

УДК 621.396.001

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧАХ ЗВУКУ**

© Піндус Н. М., Вацшиак С. П., Чеховський С. А., 2000
Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Розроблена математична модель процесів теплообміну в електродинамічних випромінювачах звуку на базі аналітичних досліджень. Приведені експериментальні результати досліджень, які підтверджують адекватність моделі та її придатність для інженерних теплових розрахунків випромінювачів звуку.

Якість роботи звуковідтворюючої апаратури в цілому визначається роботою акустичних систем, основними елементами в яких є електродинамічні випромінювачі звуку. Це пояснюється їх досить низькою вартістю, простотою конструкції, високими технологічними та екологічними показниками.

В умовах сучасного радіотехнічного виробництва суцільний контроль якості електроакустичної апаратури проводиться в основному тільки за деякими її технічними характеристиками. Зокрема, практично всі існуючі методики контролю параметрів випромінювачів звуку базуються на аналізі звукового тиску та геометричних характеристиках його розповсюдження як в процесі експлуатації, так і при проведенні контрольно-діагностичних робіт з використанням звукоглушних камер. Така незначна кількість інформативних параметрів суттєво обмежує вірогідність результатів контролю, оскільки поза увагою залишаються теплові явища, вплив яких на якісні характеристики гучномовців ще недостатньо вивчений.

Аналіз і, відповідно, методика інженерного розрахунку теплових процесів в гучномовцях почали розвиватися порівняно недавно з використанням, в основному, енергетичного підходу [1], що не дає змоги здійснювати контроль параметрів гучномовців в усьому діапазоні їхніх частот та потужностей як за якісними, так і за кількісними показниками.

Для оцінки впливу теплових процесів на роботу гучномовця доцільно скористатися методами математичного моделювання. З метою побудови достовірної моделі представимо електродинамічний гучномовець як складний електромеханічний перетворювач, у якому відбуваються лінійні і нелінійні перетворення вхідного сигналу $U(t)$, що підводиться у вигляді напруги від підсилювача чи фільтруючорекоректуючої ланки в розподілений у просторі звуковий тиск $P(t)$. Якщо вхідний сигнал є аналогом музичного сигналу, то він має складну часову нестаци-

онарну структуру. Тому основним завданням гучномовця є забезпечення передачі часової структури вхідного сигналу з спотвореннями, що є нижчими за слуховий поріг людини. Саме ця умова висуває вимоги до рівня лінійних і нелінійних спотворень частотного та динамічного спектрів сигналу, що в значній мірі визначають якість гучномовця.

Основні теплофізичні процеси, які обмежують безспотворне відтворення звуку гучномовцем, протікають у вузлі "звукова котушка – магнітне коло". У процесі перетворення сигналу підведена до гучномовця електрична енергія частково перетворюється в акустичну (1-5 %), а решта її (біля 95 %) розсіюється у виді тепла. Значне нагрівання звукової котушки (ЗК) і елементів магнітного кола (МК) викликають такі небажані явища, як механічне пошкодження ЗК, зростання її активного опору, зміну магнітних властивостей магнітної системи. Зміна активного опору ЗК в 1,5-2 рази при нагріванні до 200 °С призводить до зміни струму у ній при великих потужностях, а оскільки це явище відбувається, в основному, в області електромеханічного резонансу, то з підвищенням потужності деформується форма амплітудно-частотної характеристики гучномовця. Крім того, така значна зміна активного опору ЗК призводить до розузгодження гучномовця з фільтрами акустичної системи, що погіршує її параметри і якість звучання. Тому при проектуванні гучномовців необхідно забезпечити максимальний відвід тепла від елементів конструкції і забезпечити їхню значну теплостійкість

Суттєвою трудностю при теоретичному аналізі процесів теплопередачі в гучномовцях є: необхідність врахування всіх трьох основних шляхів перенесення тепла (теплопровідності, конвекції і випромінювання); нестационарність процесу теплопередачі, яка зумовлена специфікою музичних і мовних сигналів; складність форми області, в якій розміщена ЗК (зазори, отвори в керні, порожнини між верх-

нім і нижнім фланцем і магнітом).

Конструктивні елементи магнітного кола гучномовця (магніта, фланців, керна, наявність отвору в керні) істотно впливають на процес нагріву ЗК. Дослідження впливу ширини зазору на процес тепловідведення показали, що із зменшенням його ширини від 0,6 до 0,2 мм тепловий опір зменшується майже в 2 рази.

Конструктивні параметри ЗК суттєво впливають на тепловий режим роботи випромінювача. Оцінка впливу діаметра котушки на процес встановлення температури дає змогу встановити, що збільшення діаметра суттєво понижує її температуру. Наприклад, перехід від діаметра ЗК 25 мм до діаметра 40 мм дозволяє зменшити температуру майже в 2 рази і збільшити час встановлення стаціонарного теплового режиму на 70 %. Також на формування теплового процесу в гучномовці вагомий вплив створюють: матеріал каркасу ЗК; відношення висоти обмотки до висоти зазору; теплофізичні властивості середовища в зазорі магнітного кола гучномовця; вихрові струми, що виникають в поверхневих частинах деталей гучномовців при русі ЗК.

Функціонально електродинамічний гучномовець можна подати у вигляді моделі, що складається з наступних перетворювачів енергії:

1) електромагнітного, який перетворює підведену до ЗК напругу $U(t)$ у змінний струм $I(t)$ і в електромеханічну силу $F(t)$ магнітної системи:

$$\begin{aligned} I(t) &= L_1[U(t)], \\ F(t) &= L_2[I(t)], \end{aligned} \quad (1)$$

де L_1 і L_2 – оператори перетворення нелінійного типу, які залежать від частоти і потужності випромінювача;

2) механічного, який здійснює перетворення сили $F(t)$ в розподілене по поверхні дифузора гучномовця механічне зміщення $U^*(\alpha, \beta, t)$, де α, β – точки на поверхні дифузора в циліндричній системі координат:

$$F(t) = L_{3i}(U^*), \quad (2)$$

де L_{3i} – оператор, який описує коливні процеси на поверхні рухомої системи гучномовця; U^* – вектор зміщення точки поверхні дифузора;

3) акустичного, який перетворює зміщення $U^*(\alpha, \beta, t)$ в розподілений у просторі звуковий тиск $P(R, t)$ і $L_4 \Phi = 0$, з врахуванням граничних умов $\partial \Phi / \partial n|_{S=V_{\text{гт}}}$,

де R – опір прилеглого до дифузора повітря, L_4 – оператор хвильового рівняння, Φ – потенціал звукового поля, пов'язаний з P співвідношенням $P = \partial \Phi / \partial t$, $V_{\text{гт}}$ – коливна швидкість на поверхні дифузора рівня $P = \partial \Phi / \partial t$.

Всі ці перетворювачі мають прямий і зворотній вплив один на одного.

Опишемо математичну модель гучномовця наступними рівняннями:

1) рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\begin{aligned} SC_p(r, z) \rho(r, z) \partial T / \partial t = \\ = 1/r \frac{\partial}{\partial r} [r \lambda(r, z)] \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \lambda(r, z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \end{aligned} \quad (3)$$

де T – функція розподілу температур; $\lambda(r, z)$, $C_p(r, z)$, $\rho(r, z)$ – функції, що характеризують властивості середовища, в якому працює ЗК; $\lambda(r, z)$ – коефіцієнт теплопровідності; $C_p(r, z)$ – питома теплоємність; $\rho(r, z)$ – густина; $W(t, r, z)$ – питома потужність джерела випромінювання.

При $S=0$ має місце стаціонарний процес, а при $S=1$ – динамічний;

2) рівняння кількості теплоти, яка виділяється за одиницю часу при протіканні вихрових струмів:

$$Q = I^2 R_{\text{матер}} = \left[-\frac{\mu_1 \mu_0}{2} \cdot \frac{W^2 S}{h_k} \right]^2 \frac{U_{\text{ЗК}}}{Z^2} \cdot \frac{W^2}{R_M}, \quad (4)$$

де $\mu_1 \mu_0$ – магнітна проникність керна і повітря; W – кількість витків ЗК; S – площа поперечного перерізу витків і керна; h_k – висота котушки; $U_{\text{ЗК}}$ – напруга, яка підводиться до ЗК; R_M – опір матеріалу керна (фланців); Z – повний електричний опір ЗК;

3) система рівнянь теплового балансу:

3.1) рівняння теплової провідності:

$$\beta = \frac{1}{R}, \quad (5)$$

де R – тепловий опір;

3.2) рівняння кондуктивного теплового опору:

$$R_K = L / \lambda \delta, \quad (6)$$

де L – довжина кондуктивної передачі, м; δ – площа поперечного перерізу кондуктивної теплопередачі, м²; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК;

3.3) рівняння конвективного теплового опору:

$$R_K = \frac{0,0002}{S_K}, \quad (7)$$

де S_K – площа контакту;

3.4) рівняння теплового опору випромінювання:

$$R_B = 1 / (\gamma - S_B), \quad (8)$$

де γ – коефіцієнт тепловіддачі випромінювання, Вт/м²К; S_B – площа поверхні випромінювання, м²;

3.5) рівняння теплопровідності між елементами:

$$\sum_{i \neq j}^N B_{ij} T_i - \sum_{i \neq j}^N B_{ij} T_j + B_{i_{\text{НС}}} T_i - B_{i_{\text{НС}}} T_{\text{нс}} - P_i = 0, \quad (9)$$

де B_{ij} – теплова провідність між $i^{\text{м}}$ і $j^{\text{м}}$ елементами, Вт/К; $B_{i_{\text{НС}}}$ – теплова провідність між $i^{\text{м}}$ елементом системи і навколишнім середовищем, Вт/К; P_i – те-

плова потужність i^{10} елемента, Вт; T_i – температура i^{10} елемента, $^{\circ}\text{C}$; T_{nc} – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

3.6) рівняння випромінювання елемента системи в навколишнє середовище:

$$\gamma_{iHC} = \frac{5,67 \cdot 10^{-5} \varepsilon_i U \left[(T_i + 273,2)^U - (T_{nc} + 273,2)^U \right]}{T_i - T_{nc}}, \quad (10)$$

де ε_i – приведена ступінь чорноти i^{10} елемента, U – коефіцієнт опромінювання;

3.7) тепловий опір теплопередачі конвекцією:

$$R_K = 1 / \gamma_K / S_K, \quad (11)$$

де R_K – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$; S_K – площа тепловідної поверхні, м^2 ;

3.8) рівняння природного конвективного теплообміну в прошарках:

$$\begin{aligned} \gamma_K &= \frac{\lambda_n}{h} \cdot 0,18 (G_r P_r)^{0,25} = \\ &= \frac{\lambda_n}{h} \cdot 0,8 \cdot \gamma \left[(T_i - T_j) P_r \cdot \frac{g h^3}{\nu^2} \beta \right]^{0,25}, \quad (12) \end{aligned}$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, $\text{Вт}/\text{мK}$; h – товщина повітряного зазору, м ; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; P_r – критерій Прандтля (для повітря $P_r=0,7$); g – прискорення вільного падіння, $9,8 \text{ м}/\text{с}^2$; β – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $1/\text{K}$, який визначається з формули:

$$\begin{aligned} \beta &= 1 / (T + 273,2), \quad (13) \\ T &= 0,5(T_i + T_j); \end{aligned}$$

3.9) рівняння взаємного опромінювання елементів системи:

$$\gamma_{ij} = \frac{5,67 \cdot 10^{-5} \varepsilon_{ij} U \left[(T_i + 273,2)^U - (T_j + 273,2)^U \right]}{T_i - T_j}, \quad (14)$$

де ε_{ij} – приведена ступінь чорноти i^{10} і j^{10} елементів;

3.10) рівняння приведеної ступені чорноти:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{(1/\varepsilon_i + 1/\varepsilon_j - 1)}; \quad (15)$$

4) результуючий звуковий тиск буде мати вигляд:

$$P = \frac{jk\rho_0 C_0}{4\pi} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} \delta d\sigma, \quad (16)$$

де k – хвильове число; f – частота, Гц; C_0 – швидкість звуку, $\text{м}/\text{с}$; ρ_0 – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; r – відстань між мембраною і точкою спостереження в звуковому полі, м ; S – площа мембрани гучномовця, м^2 .

Подальша реалізація математичної моделі гучномовця завершується побудовою його теплової еквівалентної схеми, що дає змогу розрахувати теплові зв'язки елементів цієї схеми шляхом представлення

їх у вигляді елементарних ділянок. Розв'язок системи рівнянь теплового балансу проводився методом послідовного наближення для різних типів випромінювачів і різних матеріалів.

Нами проведені аналітичні дослідження теплових процесів, що базуються на аналізі основних термодинамічних залежностей, характерних для електродинамічних та ізодинамічних випромінювачів. Дослідження проводились при потужностях випромінювачів 10 і 20 Вт, температурі навколишнього середовища 22°C , атмосферному тиску 101 кПа. Режим роботи гучномовців – неперервний на протязі 30 хвилин, охолодження випромінювачів – вільна конвекція. Досліджувались послідовно 6 моделей гучномовців, в конструкцію яких вводились зміни у відповідності до зміни параметрів математичної моделі з метою покращення теплових характеристик випромінювачів.

Типи моделей перетворювачів наступні:

1) рама і фланець з полістиролу, вставка з гетинаксу, мембрана з поліаміду, котушка з алюмінієвого сплаву, магніти із сплаву фериту барія, пластини магнітної системи із сталі Ст.3;

2) тип моделі ідентичний попередньому, але все поле мембрани ззовні покрите алюмінієвою фольгою, товщиною 14 мкм;

3) тип моделі ідентичний попередньому, але збільшена ступінь чорноти поверхні котушки;

4) тип моделі ідентичний попередньому, але між кожною ділянкою котушки і двома найближчими вертикальними рядами магнітів введений безпосередній кондуктивний зв'язок з тепловим опором 10 К/Вт;

5) тип моделі ідентичний попередньому з покриттям котушки, що збільшує ступінь чорноти її поверхні;

6) тип моделі ідентичний четвертому при тепловому опорі 1 К/Вт з додатковими ребрами для відведення тепла на зовнішній поверхні перфорованих пластин площею $0,086 \text{ м}^2$, і покриттям котушки, що забезпечує ступінь чорноти її поверхні 0,95.

Аналіз розрахунків та експериментальних досліджень теплових режимів роботи перетворювачів дає можливість зробити наступні висновки:

1) суцільне алюмінієве фольгування і покриття мембрани з зовні понижую середню температуру звукової котушки на $3,7^{\circ}\text{C}$ при вихідній потужності 10 Вт за рахунок збільшення тепловіддачі випромінюванням;

2) покриття котушки із збільшенням чорноти її поверхні знижує середню температуру котушки на $5,8^{\circ}\text{C}$ при вихідній потужності 10 Вт і на $4,3^{\circ}\text{C}$ при вихідній потужності 20 Вт;

3) введення кондуктивного зв'язку між котуш-

кою і магнітами понижує середню температуру ЗК на 7 °С при вихідній потужності 10 Вт і на 4,5 °С при вихідній потужності 20 Вт;

4) введення кондуктивного зв'язку між котушкою і магнітами, а також покриття котушки понижує середню температуру котушки на 8,9 0С при вихідній потужності 10 Вт;

5) введення кондуктивного зв'язку між котуш-

кою і магнітами з додатковими ребрами і покриттям котушки знижує середню температуру котушки на 14,6 0С при вихідній потужності 20 Вт.

1. Схемотехніка високоякісного звуковідтворення / М. Є. Сухов, С. Д. Бать, В. В. Колосов, О. Г. Чупаков. – К.: Техніка, 1992. – 127 с.