

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 534.8:004.925.8

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.

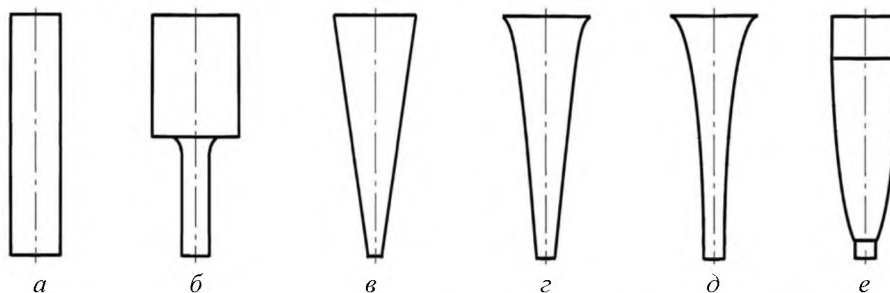


Рис. 1 – Типи півхвильових акустичних концентраторів: *a* – циліндричний; *б* – циліндричний двоступінчастий; *в* – конічний; *г* – експонентний; *д* – катеноїдальний; *е* – краплеподібний

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 .

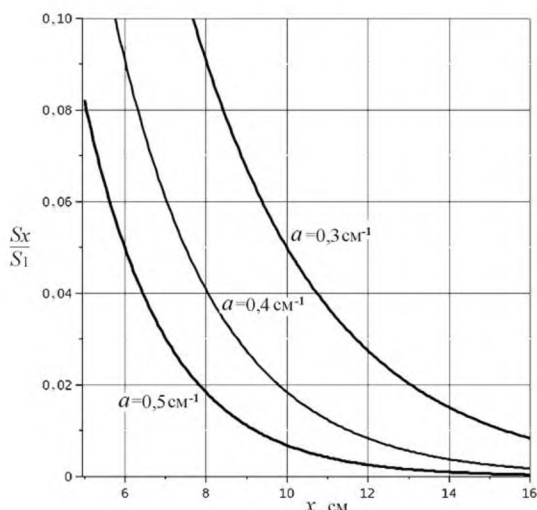


Рис. 2 – Візуалізація залежності (3)

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 неприємної довжини l доречно застосувати більшу робочу УЗ-частоту (табл. 5 рис. 4).

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|----|---|-------------------------|------------|-------|------------|--------|------------|-------|---|----------|
| 1 | Параметричні розрахунки експонентного акустичного концентратора | | | | | | | | | |
| 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 | <i>min</i> | 2,0 | <i>max</i> | 7,0 | | | | 6,00 |
| 9 | Діаметр кінцевий | D_2 , см | <i>min</i> | 0,3 | <i>max</i> | 1,0 | | | | 0,80 |
| 10 | | | | | | | | | | |
| 11 | Обчислені величини: | | | | | | | | | |
| 12 | Коефіцієнт підсилення | k | 7,50 | | <i>min</i> | 4,0 | <i>max</i> | 16,0 | | |
| 13 | Площа торця | S_2 , см ² | 0,50 | | <i>min</i> | 0,2 | <i>max</i> | 1,0 | | |
| 14 | Довжина концентратора | L , см | 10,99 | | <i>min</i> | 5,0 | <i>max</i> | 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 |
| k | 7,5 | 7,06 | 6,67 | 6,9 |
| S_2 , см ² | 0,50 | 0,57 | 0,64 | 0,59 |
| l , см | 10,99 | 10,89 | 10,81 | 10,86 |

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 , см ² | 0,50 | 0,57 | 0,64 | 0,59 |
| l , см | 9,16 | 9,08 | 9,0 | 9,05 |

Таблиця 6
Латунь $f = 20$ 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 | 10,03 | 9,94 | 9,85 | 9,9 |

Таблиця 7
Мідь, $f = 24$ кГц

| | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|
| D_1 , см | 7 | 6,67 | 6,3 | 5,59 |
| D_2 , см | 0,87 | 0,83 | 0,78 | 0,69 |
| k | 8,05 | 8,04 | 8,08 | 8,10 |
| S_2 , см ² | 0,59 | 0,54 | 0,48 | 0,37 |
| l , см | 9,25 | 9,25 | 9,26 | 9,26 |

Рис. 4 – Приклади варіювання параметрів концентратора

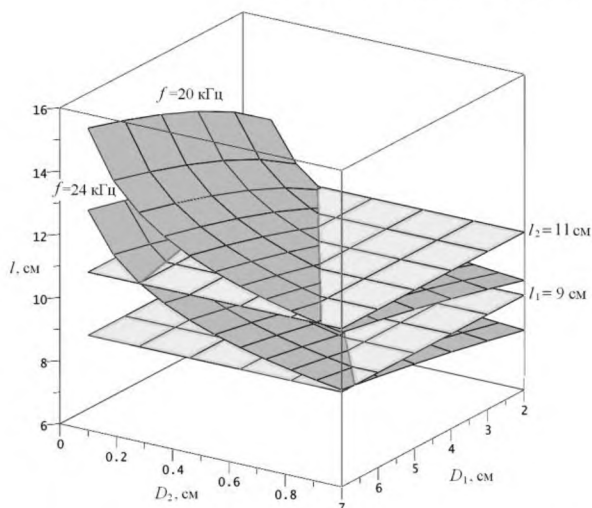


Рис. 5 – Відтворення комп'ютерною геометричною моделлю залежності (6) для міді

ман. – М. : Энергия, 1976. – 320 с.

- 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.

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

На завершальному етапі створюють твердотільну комп'ютерна геометрична 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

- Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. М. Фрид-

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.
5. 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-Европейський журнал передових технологій. – 2010. – 5/1 (47). – С. 54-57.

Надійшла до редакції 17.12.2014

Virchenko G. A., Kolosova E. P.

VARIANT PARAMETRIC DESIGN OF ACOUSTIC CONCENTRATORS

It is noted that the development of optimal technical systems is an important sphere of human activity. And this trend is especially important now due to the increasing complexity and expansion of the range of modern industrial products. It is indicated that ultrasound (US) production equipment is no exception in this regard. It is used in various industries. One of the progressive trends of its improvement is the rational design of acoustic waveguides hubs that are working tools of the ultrasound equipment. Constituent elements of many of these systems are the cores of variable rigidity (acoustic hubs), which transmit the longitudinal oscillations from the ultrasonic generator to the working area and simultaneously increase the amplitude of these oscillations. It is indicated that the most common hubs are rods of a variable diameter. The law of changing the area of the cross-sections is selected so as to maximize the amplitude of the oscillations increase under appropriate conditions of strength.

The authors of this paper proposed a new approach to variant constructing of the acoustic concentrators of ultrasonic equipment. The developed techniques of rational computer-aided design are based on the wide use of computer geometric models which conveniently and visually reflect the existing relationship between the variation parameters of shape and size of created products. Several types of half-wave concentrators were analyzed. Recommendations for optimal design were given. The efficient interactions of geometrical models with other computational models of formed technical objects were considered. The main promising directions for further research were discussed.

Keywords: *computer-aided design, acoustic concentrators, variant parametric designing, computer geometric models, ultrasonic processing equipment.*

References

1. *Hershhal D. A. Ultrazvukovaia tekhnolohycheskaia apparatura [Ultrasonic technology equipment] / D. A. Hershhal, V. M. Frydman. – M. : Enerhiya, 1976. – 320 s.*
2. *Abakumov V. H. K voprosu o vibore effektivnykh konfyhuratysi sostavnykh kontsentratorov akustycheskoi enerhiy [On the selection of effective configurations of composite hubs acoustic energy] / V. H. Abakumov, A. H. Trapezon, K. A. Trapezon // Akustychnyi visnyk. – 2009. – T. 12. – # 4. – S. 3–9.*
3. *Vanin V. V. Vyznachennia ta osnovni polozhennia struktarno-parametrychnoho heometrychnoho modeliuвання [Definitions and guidelines structural and parametric geometric modeling] / V. V. Vanin, H. A. Virchenko // Heometrychne ta kompiuterne modeliuвання : zб. nauk. prats. – Vyp. 23. – Kharkiv : KhDUKht, 2009. – S. 42-48.*
4. *Virchenko H. A. Struktarno-parametrychnyi pidkhid yak zahalna metodolohiia kompiuternoho heometrychnoho modeliuвання ob'ektiv mashynobuduvannya [Structural-parametric approach as a general methodology for computer modeling of geometrical objects engineering] / H. A. Virchenko // Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika : nauk.-tekhn. zб. – Vyp. 83. – K. : KNUBA, 2010. – S. 146-152.*
5. *Vanin V. V. Kompiuterne struktarno-parametrychne heometrychne modeliuвання yak osnova dlia kompleksnoi optymizatsii protsesiv proektuvannya ta vyrobnytstva ob'ektiv mashynobuduvannya [Computer structural and parametric geometric modeling as a basis for the comprehensive optimization of the design and production engineering objects] / V. V. Vanin, H. A. Virchenko, H. P. Hriaznova // Vostochno-Evropeyskyi zhurnalпередovykh tekhnolohiy. – 2010. – 5/1 (47). – S. 54-57.*