

УДК 617-7

А.В. ГРЕЧЕНЕВА, О.Р. КУЗИЧКИН, Н.В. ДОРОФЕЕВ, И.С. КОНСТАНТИНОВ

ПРИМЕНЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГОНИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой и практическим применением акселерометрических датчиков в различных электронно-механических системах диагностики и реабилитации опорно-двигательного аппарата. 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 данного подхода. Рассмотрены основные положения фазометрического метода формирования сигнала дифференциальных измерительных преобразователей для акселерометрического датчика угла поворота. Рассмотрена реализация электронного датчика угла поворота биокинематических 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: гониометрия; акселерометрический датчик; фазометрический метод; угол поворота; система диагностики; опорно-двигательный аппарат; суставные перемещения.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика опорно-двигательного аппарата человека является первостепенной задачей на этапе определения курса реабилитации и восстановительной методики.

Повысить точность, эффективность и надежность средств гониометрических измерений позволяет замена традиционных механических гониометров и угломеров электронными системами с микропроцессорным управлением. Перспективным подходом в создании гониометрического оборудования является применение инерционных систем контроля на базе акселерометрических преобразователей.

Основной проблемой традиционных измерительных систем на базе дифференциальных измерительных преобразователей, является наличие мультипликативной нестабильности ветвей преобразователя. Для устранения данной погрешности в устройствах формирования выходного сигнала измерительного преобразователя применяются компенсационные методы.

Целью работы является создание нового подхода к достижению высокоточных гониометрических измерений, изучение возможности применения акселерометрических датчиков для измерения суставных перемещений и обоснование применения фазометрического метода в рамках разработки акселерометрического гониометра.

АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СУСТАВНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Принцип применения акселерометров для измерения угла поворота φ основан на измерении вектора полного ускорения \vec{a} общей точки O кинематической пары в двух системах отсчета [1]. При этом вектор полного ускорения \vec{a} определяется измерением четырех значений ускорений в двух системах координат $ax1, ay1, ax2, ay2$, полученных при

помощи двухкомпонентных акселерометров дифференциального типа, закрепленных на соседних звеньях диагностируемого сустава (рис. 1).

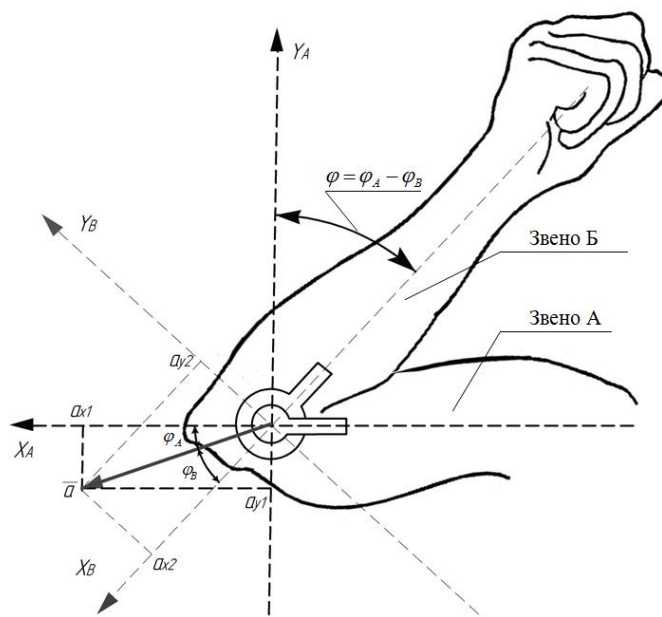


Рисунок 1 – Акселерометрический метод измерения угла поворота

Ускорение общей точки О биокинематической пары не связано с углом поворота φ , а определяется только параметрами общего движения объекта и самой точки О. В результате измерений значений ускорения для каждого акселерометра в двух системах координат на выходе получают четыре сигнала, пропорциональные ускорению общей точки кинематической пары \vec{a} :

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

где φ_A и φ_B – углы между направлением вектора ускорения общей точки О 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.

Исходя из соотношений (1) и на основании связей между компонентами вектора линейного ускорения, при движении объекта и смещении акселерометров на угол $\varphi = \varphi_A - \varphi_B$, последний можно определить по формулам [2]:

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

При технической реализации данного подхода возникают трудности его практического применения, обусловленные громоздкими вычислениями и нестабильностью системы к влиянию мультипликативных помех. Решением данной проблемы является применение фазометрического метода [3].

ФАЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА

Принцип действия данного метода основан на непосредственном преобразовании сигналов с двухкомпонентных акселерометров в фазу синусоидального колебания. Это достигается путем питания акселерометров источником переменного напряжения, при этом фаза одного напряжения сдвинута относительно фазы другого на $\pi/2$.

По данной методике, направление мгновенного ускорения по отклонению к базису объекта А будет иметь угол φ_A , а к базису объекта В – угол φ_B . Тогда сигналы с выходов акселерометров будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} a_{x1} &= U \sin(\omega t) K_{x1} a \cos(\varphi_A), \\ a_{y1} &= U \cos(\omega t) K_{y1} a \sin(\varphi_A), \\ a_{x2} &= U \sin(\omega t) K_{x2} a \cos(\varphi_B), \\ a_{x2} &= U \cos(\omega t) K_{y2} a \sin(\varphi_B), \end{aligned} \quad (3)$$

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

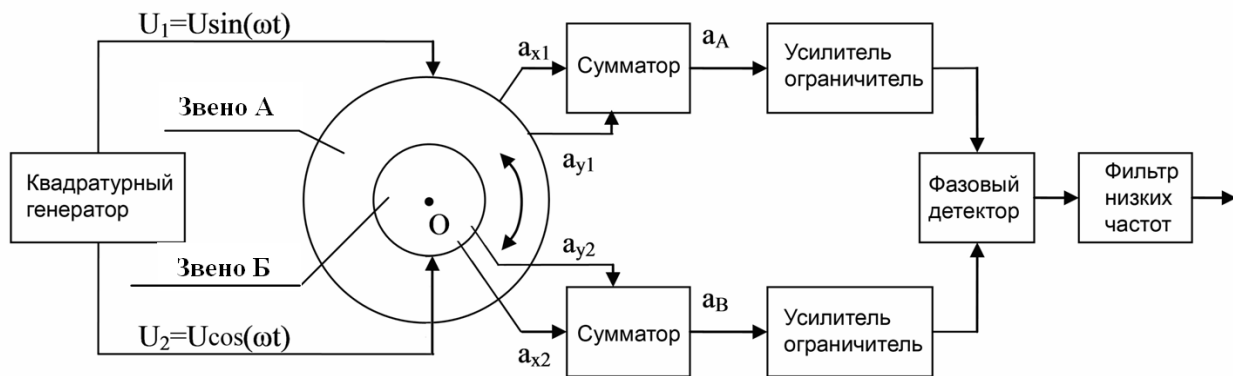


Рисунок 2 – Фазометрический метод измерения угла поворота

При сложении сигналов в сумматорах для объекта А и объекта В соответственно получим:

$$a_A = UK_{x1} a \cos(\omega t + \varphi_A + \varphi_{K1}), \quad a_B = UK_{x2} a \cos(\omega t + \varphi_B + \varphi_{K2}), \quad (4)$$

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 счет ограничения уровня сигналов в ограничителе с последующим фазовым детектированием сигнала и определяется технической реализацией фазометрического метода. [4]

АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ГОНИОМЕТР

Реализация данного датчика позволяет решить задачу повышения точности измерений суставных перемещений. Это достигается путем применения двухкоординатных акселерометров, питаемых переменным током и соединенных последовательно на объекте А и объекте В.

Данное подключение способствует образованию пространственно ориентированного измерительного моста, выходами которого являются точки соединения акселерометров на

каждом из объектов. Применение этого подхода в рамках реализации акселерометрического гониометра позволяет устранить влияние мультипликативной нестабильности [5].

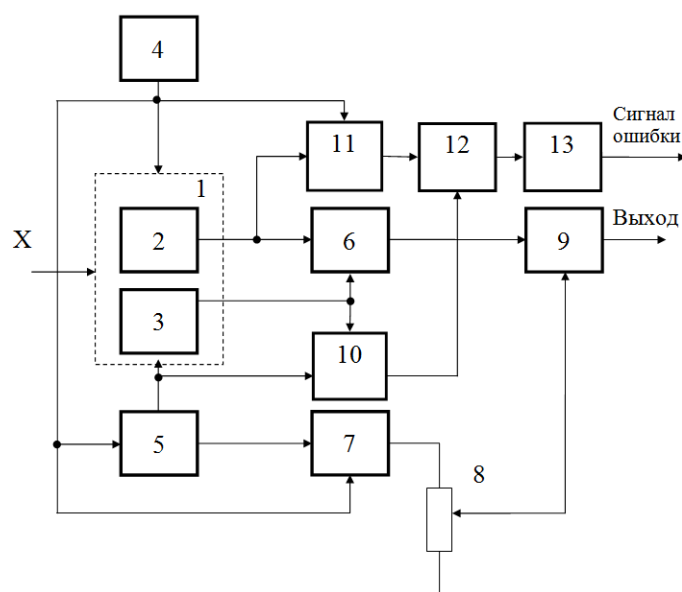


Рисунок 3 – Блок-схема устройства формирования сигнала гониометра

Отличительная особенность разрабатываемого гониометра заключается в применении схемы устройства формирования сигнала, содержащей дополнительный фазовращатель 5. Это обусловлено необходимостью генерации квадратурной составляющей сигнала, поступающего с источника переменного тока 4. Фазовый сдвиг, формируемый фазовращателем, должен находиться в пределах от $\pi/6$ до $5\pi/6$, но оптимальным является значение $\pi/2$, которое обеспечивает питание измерительного преобразователя квадратурными составляющими. Измеряемые напряжения с выходов ветвей 2 и 3 акселерометра 1 поступают на входы фазового детектора 6, выход которого подключен к входу дифференциального усилителя 9, формирующего выходное постоянное напряжение. Переменный резистор 8 присоединен к выходу второго фазового детектора 7, ко входам которого подключен источник питающего тока 4 и выход фазовращателя 5. Движок переменного резистора 8 соединен со вторым входом дифференциального усилителя 9. Контроль за работоспособностью дифференциального измерительного преобразователя осуществляется с помощью двух дополнительных фазовых детекторов 10 и 11, подключенных к выходам источника переменного тока 4 и фазовращателя 5, а также к выходам дифференциального измерительного преобразователя 1. Выходы фазовых детекторов подключены к входам дифференциального усилителя 12, выход которого подключен к устройству фиксации ошибки 13, которое в случае рассогласования измерительных ветвей, возникающее вследствие износа или неисправности дифференциального измерительного преобразователя, вырабатывает сигнал ошибки. [6]

Исходя из соотношений (3) и (4), сигнал на входе основного фазового детектора будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} U_A &= UK_{x1}(1 + \Delta K_1)a \cos(\omega t + \varphi_A + \varphi_{K1}), \\ U_B &= UK_{x2}(1 + \Delta K_2)a \cos(\omega t + \varphi_B + \varphi_{K2}) \end{aligned} \quad (5)$$

Так как выбрана схема последовательного включения акселерометров, то коэффициенты преобразования соответственно равны $K_{x1} = K_{y1}$ и $K_{x2} = K_{y2}$, следовательно,

фазы рассогласования измерительных ветвей $\varphi_{K1} = \varphi_{K2} = 0$. В результате на выходе основного фазового детектора δ формируется сигнал пропорциональный углу поворота φ биокинематической пары без влияния коэффициентов неустойчивости ветвей измерительного преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, практическая реализация акселерометрических гониометров по приведенной методике позволит:

- повысить устойчивость системы к влиянию мультипликативных помех на качество измерений за счет входящего в состав системы фазового детектора;
- повысить устойчивость к неустойчивости питающего напряжения за счет включения в состав системы амплитудного ограничителя и фильтра низких частот;
- повысить точность и чувствительность измерений;
- повысить устойчивость к условиям эксплуатации;
- упростить вычисления измеряемых параметров для удобства их практического использования как для аналоговой, так и для микропроцессорной техник;
- исключить возможность свободного хода биокинематической пары, так как по принципу действия гониометра угол поворота объектов определяется путем преобразования направления мгновенного вектора ускорения в фазу синусоидального колебания;
- получить возможность простой реализации телеметрических измерений;
- минимизировать габариты и стоимость датчиков за счет применения двухкоординатных акселерометров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент №93026518 (РФ) G01P15/00. Устройство для измерения параметров углового движения / В.П. Демиденко, Г.М. Попов, А.В. Пупенин и др. Заявл. 19.05.1993; опубл. 20.12.1996.
2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров. – М.: Наука, 1986.
3. Дорофеев Н.В., Кузичкин О.Р. Проблемы мультипликативной неустойчивости дифференциальных измерительных преобразователей электромагнитного поля // Вопросы радиоэлектроники, 2010. – Т. 1. – № 1. – С. 117-122.
4. Кузичкин О.Р., Дорофеев Н.В. Устранение мультипликативной неустойчивости параметров дифференциальных измерительных преобразователей // Методы и устройства передачи и обработки информации. – Вып. 10. – М.: Радиотехника, 2008. – С. 79-82.
5. Цаплев А.В., Дорофеев Н.В., Кузичкин О.Р. Радиотехнические и телекоммуникационные системы // ISSN 2221-2574. – № 4(16), 2014. – С. 13-18.
6. Патент 151194 (РФ) G01V7/14. Устройство формирования выходного сигнала дифференциального измерительного преобразователя / О.Р. Кузичкин, Гладышев М.А. Заявл. 08.08.14; опубл. 27.03.2015.

Греченева Анастасия Владимировна

Муромский институт (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром
Студентка факультета «Радиоэлектроника и компьютерные системы»
E-mail: nastena07_93@mail.ru

Кузичкин Олег Рудольфович

Муромский институт (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром
Доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах»

E-mail: electron@mivlgu.ru

Дорофеев Николай Викторович

Муромский институт (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление и контроль в технических системах»

E-mail: itpu@mivlgu.ru

Константинов Игорь Сергеевич

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород

Доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, директор института инженерных технологий и естественных наук

E-mail: ViceRectorScience@bsu.edu.ru

A.V. GREChENEVA (*Student of the Department «Electronics and Computer Systems»*)

O.R. KUZICHKIN (*Doctor of Engineering Sciences,*

Professor of the Department «Control and Monitoring in Technical Systems»)

N.V. DOROFEEV (*Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,*

Head of the Department «Control and Monitoring in Technical Systems»)

Murom Institute (Branch) State Institution of Higher Professional Education «Vladimir State University named after Alexander and Nicholas Stoletovs», Murom

I.S. KONSTANTINOV (*Doctor of Engineering Sciences, Professor,*

Vice-Rector for Science and Innovation, Director of the Institute of Engineering Technologies and Natural Sciences) Belgorod National Research University, Belgorod

**USE OF THE ACCELEROMETER
IN MEASUREMENT GONIOMETRIC SYSTEMS**

This article discusses issues related to the development and practical application of the accelerometer in various electro-mechanical systems, diagnostics and rehabilitation of the musculoskeletal system. The main problems of application for registration methods accelerometer complete acceleration vector using two-component accelerometers differential type. The basic cause of the measurement error in the application of this approach. The main provisions of, phase-measuring method of the signal differential transducers for accelerometer steering angle. Realization of electronic angle sensor kinematic pair, phase-measuring method based on the signal. It justified the application of the principle of the method, phase-measuring accelerometric method the angle of rotation kinematic pair that bridge the multiplicative error in the preliminary stage of measurement of the angle of rotation kinematic pair.

Keywords: *goniometry accelerometer; phase-measuring method rotation angle; diagnostic system; musculoskeletal system; joint movement.*

BIBLIOGRAPHY (TRANSLITERATED)

1. Patent №93026518 (RF) G01P15/00. Ustrojstvo dlya izmereniya parametrov uglovogo dvizheniya / V.P. Demidenko, G.M. Popov, A.V. Pupenin i dr. Zayavl. 19.05.1993; opubl. 20.12.1996.
2. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov. – M.: Nauka, 1986.
3. Dorofeev N.V., Kuzichkin O.R. Problemy' mul'tiplikativnoj nestabil'nosti differencial'ny'x izmeritel'ny'x preobrazovatelej e'lektromagnitnogo polya // Voprosy' radioe'lektroniki, 2010. – T. 1. – № 1. – S. 117-122.
4. Kuzichkin O.R., Dorofeev N.V. Ustranenie mul'tiplikativnoj nestabil'nosti parametrov differencial'ny'x izmeritel'ny'x preobrazovatelej // Metody' i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. – Vy'p. 10. – M.: Radiotekhnika, 2008. – S. 79-82.
5. Caplev A.V., Dorofeev N.V., Kuzichkin O.R. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionny'e sistemy' // ISSN 2221-2574. – № 4(16), 2014. – S. 13-18.
6. Patent 151194 (RF) G01V7/14. Ustrojstvo formirovaniya vy'xodnogo signala differencial'nogo izmeritel'nogo preobrazovatelya / O.R. Kuzichkin, Gladyshev M.A. Zayavl. 08.08.14; opubl. 27.03.2015.