

УДК 621.867.2.8:621.313.331:539.19

Ю.К. Сопин,

В.Я. Копп, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДИФФУЗИОННО-КИНЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ УСКОРЕНИЙ

Предложен диффузионно-кинетический преобразователь угловых ускорений (ПУУ) с внутренним задатчиком тест-сигнала. Разработана система автоматической коррекции коэффициента преобразования, обеспечивающая повышение метрологической надежности ПУУ и точности измерения параметров движения.

Ключевые слова: *диффузионно-кинетический преобразователь расхода, рабочая жидкость, угловое ускорение, преобразователь ток-напряжение, тест-сигнал, пьезоэлектрический задатчик расхода, коэффициент преобразования, режекторный фильтр, полосовой фильтр.*

Введение. Задача измерения угловых ускорений в реальном масштабе времени возникает в различных областях: сейсмология, исследование процессов качки, контроль параметров вибрации, управление траекторией движения объектов и т.п. Угловое ускорение $\ddot{\phi}$ – «универсальный» параметр движения: при известном радиусе вращения R_ϕ по величине углового ускорения рассчитывается линейное ускорение $a = R_\phi \ddot{\phi}$; путем двукратного интегрирования информационного сигнала об ускорении $\ddot{\phi}$ определяется скорость и перемещение колеблющегося объекта.

Для измерения ускорений большой амплитуды используются пьезоэлектрические датчики. На низких частотах разрешающая способность этих датчиков существенно уменьшается, поскольку величина параметра $\ddot{\phi}$ пропорциональна квадрату круговой частоты ω : $\ddot{\phi} = \omega^2 \phi$, где ϕ – угловое перемещение объекта. На высоких частотах погрешность измерения ускорений возрастает, вследствие инерционности чувствительного элемента и влияния его габаритов на контролируемый процесс.

Указанные ограничения отсутствуют в диффузионно-кинетическом преобразователе угловых ускорений (ПУУ). Конструкция последнего представляет собой заполненный рабочей жидкостью торовый канал, внутри которого размещен диффузионно-кинетический преобразователь расхода (ДКПР), построенный на основе пористого фильтра из диэлектрика с кольцеобразными электродами, подключенными к преобразователю ток – напряжение (ПТН), реализующему режим короткого замыкания измерительной цепи [1, 2].

Принцип действия ПУУ основан на циркуляции рабочей жидкости (инерционной массы) по замкнутому контуру под воздействием инерционных сил. Если корпус ПУУ совершает вращательно-колебательное движение с угловой скоростью $\dot{\phi}$, то под действием ускорения $\ddot{\phi}$ жидкость, как целое, смещается на угол ϕ относительно стенок канала (капилляра). Между торцами фильтра возникает перепад давления $\Delta P = 2\pi r_{ж} R_{cp}^2 \ddot{\phi}$, где $r_{ж}$ – плотность жидкости; R_{cp} – средний радиус тора.

На границе раздела фаз диэлектрик – жидкость существует двойной электрический слой (ДЭС), в котором локализованы избыточные электрические заряды (ионы). Давление ΔP обуславливает в замкнутом канале объемный расход Q рабочей жидкости, величина которого зависит от гидравлического сопротивления пористого фильтра и углового ускорения. Направленное движение жидкости порождает в межэлектродной области ДЭС ионный ток течения $I_s(\ddot{\phi})$. В результате электрохимической реакции на электродах в измерительной цепи ДКПР формируется электронный ток $I_e(\ddot{\phi})$, преобразующийся на выходе ПТН в напряжение $U_{вых}(\ddot{\phi}) = -R_n I_e(\ddot{\phi}) = S_{np} \ddot{\phi}$, где S_{np} – статический коэффициент преобразования ПУУ [2].

Выражения объемного расхода Q и коэффициента преобразования $S_{np} = U_{вых}(\ddot{\phi})/\ddot{\phi}$ получены из математических моделей ДКПР [3]

$$\begin{cases} Q = 0,25\pi^2 \left\{ [W_{эфф} (R_{cp} r_n r_{cp})^2] / (n_u h_n v) \right\} \ddot{\phi}; \\ S_{np} = A_k A_\delta C_H R_n; \\ A_k = 0,8\pi F [W_{эфф} L_0 b_\delta (R_{cp} r_n)^2] / (n_u h_n r_{cp}); \\ A_\delta = [K_e (K_s + 1) (\delta/v)]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $W_{эфф}, h_n, r_n, n_u, r_{cp}$ – соответственно эффективная пористость, толщина, радиус, извилистость и средний радиус капилляров пористого фильтра; C_H – концентрация ионов водорода в объеме рабочей жидкости; R_n – сопротивление нагрузки ПТН; L_0, b_s – периметр рабочего канала (капилляра) и толщина электродов; K_e, K_s, δ – характеристические параметры ДЭС; ν – кинематическая вязкость рабочей жидкости.

Изменение параметров рабочей среды, вследствие ее загрязнения или старения, обуславливает нестабильность коэффициента преобразования ПУУ. С течением времени это приводит к *метрологическому отказу* средства измерения, если параметр S_{np} выйдет за нормированные пределы надежности. Данный вид отказа обнаруживается при периодической проверке ПУУ, а межповерочный интервал определяется метрологической надежностью преобразователя.

Целью настоящей работы является повышение метрологической надежности диффузионно-кинетического преобразователя угловых ускорений.

Для достижения поставленной цели в конструкцию ПУУ введен пьезоэлектрический датчик расхода (ПЗР) рабочей жидкости, формирующий внутренний *тест-сигнал* (рисунок 1).

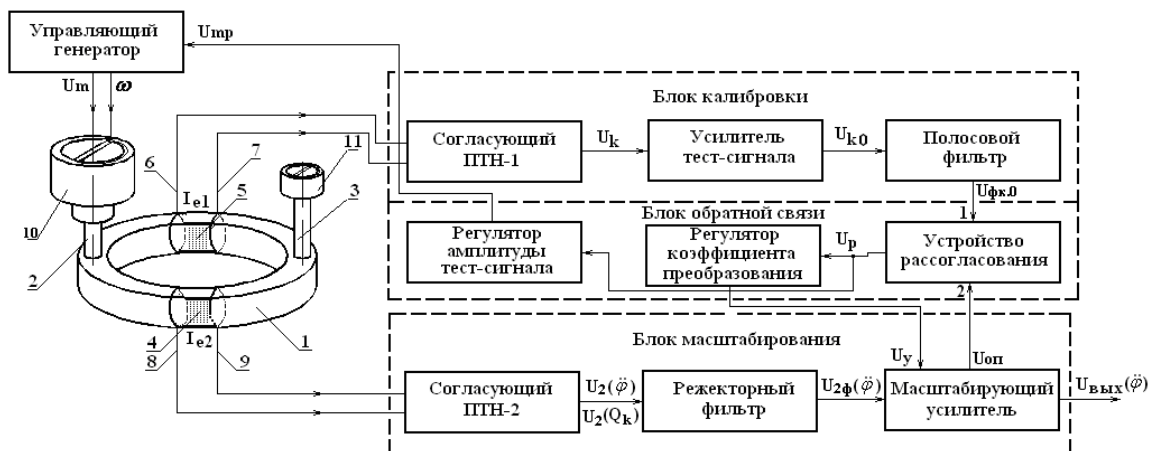


Рисунок 1 – Преобразователь угловых ускорений с внутренним тест-сигналом

В замкнутом корпусе 1 с патрубками 2, 3 размещены пористые фильтры 4, 5 с кольцеобразными электродами 6, 7 и 8, 9 соответственно. Фильтры разделены с одной стороны пьезоэлектрическим датчиком расхода 10, а с другой – диэлектрической пробкой 11 с глухим внутренним отверстием, в котором образуется воздушный пузырь – газовый компенсатор температурного расширения жидкости. Датчик 10 и компенсатор 11 соединяются с корпусом 1 через патрубки 2, 3, предназначенные для заполнения преобразователя рабочей жидкостью.

Управляющий генератор формирует на выходе гармонический сигнал амплитудой U_m с круговой частотой $\omega = 2\pi f$. Под действием этого сигнала датчик расхода 10 *генерирует* в капиллярах пористых фильтров 4, 5 высокочастотные колебания жидкой фазы ДЭС с циклической частотой f .

Преобразователи расхода 4, 5 связаны через сообщающиеся сосуды, а их измерительные цепи – через блоки *обратной связи, калибровки и масштабирования*. Блок *обратной связи* содержит устройство рассогласования, регуляторы коэффициента преобразования и амплитуды тест-сигнала; блоки *калибровки и масштабирования* включают соответственно согласующие преобразователи ток – напряжение ПТН – 1, 2, полосовой и режекторный фильтры, усилитель тест-сигнала и масштабирующий усилитель.

Математическая модель ПУУ с внутренним тест-сигналом (рисунок 1) имеет вид [3]

$$\begin{cases} I_{e1}(t) = [A_1 \omega \text{Mod} \Phi_s(\omega)] \cos(\omega t); \\ I_{e2}(t) = [A_2 \omega \text{Mod} \Phi_s(\omega)] \cos(\omega t); \\ Q_k(t) = 2k_{ce} S_n U_m f \sqrt{\varepsilon^s / C^D} \cos \omega t; \\ A_1 = 3,2 F \delta_1 G_{n1} \varphi(\beta); \\ A_2 = 4 F \delta_1^2 (G_{n1} / b_s) \varphi(\beta); \\ \varphi(\beta) = (\beta + 1) K_e \exp(-\varphi_0); \\ G_{n1} = n_u b_s C_H K_{n1} U_m / W_{эфф} r_{cp} r_n; \\ K_{n1} = (K_{ce} / \pi) S_n \sqrt{\varepsilon^s / C^D} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $I_{e1,2}(t)$ – электронные токи короткого замыкания преобразователей расхода; $Q_k(t)$ – калиброванный расход рабочей среды; $Mod\Phi_s(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика пористого фильтра; $k_{ce}, S_n, \epsilon_s, C^D$ – соответственно коэффициент электромеханической связи, площадь поперечного сечения, абсолютная диэлектрическая проницаемость и модуль упругости, пьезокристалла; Φ_0 – энергетический параметр ДЭС; F – число Фарадея; $\beta = \delta_2/\delta_1, \delta_1, \delta_2$ – толщина слоев Гельмгольца и Гуи соответственно.

Анализ моделей (1), (2) показывает: нормированное угловое ускорение $\ddot{\Phi}_0$ создает в торовом канале ПУУ объемный расход $Q_0 = 0,25\pi^2 \left\{ \left[W_{\Phi\Phi} (R_{cp} r_n r_{cp})^2 \right] / (n_u h_n v) \right\} \ddot{\Phi}_0$; электрический сигнал амплитудой $U_m = U_{m,0}$ с частотой $f = f_0$ формирует *калиброванный расход* рабочей жидкости $Q_{k,0} = 2k_{ce} S_n U_{m,0} f_0 \sqrt{\epsilon^s / C^D}$.

Из тождества $Q_0 = Q_{k,0}$ получено условие коррекции коэффициента преобразования ПУУ в реперной точке $U_{вых,0}(\ddot{\Phi}_0) = S_{np} \ddot{\Phi}_0$

$$(U_{m,0} f_0) = \left(8/\pi^2 \right) (k_{ce} S_n n_u h_n) v \sqrt{\epsilon^s / C^D} / \ddot{\Phi}_0 W_{\Phi\Phi} (R_{cp} r_n r_{cp})^2 . \quad (3)$$

При известных параметрах пьезокристалла, пористого фильтра и рабочей среды из выражения (3) определяется нормированная амплитуда $U_{m,0}$ сигнала управления ПЗР, а частота f_0 тест-сигнала выбирается за пределами полосы пропускания ПУУ и вне зоны собственного резонанса пьезокристалла.

Автоматическая коррекция коэффициента преобразования осуществляется следующим образом.

Управляющий генератор возбуждает пьезокристалл ПЗР электрическим сигналом амплитудой $U_m = U_{m,0}$ с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$ (рисунок 1). Электронный ток I_{e1} , сформированный преобразователем расхода 5, поступает на вход *блока калибровки*. На выходе согласующего блока ПТН – 1 формируется высокочастотное напряжение калиброванной амплитуды U_k . Усиленный до нормированного уровня U_{k0} тест-сигнал подается на вход полосового фильтра, выделяющего на выходе *низкочастотный* сигнал коррекции $U_{\Phi k,0}$, поступающий на вход 1 устройства рассогласования. Электронный ток I_{e2} преобразователя расхода 4, содержит высокочастотную составляющую по расходу $I_{e2}(Q_{k,0})$ и информационную составляющую по ускорению $I_{e2}(\ddot{\Phi}_0)$. В согласующем блоке ПТН – 2 указанные сигналы преобразуются в напряжения $U_2(Q_{k,0})$ и $U_2(\ddot{\Phi}_0)$, поступающие на вход режекторного фильтра. Последний подавляет тест-сигнал с частотой f_0 , и выделяет информационный сигнал $U_{2\Phi}(\ddot{\Phi}_0)$. Масштабирующий усилитель нормирует информационный сигнал $U_{вых,0}(\ddot{\Phi}_0)$ по уровню. Часть этого сигнала используется в качестве *опорного напряжения* U_{on} , поступающего на вход 2 устройства рассогласования.

В блоке обратной связи опорный и корректирующий сигналы сравниваются по уровню: на выходе устройства рассогласования формируется сигнал $U_p = (U_{on} - U_{\Phi k,0})$, поступающий на вход регулятора коэффициента преобразования. На выходе последнего образуется сигнал управления U_y , который корректирует коэффициент усиления K_m масштабирующего усилителя. Регулятор амплитуды тест-сигнала формирует *сигнал обратной связи* U_{mp} , нормирующий амплитуду U_m электрического сигнала управления ПЗР.

Амплитуда U_m электрического сигнала управляющего генератора нормируется при условии $U_p = 0, U_{on} = U_0$. Нестабильность коэффициента преобразования ПУУ нарушает данное условие: выходные сигналы U_{mp}, U_y регуляторов в блоке обратной связи *корректируют* амплитуду U_m электрического сигнала генератора и коэффициент усиления K_m масштабирующего усилителя. Данная *коррекция* осуществляется до момента *компенсации* сигнала рассогласования ($U_p = 0$). В результате *стабилизируется* нормированный расход рабочей среды ($Q_{k,0} = const$) и коэффициента преобразования ПУУ ($S_{np} = const$).

Таким образом, «электрогидравлическая» обратная связь обеспечивает *автоматическую коррекцию* коэффициента преобразования ПУУ по *калиброванному расходу* рабочей жидкости.

Межповерочный интервал может задаваться *автоматически*, а периодическая калибровка чувствительности преобразователя в процессе его функционирования повышает метрологическую надежность измерения параметров движения.

Преобразователь угловых ускорений с внутренним тест-сигналом (рисунок 1) нечувствителен к ускорению силы тяжести. Данный преобразователь может использоваться для управления движущимися объектами: успокоители качки судов, системы управления траекторией летательных аппаратов, автоматизация процесса прецизионной сборки и т.п.

Перспективным направлением дальнейших исследований планируется разработка диффузионно-кинетических преобразователей с магнитным выходом.

Библиографический список использованной литературы

1. Введение в молекулярную электронику / Н.С. Лидоренко, Б.И. Ильин, И.А. Зайденман [и др.]; под ред. Н.С. Лидоренко. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 320 с.
2. Сопин Ю. К. Синтез датчиков на основе диффузионно-кинетических преобразователей расхода / Ю.К. Сопин, В.Я. Копп // Вісник СумДУ. Серія: Технічні науки. — 2009. — № 4. — С. 56–63.
3. Сопин Ю.К. Модели комбинированных молекулярно-электронных преобразователей диффузионно-кинетического типа / Ю.К. Сопин, В.Я. Копп, А.А. Чуклин // Зб. наук. пр. Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. — 2009. — № 3. — С. 164–173.

Поступила в редакцию 16.11.2012 г.

Сопин Ю.К., Копп В.Я. Дифузійно-кінетичний перетворювач кутових прискорень підвищеної метрологічної надійності

Запропоновано дифузійно-кінетичний перетворювач кутових прискорень (ПКП) з внутрішнім задатчиком тест-сигналу. Розроблено систему автоматичної корекції коефіцієнта перетворення, що забезпечує підвищення метрологічної надійності ПКП та точності виміру параметрів руху.

Ключові слова: дифузійно-кінетичний перетворювач витрат, робоча рідина, кутове прискорення, перетворювач струм-напруга, тест-сигнал, п'єзоелектричний задатчик витрат, коефіцієнт перетворення, режекторний фільтр, смуговий фільтр.

Sopin Y., Kopp V. The diffusion-kinetic angle converter accelerated rise metrological reliability

Proposed diffusion-kinetic converter angular accelerations (CAA) with internal setter test signal. A system for automatic correction conversion factor to give more metrological reliability CAA and accuracy of motion parameters.

Keywords: diffusion-kinetic flow converter, hydraulic fluid, angular acceleration, the current-voltage converter, test-signal, piezoelectric flow setpoint, conversion factor, notch filter, band-pass filter.