

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.396.001

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ЗВУКОЗАГЛУШЕНИХ КАМЕРАХ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИПРОМІНЮВАЧІВ ЗВУКУ

© 1997, С.П.Ващишак, С.А.Чеховський, Н.М.Пиндус

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Створено та досліджено математичну модель процесів, які відбуваються із звуковими хвилями та пучками в заглушеному приміщенні - акустичній звуковимірній камері малого об'єму для автоматизованих систем контролю якості випромінювачів звуку. Математична модель камери представлена у вигляді розрахункового алгоритму, який виконано за допомогою геометричного методу Гюйгенса. Це дало змогу відмовитись від вибору хвильових рівнянь і значно спростити розрахунки.

Сучасна вітчизняна промисловість виготовляє більше 60-ти видів звукових випромінювачів для телевізорів, магнітофонів, приймачів та акустичних систем, загальною кількістю декілька мільйонів штук у рік. Основною вимогою забезпечення конкурентоздатності таких виробів є проведення суцільного контролю їх якості за якомога більшою кількістю параметрів. Для точних досліджень акустичних властивостей випромінювачів звуку їх випробовування потрібно здійснювати в умовах "вільного поля", тобто там, де відсутні будь-які ревербераційні явища. Відтворити такі умови з високою достовірністю вдається в звуковимірних заглушених камерах (ЗЗК). Внутрішню поверхню ЗЗК покривають спеціально орієнтованим у просторі звукопоглинаючим матеріалом, який має здатність максимально поглинати та розсіювати звукову енергію і дає можливість проводити вимірювання в "ближньому" та "дальньому" звукових полях. Точність вимірювань у таких камерах тим вища, чим більший їх об'єм та кількість використаного звукопоглинаючого матеріалу.

Проте будівництво та обслуговування ЗЗК вимагає значних фінансових витрат, а процес проведення вимірювань за їх допомогою є довготривалим, що, своєю чергою, не дає змоги використовувати ЗЗК в автоматизованих системах для здійснення суцільного контролю якості звукових випромінювачів.

Для проведення суцільного контролю якості випромінювачів звуку в автоматизованих системах за трьома параметрами використовують бокси акустичні (БА). Ними є дерев'яні ящики, об'ємом 03...05 м³, покриті з середини ватними матами. БА є досить дешевими виробами, які дають змогу здійснювати вимірювання тільки в "ближньому полі". Перерахунок отриманих результатів для "дальнього поля" здійснюють за формулою

$$P_r = \left(\frac{P_0}{2\pi r} \right) \omega^2 P_k c_k, \quad (1)$$

де P_r - звуковий тиск на відстані r від джерела у "вільному полі"; P_k - звуковий тиск всередині корпусу боксу; ρ_0 - густина повітря при 20 °С; r - відстань від випромінювача до мікрофона; ω - кругова частота; c_k - акустична гнучкість повітря всередині корпусу боксу.

До недоліків існуючих БА належать обмеження верхньої межі потужності досліджуваних випромінювачів значенням 20 Вт, необхідність використання швидкодіючих слідкуючих ланок для корекції частотної характеристики, а також значний рівень спотворень сигналу відгуку випромінювача. Дослідження випромінювачів в БА відбувається за допомогою шумових та тональних способів їх збудження.

З метою забезпечення суцільного контролю якості звукових випромінювачів із потужністю до

100 Вт за максимальною кількістю параметрів і усунення недоліків існуючих БА доцільним є створення оптимальних за розмірами та формою акустичних камер. Ці камери повинні поєднувати в собі високі акустичні характеристики ЗЗК та дешевизну і невеликі розміри БА. Окрім того, їх повинні експлуатувати в складі автоматизованих систем контролю якості випромінювачів звуку.

Суттєво зменшити розміри акустичної камери при забезпеченні високих акустичних характеристик дають змогу імпульсні методи досліджень. Застосування цих методів дає можливість здійснювати контроль великої кількості параметрів звукових випромінювачів за короткої час.

Ряд досліджень [1, 2], проведених на моделях різної форми, показали, що оптимальною формою для акустичної камери (АК) є куля, оскільки вона має максимальний об'єм при мінімальних розмірах, і в ній відсутні дифракційні явища через те, що всередині корпусу немає плоских відбиваючих поверхонь.

За результатом проведених нами досліджень випромінювачів різних типів встановлено, що найбільш повну інформацію про їх стан містять перші три-чотири коливання діафрагми. Внаслідок цього, вибір радіуса проектованої камери повинен здійснюватись за нижнім значенням робочої частоти діапазону відтворення найбільш потужного з досліджуваних випромінювачів. Згідно з вищенаведеним радіус АК повинен бути не меншим за сумарну тривалість τ відгуків 1-4 коливань дифузора випромінювача

$$R k \geq \tau \frac{c}{2}, \quad (2)$$

де c - швидкість звуку в повітрі.

Обмеження за максимальним значенням радіуса камери накладаються умовами її розміщення та експлуатації.

В основу математичного моделювання процесів, що відбуваються в АК покладено геометричний метод Гюйгенса [3], що дало змогу суттєво спростити інженерні розрахунки, відмовившись від застосування методів хвильової теорії.

Внаслідок того, що максимальне поглинання звуку відбувається в місці, де внутрішня поверхня камери має максимальну кривизну, звукопоглинач виконано у вигляді акустичних розсіювачів (АР), що мають форму еліпсоїдів (рис. 1).

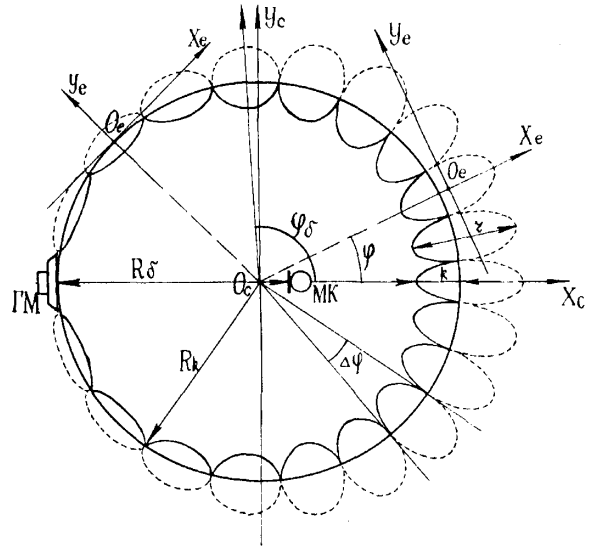


Рис. 1. Розміщення акустичних розсіювачів по поверхні акустичної камери.

Ступінь поглинання звуку визначається акустичними характеристиками звукопоглинаючого матеріалу, які в нашому випадку встановлені експериментально. У даній моделі як вхідний параметр використовували значення акустичного опору звукоізоляційного покриття.

Ступінь розсіювання звукового пучка знаходиться як відношення падаючої і відбитої звукових хвиль, а ступінь спотворень сигналу відгуку визначається середньою довжиною шляху гучномовець (ГМ) - звукопоглинач - мікрофон (МК). Чим довший цей шлях, тим менші спотворення сигналу відгуку. Згідно з цим доцільно задатися нижньою межею відношення інтенсивностей падаючої та відбитої звукових хвиль, при якій енергія звукового пучка розсіюється значною мірою. Експериментально встановлено, що мінімальне значення відношення інтенсивностей повинно бути не меншим ніж 10 дБ.

Враховуючи вищесказане, критерій оптимальності моделі камери можна представити у вигляді

$$I = \delta \left\{ \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{п}}} \right\} + (1 - \delta) \frac{R_0}{L}, \quad (3)$$

де $\frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{п}}}$ - відношення інтенсивностей відбитої та падаючої звукових хвиль, дБ; R_0 - відстань від випромінювача до мікрофона, м; L - середня довжина шляху звукової хвилі гучномовець-звукопоглинач-мікрофон, м; δ - ваговий коефіцієнт.

що враховує ступінь важливості параметра відношення інтенсивностей або спотворень форми сигналу.

Значення коефіцієнта δ вибирають із співвідношення 50:50, 60:40 або 70:30, залежно від того, який з параметрів для проектованої камери є важливішим: ступінь розсіювання звукової енергії (перший доданок формули 3), чи ступінь спотворень сигналу відгуку, спричинений інтерференцією звукових хвиль (другий доданок у формулі 3).

Отже, знаходження оптимальних параметрів АК зводиться до екстремальної задачі мінімізації функціонала (3) відносно параметрів камери:

$$I_{opt} = \min_p I(p), \quad (4)$$

де p - сукупність параметрів камери.

Математична модель АК буде представлена як розрахунковий алгоритм.

Внаслідок того, що АК є сферичною, форма AP змінюється по всій поверхні камери.

Параметрами AP є ексцентриситет e (ступінь сплюсненості), який визначає локальну кривизну внутрішньої поверхні камери; розмір більшої півосі еліпсоїда r ; ступінь висування еліпсоїда всередину камери k . Ці параметри є функціями від координат розміщення AP і можуть змінюватись вздовж лінії поверхні АК довільно (рис. 1).

Рівняння (4) розв'язують при таких обмеженнях на параметри камери: $e \in [0, 1]$; $r \in [0, R_k/5]$;

$$F(Z) = \begin{cases} Z^2(1 - e^2)[R_k + r(1 - k) - \sqrt{R_k^2 - Z^2}]^2 - r^2(1 - e^2) = 0 & \text{при } \varphi \leq \varphi_\sigma; \\ (1 - e^2)Z^2 + [R_k + r(1 - k)\sqrt{1 - e^2} - \sqrt{R_k^2 - Z^2}]^2 - r^2(1 - e^2) = 0 & \text{при } \varphi > \varphi_\sigma, \end{cases} \quad (5)$$

де $Z = R_k \sin(\Delta\varphi/2)$.

Розкладка AP по поверхні камери починається з розміщення першого з них на осі X_c від кута $\varphi = 0^\circ$ і має таку послідовність:

а) знаходиться кут $\Delta\varphi_1$, який дорівнює половині кута розкриття першого AP;

б) визначається кут φ_{i+1} :

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi_i, \quad (6)$$

де φ_i - кут центра попередньо встановленого AP відносно осі X_c ;

в) знаходимо значення параметрів AP як функції від φ_i ;

г) визначаються координати перетину поверхонь AP і камери. Якщо точки перетину поверхонь сусідніх AP не збігаються, то ми їх сумішасмо, розраховуємо новий кут φ_i і проводимо ту ж саму послідовність обчислень. При цьому використовуємо ітераційну процедуру зна-

$k \in [0, 1]$. Обмеження r значенням $R_k/5$ спричинене тим, що при більшому значенні r сусідні еліпсоїди (рис. 1) перекривають більшу частину поверхні один одного, внаслідок чого погіршиться загальне звукопоглинання.

Відповідно до того, в якій частині АК відносно до вхідного отвору гучномовця знаходиться AP існує два варіанти їх розміщення вздовж поверхні камери (рис. 1.):

коли $\varphi \in [0, \varphi_\sigma]$ - велика піввісь еліпсоїда направлена вздовж радіуса камери;

коли $\varphi \in [\varphi_\sigma, \pi]$ - велика піввісь еліпсоїда направлена перпендикулярно до радіуса АК; φ - це кут напрямку на вісь AP відносно осі X камери; φ_σ - це кут повороту осей еліпсоїда.

При подальших розрахунках АК розглянута в двох системах координат (рис. 1).

Σ_c - глобальна система координат з центром в геометричному центрі АК. Вісь абсцис цієї системи направлена по прямій випромінювач-мікрофон; Σ_e - локальна система координат, яка зв'язана з центром AP. Вісь абсцис направлена вздовж радіуса АК назовні коли $\varphi \leq \varphi_\sigma$, і по дотичній до зовнішньої поверхні камери, коли $\varphi > \varphi_\sigma$.

Кут розкриття AP $\Delta\varphi$ можна визначити з розв'язку квадратного рівняння $F(Z) = 0$ відносно Z . Для всіх випадків розміщення по поверхні камери

ходження геометричного місця розміщення наступного AP відносно попереднього з використанням формули (5).

Внаслідок зміни параметрів AP вздовж поверхні камери їхнє освітлення звуковим пучком буде також змінюватись. Існує три варіанти поведінки звукового променя в зоні освітлення AP акустичною хвилею:

1) коли акустичний промінь падає на лінію перетину AP і внутрішньої поверхні камери;

2) коли промінь проходить по дотичній до поверхні AP;

3) коли звуковий промінь попадає на границю тіні, яку утворює на поверхні AP сумішний AP.

Координати точки дотику променя до поверхні AP визначають як розв'язок відносно Z рівняння

$$r\sqrt{1 - e^2}Z' - Kr\sqrt{1 - Z'^2} - Y_{\Delta} + KX_{\Delta} = 0, \quad (7)$$

де K - кутовий коефіцієнт прямої, що проходить від випромінювача до поверхні АР; X_{Δ}, Y_{Δ} - координати випромінювача в локальній системі; $Z' = \sin t_1$; t_1 - параметр точки перетину поверхні АР звуковим променем.

В зоні освітлення кожного АР є певна зона звукового затухання, в якій після багаторазового відбивання звукова енергія повністю поглинається, що покращує загальне звукопоглинання АК.

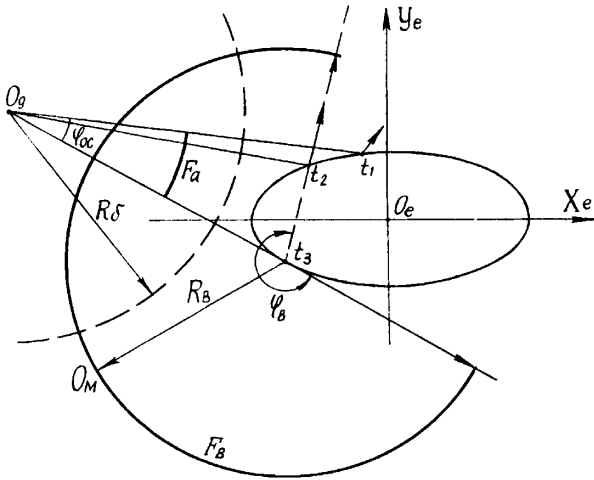


Рис. 2. Зона падіння та зони відбиття акустичного пучка на поверхні акустичного розсіювача.

$$F_B = \begin{cases} 2\pi R_B^2 [1 + (\operatorname{tg} 2\varphi_B / 2) / 8] & \text{при } \operatorname{sign} K_3 = \operatorname{sign} K_2 \\ 4\pi R_B^2 - 2\pi R_B^2 [1 + \operatorname{tg} 2\varphi_B / 4] / 8 & \text{при } \operatorname{sign} K_3 \neq \operatorname{sign} K_2 \\ 4\pi R_B^2 - 2\pi R_B^2 [1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_B / 4] / 8 & \text{при } \operatorname{sign} K_3 \neq \operatorname{sign} K_2 \end{cases} \quad (12)$$

Після цього визначимо відношення інтенсивностей відбитої та падаючої звукових хвиль

$$\frac{I_B}{I_{\Pi}} = K_B \frac{F_a}{F_B}, \quad (13)$$

де K_B - коефіцієнт відбиття.

Значення K_B обчислюють за характеристиками повітряного середовища та звукопоглинаючого матеріалу, з якого виготовлено АР.

Згідно з розрахунками, наведеними в [3], а також з результатами експериментальних досліджень отримано вираз для визначення хвильового опору звукопоглинаючого матеріалу

Для розрахунку інтенсивностей падаючої та відбитої звукових хвиль розглянемо рис. 2, з якого видно, що зона затухання знаходиться між точками t_1 і t_2 . Кут конуса пучка освітлення АР знаходять з виразу:

$$\varphi_{oc} = \operatorname{arctg} \left(\frac{K_3 - K_1}{1 + K_1 K_3} \right), \quad (8)$$

де K_1 і K_3 - кутові коефіцієнти променів $O_d t_1$ і $O_d t_3$, t_1 і t_3 - граничні точки зони освітлення, t_2 і t_3 - граничні точки зони відбивання.

Звідси площу пучка освітлення визначають як

$$F_a = 2\pi R_o (1 + (\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{oc}}{4}) / 8). \quad (9)$$

Радіус сфери відбивання визначається з виразу:

$$R_B = \sqrt{(X_f - X_{om})^2 + (Y_f + Y_{om})^2}, \quad (10)$$

де X_f і Y_f - координати точки перетину променя з границею зони відбивання; X_{om} і Y_{om} - координати точки розміщення мікрофона.

Після цього знаходимо кут між граничними променями, що відбиваються:

$$\varphi_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{K_3 - K_2}{1 + K_3 K_2} \right), \quad (11)$$

де K_2 - кутовий коефіцієнт променя, що відбивається від АР.

Площу сфери відбивання знаходять з виразу:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 \bar{\Delta}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_1 \bar{\Delta}}{2} \right)^2 + \omega_1^2}, \quad (14)$$

де $\bar{\Delta}$ - середнє значення Δ ; ω_1 - хвильовий опір повітря.

Значення Δ одержуємо з виразу

$$\Delta = 2 \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 2\pi \frac{l}{\lambda}} \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right)}, \quad (15)$$

де l - товщина шару звукопоглинаючого матеріалу; λ - довжина звукової хвилі; σ - коефіцієнт проходження звукової хвилі через стінку АК.

Значення σ визначається експериментально.

Відстань, що проходить звуковий промінь від випромінювача до мікрофона при умові його відбивання від АР визначають як:

$$L = \sqrt{(X_{од} - X_1)^2 + (Y_{од} - Y_1)^2} + \sqrt{(Y_{ом} - Y_1)^2 + (X_{ом} - X_1)^2} \quad (16),$$

де $X_{од}$ і $Y_{од}$ - координати випромінювача; X_1 і Y_1 - координати точки дотику променя до поверхні АР.

Отже, процес створення математичної моделі АК для автоматизованих систем контролю якості гучномовців передбачає наступну послідовність дій. Встановлюється форма камери і її мінімальний радіус. Визначають форму АР і необхідні їх параметри.

Після того, як АР, починаючи від найближчого до випромінювача, розміщені по поверхні камери, визначаємо для кожного з них:

- 1) граничні координати зон освітлення,
- 2) координати зон відбиття,
- 3) площу поверхні освітлення і площу поверхні відбиття,
- 4) довжину ходу променя від гучномовця до мікрофона при його відбиванні від поверхні АР.

Після цього сумуємо окремо значення поверхонь освітлення і відбиття, а також довжини ходу променів. Закінчивши розрахунок для останнього АР, одержуємо відношення інтенсивностей відбитої та падаючої звукових хвиль, як відношення сумарної площі відбиття до сумарної площі освітлення, а також середню довжину ходу променя.

Поданий вище алгоритм дає змогу за значенням верхньої межі інтенсивності звукової енергії або потужності досліджуваних випромінювачів розрахувати оптимальну за формою та розмірами АК, яка при невеликому об'ємі має досить високі акустичні характеристики, с набагато дешевшою за ЗЗ К і її можна використовувати в автоматизованих системах контролю якості звукових випромінювачів замість акустичних боксів.

1. Есено Т. Экраны и корпуса // *Акустика*. 1972. Т.9-28. С.25-32. 2. Терещук Р.М. и др. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: *Справ. радиолюбителя*. К., 1988. 3. Тюлин В.М. *Введение в теорию излучения и рассеяния звука*. М., 1976.

УДК 681.121.089.6

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКІСНО-ІНФОРМАТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ДЗВОНОВИХ ВИТРАТОВИМІРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

© 1997, О.Є.Середюк

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Розроблено математичну модель якісно-інформативних гідродинамічних процесів у витіснювачі дзвонових витратовимірювальних установок з обертовим дзвоном. Здійснений аналітичний розв'язок складеної системи диференціальних рівнянь, внаслідок чого отримані залежності для зміни напруження сил гідродинамічного тертя стійки дзвона в функціональній залежності від геометричних розмірів установки, швидкості руху і глибини занурення дзвона. Проведений чисельний аналіз одержаних результатів, подана їх графічна інтерпретація і встановлений зв'язок з якісними характеристиками витратовимірювальних установок.

Однією із найважливіших якісних характеристик взірцевих дзвонових витратовимірювальних установок є стабільність відтворення миттєвих витрат газу. Інформативність цього параметра визначається переважно гідродинамічними процесами, які існують у витіснювачі установки. Ці процеси зумовлюють виникнення сил гідродинамічного опору опусканню дзвона [2]. Останні залежать від геометричних розмірів дзвона і витіснювача, а також від швидкості руху і глибини

занурення стінок дзвона у рідину витіснювача. У цілому вплив вказаних параметрів на гідродинамічні сили опору рухові дзвона характеризують якісно-інформативні процеси витратовимірювальних установок, які безпосередньо впливають на їх метрологічні характеристики.

Одним із шляхів підвищення стабільності відтворюваних витрат газу, що підтверджується новизною технічної реалізації [1] і експериментальними даними [3], є надання дзвону