

УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

УГЛА ПОВОРОТА АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ РЛС

Цаплев Алексей Вячеславович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

E-mail: arhiav@yandex.ru.

Дорофеев Николай Викторович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

E-mail: itpu@mivlgu.ru.

Кузичкин Олег Рудольфович

доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

E-mail: electron@mivlgu.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы использования акселерометров для измерения угла поворота кинематических пар систем позиционирования антенных устройств РЛС. Определены основные проблемы применения акселерометрических методов при регистрации полного вектора ускорения с помощью двухкомпонентных акселерометров дифференциального типа. Выявлена основная причина возникновения погрешности измерения при применении акселерометрического метода и определена функция погрешности метода. Обосновано применение фазометрического метода формирования сигнала дифференциальных измерительных преобразователей для акселерометрического датчика угла поворота антенных устройств РЛС. Рассмотрена реализация электронного датчика угла поворота кинематических пар на основе фазометрического метода формирования сигнала. Обоснован принцип применения фазометрического способа акселерометрического измерения угла поворота кинематической пары, позволяющего устранить мультипликативную погрешность на предварительной стадии измерения угла поворота кинематических пар.

Ключевые слова: антенные устройства, мультипликативная помеха, датчик угла поворота, кинематическая пара, акселерометр, фазометрический метод, обработка сигнала.

Введение

Измерение угла поворота одного механического объекта относительно другого является важной задачей при создании контрольно-измерительной аппаратуры в машиностроении. В частности, при создании антенных устройств РЛС, где в последнее время прослеживается тенденция повышения эффективности и надёжности за счёт замены традиционных механизмов с конечными фиксаторами положения, электронными датчиками положения механизмов с микропроцессорным управлением

[1-3]. В простейших случаях, где есть возможность по конструктивным и эксплуатационным параметрам, установить контактные электронные датчики поворота, особых сложностей не возникает. Более трудной является задача создания электронного датчика угла поворота неконтактного типа, позволяющего проводить измерение без особых конструктивных доработок кинематических узлов механизмов антенн.

Традиционными подходами к решению данной задачи является применение электро-

магнитных методов измерения [4-7]. При этом измерение осуществляется за счет взаимодействия магнитных или электростатических полей конструктивных элементов кинематических узлов механизма. В последнее время перспективным направлением является применение инерционных систем контроля механических перемещений объектов, принцип работы которых основан на применении в качестве базовых элементов акселерометров.

Целью работы является изучение возможности применения акселерометров для измерения углов поворота кинематических узлов в механизмах антенных устройств РЛС и обоснование фазометрического метода формирования сигнала акселерометрического датчика угла поворота.

Принцип применения акселерометров для измерения угла поворота кинематических пар

Принцип применения акселерометров для измерения угла поворота φ кинематических пар, основан на измерении полного вектора ускорения общей точки O кинематической пары в двух системах отсчета [8]. При этом полный вектор ускорения измеряется с помощью двухкомпонентных акселерометров дифференциального типа для объекта А и объекта В кинематической пары в отдельности (рис.1).

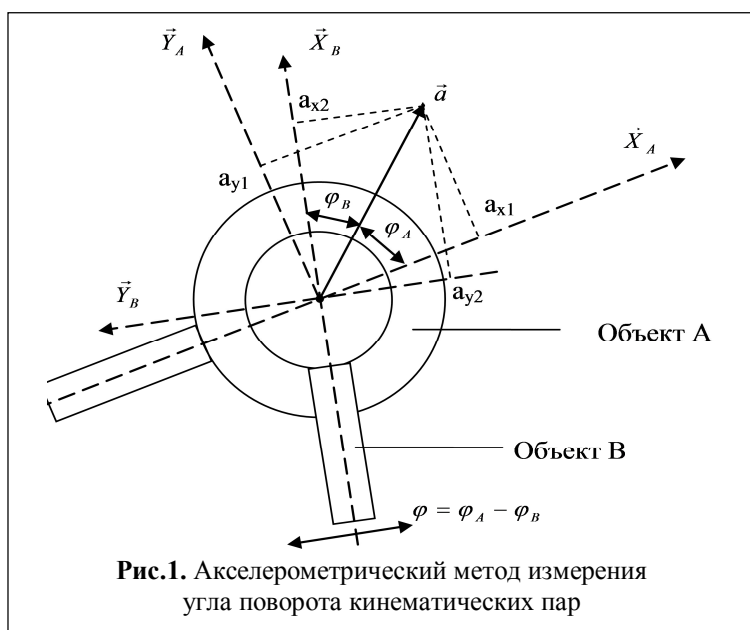


Рис.1. Акселерометрический метод измерения угла поворота кинематических пар

Ускорение общей точки кинематической пары O не связано с углом поворота φ , а определяется только параметрами общего движения механизма и самой точки O . В результате измеряются четыре значения ускорения в двух системах координат и на выходе получаются четыре сигнала, пропорциональные ускорению \vec{a} общей точки кинематической пары

$$\begin{aligned} a_{x1} &= K_{x1}a \cos(\varphi_A), a_{y1} = K_{y1}a \sin(\varphi_A), \\ a_{x2} &= K_{x2}a \cos(\varphi_B), a_{y2} = K_{y2}a \sin(\varphi_B), \end{aligned} \quad (1)$$

где φ_A и φ_B - углы между направлением вектора ускорения общей точки O кинематической пары \vec{a} и измерительными акселерометрическими системами (\vec{x}_A, \vec{y}_A) и (\vec{x}_B, \vec{y}_B) соответственно; $K_{x1}, K_{y1}, K_{x2}, K_{y2}$ - коэффициенты преобразования соответствующих акселерометров.

В дальнейшем предлагается на основании имеющих место связей между компонентами вектора линейного ускорения (1) при повороте системы отсчета на угол $\varphi = \varphi_A - \varphi_B$, последний определять по формулам [9]:

$$\begin{aligned} \sin\varphi &= \frac{a_{x2}a_{y1}/K_{x2}K_{y1} - a_{x1}a_{y2}/K_{x1}K_{y2}}{(a_{x1}/K_{x1})^2 - (a_{y1}/K_{y1})^2}, \\ \cos\varphi &= \frac{a_{x2}a_{x1}/K_{x2}K_{x1} + a_{y2}a_{y1}/K_{y2}K_{y1}}{(a_{x1}/K_{x1})^2 + (a_{y1}/K_{y1})^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Такой подход не является удачным с точки зрения его технической реализации, так как формулы являются очень громоздкими и неудобными для практического использования, как для аналоговой, так и для микропроцессорной реализации электронного датчика [10-12]. При их практической реализации появляется ряд существенных источников погрешностей измерения угла, определяемых нелинейностью соотношений (2) и возможной разбалансировкой и нестабильностью коэффициентов преобразования акселерометров.

В традиционных измерительных системах угловых перемещений, в которых применяются дифференциальные измерительные преобразователи, основной проблемой является наличие мультипликативной неста-

бильности ветвей преобразователя [13]. Для её устранения в устройствах формирования выходного сигнала измерительного преобразователя применяются компенсационные методы [14]. В этом случае питание измерительного моста осуществляется от источника переменного тока, а выпрямленные сигналы с соответствующих ветвей моста усиливаются до необходимого уровня дифференциальным усилителем. Для мультипликативной компенсации и получения более высокой точности измерения в устройство дополнительно вводится компенсационный переменный резистор, подключаемый к входу одного из выпрямителей и к дополнительному входу дифференциального усилителя, что позволяет осуществить устранение влияния нестабильности параметров преобразователя [15].

В соответствии с (1) в общем случае для ветвей измерительного преобразователя угла поворота измеряемые напряжения могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} U_{x1}(t) &= U_0 K_{x1} a \cos(\varphi_A(t))(1 + \Delta K_1), \\ U_{x2}(t) &= U_0 K_{x2} a \cos(\varphi_B(t))(1 + \Delta K_2), \\ U_{y1}(t) &= U_0 K_{y1} a \cos(\varphi_A(t))(1 + \Delta K_1), \\ U_{y2}(t) &= U_0 K_{y2} a \cos(\varphi_B(t))(1 + \Delta K_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta K_1, \Delta K_2$ - коэффициенты нестабильности ветвей измерительного преобразователя, равные относительному изменению параметра ветви; U_0 - напряжение питания преобразователя.

При этом погрешность определения угла поворота φ определяется функцией [16]:

$$F(\Delta K_1, \Delta K_2) = \frac{\sin(\varphi^*)}{\sin(\varphi)} - 1 = \frac{\Delta K_1 - \Delta K_2}{1 + \Delta K_2}, \quad (4)$$

где φ^* - измеренное значение угла поворота. Как видно из рис. 2 мультипликативная погрешность максимальна при максимальном рассогласовании ветвей.

В этом случае мультипликативную погрешность полностью компенсировать невоз-

можно, и её можно частично устранить за счёт компенсации несимметричности дифференциального измерительного преобразователя [17].

Фазометрический метод акселерометрического измерения угла поворота

Применение фазометрического способа акселерометрического измерения угла поворота кинематической пары позволяет избежать громоздких вычислений угла по формулам (2) и устранить мультипликативную погрешность на предварительной стадии измерения. Принцип его действия основан на непосредственном преобразовании сигналов с двухкомпонентных акселерометров в фазу синусоидального колебания. Это достигается путём применения квадратурного генератора для источника опорного напряжения акселерометров [18].

При этом устройство измерения угла поворота содержит (рис.3) квадратурный генератор (КГ), двухкомпонентные датчики - акселерометры объекта А и двухкомпонентные датчики акселерометры объекта В, сумматоры С, усилители-ограничители (УО), фазовый детектор (ФД) и фильтр низких частот (ФНЧ).

Предположим, что направление мгновенного ускорения, измеряемого системой двухкомпонентных базисов в общей точке кинематической пары O по отклонению к базису объекта А, будет иметь угол φ_A , а к базису объекта В φ_B . Тогда сигналы с выходов акселерометров при угле поворота между объектами φ будут иметь следующий вид:

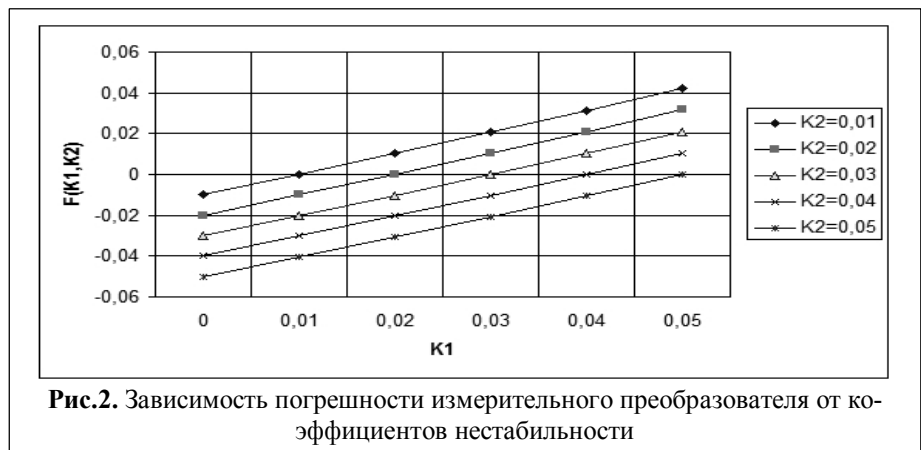


Рис.2. Зависимость погрешности измерительного преобразователя от коэффициентов нестабильности

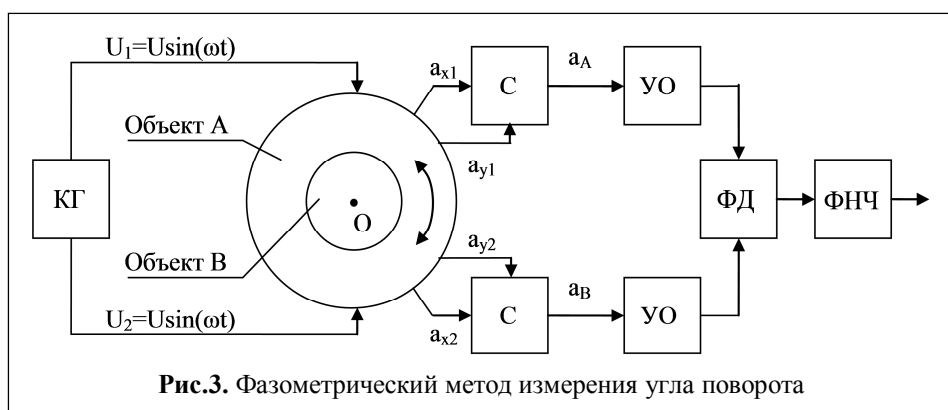


Рис.3. Фазометрический метод измерения угла поворота

$$\begin{aligned}
 a_{x1} &= U \sin(\omega t) K_{x1} a \cos(\varphi_A), \\
 a_{y1} &= U \cos(\omega t) K_{y1} a \sin(\varphi_A), \\
 a_{x2} &= U \sin(\omega t) K_{x2} a \cos(\varphi_B), \\
 a_{x2} &= U \cos(\omega t) K_{y2} a \sin(\varphi_B),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где U, ω - амплитуда и частота сигнала квадратурного генератора.

В соответствии с соотношениями (3), при сложении сигналов в сумматорах для объекта А и объекта В соответственно:

$$\begin{aligned}
 a_A &= UK_{x1} a \cos(\omega t + \varphi_A + \varphi_{K1}), \\
 a_B &= UK_{x2} a \cos(\omega t + \varphi_B + \varphi_{K2}),
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где φ_{K1} и φ_{K2} - фазы рассогласования измерительных ветвей.

В результате с выхода фазового детектора после низкочастотной фильтрации мы будем иметь сигнал пропорциональный углу поворота объекта А относительно объекта В. Мультипликативная погрешность устраняется за счёт ограничения уровня сигналов в ограничителе с последующим фазовым детектированием сигнала и определяется технической реализацией фазометрического метода [19].

Электронный датчик угла поворота кинематических узлов механизмов

Задача повышение точности измерений угла поворота кинематических пар с помощью дифференциальных измерительных преобразователей, питаемых переменным током, может быть решена за счёт применения двухкоординатных акселерометров, соединённых последовательно на объекте А и объекте В. При этом они образуют пространственно ориентированный измерительный мост, выходами моста являются точки соединения акселеромет-

ров на каждом из объектов. Этот подход, позволяющий устранить влияние мультипликативной нестабильности, реализован в электронном датчике угла поворота кинематических узлов механизмов, приведённом на рис. 4 [20].

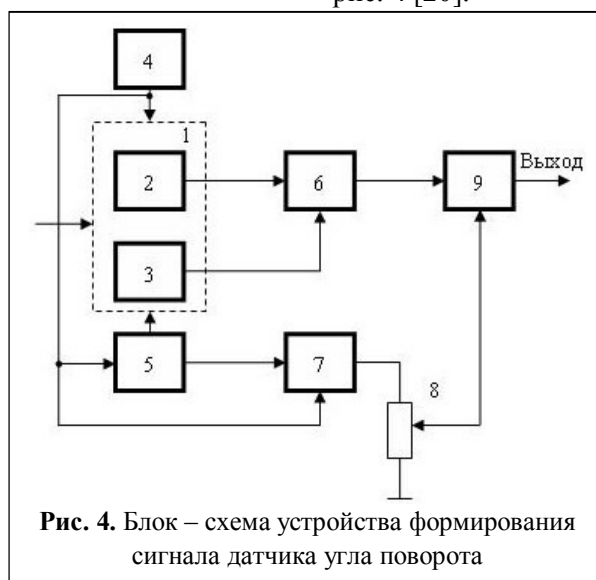


Рис. 4. Блок – схема устройства формирования сигнала датчика угла поворота

Отличительностью особенностью приведённого электронного датчика угла поворота является введение в него дополнительного фазовращателя 5, служащего для формирования квадратурной составляющей сигнала, вход которого подключается к источнику переменного тока 4, а выход к измерительному преобразователю 1 и второму фазовому детектору 7. Входы основного фазового детектора 6 соединяются с выходами ветвей 2 и 3 измерительного преобразователя, а выход подключается ко второму входу дифференциального усилителя 9. Входы второго фазового детектора подключаются к источнику переменного тока и к выходу фазовращателя, а выход подключён к переменному резистору 8. В состав фазовых детекторов конструктивно входят усилители-ограничители и фильтры низких частот.

В соответствии с соотношениями (5-6) сигнал на входе основного фазового детектора будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} U_A &= UK_{x1}(1 + \Delta K_1)a \cos(\omega t + \varphi_A + \varphi_{K1}), \\ U_B &= UK_{x2}(1 + \Delta K_2)a \cos(\omega t + \varphi_B + \varphi_{K2}). \end{aligned} \quad (7)$$

При последовательном включении акселерометров $K_{x1} = K_{y1}$ и $K_{x2} = K_{y2}$, соответственно фазы рассогласования измерительных ветвей $\varphi_{K1} = \varphi_{K2} = 0$. В результате на выходе основного фазового детектора формируется сигнал пропорциональный углу поворота кинематической пары φ без влияния на коэффициенты неустойчивости ветвей измерительного преобразователя.

Сигнал со второго фазового детектора 7 с помощью переменного резистора 8 в нормальных условиях позволяет формировать нулевой угол отсчёта поворота кинематической пары при несимметричном дифференциальном измерительном преобразователе. Также это даёт возможность выполнять периодическую балансировку измерительного преобразователя 1 при расположении последнего в местах, труднодоступных для обслуживающего персонала.

Выводы

Таким образом, рассмотренный фазометрический способ измерения угла поворота кинематической пары повышает точность измерений за счёт применения схемы дифференциального включения акселерометров, питаемых переменным током, и позволяет устранить влияние мультипликативной неустойчивости, возникающей вследствие действия внешних возмущающих факторов (температуры, влажности и т.п.).

Кроме простоты реализации электронный датчик угла поворота, реализованный по принципу фазометрического измерения, позволяет устранить ошибку измерений, связанную с неустойчивостью питающего акселерометры напряжения, и такой неустранимой причиной, как люфт кинематической пары. Последняя причина, как известно, приводит к рассогласованию абсолютного значения измеряемого

ускорения без изменения его направления, что приводит к невозможности применения формул (2) даже при отсутствии инструментальной ошибки измерения ускорений [21]. Предлагаемый способ лишён данного недостатка, так как по принципу его действия угол поворота объектов определяется путём преобразования направления мгновенного вектора ускорения в фазу синусоидального колебания.

Литература

1. Левшин Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. Учеб. пособие для вузов. / Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.
2. Miller R.W. Servomechanisms devices and fundamentals. / Reston Publish., Comp. Reston, Virginia, 1977.
3. Роцин Г.И. Несущие конструкции и механизмы РЭА. М.: Высшая школа. 1981.
4. Doebelin E.O. Measurement systems. Application and design. / McGraw Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 1975.
5. Yuan L. Magnetoresistive transducer. Sol. St. Electr., Vol.9, 1976, p.497-505.
6. Thilliez J. La commande numerique des machines. Dunod, Paris, 1967.
7. Кошарский Б.Д. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Л.: Изд-во "Машиностроение", 1968.
8. Патент №93026518 (РФ) G01P15/00. Устройство для измерения параметров углового движения. / В.П. Демиденко, Г.М. Попов, А.В. Пупенин и др. (РФ), заявл. 19.05.1993.; опубл. 20.12.1996
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров. -М.: Наука, 1986.
10. Short K. Microprocessors and programmed logic. \ 2-nd Ed. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
11. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
12. Кузичкин О.Р., Костенко Д.Н., Кулигин М.Н. Программно-аппаратный комплекс для отладки измерительных систем на базе микроконтроллеров серии MCS-96 / Методы и устройства передачи и обработки информации. - Вып. 5. - СПб.: Гидрометеиздат, 2004. - С. 210-214
13. Дорофеев Н.В., Кузичкин О.Р. Устранение мультипликативной неустойчивости параметров дифференциальных измерительных преобразователей / Методы и устройства передачи и обработки информации. - Вып. 10. - М.: Радиотехника, 2008 г. С. 79-82.

14. *Лейтман М.Б., Мелик-Шахназаров Л.М.* Компенсационные измерительные преобразователи электрических величин. М.: Энергия, 1978.

15. *Дорофеев Н.В., Кузичкин О.Р.* Проблемы мультипликативной нестабильности дифференциальных измерительных преобразователей электромагнитного поля / Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т.1. №1. С. 117-122.

16. *Kuzichkin O.R., Dorofeev N.V.* Analysis of algorithmic errors and mistakes in regression treatment of geomagnetic measurements / Measurement Techniques. V.50. 2007, №12. P. 1246-1251.

17. *Wong Y.J., Ott W.E.* Function circuits. \ Burr Brown Electronics series, Mc Graw, N.-Y., 1976.

18. *Sharapov R., Kuzichkin O.* The polarizing characteristics of electrolocation signals and their analysis

in geomonitoring system. / 13 International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM2013. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference proceedings. 16-22 June 2013, Albena, Bulgaria, Vol. 2, 2013. P. 913-918.

19. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы / Учебник для Вузов. 4 –е изд. - М.: Радио и связь, 1986.

20. Патент 64342 (РФ) G01V7/14. Устройство формирования выходного сигнала дифференциального измерительного преобразователя / *О.Р. Кузичкин, Н.В. Дорофеев* (РФ), заявл. 20.12.2006.; опубл. 27.03.2007.

21. *Blair D.P., Sydenham P.H.* Phase sensitive detection as mean to recover signals buried is noise. / J. Phys. E. Sci. Instrum., V.8, 1975, p. 621.

Поступила 21 сентября 2014 г.

English

The device for signal shaping of accelerometric sensor of the slewing angle of antenna system of the RADAR

Aleksey Vyacheslavovich Tsaplev – Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Monitoring and Control in Technical Systems Murom Institute (branch) federal state budgetary educational institution of higher professional education “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

E-mail: arhiav@yandex.ru.

Nikolay Viktorovich Dorofeev – Candidate of Engineering, Head of the Department of Monitoring and Control in Technical Systems Murom Institute (branch) federal state budgetary educational institution of higher professional education “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

E-mail: itpu@mivlgu.ru.

Oleg Rudolfovich Kuzichkin – Doctor in Engineering, Professor Department of Monitoring and Control in Technical Systems Murom Institute (branch) federal state budgetary educational institution of higher professional education “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

E-mail: electron@mivlgu.ru.

Address: Orlovskaya st., 23, Murom, 602264, Russia.

Abstract: The paper deals with the problems of accelerometers application in turning systems. The problem of measuring a slewing angle of kinematic couples of position control system of radar antenna systems is considered. The conventional approach is based on the usage of measurement systems of angular movements based on the application of differential measuring transducer. The main problem in this case is multiplicative instability of branches of the transformer. The usage of accelerometers of this type causes positioning errors. The main problems of application of accelerometry methods in recording the full acceleration vector have been specified. It was suggested to use two-component accelerometers of a differential type for these purposes. In the course of the investigation the main reason for measuring error occurrence when applying accelerometry method was found and the function of inaccuracy of slewing angle determination of a turn angle was specified. The relation of inaccuracy of the measuring transducer to instability coefficients is built and multiplicative inaccuracy proved to be maximum at the peak maximum misalignment of branches. Application of a phase-measuring method of signal generation of differential measuring transducer for accelerometric sensor of the slewing angle of antenna system of the radar. The developed device of measuring a slewing angle is presented and its design is given. Application of the suggested approach helps to eliminate multiplicative inaccuracy and it is determined by engineering implementation of a phase-measuring method. Implementation of electronic sensor of a slewing angle

of kinematic couples on the basis of a phase-measuring method of signal generation is considered. The article justifies the principle of application of the phase-measuring method of accelerometry method of measuring a slewing angle of the kinematic couple, which allows to remove multiplicative inaccuracy at the preliminary phase of measuring.

Key words: antenna system, multiplicative interference, sensor of slewing angle, the kinematic couple, accelerometer, phase-measuring method, signal processing.

References

1. *Levshin E.S., Novicky P.V.* Electrical measuring of physical values: Measuring transducers. Textbook for Students of Higher Institutions. L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-niye, 1983.
2. *Miller R.W.* Servomechanisms devices and fundamentals. Reston Publish., Comp. Reston, Virginia, 1977.
3. *Roshhin G.I.* Frame structure and mechanisms of radio electronic apparatus REA gears. M.: Vysshaja shkola. 1981.
4. *Doebelin E.O.* Measurement systems. Application and design. McGraw Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 1975.
5. *Yuan L.* Magneto-resistive transducer. Sol. St. Electr., Vol.9, 1976, p.497-505.
6. *Thilliez J.* La commande numerique des machines. Dunod, Paris, 1967.
7. *Kosharsky B.D.* Automotive instruments, regulators and control machines. Leningrad. Izdatelstvo "Mashinostroenie", 1968.
8. Patent №93026518 (Russian Federation) G01P15/00. The device for measuring parameters angular movement. *V.P. Demidenko, G.M. Popov, A.V. Pupenin et al.* (RF), appl. 19.05.1993.; publ. 20.12.1996.
9. *Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A.* Reference manual on mathematics for engineers. - M.: Nauka, 1986.
10. *Short K.* Microprocessors and programmed logic. 2-nd Ed. - Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
11. *Kenio T.* Step motors and their microprocessor systems of control, M.: Energoatomizdat, 1987.
12. *Kuzichkin O.R., Kostenko D.N., Kuligin M.N.* A soft-hardware complex for debugging of measurement systems on the basis of microcontrollers of a MCS-96 type. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*, vyp. 5 Sankt-Peterburg. Gidrometeoizdat, 2004. P. 210-214.
13. *Dorofeev N.V., Kuzichkin O.R.* Elimination of multiplicative instability of parameters of differential measuring devices. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*, Vyp. 10, M.: Radiotekhnika, 2008. P. 79-82.
14. *Lejtman M.B., Melik-Shahnazarov L.M.* Compensatory measuring transducers of electrical values. M.: Ener-gia, 1978.
15. *Dorofeev N.V., Kuzichkin O.R.* The problems of multiplicative instability of differential transducers of an electromagnetic field. *Voprosy radioelektroniki*. 2010. Vol.1. №1. P. 117-122.
16. *Kuzichkin O.R., Dorofeev N.V.* Analysis of algorithmic errors and mistakes in regression treatment of geo-magnetic measurements. *Measurement Techniques*. V.50. 2007, №12. P. 1246-1251.
17. *Wong Y.J., Ott W.E.* Function circuits//Burr Brown Electronics series, Mc Graw, N. - Y., 1976.
18. *Sharapov R., Kuzichkin O.R.* The polarizing characteristics of electrolocation signals and their analysis in geomonitoring system. 13 International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM2013. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference proceedings. 16-22 June 2013, Albena, Bulgaria, Vol. 2, 2013. P. 913-918.
19. *Gonorovsky I.S.* Radio chains and signals/Textbook for Higher Schools. 4-Izd. - M.: Radio i svjaz, 1986.
20. Patent 64342 (Russian Federations) G01V7/14. The device for generating output signal of a differential measuring transducer. *O.R. Kuzichkin, N.V. Dorofeyev* (Russian Federation), appl. 20.12.06.;publ. 3/27/2007.
21. *Blair D.P., Sydenham P.H.* Phase sensitive detection as mean to recover signals buried is noise. *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, V.8, 1975, p. 621.