютерною геометричною моделлю залежності (6) для міді

Далі на засадах структурно-параметричного підходу [3–5] окремі типи досліджуваних концентраторів об'єднують у графову модель, що дозволяє провести комплексну оптимізацію опрацьовуваного виробу під час його автоматизованого проектування завдяки наявним гнучким механізмам варіювання конструктивних параметрів.

На завершальному етапі створюють твердотільну комп'ютерну геометричну модель акустичного концентратора та формується необхідний комплект технічної документації.

Висновки. У статті викладено загальну методику раціонального варіантного параметричного конструювання акустичних концентраторів УЗ-технологічного обладнання, проілюстровано її на конкретних прикладах.

Список використаної літератури

1. Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – М. : Энергия, 1976. – 320 с.
2. Абакумов В. Г. К вопросу о выборе эффективных конфигураций составных концентраторов акустической энергии / В. Г. Абакумов, А. Г. Трапезон, К. А. Трапезон // Акустичний вісник. – 2009. – Т. 12. – № 4. – С. 3–9.
3. Ванін В. В. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання : зб. наук. праць. – Вип. 23. – Х. : ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.
4. Вірченко Г. А. Структурно-параметричний підхід як загальна методологія комп'ютерного геометричного моделювання об'єктів машинобудування / Г. А. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка : наук.-техн. зб. – Вип. 83. – К. : КНУБА, 2010. – С. 146-152.

Ванін В. В. Комп'ютерне структурно-параметричне геометричне моделювання як основа для комплексної оптимізації процесів проектування та виробництва об'єктів машинобудування / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, Г. П. Грязнова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – 5/1 (47). – С. 54-57.