

стической оценки основных метрологических параметров экспериментальной установки. Получение этой выборки и оценка основных метрологических параметров явились содержанием второго этапа экспериментального исследования.

В результате эксперимента была получена гистограмма основной погрешности пневмометрического измерителя объема (рис. 2).

По причинам технического характера экспериментальная установка исследовалась в режиме, не совпадающем с оптимальным с точки зрения минимума методической погрешности. Значение основной погрешности, полученное экспериментально, составляет 8,5% (по отклонению в 3σ), значение этой же погрешности, полученное при математическом моделировании — 7,6%) собственно, здесь оценивалась не абсолютная величина методической погрешности, а ее вариации в течение цикла измерений, обусловленные неравновесными процессами теплопередачи, накоплением теплового дисбаланса от измерения к измерению).

В результате проведенного эксперимента были выявлены и устранены некоторые дополнительные погрешности, в частности, вызванные временным перекрытием (носящим случайный характер) отпускания и срабатывания электропневмоклапанов ЭПК-1 и ЭПК-2, для устранения чего и была в дальнейшем включена в схему блока управления замедляющая цепочка, состоящая из дросселя Др и конденсатора С.

Экспериментальные данные, в целом, хорошо согласуются с результатами математического моделирования, что, в частности, позволяет выразить уверенность в реальности создания пневмометрического измерителя объема класса не хуже 4—5%.

А. Н. Громов, В. Г. Завьялов

АВТОКОМПЕНСАЦИОННАЯ ДВУХКООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА

Существующие методы получения информации о пространственной ориентации объекта базируются, в основном, на гироскопических устройствах, выдающих электрический сигнал по каждой из координат отклонения объекта от плоскости горизонта.

Это приводит к тому, что для измерения и дальнейшей переработки приходящего сигнала по каждой координате необходимо наличие двух идентичных измерительных или силовых следящих систем (если необходима коррекция объекта в плоскости горизонта).

измерительное автокомпенсационное устройство как систему с двумя идентичными каналами с перекрестными симметричными связями. Подобные системы целесообразно исследовать методом комплексных координат [4].

Применяя этот метод, умножаем второе уравнение системы (1) на j и суммируем с первым. После преобразования

$$T_0^2 \frac{d^2 \bar{\Theta}}{dt^2} + (T_1 - jT_2) \frac{d\bar{\Theta}}{dt} + (n_1 + jn_2) \bar{\Theta} = -jk_y \gamma_1 \bar{u}_{oi} \cdot e^{j(\varphi - \varphi_2)} \quad (3)$$

В этом выражении в качестве комплексной координаты введен пространственный угол

$$\bar{\Theta} = \alpha + j\beta$$

Подставив значения T_1 , T_2 , n_1 , n_2 , после преобразования, получим

$$T_0^2 \frac{d^2 \bar{\Theta}}{dt^2} + [T_{мэ} + AT_э e^{j(\lambda - \varphi_2)}] \frac{d\bar{\Theta}}{dt} + jAe^{j(\lambda - \varphi_2)} \bar{\Theta} = -jk_y \gamma_1 \bar{U}_{oi} \cdot e^{j(\varphi - \varphi_2)} \quad (4)$$

где

$$A = \sqrt{k_y^2 \gamma_1^2 + 2k_y \gamma_1 \cos \varphi + 1};$$

$$\lambda = \arctg \frac{k_y \gamma_1 \sin \varphi}{1 + k_y \gamma_1 \cos \varphi}.$$

Таким образом, при сделанных допущениях движение подвижной части АКУ описывается уравнением второй степени с комплексными коэффициентами.

Введение комплексных координат существенно упрощает выражения, делает их более наглядными и удобными для исследования.

В установившемся режиме уравнение (4) принимает следующий вид:

$$Ae^{j\lambda} \bar{\Theta} = -k_y \gamma_1 \bar{u}_{oi} e^{j\varphi},$$

откуда выражение для пространственного угла $\bar{\Theta}$, на который повернется подвижная часть АКУ при подаче на вход сигнала \bar{u}_{oi}

$$\bar{\Theta} = -\frac{k_y \gamma_1 e^{j(\varphi - \lambda)}}{\sqrt{k_y^2 \gamma_1^2 + 2k_y \gamma_1 \cos \varphi + 1}}. \quad (5)$$

Из полученного выражения следует, что векторы \bar{u}_{oi} и $\bar{\Theta}$ связаны через комплексный коэффициент передачи, который в статическом режиме не зависит от характера сопротивления рабочей цепи (угла φ_2).

С помощью оптической системы [2] пространственный угол $\bar{\Theta}$ преобразуется в перемещение светового указателя, измеряемое вектором $\bar{\rho}$ (рис. 2). При этом для малых углов $\bar{\Theta}$ можем записать

$$\bar{\rho} = -jh \bar{\Theta} e^{j\psi}. \quad (6)$$

где h — расстояние от центра подвеса подвижной части до шкалы.

Подставив в уравнение (6) значение пространственного угла Θ , получим уравнение шкалы в комплексной форме

$$\bar{\rho} = j \frac{k_y \eta h e^{j(\varphi - \lambda)}}{\sqrt{k_y^2 \eta^2 + 2k_y \eta \cos \varphi + 1}}. \quad (7)$$

Отсюда следует, чтобы обеспечить полное соответствие между вектором измеряемого сигнала u_{01} и вектором ρ положения световой отметки на шкале необходимо выбранные оси координат повернуть на 90° по часовой стрелке, а фазовый сдвиг $(\varphi - \lambda)$ скомпенсировать при настройке АКУ, так как иначе изменится положение начальной оси отсчета угла.

В АКУ предусмотрена возможность компенсации $(\varphi - \lambda)$ путем поворота исполнительного и компенсирующего элементов.

Как показывают исследования точность измерения пространственных углов зависит от стабильности фазовых сдвигов в каналах прямой и обратной связи.

Если $\varphi = 0$, то выражение для чувствительности АКУ по напряжению

$$\bar{S}_u = j \frac{k_y \eta h}{k_y \eta + 1}. \quad (8)$$

При больших коэффициентах усиления ($k_y \eta \gg 1$) чувствительность АКУ не зависит от параметров рабочей и компенсационной цепей.

Однако допустимые значения K_y , а также углов φ и λ могут быть получены на основании исследования АКУ в динамическом режиме. Исследования на устойчивость проводились с помощью критерия Эрмита—Гурвица [5] для уравнений с комплексными коэффициентами. В результате получены следующие условия устойчивости:

$$T_{мэ} > 0; \quad \varphi_2 - \arctg \frac{T_{мэ} T_э}{T_0^2} > \arctg \frac{k_y \eta \sin \varphi}{1 + k_y \eta \cos \varphi} > \varphi^2 - \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

Если $\eta k_y \cos \varphi \gg 1$ (что выполняется при больших коэффициентах усиления), то второе условие устойчивости (9) можно переписать

$$\varphi_2 - \arctg \frac{T_{мэ} T_э}{T_0^2} > \varphi > \varphi_2 - \frac{\pi}{2}.$$

Экспериментально доказано, что для обеспечения устойчивой работы диапазон изменения угла φ составляет

$$\varphi \cong 0 \div 83^\circ.$$

Следовательно, теоретическое и экспериментальное исследование показали, что применяемое для измерения АКУ более простое по сравнению с двухканальными автокомпенсационными схемами.

Система позволяет производить измерения в полярной системе координат — углов Эйлера Θ и Φ , в прямоугольной системе — углов Резаля α и β , а также зафиксировать траекторию движения объекта в пространстве.

Для снижения погрешностей АКУ необходимо повысить коэффициент усиления. При этом его увеличение не нарушает устойчивой работы системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликовский Л. Ф., Карпов Е. М., Артемьев Э. А., Громов А. Н. «Система для передачи пространственных углов», авторское свидетельство № 210925, «Бюллетень изобретений», № 25, 1968.

2. Завьялов В. Г., Карпов Е. М., Куликовский Л. Ф. «Автоматический полярно-координатный компенсатор переменного тока», авторское свидетельство № 282523, «Бюллетень изобретений», № 30, 1970.

3. Завьялов В. Г., Карпов Е. М. Автоматический полярно-координатный компенсатор с двухступенным исполнительным устройством. «Радиоэлектроника в народном хозяйстве», г. Куйбышев, 1970.

4. Красовский А. А. О двухканальных системах автоматического регулирования с антисимметричными связями. Ант. Т. XVIII, № 2, 1957.

5. Неймарк Ю. И. Устойчивость линеаризованных систем. ЛКВИА. 1949.

М. А. Евдокимов, Е. М. Карпов

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

В настоящее время все большую актуальность приобретают работы, посвященные исследованиям поля скоростей потоков газов и жидкостей.

В большинстве случаев в качестве первичных используются термоанемометрические измерительные преобразователи скорости потока в электрический сигнал. Они имеют малые габариты и обладают хорошими динамическими характеристиками [1]. Некоторые зарубежные фирмы освоили серийный выпуск нормализованных термоанемометрических первичных преобразователей и разнообразной аппаратуры к ним, предназначенных для определения как скалярных, так и векторных характеристик скоростей потоков газов и жидкостей [2]. Однако термоанемометры имеют весьма существенный недостаток — значительную температурную погрешность, и это ограничивает области их использования. Поэтому при разработке системы для определения вектора скорости потока газа, температура которого может меняться в широких пределах от термоанемометрических