



КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР, АСПАП ЖАСАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ
COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION

ӘОЖ 681.586:531.787

ҒТАХА 59.14.23

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_10

**Ж. Р. Уалиев¹, П. Г. Михайлов², А. И. Ақжолова^{1*}, А. О. Кабдолдина³,
 А.Ю. Бектилезов³**

¹Сандық техника және технологиялар институты, Алматы, Қазақстан

²Қазақстан инновациялық және телекоммуникациялық университеті, Орал, Қазақстан

³Қ.И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

*E-mail: asel_zhalyn@mail.ru

**ЭКСТРЕМАЛДЫ ЖАҒДАЙЛАРДА ЖҰМЫС ІСТЕУГЕ АРНАЛҒАН ЖАРТЫЛАЙ
 ӨТКІЗГІШ СЕНСОРЛАРДЫҢ ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН
 ЗЕРТТЕУ**

Аңдатпа. Қысым пульсацияларын авиациялық техникада өлшеу кезінде сезгіш элемент, жалғаушы арналар, корпус қуыстары және қоректендіру схемасы нәтижеге бірлесіп әсер етеді. Олардың үлестерін ажырату экстремалды жағдайларға арналған жартылай өткізгіш сенсорларды жобалау үшін қажет. Жұмыстың мақсаты — айқын берілген жорамалдар негізінде жиіліктік жасауапты, жергілікті температуралық өтемдеуді және белгісіздіктің таралуын есептеу, сондай-ақ қолда бар сипаттамалар бойынша параметрлерді анықтаудың шектеулерін көрсету. Жұқа пластина теңдеуі, екінші ретті динамикалық буындар, тұтқырлық пен жылулық шығындары бар түтіктердің ауысу матрицалары және аддитивті децибелдік белгісіздік моделі қолданылды. Есептеулер шектік жағдайлармен, тәуелсіз сандық өрнектермен және Монте-Карло әдісімен тексерілді. Бір ғана жолақ шекарасы меншікті жиілік пен демпфирлеуді бірге анықтамайтыны көрсетілді. 65 кГц есептік жолақ және 0,01–0,10 демпфирлеу аралығы қабылданғанда ғана меншікті жиіліктің шамамен 195 кГц төменгі бағасы алынады. Мойын диаметрі 0,8 мм, ұзындығы 1 мм және қуыс көлемі 1 мм³ болатын сценарийде толық каскад 25,728 кГц акустикалық шың мен 7,981 кГц жолақ береді. Ұзындығы 20 мм, радиусы 0,40 мм зонд қосылғанда сол тізбектің жолағы 0,981 кГц болады. Қуыстың жылулық шығыны мен мембрананың кері акустикалық жүктемесі бұл есепке кірмейді. Қабылданған температуралық коэффициенттер және 6 В қорек кезінде шектелген топология қажетті жергілікті өтемдеудің 13,846 пайызын қамтамасыз етеді; басқа коэффициентте бірінші туындының нөлге тең болуы толық диапазондағы тұрақтылықты дәлелдемейді. Екі шартты бюджет үшін қамту коэффициенті екіге тең кеңейтілген белгісіздік 2,491 және 0,980 дБ, ал 95 пайыздық қамту аралығының жарты ені 2,214 және 0,950 дБ болды. Нәтижелер жаңа эксперименттік валидация немесе нақты аспаптың расталған дәлдігі ретінде ұсынылмайды. Жұмыс модель жорамалдарын тексеруге және кейінгі өлшеу хаттамасын құруға негіз береді.

Түйін сөздер: пьезорезистивті сенсор, жиіліктік жасауап, қуыс резонансы, акустикалық зонд, параметрлерді анықтау, температуралық өтемдеу, өлшеу белгісіздігі, сандық верификация.

Кіріспе.

Авиациялық техникадағы қысым пульсацияларын өлшеуде мембрана, жалғаушы арналар, корпус қуысы және қорек схемасы нәтижеге бірлесіп әсер етеді. MEMS сенсорларының конструкциясы мен корпустауы [1], 4H-SiC материалдарының экстремалды жағдайлардағы қасиеттері [2] және транзисторлық температуралық өтемдеу [3] бойынша жұмыстар осы әсерлерді бөлек бағалау қажеттігін көрсетеді.

Түтік-қуыс жүйелерінің теориясы [4] Берг-Тейдеман тәсіліне [5] негізделген. Акустикалық зондтардың сипаттамаларын түзету [6], корпусталған сенсорлардың жиіліктік сипаттамасы [7] және қуыстағы жылу алмасуды ескеретін модель [8] белгілі болғандықтан, каскадты сипаттаудың өзі бұл жұмыста жаңалық ретінде ұсынылмайды.

ПД сериялы сенсорлар жөніндегі [9] жұмыста салыстырмалы әдістің дәлдігі ± 1 дБ (20 Гц – 65 кГц), жабық конструкцияның жиілік шегі ≈ 30 кГц, ал ашық конструкцияның диапазоны 0–75 кГц деп көрсетілген. Әдістің дәлдігі нормаланған амплитудалық-жиіліктік сипаттаманың (АЖС) ± 1 дБ жолағымен бірдей емес, сондықтан бұл мәндер төменде тек шартты нысана ретінде пайдаланылады.

Жұмыстың мақсаты — айқын берілген жорамалдар негізінде өлшеу арнасының динамикалық, температуралық және метрологиялық әсерлерін есептеу және қолда бар сипаттамалар бойынша параметрлерді анықтаудың шектерін көрсету. Жұмыстың үлесі: бір ± 1 дБ жолақ шекарасы бойынша меншікті жиілік пен демпфирлеуді бірге анықтау мүмкін еместігін сандық көрсету; бірдей анықталған толық каскад үшін жолақ пен шыңдарды сәйкестендіру; жергілікті температуралық өтемдеуді схема топологиясымен байланыстыру; $U(k=2)$ кеңейтілген белгісіздігі мен 95 % қамту аралығын ажырату. Жаңа эксперимент жүргізілмеді; есептеу верификациясы эксперименттік валидациядан ажыратылады [10].

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Кіріс деректер және шекаралық шарттар

Геометрия мен коэффициенттердің мәндері және олардың дәлелдік мәртебесі 1-кестеде берілген. Нақты мембраналардың бірдейлігі, қорғаныш торы және жылулық шекаралар расталмаған. Brüel & Kjaer 4136 микрофоны үшін паспорттағы 4 Гц – 70 кГц, ± 2 дБ диапазон [11] нақты экземплярдың калибрлеу қалдығын анықтамайды.

1 кесте – Негізгі кіріс деректердің мәндері мен дәлелдік мәртебесі

Шама	Мәні	Мәртебесі және қолданылу шарты
Салыстырмалы әдіс дәлдігі	± 1 дБ; 20 Гц – 65 кГц	[9], 81-бет; АЖС тегістігінің критерийі емес
Конструкциялардың жиілік диапазоны	жабық: ≈ 30 кГц; ашық: 0–75 кГц	[9], 82-бет; B шамасымен теңдігі расталмаған
Есептік жолақ нысаналары	$B = 65, 70$ және 30 кГц	Осы жұмыста анықталған шартты ± 1 дБ критерийі
Мембрана параметрлері	$f_0 = 211,6$ кГц; $\zeta = 0,05$	Салыстыру үшін бекітілген сценарий; өлшенген параметрлер емес
Қуыс және мойын	$V = 1,0$ мм ³ ; $d = 0,8$ мм; $l = 1,0$ мм	Жорамал геометрия; $l_{\text{eff}} = l + 0,85d = 1,68$ мм
Зонд	$L = 20$ мм; $R = 0,40$ мм	Есептік геометрия; толық тізбекте $V = 1,0$ мм ³
Бір түтік моделінің соңғы көлемі	$V_v = 1,05$ мм ³	$\approx 3,65$ кГц шынды алу үшін таңдалған сценарий; тәуелсіз өлшем емес
Ауа	$\rho_0 = 1,204$ кг/м ³ ; $c = 343,2$ м/с; $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $\gamma = 1,4$; $Pr = 0,71$	20 °С маңындағы есептік тұрақтылар; экстремалды температураға экстраполяцияланбайды

Шама	Мәні	Мәртебесі және қолданылу шарты
Температуралық коэффициенттер	$\alpha_\pi = -0,27 \text{ \%}/\text{K}$; $\beta = -2 \text{ мВ}/\text{K}$; $U_{\text{EB}} = 0,65 \text{ В}$	Жергілікті есепке қабылданған мәндер; нақты элементтің сертификатталған параметрлері емес

Қысым p пен көлемдік шығын q үшін $\exp(j\omega t)$ уақыттық келісімі және $\omega = 2\pi f$ қолданылады. Түтік қабырғалары қатты және изотермиялық, орташа ағын жоқ деп қабылданды. Беріліс функциясы төменгі жиіліктегі мәніне нормаланған; электроника буыны $W_e = 1$. Температуралық есеп жұмыс нүктесінің маңына қатысты. Есептеу тізбегінің құрылымы 1-суретте көрсетілген.



1 сурет – Қысымның кірістен мембранаға берілу тізбегі: $A = T_{\text{rad}} T_1 T_2$, соңғы жүктеме Z_V ; мембрана динамикасы W_3 және нормаланған электроника $W_e = 1$. Зонд болмаған кезде T_1 бірлік матрицаға тең. Мембрананың акустикалық кері жүктемесі ескерілмейді

Мембрана моделі

Периметрі қатаң бекітілген, тиімді изотропты дөңгелек пластина үшін қозғалыс теңдеуі:

$$D \nabla^4 w - N_r \nabla^2 w + \rho_s h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p(r, t), \quad D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (1)$$

мұнда w – иілу; D – цилиндрлік қатаңдық; E , ν – тиімді серпімділік модулі мен Пуассон коэффициенті; $N_r \geq 0$ – ұзындық бірлігіне келетін радиалды созу күші, Н/м; a , h – радиус пен қалыңдық; ρ_s – материал тығыздығы. Кремний анизотропиясын тиімді E , ν шамаларымен алмастыру – жорамал. $w(a, t) = 0$ және $\partial w / \partial r = 0$ ($r = a$) шекаралық шарттарынан меншікті мәндер теңдеуі шығады:

$$\lambda_o J_1(\lambda_o) I_0(\lambda_e) + \lambda_e I_1(\lambda_e) J_0(\lambda_o) = 0 \quad (2)$$

$$\lambda_e^2 = \frac{k^2 + \sqrt{k^4 + 4\Omega^2}}{2}, \quad \lambda_o^2 = \frac{-k^2 + \sqrt{k^4 + 4\Omega^2}}{2}, \quad (3)$$

$$k^2 = \frac{N_r a^2}{D}, \quad \Omega = \omega a^2 \sqrt{\frac{\rho_s h}{D}} \quad (4)$$

мұнда J , I – кәдімгі және модификацияланған Бессель функциялары. $N_r = 0$ болғанда (2) теңдеудің бірінші түбірі $\Omega_0 = 10,215826$ және меншікті жиілік:

$$f_0 = \frac{10,215826}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E h^2}{12\rho_s(1 - \nu^2)}} \quad (4)$$

Созу басым болатын шекте $\Omega/k \rightarrow 2,4048$. Бұл тексерулер нақты a , h , N_r мәндері болмағанда сенсордың жиілігін анықтамайды. Таңдалған кристаллографиялық бағдар мен резисторлардың орналасуы үшін [12]:

$$\frac{U_{\text{out}}}{U_{AB}} = \frac{1}{2} \pi_{44}(N, T)(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}),$$

$$\pi_{44}(N, T) = P(N, T) \pi_{44}(N_0, T_0), \quad \alpha_\pi = \frac{\partial \ln \pi_{44}}{\partial T} \quad (5)$$

мұнда U_{out} – көпірдің шығыс кернеуі; U_{AB} – көпірдің қорек кернеуі; $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}$ – радиалды және тангенциалды механикалық кернеулер; $P(N, T)$ – легирлеу деңгейі мен температураға тәуелді көбейткіш. $\alpha_\pi = -0,27 \text{ \%}/\text{K}$ – есептік кіріс, өлшенген легирлеу сипаттамасы емес. Мембрана екінші ретті буынмен сипатталады, ал жолақ B АЖС-тың ± 1 дБ дәлізінен бірінші шығу жиілігі ретінде анықталады:

$$W_3(j\omega) = \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]^{-1}, \quad (6)$$

$$B = \inf\{f > 0: |20\lg|W(j2\pi f)|| > 1\}$$

мұнда W – жеке буынның немесе толық каскадтың берілісі; шек 1 дБ-ге тең. Меншікті жиілік f_n , максимум жиілігі f_{peak} және жолақ B бір-бірінен ажыратылады. Жеке буында $\zeta < 1/\sqrt{2}$ үшін $f_{\text{peak}} = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$; каскадтың максимумы әр жағдайда қайта есептеледі.

Акустикалық модель

Түтіктегі тұтқырлық және жылулық шығындар [4, 5] бойынша сипатталады:

$$\alpha = j^{3/2} R \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{\mu}}, \quad n = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{J_2(\alpha \sqrt{\text{Pr}})}{J_0(\alpha \sqrt{\text{Pr}})} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\gamma}{n}} \sqrt{\frac{J_0(\alpha)}{J_2(\alpha)}}, \quad Z_c = \frac{\rho_0 c}{\pi R^2} \sqrt{\frac{n}{\gamma}} \sqrt{-\frac{J_0(\alpha)}{J_2(\alpha)}} \quad (8)$$

мұнда R – түтік радиусы; $\rho_0, \mu, \gamma, \text{Pr}$ – ауаның тығыздығы, динамикалық тұтқырлығы, адиабата көрсеткіші және Прандтль саны; c – дыбыс жылдамдығы; n – политропа көрсеткіші. Түбір тармақтары пассивтілік шартымен үйлеседі: шығынсыз шекте $\Gamma \rightarrow j\omega/c$, $Z_c \rightarrow \rho_0 c / (\pi R^2)$. Толқындық кедергі Z_c қысымның көлемдік шығынға қатынасы ретінде анықталады. Ұзындығы L түтіктің ауысу матрицасы, қуыстың кедергісі және тізбектің берілісі:

$$\mathbf{T}(L) = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma L & Z_c \sinh \Gamma L \\ Z_c^{-1} \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{pmatrix}, \quad Z_v = \frac{\rho_0 c^2}{j\omega V} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} p_{\text{in}} \\ q_{\text{in}} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} p_m \\ q_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \mathbf{T}_{\text{rad}} \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2, \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{\text{rad}} = \begin{pmatrix} 1 & Z_{\text{rad}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad W_{\text{ac}} = \frac{p_m}{p_{\text{in}}} = \frac{Z_v}{A_{11} Z_v + A_{12}}$$

мұнда $\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}(L)$ – зонд; $\mathbf{T}_2 = \mathbf{T}(l_{\text{eff}})$ – мойын; $l_{\text{eff}} = l + 1,7R$ – мойынның тиімді ұзындығы. Радиацияның активті кедергісі $Z_{\text{rad}} = \rho_0 c (\omega R/c)^2 / (2\pi R^2)$ деп қабылданды; шеттік түзету тиімді ұзындыққа енгізілген, реактивті радиация бөлек қосылмайды.

Қуыс адиабаталық деп алынды, яғни түтік шығындары қуыстағы жылу алмасуды қамтымайды. $W = W_{\text{ac}} W_3$ біржақты байланысында мембрананың көлемдік шығыны газдың сығылуынан туындайтын шығынмен салыстырғанда елеусіз деп есептелді; бұл [8] жұмысындағы мембрана әсерін нөлге тең қабылдауға сәйкес келеді. Кері жүктеме елеулі болса, мембрананың өлшенген кедергісі Z_m қажет және (10) өрнегі $Z_{\text{eff}} = (Z_v^{-1} + Z_m^{-1})^{-1}$ арқылы қайта есептеледі. «Толық каскад» термині тек көрсетілген буындарды білдіреді.

Радиациясыз бір түтік пен соңғы көлем үшін:

$$W_1 = \left[\cosh \Gamma L + \frac{V_v}{\pi R^2 L} \cdot \frac{n}{\gamma} \Gamma L \sinh \Gamma L \right]^{-1} \quad (11)$$

мұнда V_v – түтіктің соңындағы көлем. Салыстыру үшін жинақталған (Гельмгольц) модель қолданылды:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi d^2/4}{V l_{\text{eff}}}}, \quad W_2 = \left[1 - \left(\frac{f}{f_H} \right)^2 + 2j\zeta_H \frac{f}{f_H} \right]^{-1} \quad (12)$$

мұнда d – мойын диаметрі; ζ_H – демпфирлеу коэффициенті. Бұл модель мойын көлемі қуыс көлемінен едәуір аз және акустикалық өлшемдер толқын ұзындығынан қысқа болғанда қолданылады. ζ_H – тәуелсіз сценарий параметрі; оны B мәніне сәйкестендіру эксперименттік идентификация емес. Әр сценарийде 30 кГц-ке дейін шекараның ертерек бұзылмағаны тексерілді.

Температуралық өтемдеу және өздігінен қызу

Тұрақты E_P , x және $\beta = dU_{EB}/dT < 0$ үшін:

$$U_{AB} = E_P - xU_{EB}, \quad \frac{1}{S} \frac{dS}{dT} = \alpha_\pi + \gamma_x, \quad \gamma_x = \frac{x|\beta|}{E_P - xU_{EB}} \quad (13)$$

мұнда E_P – қорек кернеуі; U_{EB} – транзистордың эмиттер–база кернеуі; x – резистивті белгіштің коэффициенті; $S \propto \pi 44 U_{AB}$ – сезімталдық. Транзистор мен сенсордың температуралары бірдей өзгереді деп алынды. $\beta \approx -(1,5 \dots 2)$ мВ/К – [13, 61-6.] бойынша типтік баға, нақты транзистордың сертификатталған мәні емес. Сезімталдықтың температура бойынша бірінші туындысының нөлге тең болу шарты:

$$x^* = \frac{|\alpha_\pi| E_P}{|\beta| + |\alpha_\pi| U_{EB}}, \quad U_{AB}^* = \frac{E_P |\beta|}{|\beta| + |\alpha_\pi| U_{EB}} \quad (14)$$

$x = 1 - R_8/R_9$ топологиясында ($R_8, R_9 > 0$) оң өтемдеу үшін $0 \leq x < 1$, ал $x = 1$ – идеал шек. $x > 1$ басқа схеманы, кернеу қорын және жұмыс режимін тексеруді қажет етеді. (14) шарты толық температура диапазонындағы нөлдік дрейфті дәлелдемейді.

Кристалл (T_j), корпус (T_c) және орта (T_a) температуралары үшін орныққан бір ағынды жылулық модель:

$$P = \frac{U^2}{R_k}, \quad T_j - T_a = P(R_{th,jc} + R_{th,ca}), \quad T_c - T_a = P R_{th,ca} \quad (15)$$

мұнда R_k – көпір кедергісі; $R_{th,jc}$ және $R_{th,ca}$ – кристалл–корпус және корпус–орта жылулық кедергілері. Екі жұмыс нүктесінде $R_{th} = R_{th,jc} + R_{th,ca}$ болса, өздігінен қызулардың қатынасы:

$$\frac{\Delta T_{sh,1}}{\Delta T_{sh,2}} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \frac{R_{k,2}}{R_{k,1}} \cdot \frac{R_{th,1}}{R_{th,2}} \quad (16)$$

Терморезистор кедергілерінің қатынасы бойынша қызуды анықтау үшін тұрақты U , R_{th} және $R_k \propto R_t$ шарттары бөлек негізделуі тиіс. Жұпталған T , R өлшеу хаттамасы болмағандықтан, терморезистордың регрессиялық сипаттамасы мен қызудың абсолют мәні бұл жұмыста сенсордың нәтижесі ретінде берілмейді.

Белгісіздік және есептеулерді верификациялау

Түзетілген салыстырмалы нәтиже $y = \sum x_i$ (дБ) аддитивті модельмен сипатталады, сезімталдық коэффициенттері бірге тең [14, 15]:

$$u_c^2 = \sum_i u_i^2 + 2 \sum_{i < j} r_{ij} u_i u_j, \quad U(k) = k u_c, \quad v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_i u_i^4 / v_i} \quad (17)$$

мұнда u_i – құрамдастардың стандартты белгісіздіктері; r_{ij} – корреляция коэффициенттері; k – қамту коэффициенті; v_i – еркіндік дәрежелері; v_{eff} өрнегі тек тәуелсіз құрамдастар үшін қолданылады. Тікбұрышты таралу үшін $u = \Delta/\sqrt{3}$, мұнда Δ – шектің жарты ені. 95 % аралықтың жарты ені $q_{0,95}$ шамасы $P(|y| \leq q_{0,95}) = 0,95$ шартынан табылады және $U(k=2)$ шамасына міндетті түрде тең емес. Базалық кірістер тәуелсіз, орта мәні нөлге тең, таралу параметрлері бекітілген деп алынды. Монте-Карло әдісімен [15] әр сценарийге бес тәуелсіз тізбек, әрқайсысында $2 \cdot 10^6$ іске асыру орындалды (PCG64 генераторы,

SeedSequence(20260921).spawn(10)). Квантильдер детерминделген сандық интегралдаумен тексерілді.

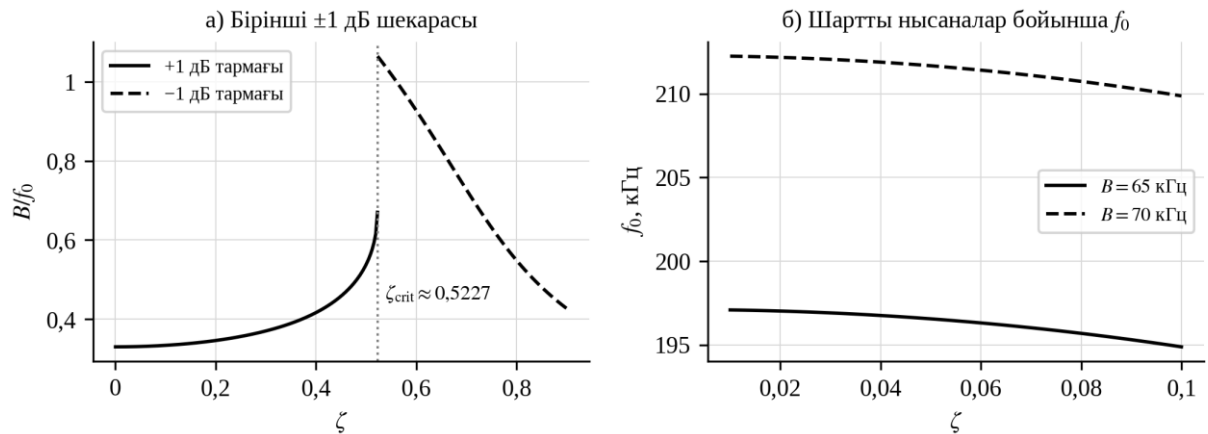
Есептеулер қос дәлдікпен орындалды: B шекарасы $10^{-5} \dots 5 \cdot 10^5$ Гц торында Брент әдісімен, шыңдар локалды оңтайландырумен анықталды. 1001/4001/16001 түйінді торлар, $10^{-4}/10^{-8}/10^{-10}$ Гц рұқсаттар, полином түбірлері, Бессель функцияларының масштабталған түрі және матрицалық көбейтінді салыстырылды (3-кесте).

Нәтижелер және оларды талқылау.

Бір жолақ шекарасының ақпараттылығы

$\zeta = 0,01; 0,05; 0,10$ үшін $B/f_0 = 0,32981; 0,33070; 0,33354$, яғни демпфирлеу он есе өзгергенде бұл қатынас небәрі $\approx 1,13$ %-ға өзгереді. Демек бір B мәні екі параметрді бірге анықтамайды. $B = 70$ кГц нысанасы $f_0 \approx 209,9 \dots 212,2$ кГц, ал 65 кГц нысанасы 194,9...197,1 кГц береді. $f_0 \geq 195$ кГц бағасы нақты ± 1 дБ жолақ пен қабылданған демпфирлеу аралығы расталғанда ғана жарамды; ол [9] жұмысындағы әдіс дәлдігінен тікелей шықпайды.

$\zeta_{\text{crit}} \approx 0,522728$ кезінде АЖС $+1$ дБ деңгейіне тек жанасады, сондықтан шекара бұзылмайды: B/f_0 сол жақ шектегі $\approx 0,67343$ мәнінен -1 дБ тармағындағы $\approx 1,06542$ мәніне секірімелі түрде ауысады (2-сурет). Бекітілген $f_0 = 211,6$ кГц, $\zeta = 0,05$ үшін $B = 69,976$ кГц; дәл 70 кГц алу үшін $f_0 = 211,672$ кГц қажет.



2 сурет – Оқшауланған екінші ретті буын: а – бірінші ± 1 дБ шекарасы және тармақтың ауысуы; б – $B = 65$ және 70 кГц шартты нысаналары үшін f_0 бағалары. Қысықтар өлшеу нәтижелері немесе сенімділік аралықтары емес

$f_0 \geq 195$ кГц және $\zeta \in [0,01; 0,10]$ болғанда мембрананың 30 кГц-тегі күшейтуі $+0,2081$ дБ-ден аспайды. Бұл бірдей мембраналар жорамалында конструкциялар арасындағы айырманы акустикалық трактіден іздеуге негіз береді, бірақ нақты себептілікті дәлелдемейді.

Қуыс пен зонд

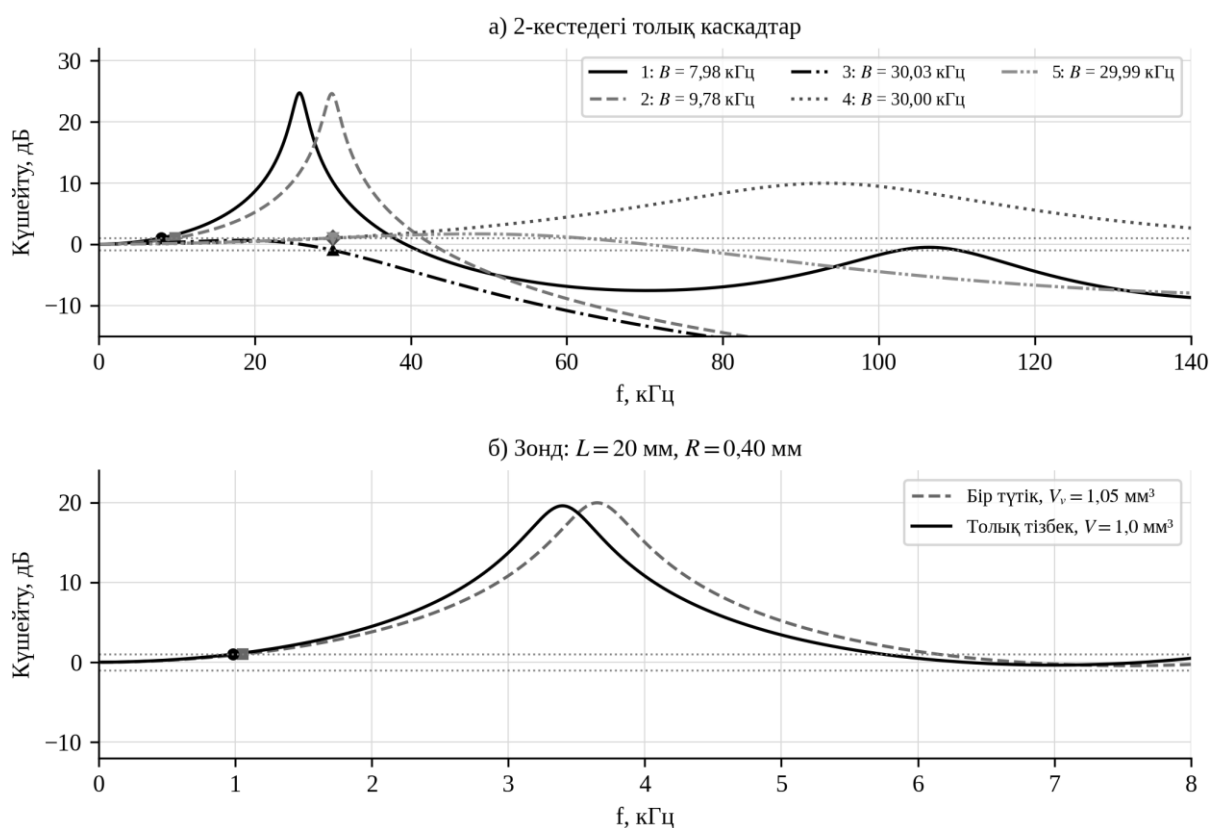
Жинақталған модель бойынша геометриялық баға $f_H = 29,878$ кГц; f_H шамасының V , d , l бойынша логарифмдік сезімталдықтары $-0,500; +0,798; -0,298$. Мойын көлемі $0,503$ мм³, яғни қуыс көлемімен салыстырмалы болғандықтан, таралған әсерлер елеулі болуы мүмкін. Радиациясы бар таралған акустикалық модельдің шыңы 25,727 кГц-те $+24,596$ дБ; мембрана қосылған толық каскадтардың нәтижелері 2-кестеде берілген. Жиіліктің 29,9-дан 25,7 кГц-ке төмендеуі ≈ 14 %-ды құрайды (кері бағытта салыстырғанда 29,9 кГц мәні $\approx 16,2$ %-ға жоғары).

$B \approx 30$ кГц беретін сценарийлердің шыңдары әртүрлі (3-сурет). 4- және 5-жолдардағы $+9,955$ және $+1,678$ дБ толық каскадқа қатысты, ал жеке W_2 буынының шыңдары $+8,136$ және $+1,249$ дБ. 3-жолдағы $f_H = 29,9$ кГц параметрі 18,132 кГц-тегі максимум жиілігіне тең емес.

2 кесте – Бірдей мембрана буынын қамтитын толық каскадтардың нәтижелері

№ және акустикалық модель	f_H , кГц	ζ_H	B , кГц	Бірінші акустикалық максимум $f_{\text{реак}}$, кГц	Шың, дБ
1. Таралған мойын және адиабаталық қуыс	—	—	7,981	25,728	24,725
2. Жинақталған сценарий	29,9	0,03	9,784	29,874	24,615
3. Жинақталған сценарий	29,9	0,57	30,029	18,132	0,630
4. Жинақталған сценарий	95,2	0,20	30,005	93,208	9,955
5. Жинақталған сценарий	63,6	0,50	29,993	48,081	1,678

Ескертпе – авторлардың есептеулері; барлық жолдарда мембрана буыны $f_0 = 211,6$ кГц, $\zeta = 0,05$.

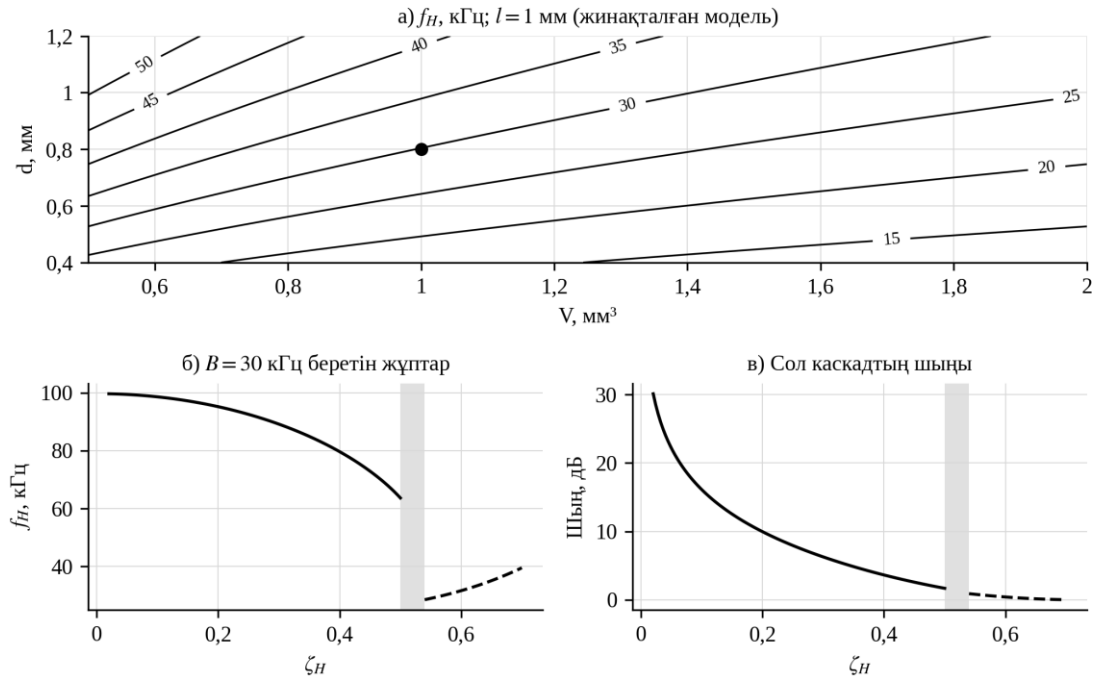


3 сурет – а – 2-кестедегі толық каскадтардың АЖС (қисық нөмірлері кесте жолдарына сәйкес); б – бір түтік пен соңғы көлем және зонд–мойын–қуыс толық тізбегі. Көлденең пунктир сызықтар ± 1 дБ шектерін, белгілер B мәндерін көрсетеді

$B = 30$ кГц шартын қанағаттандыратын, бірінші шекарасы тексерілген 180 жұп үшін $\zeta_H = 0,54$ кезінде $f_H = 28,438$ кГц, шың $+0,895$ дБ; $\zeta_H = 0,02$ кезінде $f_H = 99,645$ кГц, шың $+30,121$ дБ (4-сурет). Демек ζ_H мен шың биіктігіне барлық жағдайға ортақ шектеу қоюға болмайды. $0,50 < \zeta_H < 0,54$ аралығы есептелмеген, сондықтан ол үйлесімсіз деп тұжырымдалмайды.

Бір түтік үшін ($L = 20$ мм, $R = 0,40$ мм, $V_v = 1,05$ мм³) шың $3,651$ кГц-те $+19,955$ дБ, $B = 1,056$ кГц. Мойын, $V = 1,0$ мм³ қуыс, радиация және W_3 қосылған толық тізбек үшін шың $3,397$ кГц-те $+19,579$ дБ, $B = 0,981$ кГц; $V = 1,05$ мм³ болғанда $B = 0,978$ кГц. Айырма тізбектің геометриясы мен құрамына байланысты; бірдей бір түтік үшін (11) формула мен

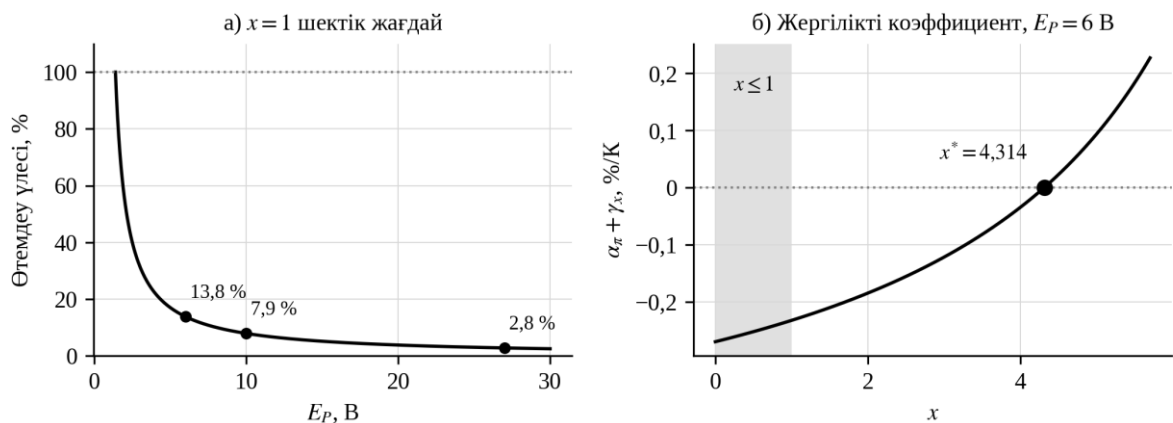
матрицалық есеп сәйкес келеді. Сондықтан зонд ұзындығы жалғыз өзі жолақты анықтамайды. ≈ 8 және 30 кГц жолақтарының айырмасы нақты датчикте тек қосымша демпфер бар екенін дәлелдемейді.



4 сурет – а – $l = 1,0$ мм кезіндегі жинақталған $f_H(V, d)$ номограммасы, нүкте 1-кесте геометриясына сәйкес; б – $B = 30$ кГц беретін (f_H, ζ_H) жұптары; в – сол толық каскадтың акустикалық шыңы. Бір-бірінен ажыраған тармақтар жалғанбайды; сұр аймақ $(0,50 < \zeta_H < 0,54)$ есептелмеген және интерполяцияланбаған

Температуралық өтемдеу және есептеулерді тексеру

$E_P = 6$ В және $x \leq 1$ болғанда жергілікті өтемдеу қажетті мәnniң 13,846 %-ын құрайды; 10 және 27 В үшін сәйкесінше 7,922 және 2,811 % (5-сурет). $x^* = 1$ шегі $E_P = 1,3907$ В-қа сәйкес келеді, бірақ бұл кезде транзистордың жұмыс режимі бөлек тексерілуі тиіс. 6 В кезінде $x^* = 4,314$, $U_{AB}^* = 3,196$ В. Бірінші туынды нөлге тең болғанымен, жоғары ретті әсерлер мен жылулық сәйкессіздік сақталады.



5 сурет – Жергілікті өтемдеу мысалы: а – $x = 1$ шегіндегі өтемдеу үлесінің E_P -ға тәуелділігі; б – $E_P = 6$ В кезіндегі қалдық жергілікті коэффициент $\alpha_\pi + \gamma_x$ және $x^* = 4,314$ нүктесі. Сұр аймақ $x \leq 1$ шартын көрсетеді; $x > 1$ аймағы басқа топологияны талап етеді

Есептеу модельдерін тексеру нәтижелері 3-кестеде жинақталған. Келтірілген өте кіші айырмалар есептеу процедурасына қатысты және бұйым сипаттамаларының белгісіздігі болып табылмайды.

3 кесте – Есептеу модельдерін тексеру нәтижелері

Тексеру	Нәтиже	Критерий немесе қолданылу шегі
Пластина шегі, $k = 0$	$\Omega_0 = 10,2158262299$	[5; 15], [8; 12], [10; 11] аралықтарында түбір; бисекциямен айырма $\approx 10^{-12}$
Созу басым шек	$\Omega/k = 2,4171$ ($k = 200$)	Асимптоталық 2,4048 мәнінен $\approx 0,51$ % айырма
Акустикалық шығынсыз шек	$\Gamma \rightarrow j\omega/c$; $Z_c \rightarrow \rho_0 c / (\pi R^2)$	$\exp(j\omega t)$ және көлемдік шығын келісімі
Бірдей радиусты түтіктер	$T(L_1)T(L_2) = T(L_1 + L_2)$; берілістердің ең үлкен салыстырмалы айырмасы $6,8 \cdot 10^{-14}$	0,01 Гц – 1 МГц есептік торы
Бессель функцияларын масштабтау	Берілістердің ең үлкен салыстырмалы айырмасы $1,4 \cdot 10^{-13}$	Сол тор, толық зонд тізбегі
Бірінші жолақ шекарасы	Тор мен рұқсатты өзгерткенде $\Delta B < 5 \cdot 10^{-6}$ Гц	Үш сценарий, 1001–16001 түйін
Екі буынды каскад шыңы	Полином туындысы мен тікелей кешенді беріліс келіседі	2-кестенің 2–5-жолдары; шың жеке буыннан көшірілмейді
95 % квантиль	2,213966 және 0,949607 дБ	Детерминделген интегралдау; Монте-Карло нәтижесін бақылау
<i>Ескертпе – авторлардың есептеулері.</i>		

Белгісіздік сценарийлері

А сценарийі паспорттық ± 2 дБ шегіне тікбұрышты таралу жорамалын қосады; өндіруші бұл ықтималдық заңын бекітпеген. В сценарийі түзетілген эталон қалдығына гипотетикалық $U_{\text{ref}} = 0,30$ дБ ($k = 2$) мәнін қабылдайды. Екі бюджет те қол жеткізілген стенд дәлдігі емес (4-кесте, 6-сурет).

4 кесте – Аддитивті дБ моделі үшін шартты белгісіздік бюджеті

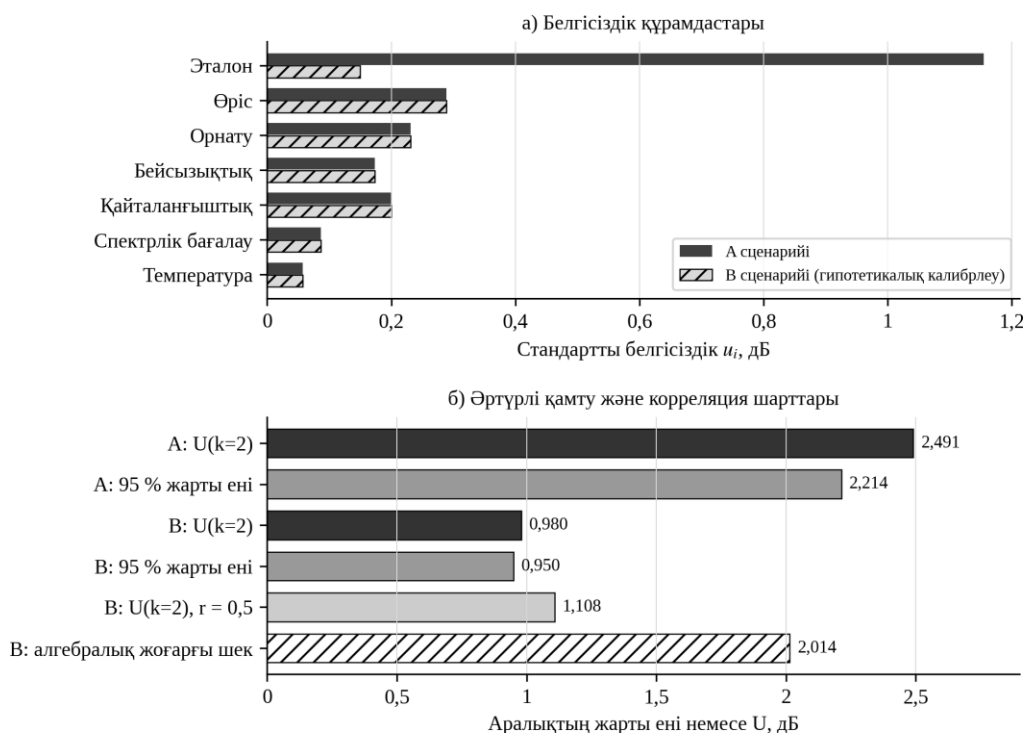
Құрамдас	Қабылданған кіріс және таралу	А сценарийі, u_i , дБ	В сценарийі, u_i , дБ	Негізі
Эталонның жиіліктік жауабы	А: $\pm 2,00$, тікбұрышты; В: қалыпты, $\sigma = 0,15$	1,1547	0,1500	[11] шегі + таралу жорамалы; В – гипотетикалық калибрлеу
Акустикалық өріс	$\pm 0,50$, тікбұрышты	0,2887	0,2887	Стенд деректерімен расталмаған сценарий
Орнату	$\pm 0,40$, тікбұрышты	0,2309	0,2309	Сценарий
Тракт бейсыздықтығы	$\pm 0,30$, тікбұрышты	0,1732	0,1732	Сценарий; тракт паспорты ұсынылмаған
Қайталанғыштық	қалыпты, $\sigma = 0,20$	0,2000	0,2000	Нәтиженің стандартты белгісіздігі ретінде жорамал
Спектрлік бағалау және кванттау	$\pm 0,15$, тікбұрышты	0,0866	0,0866	Сценарий
Температуралық әсер	$\pm 0,10$, тікбұрышты	0,0577	0,0577	[11]: $-0,01$ дБ/°C және ± 10 °C сценарийі

Құрамдас	Қабылданған кіріс және таралу	А сценарийі, u_i , дБ	В сценарийі, u_i , дБ	Негізі
u_c	тәуелсіз құрамдастар	1,2453	0,4899	(17)
$U(k=2)$	кеңейтілген белгісіздік	2,4906	0,9798	$2u_c$
$q_{0,95}$	95 % симметриялы аралықтың жарты ені	2,2140	0,9496	Таралуларды тарату [15]
Ескертпе – авторлардың есептеулері.				

$U(k=2)$ шектерінің нақты қамтуы А және В үшін 98,253 % және 95,746 %. Сондықтан оларды 95 % аралықтың жарты енімен бірдей « U_{95} » деп белгілеуге болмайды. Монте-Карло квантильдерінің тізбектер арасындағы стандартты ауытқуы 0,00117 және 0,00069 дБ; бұл өлшеу белгісіздігі емес, есептеудің сандық шашырауы.

В бюджетінде $u_A = s/\sqrt{n} = 0,20$ дБ бекітіліп, В типті бағалауларға $v_i = \infty$ берілсе, $n = 2, 4, 10$ үшін $v_{\text{eff}} = 36, 108, 324$. $n = 2$ кезінде жуық $U_{95} = 0,994$ дБ, яғни бұл модельде 1 дБ шегі үшін $n \geq 3$ шарты міндетті емес. Бұл бір деректер жиынында n -ді арттыру тәжірибесі емес. В типті бағалаулардың сенімділігін төмендету нәтижені өзгертеді: $n = 2$ және басқа В типті құрамдастар үшін $v = 2$ болғанда $v_{\text{ref}} = \infty$ үшін $U_{95} = 1,124$ дБ, ал $v_{\text{ref}} = 2$ үшін 1,131 дБ. Тәуелсіз құрамдастарға арналған Уэлч–Саттертуэйт жуықтауы алдын ала бекітілген таралулар моделімен бірдей емес.

Өріс пен орнату құрамдастары арасындағы корреляция $r = 0,3; 0,5; 1$ болса, В үшін $U(k=2) = 1,058; 1,108; 1,222$ дБ. Барлық В типті құрамдастар толық корреляцияланған деп алынғанда 2,014 дБ – алгебралық жоғарғы шек; әртүрлі таралуларға бір мезгілде Пирсонның $r = 1$ коэффициентін беру іс жүзінде жүзеге асатын бірлескен модель емес.



6 сурет – а – А және В сценарийлерінің стандартты белгісіздік құрамдастары; б – $U(k=2)$, 95 % аралықтың жарты ені, өріс–орнату корреляциясының әсері және алгебралық жоғарғы баға. В сценарийіндегі эталон калибрлеуі гипотетикалық

Қолданылу шектері және валидацияға қойылатын талаптар

Есеп 20 °C маңындағы ауаға қатысты; жоғары температурада, агрессивті ортада немесе дірілде жұмысқа қабілеттілік бұл жұмыста расталмайды. Қуыстағы жылу алмасу, мембрананың кері жүктемесі және нақты электроника бағаланбаған. Эксперименттік валидация үшін нақты геометрия, қорғаныш тор, жылулық шекаралар, нормаланған кешенді АЖС, эталон түзетулері және орта жағдайлары қажет. Өлшеу диапазоны күтілетін резонансты қамтуы немесе оған дейінгі идентификация негізделуі тиіс; 150 кГц жоғарғы шегі ≥ 195 кГц резонансты бақылауға жеткіліксіз.

Температуралық тексеру үшін жұпталған T , R өлшемдері, қыздыру–салқындату циклдері, ток, корек кернеуі, тұрақтану уақыты және кристалл мен корпус температуралары қажет. Жеке өлшемнің шашырауы орта мәннің белгісіздігінен ажыратылуы, ал қайталау саны мақсатты белгісіздікке сай таңдалуы тиіс.

Қорытынды.

1. Бір ± 1 дБ жолақ шекарасы меншікті жиілік f_0 пен демпфирлеу ζ -ны бірге анықтамайды: ζ он есе өзгергенде B/f_0 небәрі $\approx 1,13$ %-ға өзгереді. $f_0 \geq 195$ кГц бағасы тек расталған $B \geq 65$ кГц және қабылданған демпфирлеу аралығы жағдайында жарамды.

2. Қабылданған мойын–қуыс геометриясы үшін толық каскад 25,728 кГц-те шың және $B = 7,981$ кГц береді, ал 20 мм зонды бар толық тізбектің жолағы $B = 0,981$ кГц. Бұл нақты құрылғының расталған сипаттамалары емес, модель жорамалдарының салдары.

3. $E_p = 6$ В, $x \leq 1$ топологиясы жергілікті өтемдеудің 13,846 %-ын ғана береді; $x^* = 4,314$ мәні тек бірінші туындыны нөлге келтіреді және басқа схеманы талап етеді.

4. Шартты бюджеттер үшін $U(k=2) = 2,491$ және 0,980 дБ, ал 95 % аралықтың жарты ендері 2,214 және 0,950 дБ; бұл шамаларды бір-бірімен алмастыруға болмайды. Нақты сенсордың ± 1 дБ дәлдігі бұл жұмыста мәлімделмейді.

5. Кейінгі зерттеудің бағыты – ұсынылған талаптарға сай нақты геометрия бойынша кешенді АЖС-ты, жұпталған T , R деректерін және эталонның жеке калибрлеуін алу, содан кейін модельдерді тәуелсіз эксперименттік валидациялау.

Қаржыландыру. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (2025–2027 жж., грант № AP26196431).

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

1. Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: Design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>

2. Wu, C., Fang, X., Kang, Q., Fang, Z., Wu, J., He, H., Zhang, D., Zhao, L., Tian, B., Maeda, R., & Jiang, Z. (2023). Exploring the nonlinear piezoresistive effect of 4H-SiC and developing MEMS pressure sensors for extreme environments. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00496-1>

3. Basov, M. (2020). High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, Article 111705. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111705>

4. Kutin, J., & Svete, A. (2018). On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes. *Measurement Science and Technology*, 29(12), Article 125108. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aae884>

5. Bergh, H., & Tjeldeman, H. (1965). *Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems* (Report NLR-TR F.238). National Aero- and Astronautical Research Institute (NLR).

6. Гимадиев, А. Г., Быстров, Н. Д., & Дягилева, Е. С. (2018). Анализ схем коррекции динамических характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газотурбинных двигателях. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 17(3), 56–67. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-3-56-67>
7. Hurst, A. M., Olsen, T. R., Goodman, S., VanDeWeert, J., & Shang, T. (2014). An experimental frequency response characterization of MEMS piezoresistive pressure transducers. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014* (Vol. 6, Paper GT2014-27159, V006T06A031). ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2014-27159>
8. Farnan, E. L., & Juliano, T. J. (2025). Dynamic response of line-cavity pressure-measurement systems. *Measurement Science and Technology*, 36(8), Article 085301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adebf4>
9. Михайлов, П. Г., Уалиев, Ж. Р., Кабдолдина, А. О., Пасхин, И. Н., & Светлов, А. В. (2025). Методы и средства контроля метрологических характеристик преобразователей физических величин. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, (4), 77–87. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-4-9>
10. American Society of Mechanical Engineers. (2009). *Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer* (ASME V&V 20-2009, reaffirmed 2021).
11. Brüel & Kjær. (n.d.). *Condenser microphone cartridges* (Product data BP 0100). <https://www.bksv.com/media/doc/bp0100.pdf>
12. Kanda, Y. (1982). A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(1), 64–70. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1982.20659>
13. Ломтев, Е. А., Михайлов, П. Г., Аналиева, А. У., & Сазонов, А. О. (2015). Многофункциональные датчики физических величин. Принципы построения, модели и конструкции. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, 2(12), 57–65. https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/imuk_2_12_.pdf
14. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
15. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method* (JCGM 101:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM101-2008>

References

1. Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: Design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>
2. Wu, C., Fang, X., Kang, Q., Fang, Z., Wu, J., He, H., Zhang, D., Zhao, L., Tian, B., Maeda, R., & Jiang, Z. (2023). Exploring the nonlinear piezoresistive effect of 4H-SiC and developing MEMS pressure sensors for extreme environments. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, Article 41. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00496-1>
3. Basov, M. (2020). High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, Article 111705. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111705>
4. Kutin, J., & Svete, A. (2018). On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes. *Measurement Science and Technology*, 29(12), Article 125108. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aae884>

5. Bergh, H., & Tijdeman, H. (1965). *Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems* (Report NLR-TR F.238). National Aero- and Astronautical Research Institute (NLR).
6. Gimadiev, A. G., Bystrov, N. D., & Dyagileva, E. S. (2018). Analiz skhem korrektsii dinamicheskikh kharakteristik akusticheskikh zondov dlya izmereniya pul'satsii davleniya v gazoturbinnnykh dvigatelyakh [Analysis of correction schemes for dynamic characteristics of acoustic probes for measuring pressure pulsations in gas turbine engines]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 17(3), 56–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-3-56-67>
7. Hurst, A. M., Olsen, T. R., Goodman, S., VanDeWeert, J., & Shang, T. (2014). An experimental frequency response characterization of MEMS piezoresistive pressure transducers. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014* (Vol. 6, Paper GT2014-27159, V006T06A031). ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2014-27159>
8. Farnan, E. L., & Juliano, T. J. (2025). Dynamic response of line-cavity pressure-measurement systems. *Measurement Science and Technology*, 36(8), Article 085301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adebf4>
9. Mikhailov, P. G., Ualiev, Zh. R., Kabdoldina, A. O., Pashkin, I. N., & Svetlov, A. V. (2025). Metody i sredstva kontrolya metrologicheskikh kharakteristik preobrazovatelei fizicheskikh velichin [Methods and means of control of metrological characteristics of physical quantity converters]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, (4), 77–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-4-9>
10. American Society of Mechanical Engineers. (2009). *Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer* (ASME V&V 20-2009, reaffirmed 2021).
11. Brüel & Kjær. (n.d.). *Condenser microphone cartridges* (Product data BP 0100). <https://www.bksv.com/media/doc/bp0100.pdf>
12. Kanda, Y. (1982). A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(1), 64–70. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1982.20659>
13. Lomtev, E. A., Mikhailov, P. G., Analieva, A. U., & Sazonov, A. O. (2015). Mnogofunktsional'nye datchiki fizicheskikh velichin. Printsipy postroeniya, modeli i konstruksii [Multifunctional sensors of physical quantities: Construction principles, models and designs]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2(12), 57–65. https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/imuk_2_12_.pdf
14. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
15. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method* (JCGM 101:2008). <https://doi.org/10.59161/JCGM101-2008>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. При измерении пульсаций давления в авиационной технике чувствительный элемент, соединительные каналы, полости корпуса и схема питания совместно влияют на результат. Разделение этих влияний необходимо при проектировании полупроводниковых сенсоров для экстремальных условий. Цель работы — при явно заданных допущениях рассчитать частотный отклик, локальную

температурную компенсацию и распространение неопределённости, а также установить ограничения идентификации параметров по доступным характеристикам. Использованы уравнение тонкой пластины, динамические звенья второго порядка, матрицы передачи трубок с вязкими и тепловыми потерями и аддитивная модель неопределённости в децибелах. Расчёты проверены предельными переходами, независимыми численными выражениями и методом Монте-Карло. Показано, что одна граница полосы не определяет одновременно собственную частоту и демпфирование. Нижняя оценка собственной частоты около 195 кГц получается только при принятии расчётной полосы 65 кГц и интервала демпфирования 0,01–0,10. В сценарии с диаметром горловины 0,8 мм, длиной 1 мм и объёмом полости 1 мм³ полный каскад даёт акустический пик 25,728 кГц и полосу 7,981 кГц. При добавлении зонда длиной 20 мм и радиусом 0,40 мм полоса этой цепи составляет 0,981 кГц. Тепловые потери в полости и обратная акустическая нагрузка мембраны в данный расчёт не включены. Для принятых температурных коэффициентов и питания 6 В ограниченная топология обеспечивает 13,846 процента требуемой локальной компенсации; обнуление первой производной при другом коэффициенте не доказывает стабильность во всём диапазоне температур. Для двух условных бюджетов расширенная неопределённость с коэффициентом охвата два равна 2,491 и 0,980 дБ, а полуширина 95-процентного интервала охвата — 2,214 и 0,950 дБ. Результаты не представляются как новая экспериментальная валидация или подтверждённая точность конкретного прибора. Работа даёт основу для проверки модельных допущений и построения последующего измерительного протокола.

Ключевые слова: пьезорезистивный сенсор, частотный отклик, резонанс полости, акустический зонд, идентификация параметров, температурная компенсация, неопределённость измерений, численная верификация.

INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR SENSORS DESIGNED TO OPERATE IN EXTREME CONDITIONS

Abstract. Pressure-pulsation measurements in aircraft testing depend on the sensing element, connecting passages, housing cavities and supply circuit. This study separates their effects on frequency response, local temperature compensation and uncertainty under explicit assumptions relevant to semiconductor sensors intended for extreme conditions. Thin-plate and second-order models, viscothermal tube transfer matrices and an additive decibel uncertainty model are checked through limiting cases, independent calculations and Monte Carlo propagation. A single bandwidth boundary cannot jointly identify natural frequency and damping. A lower frequency estimate near 195 kHz requires an assumed 65 kHz bandwidth and damping of 0.01–0.10. For a neck 0.8 mm in diameter and 1 mm long, with a 1 mm³ cavity, the complete cascade has a peak at 25.728 kHz and a bandwidth of 7.981 kHz. A 20 mm probe of radius 0.40 mm reduces the bandwidth to 0.981 kHz. Cavity thermal losses and diaphragm acoustic back-loading are neglected. With assumed temperature coefficients and a 6 V supply, the restricted topology provides 13.846 percent of the required local compensation; zeroing the first derivative does not establish stability across the temperature range. Two illustrative budgets give expanded uncertainties of 2.491 and 0.980 dB for a coverage factor of two, and 95 percent interval half-widths of 2.214 and 0.950 dB. The results are conditional computational examples, without new experimental validation or verified accuracy claims for a particular sensor. The work provides a basis for testing the model assumptions and for designing a subsequent measurement protocol.

Keywords: piezoresistive sensor, frequency response, cavity resonance, acoustic probe, parameter identification, temperature compensation, measurement uncertainty, numerical verification.

Авторлар туралы мәліметтер

Уалиев Ж. Р.	PhD, Сандық техника және технологиялар институтының зерттеуші-профессоры, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: zh-u@mail.ru
Михайлов П. Г.	Техника ғылымдарының докторы, Қазақстан инновациялық және телекоммуникациялық университетінің профессоры, Орал қ., Қазақстан. E-mail: pit_mix@mail.ru
Ақжолова А. И.	Сандық техника және технологиялар институтының ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: asel_zhalyn@mail.ru.
Кабдолдина А. О.	PhD, Қ.И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің профессоры, Алматы қ., Қазақстан. E-mail: kao_assem@mail.ru
Бектилезов А. Ю.	Ph.D., «Көлік инженериясы және логистика» мектебінің «Көлік» бағыты бойынша қауымдастырылған профессоры, «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, E-mail: a.bektilevov@satbayev.university

Сведения об авторах

Уалиев Ж. Р.	PhD, профессор-исследователь Института цифровой техники и технологий, г. Алматы, Казахстан. E-mail: zh-u@mail.ru
Михайлов П. Г.	Доктор технических наук, профессор Казахского университета инновационных и телекоммуникационных систем, г. Уральск, Казахстан. E-mail: pit_mix@mail.ru
Ақжолова А. И.	Институт цифровой техники и технологий. г. Алматы, Казахстан. E-mail: asel_zhalyn@mail.ru.
Кабдолдина А. О.	PhD, профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан. E-mail: kao_assem@mail.ru
Бектилезов А. Ю.	Ph.D., ассоц. профессор направления «Транспорт» школы «Транспортная инженерия и логистика» НАО Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.bektilevov@satbayev.university

Information about the authors

Ualiyev Zh. R.	PhD, Research Professor, Institute of Digital Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan. E-mail: zh-u@mail.ru
Mikhailov P. G.	Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakhstan University of Innovation and Telecommunication Systems, Uralsk, Kazakhstan. E-mail: pit_mix@mail.ru
Akzholova A. I.	Institute of Digital Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan. E-mail: asel_zhalyn@mail.ru.
Kabdoldina A. O.	PhD, Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: kao_assem@mail.ru
Bektilevov A. Yu.	Ph.D., Associate Professor of the direction "Transport" of the school "Transport Engineering and Logistics" of the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, E-mail: a.bektilevov@satbayev.university