

УДК 621.317

**Е. О. Зайцев, О. П. Синицкий, В. И. Бородий****АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРИЙНО  
ВЫПУСКАЕМЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В  
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ****Введение**

За последние 10 лет, в связи с прогрессом в изготовлении полупроводниковых лазеров, области использования лазерных систем бесконтактного измерения линейных перемещений, параметров вибраций, расстояний быстро расширяются. Установив на ось вращающегося объекта кулачок, или изогнутые, по форме винтовой линии, лепесток или шайбу, можно измерять лазерными системами угловые перемещения. Такие датчики линейных и угловых перемещений, а также информационно-измерительные системы (ИИС), основанные на использовании этих датчиков, по мере их совершенствования, становятся конкурентно способными по отношению к измерителям и датчикам, основанным на других принципах действия, но уже получившим широкое распространение в гироскопических системах.

Лидерами в производстве датчиков угловых перемещений являются компании: SICK AG, SIEMENS, HUBNER ELEKTROMASHINEN AG, OMRON, BAUMER, ELAP, Autonics и другие. Большую долю продукции этих фирм для определения угловых перемещений составляют оптические абсолютные или инкрементальные энкодеры [1], [2]. Этими и другими компаниями выпускаются также магнитные энкодеры, индуктивные, емкостные, магниторезистивные, индукционные, потенциометрические (резистивные) датчики угла поворота. Диапазон преобразуемых углов поворота большинства таких датчиков:  $0 \dots 360^{\circ}$ ,  $-180^{\circ} \dots +180^{\circ}$ ,  $-90^{\circ} \dots +90^{\circ}$ , однако, есть и многооборотные с диапазоном  $0 \dots n \times 360^{\circ}$ , где  $n$  может достигать нескольких тысяч. Приведенная погрешность этих датчиков  $0,01 \dots 2,5 \%$ , но у большей части она лежит в пределах  $0,1 \dots 1,0 \%$ . Габариты:  $(30 \dots 100) \times (20 \dots 60) \times (20 \dots 40)$  мм. Масса  $30 \dots 800$  г. Стоимость  $40 \dots 800$  долларов. Чем выше точность датчика, тем больше масса, габариты, стоимость.

**Постановка задачи**

Рассмотрение перспектив применения бесконтактных лазерных частотно-фазовых ИИС измерения угловых перемещений в гироскопических системах наряду с традиционно применяемыми датчиками угловых перемещений.

**Теоретические положения**

Гироскопические приборы широко применяются в системах управления на самолетах, кораблях, ракетах, космических объектах, в наземной технике военного и важного гражданского назначения и в целом ряде других случаев, например, в специальных снарядах для контроля состояния труб нефте- и газопроводов. В самолетах они позволяют визуально определять физические величины, которые интересуют летный состав, а также вводить эти данные в виде электрических сигналов или кодов в автоматические системы управления и навигации. Одним из важных элементов таких систем являются гироскопические вертикали. Они предназначены для определения углов отклонения осей самолетов от истинной вертикали места и служат датчиками углов крена и тангажа.

В ряде конструкций на измерительных осях гировертикали устанавливаются несколько потенциометров или сельсинов, с которых снимаются электрические сигналы, пропорциональные углам крена и тангажа, при этом оси рамок нагружаются моментами от этих датчиков. Это снижает точность измерения. Для компенсации влияния возникающих моментов в гировертикали приходится применять систему силовой стабилизации, обеспечивающую разгрузку измерительных осей. Таким образом, применение потенциометров или сельсинов в качестве датчиков углов поворота приводит к снижению точности измерения углов поворота и усложнению конструкции.

Рассмотрим возможность устранения этого недостатка использованием серийно выпускаемых датчиков угловых перемещений в гироскопических системах.

Основными характеристиками датчиков угла являются:

- точность;
- рабочий диапазон угла поворота;
- момент трогания и движения (если датчик контактный);
- габариты, масса стоимость.

Сразу следует отметить, что все серийно выпускаемые датчики угла поворота имеют достаточный, с запасом для гироскопов, диапазон угла поворота. Подавляющее большинство имеют диапазон  $0 \dots 360^\circ$ ,  $\pm 180^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ . Поэтому будем производить анализ по остальным характеристикам. Следует отметить еще одну особенность: все производители индуктивных датчиков RVDT (Rotary Variable Differential Transformer – угловой дифференциальный трансформатор с переменным коэффициентом передачи) и оптических угловых энкодеров, в рекламных, целях относят их к бесконтактным. Действительно, в оптических энкодерах информация с дисков не снимается с помощью механических пружинных контактов, а путем прерывания луча света. В датчиках RVDT ферромагнитный сердечник, при поворотах на измеряемый угол, не касается катушек трансформа-

## Розділ 1. Інформаційні системи

тора, а передвигается рядом с ними, изменяя, при этом, взаимоиндуктивность между катушками. Но, при анализе применения этих датчиков в гироскопических системах необходимо учитывать, что в собранном виде в этих датчиках ферромагнитный сердечник и оптический диск установлены на опорах (диск на шарикоподшипниках) и для начала их вращения необходимо преодолевать момент трогания.

Рассмотрим конкретные типы датчиков:

- Абсолютный оптический энкодер компании SIEMENS.  
Высокая точность: приведенная погрешность  $\pm 0,044^\circ$ . Однако масса 500 г, момент трогания 3 Н·см, большие размеры, цена датчика типа MC ENCODER примерно 600 €.
- Абсолютные оптические энкодеры серии MEM компании ELAP ALTHERIS.  
Высокая точность – у лучших образцов приведенная погрешность  $\pm 0,01^\circ$ . Однако масса 400 ... 500 г, момент трогания 0,8 Н·см, сравнительно большие размеры, без учета разьема электрического кабеля: 63×63 мм. Цена 340 ... 405 €.
- Магнитные абсолютные энкодеры серии ЕМА той же компании имеют ту же точность и размеры, но меньшую стоимость: 230 ... 255 €.
- Оптические абсолютные энкодеры серии ARS компании SICK имеют погрешность  $\pm 0,04^\circ$ , а начальный момент 0,4 Н·см, габариты: 90×72 мм, масса 300 г, стоимость 500 ... 800 \$ США.

Если рассмотреть энкодеры меньшей точности, то они будут, естественно иметь меньшие габариты, массу и стоимость. Так, магнитные абсолютные энкодеры угловых перемещений компании ELAP ALTHERIS, при погрешности только от квантования равной 0,2% от полной шкалы, имеют диаметр 22 мм и стоимость 162 €. Но эти простые энкодеры имеют еще один существенный недостаток – у них на выходе не предусмотрен код Грея, и имеется только двоичный код, что вызывает, в некоторых участках шкалы, при переходе одного кода к другому, в случае наличия вибраций, толчков, очень большие погрешности, которые могут составлять десятки процентов, а это недопустимо для гироскопических систем.

Анализ технических характеристик угловых энкодеров других компаний показывает, что они аналогичны вышеприведенным. Из этого можно сделать вывод, что серийно выпускаемые энкодеры малоприспособны для гироскопических систем: при подходящей точности они имеют большие габариты, массу, стоимость. Но самое главное – все они вносят дополнительную погрешность из-за наличия момента трогания.

Потенциометрические датчики имеют хорошую точность (погрешность может быть не более 0,05..0,1 %) небольшой вес, габариты и стоимость. Поэтому они нашли широкое применение в гироскопических системах. Но у них три источника, создающих момент трогания: трение между щеткой и проволокой реостата, между второй щеткой и токосъемным

кольцом и трение в опоре приводного валика (крутящий момент 0,8 Н·см). Кроме того, они имеют ограниченный ресурс работы: 10 ... 500 тысяч циклов, а это немного, т. к. у бесконтактных датчиков (у которых нет проводящего покрытия с скользящим металлическим контактом) 10..50 миллионов циклов.

Емкостные датчики выпускают компании: Analog Devices. Capacitex, Trans-Tek, Texas Instruments. Лидером среди них является Trans-Tek. Датчики этой компании серии ADT имеют диапазоны преобразования:  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $360^\circ$ ; погрешность 0,1...0,2 % от полной шкалы, вес 170...350 г, максимальный момент трогания 5 Н·см. Как видно из этих данных, при широком диапазоне преобразований и хорошей точности, они имеют большой вес и момент трогания.

Индуктивные датчики этой же компании имеют более узкий диапазон угловых перемещений, более низкую точность и меньшие габариты, а остальные параметры, как и у емкостных датчиков.

Таким образом, анализ технических характеристик серийно выпускаемых датчиков угловых перемещений показывает, что они по диапазону измерения и по точности удовлетворяют требованиям гироскопических систем, но имеют большие габариты, массу и высокую стоимость. Существенным недостатком является большой момент трогания и вращения.

### **Некоторые вопросы повышения точности измерения угловых перемещений в гироскопических системах**

В подавляющем большинстве случаев в промышленности, энергетике и на транспорте измерение угловых перемещений производится в силовых агрегатах, механическая мощность которых намного больше механической мощности потребляемой измерительными устройствами. Поэтому момент трогания датчиков угловых перемещений, равный 0,4 ... 3 Н·см, практически не влияет на работу силовых агрегатов и на точность измерений. В гироскопических системах такие моменты трогания датчиков угловых перемещений, как было сказано выше, приводят к снижению точности измерений и для устранения влияния этого источника погрешностей приходится вводить системы силовой стабилизации.

Коренным образом изменить ситуацию можно применив полностью бесконтактный съём информации. Первый вариант конструкции можно представить таким образом: подвижные диски оптического, магнитного, или емкостного энкодеров разместить на осях карданного подвеса, а статорные части энкодеров на корпусе и раме гироскопа. Но настраивать такие системы, где расстояния между статорными и подвижными частями у высокоточных энкодеров необходимо устанавливать с высочайшей точностью технологически очень сложно, а любой перекосяк или изменение установленных расстояний приведет к сбою в работе энкодера. Возникают

## Розділ 1. Інформаційні системи

проблемы с изменением размеров в этой сложной конструкции под влиянием температуры.

Избавиться от этих проблем можно в измерителях на основе лазерных ИИС. Как было указано в начале статьи, установив на ось вращающегося объекта кулачок или изогнутую по форме винтовой линии шайбу можно измерять лазерными системами угловые перемещения. Здесь не требуется точной установки неподвижной части относительно подвижной. Любое смещение или неточность установки вызывает аддитивную составляющую погрешности и, практически, почти без всяких аппаратных и временных затрат эта погрешность устраняется цифровой аддитивной коррекцией.

Лазерные ИИС основанные на использовании волоконно-оптических датчиков (ВОД) разрабатываются и исследуются в институте электродинамики НАН Украины [3] – [8]. Среди разрабатываемых лазерных ИИС можно выделить фазовые и частотно-фазовые (ЧФ) лазерные ИИС, которые предназначены для бесконтактного измерения линейных и угловых перемещений. Для решения задачи измерения угловых перемещений в гироскопических системах перспективным является применения бесконтактных ЧФ ИИС.

Обобщенная структурная схема лазерной ЧФ ИИС представлена на рис. 1. На схеме приняты следующие условные обозначения: ПЛИ – полупроводниковый лазерный излучатель; УСЧ – управляемый синтезатор частоты; ФП1 и ФП2 – фотоприемники; ПЗ1 и ПЗ2 – полупрозрачные зеркала; ФРЦ – фазорасщепляющая цепочка; СМ1 и СМ2 – смесители; К – коммутатор; АТТ – аттенюатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь напряжения; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; ПК – персональный компьютер; Об – объектив; КО – контролируемый диффузно-отражающий объект (ось гировертикали).

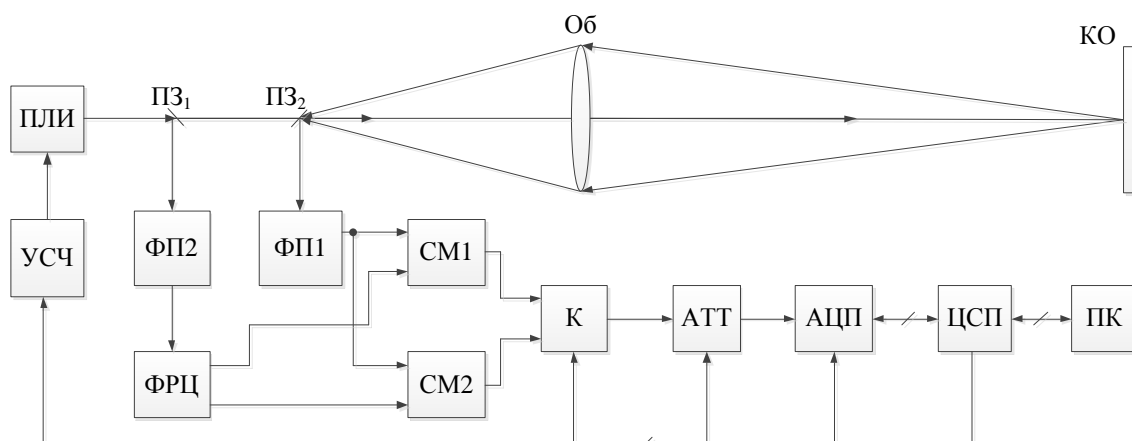


Рис. 1. Структурная схема частотно-фазовой измерительной системы

Принцип работы ЧФ системы, представленной на рисунке, следующий: модулированное лазерное излучение ПЛИ через полупрозрачное зеркало ПЗ1 и объектив Об направляется на контролируемый объект КО и ФП1 опорного канала. Отразившись от КО, световое излучение через Об направляется с помощью ПЗ2 на фотоприемник ФП2.

Частота модуляции ПЛИ определяется выходным напряжением УСЧ, устанавливаемым цифровым кодом. Последний поступает на управляющие входы УСЧ из регистра памяти цифрового сигнального процессора ЦСП. Изменение частоты модуляции имеет ступенчатый характер. При этом текущее значение частоты модуляции  $f_M(j)$ , изменяющееся в диапазоне 22 ... 90 МГц, можно представить в виде:

$$f_M(j) = f_0 + \Delta f \cdot j, \quad (1)$$

где  $f_0$  – начальное значение частоты модуляции,  $f_0 = 22$  МГц;  $\Delta f$  – шаг перестройки частоты модуляции;  $j$  – целое число,  $j = 1 \dots m$ . В свою очередь  $m = T_0 / \Delta t$  – целое число, где  $T_0$  – временной интервал, соответствующий длительности цикла изменения  $f_M(j)$ ;  $\Delta t$  – временной интервал, определяющий в частотно-фазовых системах время ступени заданной частоты модуляции [6], [7].

Выходные электрические сигналы фотоприемников ФП1 и ФП2 определяются выражениями:

$$U_{\text{ФП1}}(i\Delta t_d) = U_{m1} \sin(2\pi f_M i\Delta t_d + \varphi_k(i\Delta t_d)),$$

$$U_{\text{ФП2}}(i\Delta t_d) = U_{m2} \sin(2\pi f_M i\Delta t_d),$$

где  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  – амплитудные значения напряжений ФП1 и ФП2 соответственно;  $\varphi_k = 2\pi L / \lambda_s$  – фазовый сдвиг, отраженного от объекта сигнала при заданной частоте модуляции  $f_M$ ;  $L$  – измеряемое расстояние;  $\lambda_s$  – длина волны модулирующего напряжения  $f_M$ ;  $\Delta t_d$  – временной интервал дискретизации исследуемых электрических сигналов;  $i$  – целое число,  $i = 1 \dots n$ . где  $n = \Delta t / \Delta t_d$  – целое число.

Напряжение  $U_{\text{ФП1}}$ , соответствует измеряемому сигналу, поступает на один из входов смесителей СМ1 и СМ2. На вторые входы этих смесителей подается напряжение  $U_{\text{ФП2}}$ , используемое в качестве опорного (гетеродинного) сигнала, причем на входы смесителей СМ1 и СМ2 напряжение подается через фазорасщепляющую цепочку ФРЦ, обеспечивающую сдвиг фазы сигналов на  $\pm \varphi_{\text{СДВ}} = \pm 45^\circ$ . При этом выходные напряжения смесителей определяются выражениями:

$$U_{\text{СМ1}}(i\Delta t_d) = k_1(i\Delta t_d) \cdot U_{m1} \sin(2\pi f_M i\Delta t_d + \varphi_k) \cdot U_{m2} \sin(2\pi f_M i\Delta t_d + \varphi_{\text{СДВ}}),$$

$$U_{\text{СМ2}}(i\Delta t_{\text{д}}) = k_2(i\Delta t_{\text{д}}) \cdot U_{m1} \sin(2\pi f_M i\Delta t_{\text{д}} + \varphi_k) \cdot U_{m2} \sin(2\pi f_M i\Delta t_{\text{д}} - \varphi_{\text{СДВ}}),$$

где  $k_1(i\Delta t_{\text{д}})$  и  $k_2(i\Delta t_{\text{д}})$  – функции преобразования смесителей СМ1 и СМ2 соответственно  $1/B$ , причем  $k_1(i\Delta t_{\text{д}}) \approx k_2(i\Delta t_{\text{д}}) = k(i\Delta t_{\text{д}})$ .

Низкочастотные составляющие напряжений  $U_{\text{СМ1}}$  и  $U_{\text{СМ2}}$ , выделяемые фильтрами нижних частот, расположенные на выходах СМ1 и СМ2 соответственно, можно представить в виде:

$$U1(i\Delta t_{\text{д}}) = 0,5k(i\Delta t_{\text{д}}) \cdot U_{m1} U_{m2} \cos(\varphi_k(i\Delta t_{\text{д}}) + \varphi_{\text{СДВ}}),$$

$$U2(i\Delta t_{\text{д}}) = 0,5k(i\Delta t_{\text{д}}) \cdot U_{m1} U_{m2} \cos(\varphi_k(i\Delta t_{\text{д}}) - \varphi_{\text{СДВ}}).$$

Далее значения  $U1(i\Delta t_{\text{д}})$  и  $U2(i\Delta t_{\text{д}})$ , представляющие собой квадратурные составляющие исследуемого измерительного сигнала, через аттенюатор АТТ поступают на вход АЦП, выходной код которого пересылается в ЦСП. Цифровые данные, переданные в ЦСП, используются для вычисления фазового сдвига  $\varphi_k$  на основе метода преобразования Гильберта, которое в общем виде определяется как:

$$\varphi_k = \text{arctg} \left( \frac{\sum_{i=1}^n U1(i\Delta t_{\text{д}})}{\sum_{i=1}^n U2(i\Delta t_{\text{д}})} \right).$$

Значение  $\varphi_k$  из ЦСП пересылается в ПК для последующей цифровой обработки. В ПК производится преобразование частоты  $\varphi_k$  отраженного сигнала так, как это описано в [6]. Нормированная выходная величина системы в этом случае определяется как:

$$U_{\text{вых}}(j) = \sin(\varphi_k(j)). \quad (2)$$

Фазовый сдвиг  $\varphi$  огибающей принятого оптического сигнала [7] можно, также, записать как:

$$\varphi_k = 2\pi \cdot L/\lambda_s, \quad (3)$$

где  $L$  – измеряемое расстояние.

В свою очередь  $\lambda_s = c / 2f_m$ , где  $c$  – скорость света,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Тогда после подстановки в (3) значения  $\lambda_s$  с учетом выражения (1) получим

$$\varphi_k(j) = \frac{4\pi L}{c} \cdot (f_0 + j \cdot \Delta f). \quad (4)$$

На основании (2) и (4) нормированная по амплитуде выходная величина рассматриваемой измерительной системы может быть представлена в виде:

$$U_{\text{вых}}(j) = \sin(4\pi L(f_0 + j \cdot \Delta f) / c). \quad (5)$$

Применив БПФ к выражению (5), можно показать, что значение  $f_c$  частоты спектральной составляющей, равно:

$$f_c \approx 2L\Delta f / c = k_3 L, \quad (6)$$

где  $k_3 = 2\Delta f L / c$  – постоянный коэффициент.

Как следует из (6), значение  $f_c$  прямо пропорционально значению  $L$ . Таким образом, осуществив ортогональную обработку входных электрических сигналов ФП1 и ФП2 для оценки фазовых сдвигов на временном интервале  $T_0$  с учетом выборок мгновенных значений нормированной амплитуды исследуемого сигнала, можно определить  $f_c$ , а, следовательно, и измеряемое расстояние  $L$  [7]. После оценки расстояния  $L$  можно также постоянно контролировать перемещение КО, осуществляя каждый раз измерение расстояния. При этом значение перемещения  $\Delta L$  контролируемого объекта КО определяется по формуле  $\Delta L = L - L'$ , где  $L'$  - значение последнего измерения расстояния до КО. При этом значение  $\Delta L$  прямо пропорционально изменению угла оси гировертикали. Как показали проведенные исследования ЧФ ИИС [3], [5] – [8] погрешность измерения расстояния составляет не более 0,05 мм, а погрешность измерения угловых перемещений составляет не более  $0,005^0$  градуса.

В результате рассмотрения особенностей построения и функционирования лазерных дальномерных ИИС, основанных на применения ЧФ метода измерения угловых перемещений, установлено, что все "мешающие" объекты и блики, находящиеся на расстоянии, отличающемся от значения  $L$ , имеют спектральные составляющие другой частоты и не оказывают влияния на результат определения  $L$ . Это одно из основных преимуществ фазово-частотных дальномеров по сравнению с фазовыми ИИС. Кроме того ЧФ ИИС не присущи многие недостатки других ИИС измерения угловых перемещения.

## Выводы

В результате проведенных исследований показано, что серийно выпускаемые датчики угловых перемещений обладают высокой точностью, широким диапазоном измеряемых углов, но они имеют большие габариты, массу, высокую стоимость. А самым главным их недостатком при применении в гироскопических системах является то, что они вызывают большую погрешность от взаимодействия. Перспективным направлением явля-



ется применение бесконтактных систем, в частности лазерных. Представленная в статье разработка лазерной ЧФ системы института электродинамики НАН Украины позволяет практически полностью исключить мощность, потребляемую от измеряемого объекта и значительно повысить точность измерения.

Анализ лазерной ЧФ системы указывает на необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований с целью совершенствования конструкции лазерного измерителя угловых перемещений, что позволит рассмотреть практический вопрос о его применении в гироскопических системах.

### Список использованной литературы

1. Промышленные системы и технологии [Электронный ресурс]: каталог: энкодеры фирм: Baumer, Autonics, Hubner. Каталог содержит 112 наименований изделий. По каждому изделию имеется файл с техническими характеристиками (англ.). – М., 2013. – Режим доступа: [www.promsytex.ru/catalog/encoder](http://www.promsytex.ru/catalog/encoder).
2. ABSOLUTE ENCODER datasheet [Электронный ресурс]: каталог энкодеров фирм: SIEMENS, OMRON, NEC, ANALOG DEVICES, ASM GmbH, National Semiconductor и др. Каталог содержит 200 наименований изделий. По каждому изделию имеется файл с техническими характеристиками (англ.). – М., 2013. Режим доступа: [www.category.alldatasheet.ru.com/index.jsp](http://www.category.alldatasheet.ru.com/index.jsp).
3. Брагинец И. А. Применение фазо-частотного метода измерения расстояний в лазерной дальнометрии // И. А. Брагинец, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, А. Д. Ниженский / Технічна електродинаміка.- 2004.- №6.- С. 56-60.
4. Брагинец И. А. Импульсно-фазовый измерительный преобразователь для лазерных дальномеров // И. А. Брагинец, Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, А. Д. Ниженский / Технічна електродинаміка.- 2008.- №3.- С. 74-80.
5. Брагинец И. А. Динамические характеристики фазового лазерного датчика вибраций // И. А. Брагинец, Е. А. Зайцев / Технічна електродинаміка.- 2010.- №5.- С. 75-80.
6. Брагинец И. А. Частотно-фазовые лазерные измерители перемещений и вибраций с оптической калибровкой // И. А. Брагинец, Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, А. Д. Ниженский / Технічна електродинаміка.- 2011.- №6.- С. 71-77.
7. Зайцев Е. А. Особенности применения фазо-частотного метода в лазерной дальнометрии // Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко,

- А. Д. Ниженский, В. И. Латенко, И .А. Орнатский / Технічна електродинаміка.- 2008.- №6.- С. 65-71.
8. *Зайцев Е. А.* Специфические погрешности фазо-частотных лазерных измерителей расстояния // Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, А. Д. Ниженский, В. И. Латенко, И .А. Орнатский / Технічна електродинаміка.- 2009.- №3.- С. 50-55.