

## АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЕТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

Грачев Н.Н.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия  
e-mail: nngrachev@mail.ru*

Проведены исследования по определению скоростного напора, действующего на летательные аппараты в верхних слоях атмосферы, и анализу стабильности параметров измерителя и его погрешностей с использованием методики вероятностного исследования стабильности выходной характеристики мембранно-емкостного преобразователя скоростного напора. В процессе исследований учтен случайный характер отклонений конструктивных и электрофизических параметров под действием дестабилизирующих факторов и в условиях серийного производства. Определена оптимальная частота электромеханического преобразования. Получены расчётные зависимости передаточной функции преобразователя для оценки её стабильности и для выбора оптимальной частоты электромеханического преобразования.

*Ключевые слова:* скоростной напор, электромеханический преобразователь, стабильность параметров.

В практике научных исследований при решении прикладных задач экспериментальной физики часто возникает необходимость разработки, создания и практического использования специализированных измерительных приборов, обеспечивающих заданную точность и надёжность систем измерений, контроля и управления [1—3, 5, 6].

В практике измерений малых, медленно меняющихся величин, например таких, как параметры газовых потоков малой плотности, действующих на летательный аппарат в верхних слоях атмосферы [4, 7], при измерении аэродинамических сил, действующих на летательный аппарат в разреженной газовой среде, электрические сигналы, поступающие с первичных преобразователей, часто имеют низкий уровень, иногда меньший уровня шумов и помех на несколько порядков. Наиболее приемлемым способом измерений таких процессов при достижении заданных метрологических характеристик является электромеханическая модуляция (прерывание) набегающего потока газа с помощью прерывателей, позволяющая получать требуемый большой коэффициент усиления сигнала переменного тока, легко отделять сигнал модулированного пучка от немодулированного сигнала фона, даже

если плотность пучка ниже плотности фона, и использовать накопление сигнала, повышающее отношение сигнал-шум на выходе преобразователя [8, 9].

Необходимо отметить, что способы повышения чувствительности и отношения сигнал-шум первичных преобразователей в каждом конкретном случае имеют свои принципиальные и практические ограничения, общими же задачами являются задачи обеспечения стабильности выходной характеристики преобразователя с учётом технологических разбросов, конструктивных и электрофизических параметров, а также влияния дестабилизирующих факторов [10, 12—17].

В датчиках с амплитудной модуляцией преобразователь настолько сильно связан с измерительной схемой, что описание выходного сигнала или передаточной функции невозможно без учета их взаимного влияния. Для измерений скоростного напора разреженного потока газа при полетах в верхних слоях атмосферы был разработан и исследован мембранно-емкостный преобразователь, позволяющий измерять скоростной напор свободномолекулярного потока газа в диапазоне  $4 \cdot 10^{-4}$ — $4 \cdot 10^{-1}$  Па [18, 20]. Преобразователь выполнен на базе мемб-

ранно-емкостных датчиков, чувствительный элемент которых представляет собой натянутую по контуру тонкую металлическую мембрану. Перед датчиком установлен прерыватель набегающего потока в виде диска с отверстиями. Применение метода емкостного преобразователя в цепях постоянного тока и выбор оптимальной частоты электро-механического преобразования позволили регистрировать изменения ёмкости датчика до  $\Delta C \sim 1 \cdot 10^{-6}$  пФ при поляризующем напряжении  $U_0 = 180$  В и статической ёмкости датчиков  $C_0 \sim 40$  пФ (рис. 1).

В общем случае для определения оптимальной частоты электро-механического преобразования различных физических величин и обеспечения заданной точности и стабильности метрологических характеристик предлагается использовать метод вероятностного исследования стабильности выходной характеристики преобразователя. В основу исследования стабильности характеристики положена методика вероятностного исследования стабильности, обеспечивающая учет случайного характера отклонений конструктивных и электрофизических параметров под действием дестабилизирующих факторов и в условиях серийного производства. Метод моментов, на котором базируется данная методика, позволяет при небольшом объеме вычислений получить необходимую точность.

Анализ стабильности выходной характеристики преобразователя

$$y = f(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n) \tag{1}$$

предусматривает описание параметров и характеристик линейными случайными функциями внешних факторов вида

$$q_i = q_{i0}(1 + \delta_{qi} + \alpha_i T), \tag{2}$$

где  $q_{i0}$  — номинальное значение параметра элемента преобразователя;

$\delta_{qi}$  — относительное значение технологического отклонения параметра  $q_i$ ;

$\alpha_i$  — температурный коэффициент параметра  $q_i$ ;

$T$  — температура окружающей среды.

В этом случае стабильность можно оценить через допуск, рассчитанный при наихудшем сочетании дестабилизирующих факторов, которые наиболее полно характеризуют стабильность:

$$\begin{aligned} \Delta_y^b &= \max[m^b(\Delta y) + E^b \sigma^b(y)]; \\ \Delta_y^H &= \min[m^H(\Delta y) - E^H \sigma^H(y)], \end{aligned} \tag{3}$$

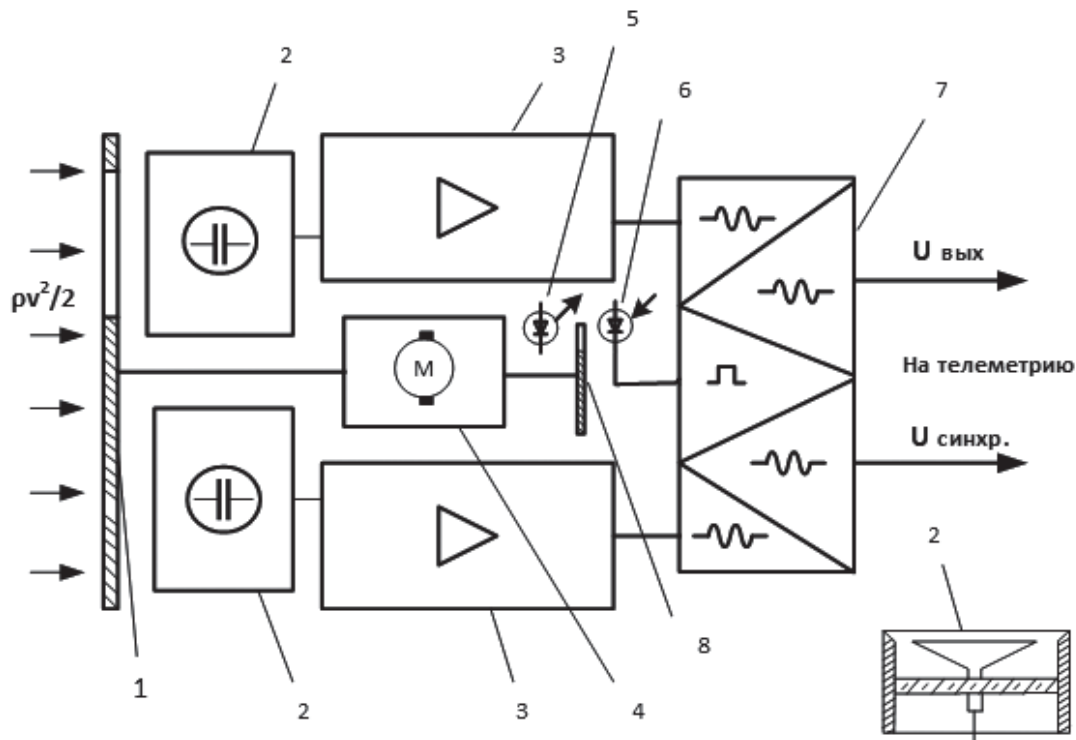


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя скоростного напора: 1 — прерыватель потока разреженного газа; 2 — преобразователь мембранно-емкостного типа; 3 — предварительный усилитель; 4 — двигатель модулятора потока; 5 — светодиод; 6 — фотодиод; 7 — преобразователь сигналов; 8 — прерыватель светового потока для создания синхроимпульсов

где

$$m(\Delta y) = m(y) - y_0; E^b = \frac{y^b - m(y)}{\sigma(y)}; E^H = \frac{m(y) - y^H}{\sigma(y)};$$

$$\Delta_y^b = m(\Delta y) + E^b \sigma(y); \Delta_y^H = m(\Delta y) + E^H \sigma(y).$$

Если использовать разложение функции  $f$  в ряд Тейлора и ограничиться линейными членами разложения, то выражения для вычисления  $m(\Delta y)$  и  $D(\Delta y)$  отклонения выходной характеристики от её номинального значения представляются в виде

$$m(\Delta y) = \sum_{i=1}^n A_i m(\Delta q_i); \tag{4}$$

$$D(\Delta y) = \sum_{i=1}^n A_i^2 D(\Delta q_i) + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i < j}}^n [A_i A_j \sqrt{D(\Delta q_i) D(\Delta q_j)} r_{ij}], \tag{5}$$

где  $A_i = \left( \frac{\partial y}{\partial q_i} \right)_{q_i=q_0}$  — функция абсолютной чувстви-

тельности выходной характеристики  $y$  к изменению параметра  $q_i$ ;  $r_{ij}$  — коэффициент корреляции между отклонениями  $i$ -го и  $j$ -го параметров;  $m(\Delta q_i)$ ,  $D(\Delta q_i)$  — математическое ожидание и дисперсия отклонений параметра  $q_i$ .

С учетом выражения (1) формулы (4), (5) принимают вид:

$$m(\Delta y) = m^{mex}(\Delta y) + Tm(\alpha_y), \tag{6}$$

где  $m^{mex}(\Delta y) = \sum_{i=1}^n B_i m(\delta_j^{mex}); m(\alpha_i) = \sum_{i=1}^n B_i m(\alpha_i);$

$$D(\Delta y) = D^{mex}(\Delta y) + T^2 D(\alpha_y), \tag{7}$$

где

$$D^{mex}(\Delta y) = \sum_{i=1}^n B_i^2 D(\delta_i^{mex}) + 2 \sum_{i>j}^n B_i B_j \sqrt{D(\delta_i^{mex}) D(\delta_j^{mex})} r_{ij}^{mex}; \tag{8}$$

$$D(\alpha_y) = \sum_{i=1}^n B_i^2 D(\alpha_i) + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i > j}}^n [B_i B_j \sqrt{D(\alpha_i) D(\alpha_j)} r_{ij}^\alpha].$$

Для расчета допусков необходимо знать чувствительность выходных характеристик к параметрам. В случае, когда описание преобразователя задано в виде передаточной функции,

$$W(j\omega) = K(\omega) e^{j\Psi(\omega)}, \tag{9}$$

где  $K(\omega)$  — амплитудно-частотная характеристика;  $\Psi(\omega)$  — фазочастотная характеристика.

Функцию чувствительности удобно определить методом совмещенной математической модели. Определяются следующие функции чувствительности:  $B_{q_i}^{\Lambda(\omega)}$  — чувствительность амплитудной характеристики, измеренной в дБ;

$\Lambda(\omega) = 20 \lg K(\omega)$  — логарифмическая АЧХ;

$B_{q_i}^{\Psi(\omega)}$  — чувствительность фазовой характеристики, градусы;

$$B_{q_i}^{\Lambda(\omega)} = 8,6858 \frac{\partial K(\omega)}{\partial q_i} q_{i0} \frac{1}{K(\omega)};$$

$$B_{q_i}^{\Psi(\omega)} = \frac{\partial \Psi(\omega)}{\partial q_i} q_{i0}. \tag{10}$$

Для определения  $\frac{\partial K(\omega)}{\partial q_i}$  и  $\frac{\partial \Psi(\omega)}{\partial q_i}$  необходимо

воспользоваться следующими соотношениями:

$$W(j\omega) = W_D + jW_M; K = \sqrt{W_D^2 + W_M^2};$$

$$\Psi = \arctg \frac{W_M}{W_D} \pm \kappa\pi; \tag{11}$$

$$\frac{\partial K}{\partial q_i} = \frac{W_D W_D' + W_M W_M'}{K}; \frac{\partial \Psi}{\partial q_i} = \frac{W_M' W_D + W_D' W_M}{K}, \tag{12}$$

где  $W_D'$ ,  $W_M'$  — производные по параметру  $q_i$  действительной и мнимой частей передаточной функции.

Для заданной передаточной функции преобразователя в виде

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}, p = j\omega, m \leq n, \tag{13}$$

имеем

$$W_D = \frac{b_D a_d + b_M a_m}{a_D^2 + a_M^2}; W_M = \frac{a_D b_M - b_D a_m}{a_D^2 + a_M^2}, \quad (14)$$

где

$$b_D = \sum_{r=1}^{\frac{m}{2}+1} b_{2r-1} (-1)^{r+1} \omega^{2r-2}; b_M = \sum_{r=1}^{\frac{m}{2}} b_{2r} (-1)^{r+1} \omega^{2r-1};$$

$$a_D = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}+1} a_{2i-1} (-1)^{i+1} \omega^{2i-2}; a_M = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} a_{2i} (-1)^{i+1} \omega^{2i-1}.$$

Для определения производных от  $W_D$  и  $W_M$  вводятся обозначения:

$$Z_1(j\omega) = \frac{1}{a_D + ja_M} \text{ — первая вспомогательная}$$

переменная, где  $Z_{1D} = \frac{a_D}{a_D^2 + a_M^2}; Z_{1M} = \frac{a_M}{a_D^2 + a_M^2}$  —

её действительная и мнимая части;

$Z_2(j\omega) = Z_1(j\omega)W(j\omega)$  — вторая вспомогательная переменная, где  $Z_{2D} = W_D Z_{1D} - W_M Z_{1M}; Z_{2M} = W_M Z_{1D} + W_D Z_{1M}$  — её действительная и мнимая части.

При этом

$$W'_D = b'_D Z_{1D} - b'_M Z_{1M} - a'_D Z_{2D} + a'_M Z_{2M},$$

$$W'_M = b'_M Z_{1D} + b'_D Z_{1M} - a'_D Z_{2M} - a'_M Z_{2D},$$

где

$$b'_D = \sum_{r=1}^{\frac{m}{2}-1} b'_{2r-1} (-1)^{r+1} \omega^{2r-2}; b'_M = \sum_{r=1}^{\frac{m}{2}} b'_{2r} (-1)^{r+1} \omega^{2r-1};$$

$$a'_D = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}-1} a'_{2i-1} (-1)^{i+1} \omega^{2i-2}; a'_M = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} a'_{2i} (-1)^{i+1} \omega^{2i-1}.$$

Производные  $b' = \frac{\partial B}{\partial q}$  и  $a' = \frac{\partial a}{\partial q}$  определяются

непосредственным дифференцированием коэффициентов  $a$  и  $b$ , заданных в общем виде. Особенность метода совмещенной модели, которым определяется функция абсолютной чувствительности, заключается во введении вспомогательных переменных  $Z_1$

и  $Z_2$ , многократном их использовании в процессе вычисления функций абсолютной чувствительности по различным параметрам.

Для анализа стабильности передаточной характеристики мембранно-емкостного преобразователя и выбора оптимальной частоты прерывания потока [19] были разработаны программы расчета номинальных значений АЧХ и ФЧХ преобразователя, чувствительности АЧХ и ФЧХ к заданным параметрам и на основе анализа частотных зависимостей коэффициентов влияния параметров преобразователя на его передаточную характеристику разработана программа расчёта математических ожиданий и дисперсии технологических разбросов и температурных коэффициентов, а также разработана программа для вычисления допусков на АЧХ и ФЧХ преобразователя по известным математическим ожиданиям и дисперсиям технологических разбросов и температурных коэффициентов. Кроме этого, были вычислены зависимости передаточной характеристики преобразователя от температуры на рабочей частоте прерывателя потока 225 Гц и от изменения температуры только мембраны преобразователя.

Уравнение мембранно-емкостного преобразователя скоростного напора

$$\frac{U}{F} = j\omega R / \left[ \frac{(\xi - Y_0)(m+n)}{U_0 C_0 mn} \left[ (j\omega)^2 \frac{1}{3} \rho t S \frac{mn}{m+n} + (j\omega) \frac{Dmn}{m+n} + 1 \right] (j\omega RC_0 + 1) - \frac{U_0}{\xi - Y_0} \right] \quad (15)$$

приводим к виду:

$$W(p) = \frac{Bp}{A_4 p^3 + A_3 p^2 + A_2 + A_1}; \quad (16)$$

$$\frac{U}{F} = j\omega R / \left[ (j\omega)^3 \frac{\xi - Y_0}{U_0} MR + (j\omega)^2 \left[ \frac{\xi - Y_0}{U_0} RD + \frac{\xi - Y_0}{U_0 C_0} M \right] + (j\omega) \left[ \frac{(\xi - Y_0)(m+n)R}{U_0 mn} + \frac{\xi - Y_0}{U_0 C_0} D \right] + \left[ \frac{(\xi - Y_0)(m+n)}{U_0 C_0 mn} - \frac{U_0}{\xi - Y_0} \right] \right], \quad (17)$$

где

$$B = R; A_4 = \frac{\xi - Y_0}{U_0} \frac{1}{3} R \rho t \frac{\pi d^2}{4}; A_3 = \frac{\xi - Y_0}{U_0} \left( RD + \frac{\pi d^2 \rho t}{12 C_0} \right);$$

$$A_2 = \frac{\xi - Y_0}{U_0} \left( \frac{R(m+n)}{mn} + \frac{D}{C_0} \right);$$

$$A_1 = \frac{(\xi - Y_0)(m+n)}{U_0 C_0 mn} - \frac{U_0}{\xi - Y_0}.$$

Здесь  $U$  — напряжение на выходе мембранно-емкостного преобразователя скоростного напора;  $F$  — давление набегающего скоростного потока;  $\xi$  — расстояние от центра мембраны до неподвижного электрода;  $Y_0$  — смещение центра мембраны;  $U_0$  — поляризующее напряжение;  $R$  — сопротивление поляризующего резистора;  $\rho$  — плотность материала мембраны;  $t$  — толщина мембраны;  $d$  — диаметр мембраны;  $D$  — механическое сопротивление, обусловленное вязким трением остаточного газа  $v$ ;  $C_0$  — статическая емкость преобразователя;  $m$  — гибкость закрепления мембраны ( $m = \frac{1}{2} \rho t \tau$ ,  $\tau$  — натяжение);  $n$  — гибкость подмембранного

объёма, обусловленная действием остаточного газовой выделения.

Номинальные значения параметров элементов, числовые характеристики законов распределения технологических разбросов и температурных коэффициентов представлены соответственно в табл. 1—3. Вероятность нахождения частотных характеристик в пределах поля допуска — 0,997. Температурный диапазон условий эксплуатации  $T^B = +150$  °C,  $T^H = -50$  °C.

Для исследования резонанса преобразователя была составлена программа, с помощью которой определено значение резонансной частоты с точностью 0,01% ( $f_p = 2595,72$  Гц). Результаты расчетов представлены на рис. 2—4.

**Выводы**

На основе представления передаточной функции электромеханического преобразователя в виде отношения полиномиальных многочленов и анализа функций абсолютной чувствительности к технологическим разбросам, конструктивным и электрофизическим параметрам, а также к влиянию дестабилизирующих факторов получены расчётные зависимости передаточной функции преобразователя для оценки её стабильности и выбора оптимальной частоты электромеханического преобразования.

Таблица 1

Номинальные значения параметров элементов мембранно-емкостного преобразователя

Параметр $q_i$	$R$ , МОм	$\xi$ , мкм	$Y_0$ , мкм	$U_0$ , В	$t$ , мкм	$d$ , мм	$v$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$C_0$ , пФ	$m$ , мкН/м	$n$ , мкН/м
Значение параметра	510,00	50,00	10,00	150,00	8,00	23,77	3,72	8,90	50,00	81,30	484,00

Таблица 2

Числовые характеристики законов распределений технологических разбросов

Параметр $q_i$	$R$ , МОм	$\xi$ , мкм	$Y_0$ , мкм	$U_0$ , В	$t$ , мкм	$d$ , мм	$v$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$C_0$ , пФ	$m$ , мкН/м	$n$ , мкН/м
$m^{tex}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sigma^{tex}$ , %	0,017	0,170	0,003	0,01	0,03	0,0007	0	0	0,053	0,01	0

Таблица 3

Числовые характеристики законов распределений температурных коэффициентов

Параметр $q_i$	$R$ , МОм	$\xi$ , мкм	$Y_0$ , мкм	$U_0$ , В	$t$ , мкм	$d$ , мм	$v$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$C_0$ , пФ	$m$ , мкН/м	$n$ , мкН/м
$m_\alpha$	0	12,9	12,9	0	12,9	12,9	0	0	0	14,0	0
$\sigma_\alpha$ , %	17,0	1,3	1,3	0	1,3	1,3	0	0	0	1,3	0

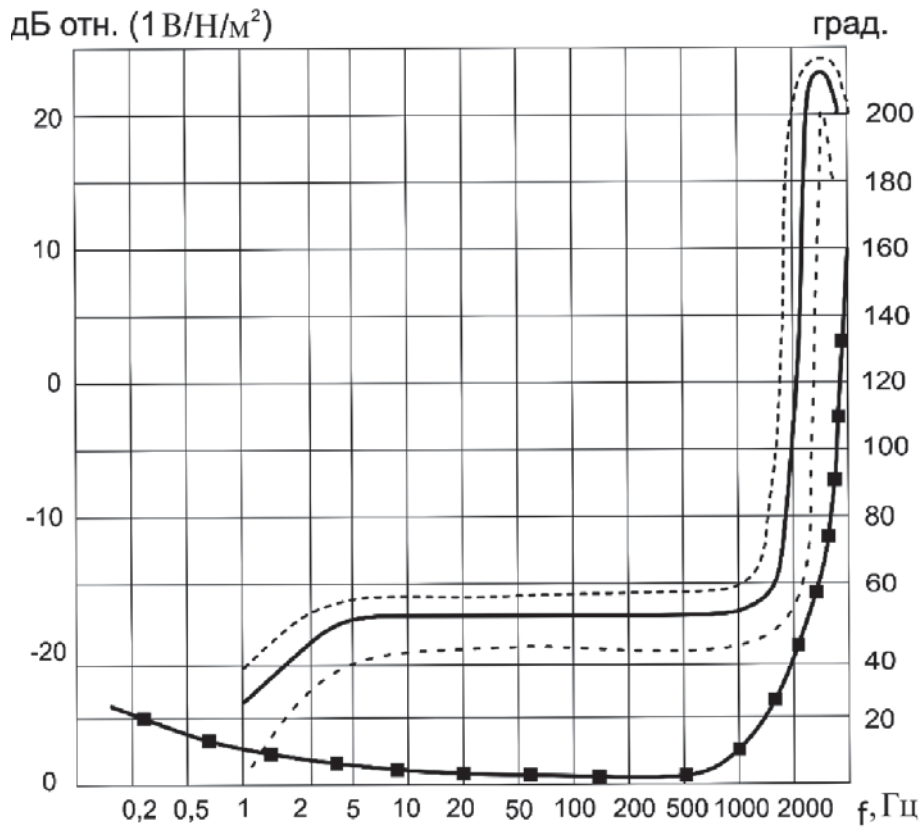


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика мембранно-емкостного преобразователя (—) и ее поле неустойчивости (- - -), фазо-частотная характеристика мембранно-емкостного преобразователя (—■—)

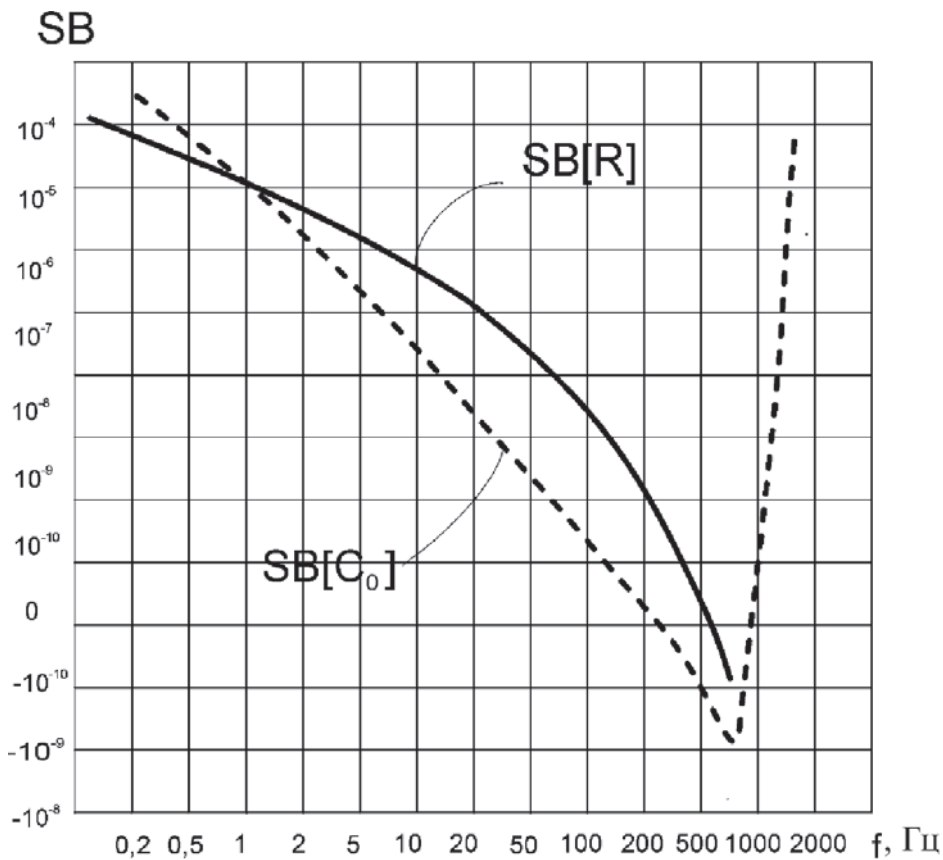


Рис. 3. Зависимости от частоты прерывания коэффициентов влияния параметров  $R$  и  $C_0$  на передаточную характеристику преобразователя

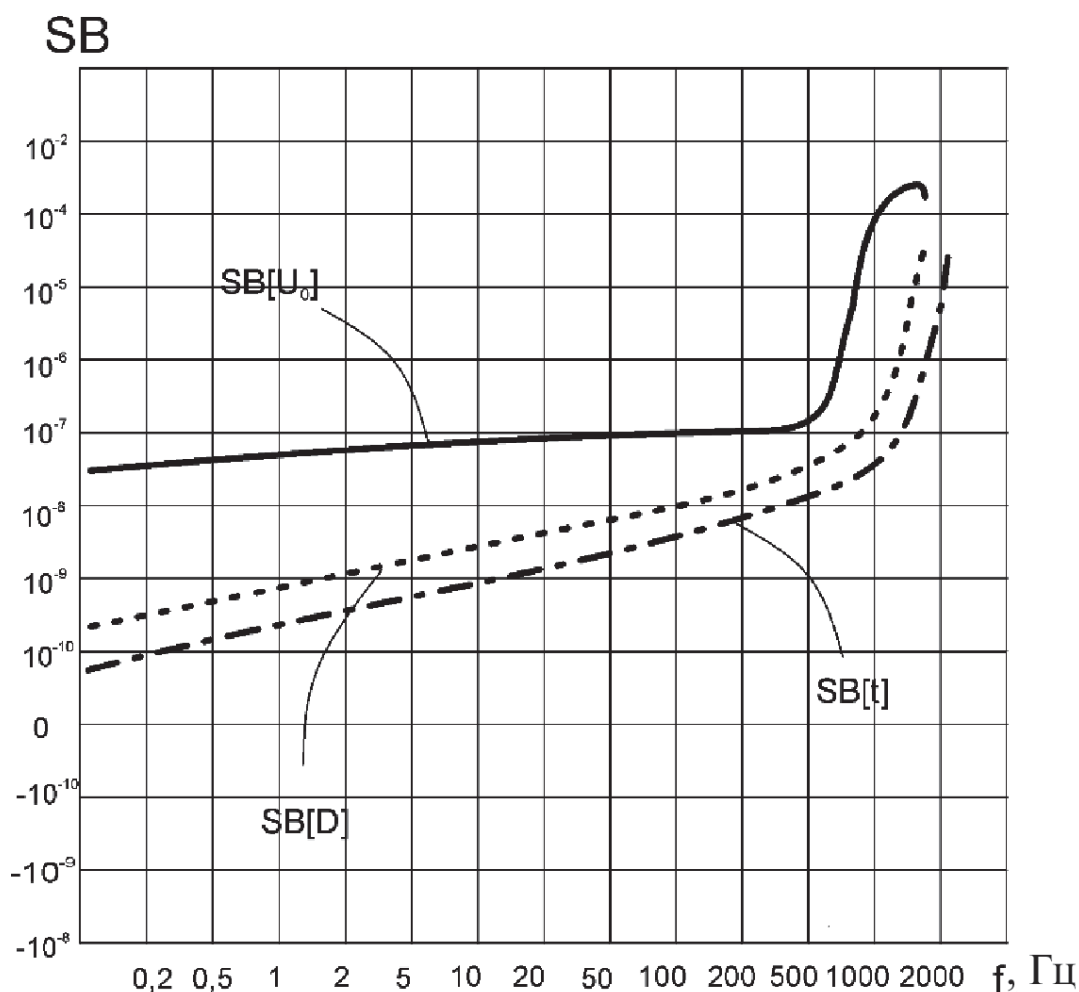


Рис. 4. Зависимости от частоты прерывания коэффициентов влияния параметров  $U_0$ ,  $D$  и  $t$  на передаточную характеристику преобразователя

**Библиографический список**

1. Воронич И.В., Мьинт З.М. Влияние особенностей взаимодействия газа с поверхностью на аэродинамические характеристики космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 59-67.
2. Никитин Д.П. Исследование методов оценки ориентации вектора скорости при движении навигационного приёмника // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 166-172.
3. Величко А.П. Разработка наземных средств дистанционного контроля атмосферы // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 116-123.
4. Соколов Н.Л. Аналитический метод расчета траекторий движения космического аппарата в атмосфере // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 111-121.
5. Котельников В.А., Ким В.П., Котельников М.В., Сидоренко Е.К. Зондовые измерения в потоке разреженной плазмы // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 129-134.
6. Ескин В.И., Полуэктов С.П., Рубинов В.И., Кин К.Л., Афанасьев А.С. Исследование точностных характеристик приемников воздушных давлений путем математического моделирования спектра обтекания воздушным потоком // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 19-26.
7. Скибин В.А., Крайко А.Н. Вычислительная газовая динамика и математическое моделирование устройств принципиально новых типов // Вестник Московского авиационного института. 2005. Т. 12. № 2. С. 123-141.
8. Коршаковский С.И., Красненков М.А., Марков А.А., Субботин В.Ю. Измерение воздушной скорости летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т. 14. № 3. С. 10-16.
9. Сыпало К.И., Подогова А.А. Идентификация коэффициентов аэродинамических сил и моментов высокоскоростного летательного аппарата в процессе полета // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 2. С. 21-32.
10. Каверин А.М., Печерица Д.С. Оценка точностных характеристик аппаратуры записи и воспроизведения сигналов космических навигационных систем // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 8-10.
11. Кулигин М.Н. Минимизация погрешности аналогового тракта системы сбора геофизических данных // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 10-12.

12. Ломакин М.И., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 8-12.
13. Коган М.Н. Динамика разреженного газа: кинетическая теория. — М.: Наука, 1967. — 440 с.
14. Баранцев Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. — М.: Наука, 1975. — 343 с.
15. Тумакова Е.В. Контроль влияния внешних факторов, воздействующих на функционирование электромеханических систем // Измерительная техника. 2016. №6. С.33-36.
16. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 535 с.
17. Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин: Введение в теорию, расчет и конструирование / Пер. с англ. М.М. Фетисова. — Л.: Энергия, 1970. — 360 с.
18. Воронин А.С., Грачев Н.Н., Жестков Б.Е. Мембранно-емкостной измеритель скоростного напора набегающего свободномолекулярного потока газа // Прикладная аэродинамика космических аппаратов. Киев: Наукова думка, 1977. С. 59-63.
19. Грачев Н.Н. Оптимизация частоты электромеханического преобразования в датчиках малых величин скоростного напора // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвузовский сб. Пенза: Пензенский государственный университет, 1989. С. 22-26.
20. Воронин А.С., Грачев Н.Н., Жестков Б.Е. Исследование бортового измерителя скоростного напора ИПА-С. — М.: ЦАГИ, 1980. — 27 с.

## STABILITY PROVISION OF ELECTROMECHANICAL TRANSDUCER CHARACTERISTICS IN CONDITIONS OF FLIGHT IN THE UPPER ATMOSPHERE

Grachev N.N.

*National Research University "Higher School of Economics",  
20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russia  
e-mail: nngrachev@mail.ru*

### Abstract

Scientific results obtained in the work are devoted to the issues of measurement reliability and accuracy of small, slowly changing parameters of low-density gas flows effecting an aircraft in the upper atmosphere. The main trend of the research consists in measuring the aerodynamic forces effecting a flying vehicle in a depleted gaseous environment. Measured electric signals coming from primary transducers are often of a low level, sometimes reaching the values less than the noise and interference levels by several orders of magnitude. The most acceptable way of such processes measuring while reaching the specified metrological characteristics is electrochemical modulation (interruption) of the incident gas flow by choppers. It allows obtain the required large gain of the AC signal; easily separate the modulated beam signal from the non-modulated background signal, even if the beam density is lower than this of the background, as well as employ the signal accumulation, which increases the signal-to-noise ratio at the transducer output.

To determine the optimum frequency of electromechanical conversion and ensure the specified accuracy and stability of metrological characteristics, the author proposed employing the method of probabilistic investigation of the stability of the transducer output

characteristic. The study of the characteristic's stability is based on the method of probabilistic stability research, ensuring the account for the random character of structural and electro-physical parameters deviations under the impact destabilizing factors and in conditions of mass production. The underlying method of moments allows obtaining the required accuracy with a small amount of computation.

To analyze the stability of the membrane-capacitor transducer transfer characteristic and select the optimum frequency of the flow interruption, programs for computing the nominal values of the frequency response (AFC) and phase-frequency characteristics (PFC) of the transducer, the sensitivity of the response frequency and phase response to the specified parameters were developed. The program for computing the mathematical expectations and dispersion of manufacturing tolerances and temperature coefficients was developed based on the analysis of frequency dependencies of the transducer parameters coefficients effect on its transfer characteristic. Besides, the dependencies of the transducer transfer characteristic from temperature at the flow chopper operating frequency, as well as from the temperature change of the transducer membrane were computed.



Based on the measuring transducer transfer function representation in the form of polynomials ratio and analysis of its absolute sensitivity functions to the manufacturing tolerance, structural and electro-physical parameters, as well as destabilizing factors computing dependencies of the transducer transfer function for its stability evaluation and selection of optimal electromechanical conversion frequency were obtained.

**Keywords:** velocity pressure high-speed head, electromechanical transducer, parameters stability.

## References

1. Voronich I.V., M'int Z.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 59-67.
2. Nikitin D.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 166-172.
3. Velichko A.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 116-123.
4. Sokolov N.L. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 111-121.
5. Kotel'nikov V.A., Kim V.P., Kotel'nikov M.V., Sidorenko E.K. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 129-134.
6. Eskin V.I., Poluektov S.P., Rubinov V.I., Kin K.L., Afanas'ev A.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 19-26.
7. Skibin V.A., Kraiko A.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2005, vol. 12, no. 2, pp. 123-141.
8. Korshakovskii S.I., Krasnenkov M.A., Markov A.A., Subbotin V.Yu. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2007, vol. 14, no. 3, pp. 10-16.
9. Sypalo K.I., Podogova A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 21-32.
10. Kaverin A.M., Pecheritsa D.S. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2015, vol. 10, pp. 8-10.
11. Kuligin M.N. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2015, vol. 9, pp. 10-12.
12. Lomakin M.I., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2014, vol. 1, pp. 8-12.
13. Kogan M.N. *Dinamika razrezhennogo gaza: kineticheskaya teoriya* (Rarefied gas dynamics: kinetic theory), Moscow, Nauka, 1967, 440 p.
14. Barantsev R.G. *Vzaimodeistvie razrezhennykh gazov s obtekaemymi poverkhnostyami* (Interaction of rarefied gases with streamlined surfaces), Moscow, Nauka, 1975, 343 p.
15. Tumakova E.V. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2016, no. 6, pp. 33-36.
16. Mazda F.F. *Electronic Instruments and Measurement Techniques*. Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 1987.
17. Nubert G.P. *Izmeritel'nye preobrazovateli neelektricheskikh velichin: Vvedenie v teoriyu, raschet i konstruirovaniye* (Measuring Transducers of Non-electric Sizes), Leningrad, Energiya, 1970, 360 p.
18. Voronin A.S., Grachev N.N., Zhestkov B.E. *Prikladnaya aerodinamika kosmicheskikh apparatov. Sbornik statei*, Kiev, Naukova dumka, 1977, pp. 59-63.
19. Grachev N.N. *Datchiki sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: Mezhhvuzovskii sbornik*, Penza, Penzenskii gosudarstvennyi universitet, 1989, pp. 22-26.
20. Voronin A.S., Grachev N.N., Zhestkov B.E. *Issledovanie bortovogo izmeritelya skorostnogo napora IPA-S* (Research of the onboard meter of a high-speed pressure IPA-S), Moscow, TsAGI, 1980, 27 p.