

С.А. МАНУКЯН, Л.А. БАБАЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКООРДИНАТНОГО МАГНИТОУПРУГОГО
АКСЕЛЕРОМЕТРА

Проведено исследование двухкоординатного магнитоупругого акселеро-метра, обеспечивающего измерение двух составляющих вектора ускорения с помощью одного магнитоупругого датчика. Выведены зависимости между выходными сигналами измерительных обмоток датчика и составляющими вектора ускорения. Доказано отсутствие влияния одной из составляющих вектора ускорения на измерение другой.

Ключевые слова: ускорение, магнитное сопротивление, магнитоупругий силоизмерительный датчик, схема замещения магнитной цепи.

Акселерометры широко используются для измерения ускорения на кораблях, самолетах, ракетах, автомобилях при их испытаниях и эксплуатации, а также служат чувствительным элементом автопилотов и гировертикалей. Интегрированием выходного сигнала акселерометра определяют другие параметры движения - скорость и перемещение. Ускорение - векторная величина. Модуль вектора ускорения определяют путем измерения составляющих вектора по осям выбранной системы отсчета (рис.1).

В настоящее время используются однокоординатные магнитоупругие акселерометры. В них с помощью инерционной массы ускорение преобразуется в усилие, которое измеряется магнитоупругим датчиком усилия. Однако они измеряют только одну составляющую вектора ускорения, следовательно, не обеспечивают высокую точность измерения. Более высокую точность имеют двухкоординатные акселерометры, которые дают информацию о двух составляющих вектора ускорения. В них используются два однокоординатных акселерометра, установленных во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Выходные сигналы однокоординатных акселерометров подаются на счетно-решающее устройство. С помощью последнего определяется модуль вектора ускорения согласно выражению

$$U_B = k\sqrt{U_X^2 + U_Y^2}, \quad (1)$$

где U_X , U_Y - выходные сигналы однокоординатных акселерометров; U_B - выходной сигнал двухкоординатного акселерометра; k - масштабирующий коэффициент.

Двухкоординатный акселерометр, состоящий из двух однокоординатных, имеет сложную конструкцию и большие габариты. Это обусловлено применением

двух однокоординатных акселерометров и устройства для их установки во взаимно перпендикулярных плоскостях.

С целью упрощения конструкции и повышения точности измерения разработан и исследован двухкоординатный акселерометр, где обе составляющие вектора измеряются одним магнитоупругим датчиком ускорения. Принципиальная конструкция двухкоординатного магнитоупругого акселерометра приведена на рис.2. Акселерометр содержит квадратную раму 1 из ферромагнитного материала, окно которой диагональными перемычками AD и BC разделено на четыре части. В центре перемычек установлена инерциальная масса 2. На раме расположены обмотки возбуждения 3, 6, 8, 9, которые подключены последовательно (рис. 3), а также обмотки измерения 4, 5, 7, 10, которые подключены попарно последовательно и расположены на противоположных сторонах рамы (4, 7 и 5, 10).

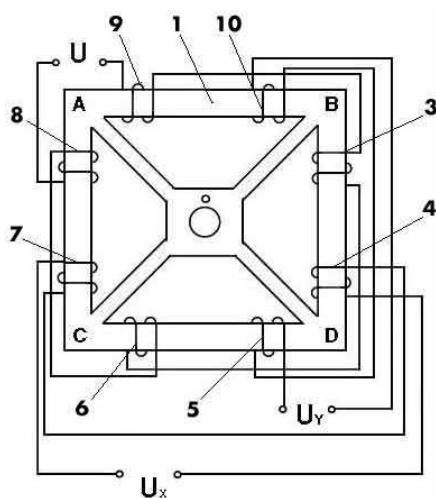


Рис. 1

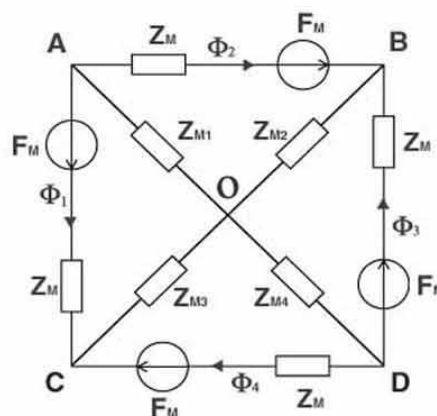


Рис. 2

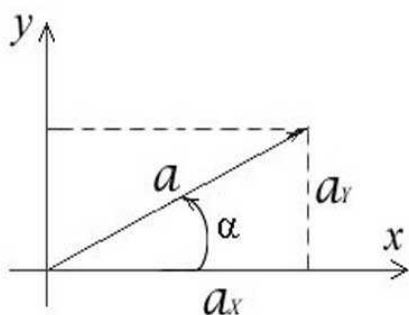


Рис. 3

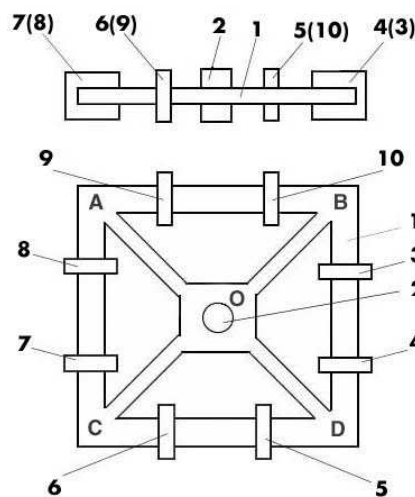


Рис. 4

Участки АОС с обмотками 7, 8 и BOD с обмотками 3, 4 работают как дифференциально трансформаторный датчик усилия, который преобразует составляющую вектора ускорения a_x в электрический сигнал U_x . Участки АОВ с обмотками 9, 10 и COD с обмотками 5, 6 также работают как дифференциально трансформаторный датчик усилия, который преобразует составляющую вектора ускорения a_y в электрический сигнал U_y (рис. 4).

В схеме замещения магнитной цепи двухкоординатного магнитоупругого акселерометра (рис. 4) введены следующие обозначения: Z_M – магнитное сопротивление сторон рамы; Z_{M1} , Z_{M2} , Z_{M3} , Z_{M4} – магнитные сопротивления участков АО, BO, CO, DO перемычек рамы; F_M – МДС обмоток возбуждения; Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , Φ_4 – магнитные потоки, протекающие по цепям АОС, АОВ, BOD, DOC.

При составлении схемы замещения магнитной цепи акселерометра магнитные сопротивления Z_{M1} , Z_{M2} , Z_{M3} , Z_{M4} приняты линейными. Это обосновано тем, что в магнитоупругих датчиках относительное изменение $\Delta Z_M/Z_M$ под действием измеряемого параметра не превышает 10-20%. Кроме того, магнитное сопротивление всех марок сталей в достаточно широком диапазоне средних индукций остается почти неизменным [2,3]. Параметры магнитопровода выбираются таким образом, что изменение $\Delta Z_M/Z_M$ происходит на линейном участке характеристики.

Обмотки возбуждения акселерометра подключаются к генератору синусоидального напряжения U (рис. 3).

Магнитные потоки в магнитопроводе определяются следующим образом:

$$\dot{\Phi}_1 = \dot{F}_M / Z_{АОС}, \dot{\Phi}_2 = \dot{F}_M / Z_{АОВ}, \dot{\Phi}_3 = \dot{F}_M / Z_{BOD}, \dot{\Phi}_4 = \dot{F}_M / Z_{COD},$$

$$\text{где } Z_{АОС} = Z_M + Z_{M1} + Z_{M3}, Z_{АОВ} = Z_M + Z_{M1} + Z_{M2},$$

$$Z_{BOD} = Z_M + Z_{M2} + Z_{M4}, Z_{COD} = Z_M + Z_{M3} + Z_{M4}.$$

Выходные напряжения $\dot{U}_x$ и $\dot{U}_y$ датчика равны

$$\dot{U}_x = j\omega w_2 \left(\frac{\dot{F}_M}{Z_{АОС}} - \frac{\dot{F}_M}{Z_{BOD}} \right) = j\omega w_1 w_2 \dot{I}_1 \left(\frac{Z_{BOD} - Z_{АОС}}{Z_{BOD} Z_{АОС}} \right), \quad (2)$$

$$\dot{U}_y = j\omega w_2 \left(\frac{\dot{F}_M}{Z_{АОВ}} - \frac{\dot{F}_M}{Z_{COD}} \right) = j\omega w_1 w_2 \dot{I}_1 \left(\frac{Z_{COD} - Z_{АОВ}}{Z_{COD} Z_{АОВ}} \right), \quad (3)$$

где ω – частота питающего напряжения; w_1 , w_2 – число витков обмоток возбуждения и измерения; $\dot{I}_1$ – ток обмоток возбуждения.

При отсутствии ускорения $\vec{a}$ все перемычки находятся в одинаково натянутом состоянии под воздействием $m\vec{g}$ – веса массы m . Магнитные сопротивления равны друг другу ($Z_{BOD}=Z_{АОС}=Z_{COD}=Z_{АОВ}$), следовательно, $\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi}_3 = \dot{\Phi}_4$ и $U_x=U_y=U_B=0$.

При наличии ускорения $\vec{a}$ создается усилие $Q = m\vec{a}$. Под воздействием $Q_x = (ma)_x = ma \cos \alpha$, составляющей усилия Q участок АОС магнитопровода растягивается, а участок БОД сжимается. Магнитные сопротивления Z_{M1} и Z_{M3} увеличиваются, а Z_{M2} и Z_{M4} уменьшаются на величину $\Delta Z_{M1,3}$. В результате магнитный поток Φ_1 увеличивается, а Φ_3 уменьшается, и на выходе измерительных обмоток напряжение изменяется по следующему закону:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= j\omega w_1 w_2 \dot{I}_1 \left[\frac{Z_{AOC} + \Delta Z_{M1,3} - (Z_{BOD} - \Delta Z_{M1,3})}{(Z_{AOC} + \Delta Z_{M1,3})(Z_{BOD} - \Delta Z_{M1,3})} \right] = j\omega w_1 w_2 \dot{I}_1 \frac{2\Delta Z_{M1,3}}{Z_{AOC} Z_{BOD}} = \\ &= jk_1 \dot{I}_1 \Delta Z_{M1,3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $k_1 = 2\omega w_1 w_2 / Z_{AOC} Z_{BOD}$.

Под воздействием составляющей $Q_y = (ma)_y = ma \sin \alpha$ участок магнитопровода АОВ сжимается, а участок СОД растягивается. Магнитные сопротивления Z_{M1} и Z_{M2} уменьшаются, а сопротивления Z_{M3} и Z_{M4} увеличиваются на величину $\Delta Z_{M1,2}$. В результате магнитный поток Φ_2 увеличивается, а Φ_4 уменьшается, и на выходе измерительных обмоток 5, 10 возникает напряжение, равное

$$\begin{aligned} \dot{U}_y &= j\omega w_1 w_2 \dot{I}_1 \left[\frac{Z_{COD} + \Delta Z_{M1,2} - (Z_{AOB} - \Delta Z_{M1,2})}{(Z_{COD} + \Delta Z_{M1,2})(Z_{AOB} - \Delta Z_{M1,2})} \right] = j\omega w_1 w_2 \dot{I}_1 \frac{2\Delta Z_{M1,2}}{Z_{COD} Z_{AOB}} = \\ &= jk_1 \dot{I}_1 \Delta Z_{M1,2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что при стабильном токе обмотки возбуждения $\dot{I}_1$ выходные напряжения U_x , U_y линейно зависят от $\Delta Z_{M1,3}$ и $\Delta Z_{M1,2}$.

Магнитные сопротивления $\Delta Z_{M1,3}$ и $\Delta Z_{M1,2}$ под действием усилий $Q_x = (ma)_x$ и $Q_y = (ma)_y$ будут изменяться по следующим формулам [4]:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{M1,3} &= (Z_{M1} + Z_{M3}) \delta_\mu \sigma_x, \\ \Delta Z_{M1,2} &= (Z_{M1} + Z_{M2}) \delta_\mu \sigma_y, \end{aligned} \quad (6)$$

где S_μ - магнитоупругая чувствительность стали, из которой изготовлен магнитопровод; σ_x , σ_y - механические напряжения, возникающие в перемычках под действием усилий Q_x и Q_y .

Механические напряжения σ_x и σ_y определяются выражениями [4]:

$$\sigma_x = \frac{Q_x}{4 \cdot \cos 45^\circ \cdot F} = 0,36 \frac{ma \cdot \cos \alpha}{F} = k_2 a \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

$$\sigma_y = \frac{Q_y}{4 \cdot \cos 45^\circ \cdot F} = 0,36 \frac{ma \cdot \sin \alpha}{F} = k_2 a \cdot \sin \alpha, \quad (9)$$

где F - площадь сечения перемычек, $k_2 = 0,36m/F$.

С учетом (6) - (9) из (4), (5) получим

$$\dot{U}_X = jk_1 \dot{I}_1 k_2 a \cdot \cos \alpha (Z_{M1} + Z_{M3}) \delta_\mu = jk_3 \dot{I}_1 a \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

$$\dot{U}_Y = jk_1 \dot{I}_1 k_2 a \cdot \sin \alpha (Z_{M1} + Z_{M3}) \delta_\mu = jk_3 \dot{I}_1 a \cdot \sin \alpha, \quad (11)$$

где $k_3 = k_1 k_2 (Z_{M1} + Z_{M3}) \delta_\mu$.

На выходе счетно-решающего устройства получим напряжение, определяемое следующим выражением:

$$U = \sqrt{U_X^2 + U_Y^2} = k_3 \dot{I}_1 a \sqrt{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = k_3 \dot{I}_1 a. \quad (12)$$

Из (12) следует, что при стабильном токе $\dot{I}_1$ выходное напряжение акселерометра линейно зависит от ускорения.

Магнитопровод акселерометра сконструирован таким образом, чтобы магнитная цепь одной составляющей ускорения не влияла на работу цепи другой составляющей. Это происходит следующим образом. Если под действием ускорения $\vec{a}_x$ магнитные сопротивления Z_{M1} , Z_{M3} уменьшаются, то Z_{M2} , Z_{M4} увеличиваются на эквивалентную величину. Вследствие этого сопротивления $Z_{M1} + Z_{M2}$ и $Z_{M3} + Z_{M4}$ не меняются и на напряжение U_Y не влияют. Аналогичным образом, если Z_{M1} , Z_{M2} увеличиваются под действием $\vec{a}_y$, то Z_{M3} , Z_{M4} уменьшаются, $Z_{M1} + Z_{M3}$ и $Z_{M2} + Z_{M4}$ остаются неизменными.

С целью проверки отсутствия влияния одной из составляющих вектора ускорения на результат измерения другой исследована модель магнитопровода акселерометра с применением компьютерной программы, разработанной в математической лаборатории ГИУА. Исследования показали, что для обеспечения отсутствия указанного влияния необходимо подобрать соответствующее значение тока возбуждения обмоток (I_1).

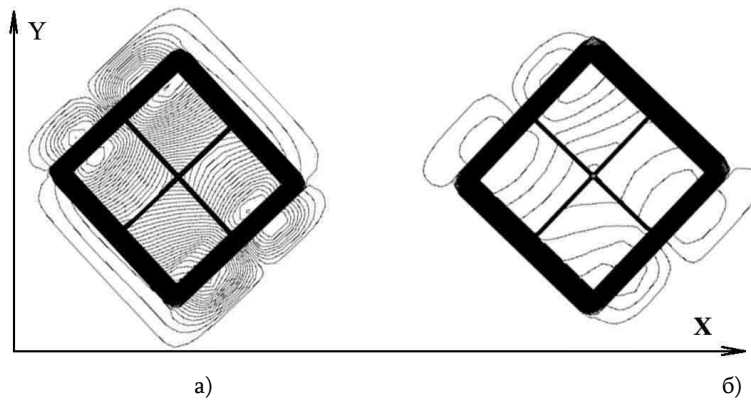


Рис. 5

На рис.5а показано распределение магнитных потоков при больших токах возбуждения, а на рис. 5б – при оптимальном токе. Видно, что при больших токах I_1 магнитный поток цепи измерения одной составляющей замыкается через цепь

измерения другой составляющей. При оптимальном токе I_1 указанная связь отсутствует (рис 5б).

Кроме того, с помощью указанной программы исследован выбор оптимальных размеров магнитопровода при заданных значениях тока обмоток возбуждения и пределов измерения ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шишкинский В.И.** Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители. - М.: Машиностроение, 1981. - 90 с.
2. **Левшина Е.С., Новицкий П.В.** Электрические измерения физических величин, измерительные преобразователи. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 320 с.
3. **Мамиконян Б.М.** Измерительные магнитные мосты. - Ереван: Айастан, 1985. - 134 с.
4. **Манукян С.А., Гамбарян А.А.** Исследование двухкоординатного магнитоупругого измерителя натяжения // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000.- Т.53, No 2. - С. 206-211.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.04.2001.

Ս.Հ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Լ.Ա. ԲԱԲՅԱՆ

ԵՐԿՉԱՓԱՆԻ ՄԱԳՆԻՍԱՌԱԶԳԱԿԱՆ ԱՔՍԵԼԵՐՈՄԵՏՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ

Ուսումնասիրված է երկչափանի մագնիսաառաձգական արսելերոմետր, որում արագացման վեկտորի երկու բաղադրիչները չափվում են մեկ մագնիսաառաձգական տվիչի միջոցով: Կազմված է տվիչի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման: Ստացված է առնչություն տվիչի չափիչ փաթույթների ելքային լարումների և արագացման վեկտորի բաղադրիչների միջև: Ապացուցված է այդ բաղադրիչներից որևէ մեկի ազդեցության բացակայությունը մյուս բաղադրիչի վրա:

S.A. MANUKYAN, L.A. BABAYAN

TWO-DIMENSIONAL MAGNETO-ELASTIC ACCELEROMETER INVESTIGATION

A two-dimensional magneto-elastic accelerometer is explored. Two components of acceleration vector measurement using one magneto-elastic sensor are provided. Relations between output voltage of measuring sensor windings and acceleration vector components are derived. It is proved that one of the vector acceleration components does not influence the result of measurement of the other.