

## Позиционные лазерные измерительные системы с обратной связью по интенсивности излучения лазера

# 10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0623318

Сиротский А. А.

УДК 681.2.084

Российский государственный социальный университет, Москва  
[hotwater2009@yandex.ru](mailto:hotwater2009@yandex.ru)

### Введение

Повышение качества деталей и изделий машиностроения связано с повышением точности измерения их геометрических параметров. На точность лазерных измерительных систем (ЛИС), которые завоёвывают всё большую популярность как средства активного и пассивного контроля, оказывает влияние нестабильность (флуктуации) интенсивности лазерного излучения во времени, что может давать соответствующие погрешности измерений.

В позиционных ЛИС реализуется прямой метод преобразования перемещений в электрический сигнал. Лазер формирует луч, энергетическая ось которого является базовой эталонной прямой, а фотоприёмник устанавливается с оптически противоположной от апертуры лазера стороны. При перемещении по поверхности позиционно-чувствительного фотоприёмника (ПЧФ) пятна от луча лазера происходит изменение выходных напряжений на фотоприёмнике, по которым определяют величину отклонения измеряемой величины.

Целью работы является создание позиционной лазерной измерительной системы с улучшенными метрологическими характеристиками за счёт снижения погрешностей и повышения помехоустойчивости.

Новым в работе является предложенный способ формирования отражённого лазерного луча и организации обратной связи, позволяющей проводить дополнительные измерения интенсивности излучения лазера с целью активной коррекции в процессе работы системы.

## 1. Анализ научной проблемы и место данной работы

Проблема повышения точности измерений поднимается в работах таких отечественных учёных, как К.П. Латышенко, В.М. Веденов, М.А. Карабегов, Дорохов И.Н., Володин В.М. [1-3, 9]. Работами в области повышения точности позиционных лазерных измерительных систем занимается Федеральное Государственное унитарное предприятие «Научно-производственная корпорация "Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова» [4].

Иностранные компании занимаются исследованием и разработкой в основном лазерных измерительных систем интерферометрического типа. Среди зарубежных лазерных измерительных систем наиболее известны интерферометрические ЛИС (ИЛИС) фирмы Renishaw, Великобритания ([www.renishaw.ru](http://www.renishaw.ru)). ИЛИС компании Renishaw используются для оценки точности работы станков, координатно-измерительных машин (КИМ) и других устройств с прецизионным позиционированием исполнительных элементов. Благодаря монтируемым снаружи делителям лазерного луча эти системы обеспечивают высокие показатели точности измерений. Компания Renishaw, начиная с 2007 г., для оценки эксплуатационных параметров станков производит ИЛИС XL-80, пришедшую на смену ИЛИС ML10, производившейся с 1998 по 2007 г. ИЛИС XL-80 обеспечивает высокую точность калибровки систем перемещения, включая КИМ и станки. Отличающаяся быстродействием, точностью и портативностью, система XL-80 сохраняет при этом главные преимущества системы ML10, которые заключаются в надежности и износостойкости при ежедневном использовании. ИЛИС Renishaw оснащены программным обеспечением автоматизации процесса измерений. Габариты лазера XL-80 и блока компенсации XC-80 таковы, что вся система измерения линейных перемещений весит 12 кг. Отдельно поставляется штатив в отдельном чехле. Лазер и блок компенсации подсоединяются к компьютеру через USB-порт. Точность линейных измерений составляет  $\pm 0,5 \text{ ppm}$  благодаря источнику лазерного излучения с высокой степенью стабилизации. Стабильность частоты лазера систем Renishaw составляет  $\pm 0,05 \text{ ppm}$  в течение 1 года и  $\pm 0,02 \text{ ppm}$  в течение 1 часа. Такие характеристики достигаются благодаря термическому контролю длины трубки лазера в пределах нескольких нанометров. Показания могут считываться при частоте вплоть до 50 кГц, с максимальной скоростью линейных измерений 4 м/с. Все процедуры измерений основаны на интерферометрическом методе.

Несмотря на все достоинства ИЛИС, их стоимость чрезмерно высока, прежде всего из-за дорогостоящих лазерных излучателей, к которым предъявляются жесточайшие требования по стабильности частоты излучения.

В тоже время ПЛИС не критичны к частоте излучения лазера, взаимному расположению «деталь-измеритель», обеспечивают гибкость процесса контроля и универсальны. Основная задача развития ПЛИС – повышение их точности, рассматривается в данной работе и предыдущих работах автора [5-8].

## 2. Постановка задачи

Задачами работы являются разработка способа компенсации амплитудных флуктуаций и снижения их влияния на точность позиционных ЛИС, разработка принципов построения, базовых структурных и функциональных схем реализации ЛИС, а также элементов конструкций преобразовательных блоков ЛИС.

## 3. Исследования формирования сигнала на позиционно-чувствительном фотоприёмнике

Рассмотрим расположение пятна - лазерного зонда (ЛЗ) на поверхности ПЧФ (рис. 1). Пусть результирующий лазерный луч, направленный на ПЧФ с геометрическим центром в точке О, имеет энергетический центр в точке Е с радиус-вектором  $|\vec{r}_E|$  и координатами на поверхности ПЧФ  $X_E$  и  $Y_E$ . При этом напряжения на выходах ПЧФ в фиксированный момент времени принимают значения

$$U_{XE} = I_S \cdot S \cdot F \cdot X_E = I_S \cdot S \cdot F \cdot |\vec{r}_E| \cdot \cos(\varphi), \quad (1)$$

$$U_{YE} = I_S \cdot S \cdot F \cdot Y_E = I_S \cdot S \cdot F \cdot |\vec{r}_E| \cdot \sin(\varphi), \quad (2)$$

где  $I_S$  – текущее значение уровня интенсивности излучения ЛЗ;  $S$  – координатная чувствительность ПЧФ по осям  $X$  и  $Y$ ;  $F$  – мощность ЛЗ.

Тогда результирующий модуль напряжения на выходе ПЧФ равен

$$\overline{U_{rE}} = I_S \cdot S \cdot F \cdot |\vec{r}_E|. \quad (3)$$

Отсюда можно сделать вывод о том, что при постоянных  $S$  и  $F$  модуль напряжения на выходе ПЧФ зависит как от величины  $|\vec{r}_E|$ , так и от интенсивности излучения ЛЗ  $I_S$ . Следовательно, при регистрации на выходе ПЧФ напряжения  $\overline{U_{rE}}$ , радиус-вектор положения энергетического центра ЛЗ должен определяться с учётом текущего значения интенсивности излучения ЛЗ из выражения

$$|\vec{r}_E| = \frac{\overline{U_{rE}}}{I_S \cdot S \cdot F} \quad . \quad (4)$$

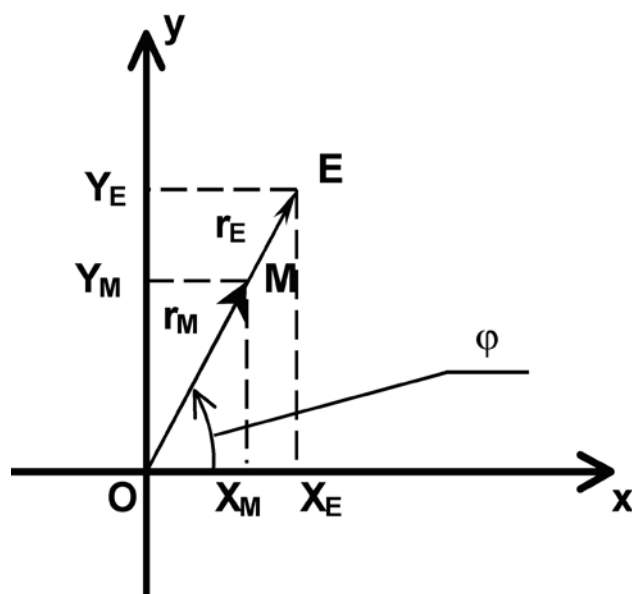


Рис. 1. Лазерный зонд на поверхности ПЧФ

Если текущее значение интенсивности излучения  $I_S$  не измеряется, то интенсивность излучения ЛЗ считается постоянной и равной некоторому принятому значению  $I_0$ . В этом случае радиус-вектор положения энергетического центра ЛЗ будет определяться как

$$|\overline{r_M}| = \frac{\overline{U_{rE}}}{I_0 \cdot S \cdot F} \quad (5)$$

Это означает, что вместо регистрации действительного радиус-вектора  $|\overline{r_E}|$ , будет определяться некоторый мнимый радиус-вектор  $|\overline{r_M}|$ . Таким образом, абсолютная ошибка измерений составит

$$|\Delta \overline{r}| = \left| \frac{\overline{U_{rE}} \cdot (I_0 - I_S)}{I_0 \cdot I_S \cdot S \cdot F} \right|. \quad (6)$$

Относительная ошибка измерений составит

$$N = \frac{|\Delta \overline{r}|}{|\overline{r_E}|} \cdot 100 = \frac{I_0 - I_S}{I_0} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Можно указать по крайней мере три важных фактора, дающих наиболее существенный вклад в величину возникающей погрешности.

1) Луч на выходе лазера может иметь собственные нестабильности интенсивности излучения во времени.

2) Луч обладает затуханием и его интенсивность уменьшается за счёт поглощения средой распространения при удалении от источника, а также за счёт частичного рассеяния на неоднородностях среды распространения.

3) Между излучателем и ПЧФ, установленным оптически противоположно апертуре лазера и перпендикулярно лазерному лучу, могут возникать амплитудно-фазовые искажения (флуктуации) излучения.

#### **4. Способ коррекции погрешностей по интенсивности излучения**

Повысить точность измерений и снизить возникающие погрешности возможно введением обратной связи по интенсивности излучения, падающего на поверхность ПЧФ, конструктивно выражающейся в организации дополнительных измерений с обработкой результатов по специальному алгоритму.

На рис. 2 показан способ коррекции погрешностей по интенсивности излучения с помощью вспомогательных измерений. ЛИС состоит из лазера 1, объекта измерения 3, измерительного ПЧФ 4 (например, установленного на объекте, перемещения которого измеряются), дополнительного опорного фотоприёмника (ФП) 6, усилителей 7 и 9, АЦП 8 и 10 и ЭВМ 11. Лазерный луч 2, выходящий из лазера 1, направляется на ПЧФ 4, который расположен под некоторым непрямым углом по отношению к падающему на него лучу 2. От поверхности ПЧФ 4 луч отражается, и отражённый луч 5 направляется на ФП 6, который регистрирует текущую интенсивность излучения в каждый момент времени. Через усилитель 7 и АЦП 8 в ЭВМ 11 поступает информация с измерительного канала с ПЧФ 4 о текущем положении объекта измерения. Через усилитель 9 и АЦП 10 в ЭВМ 11 в каждый момент времени поступает информация с ФП 6, который регистрирует интенсивность лазерного луча 5.

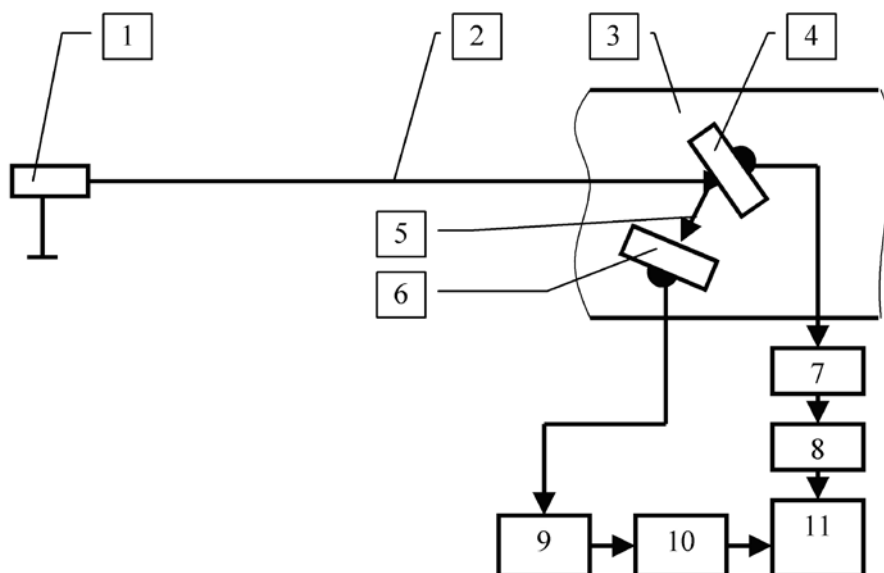


Рис. 2. Способ коррекции погрешностей измерений дополнительными измерениями интенсивности излучения, отражённого от поверхности измерительного ПЧФ (система отражённого луча)

Отличительной особенностью способа, названного «Система отражённого луча» (СОЛ), является то, что регистрируется непосредственно интенсивность лазерного излучения, падающего на поверхность измерительного ПЧФ 4. Таким образом, при увеличении трассы контроля и длины оптического пути луча 2, будет учтено соответствующее затухание интенсивности оптического излучения (при этом ФП 6 должен быть закреплён неподвижно относительно ПЧФ 4).

Рассмотренная на рис. 2 схема ЛИС СОЛ имеет некоторый недостаток. Поскольку луч падает на поверхность ПЧФ 4 под некоторым углом, отличающимся от прямого, то при исходно круглом сечении луча 2 на поверхности ПЧФ 4 световое пятно будет эллипсообразной формы (рис. 3), причем малая ось эллипса будет равна исходному диаметру луча, выходящего из источника, а большая ось эллипса будет равна

$$d_{\text{эл\_больш}} = \frac{d_{\text{исх}}}{\cos(\psi)}, \quad (8)$$

где  $d_{\text{эл\_больш}}$  – большая ось эллипса ЛЗ на поверхности ПЧФ;  $d_{\text{исх}}$  – исходный диаметр луча, падающего на ПЧФ;  $\psi$  - угол падения луча. Или

$$d_{\text{эл\_больш}} = d_{\text{исх}} \cdot K_{\text{расш}}, \quad (9)$$

где  $K_{расш} = \frac{1}{\cos(\psi)}$  - коэффициент расширения пятна луча по одной координате на поверхности ПЧФ.

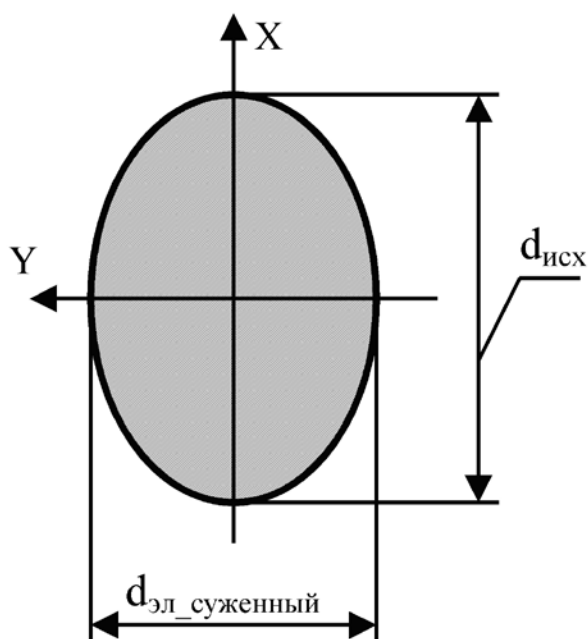


Рис. 3. Эллипсообразное сечение ЛЗ на поверхности ПЧФ

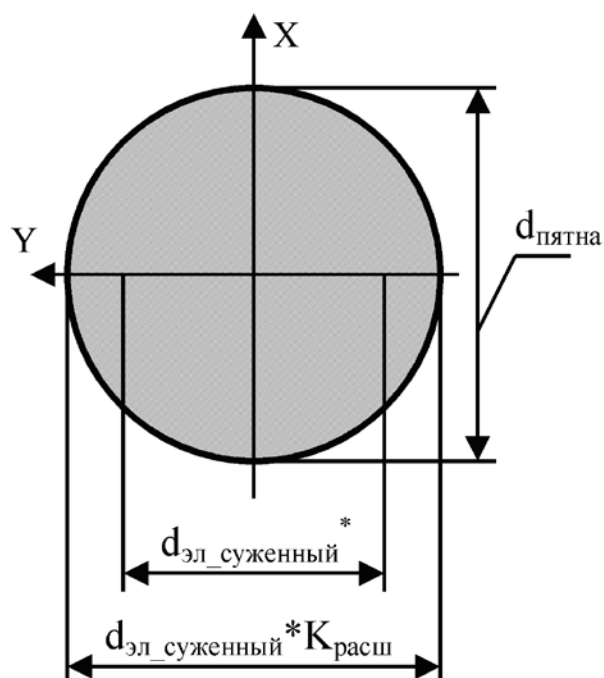


Рис. 4. Круглое сечение ЛЗ на поверхности ПЧФ

Так как в данном случае ЛЗ на поверхности ПЧФ будет иметь форму эллипса, то получится разный масштаб измерений по осям X и Y ПЧФ. Для обеспечения одинаковых

масштабов измерений по осям X и Y ПЧФ, необходимо получение на поверхности ПЧФ ЛЗ круглого сечения, как это показано на рис. 4.

Для исключения влияния на точность измерений погрешности углового положения и координатной ориентации ПЧФ и для обеспечения одинакового масштаба измерений по координатам X и Y ПЧФ, предлагается способ построения ЛИС СОЛ, показанный на рис. 5.

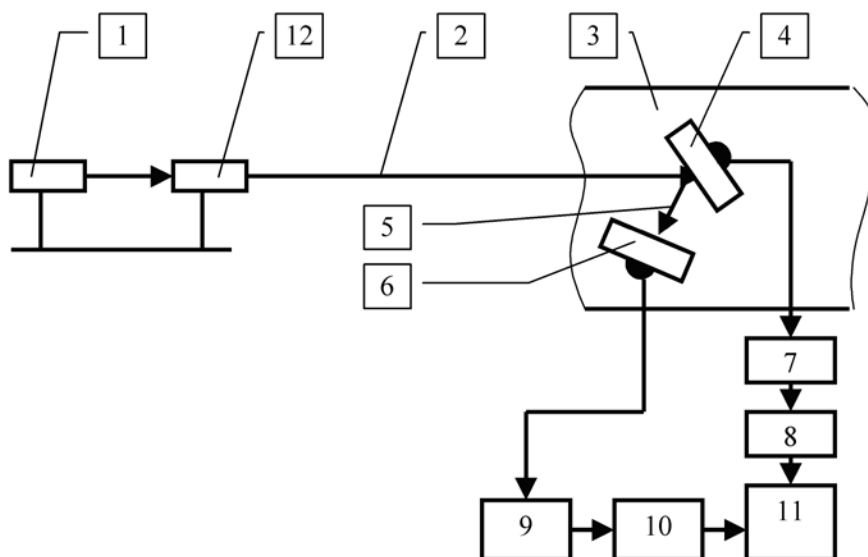


Рис. 5. ЛИС СОЛ с дополнительной оптической системой

Способ построения ЛИС СОЛ, показанный на рис. 5, отличается от рассмотренного ранее наличием оптической системы 12, состоящей из линз, сужающих или расширяющих пучок излучения только по одной координате. При этом выходящий из оптической системы 12 лазерный луч будет иметь эллипсообразное сечение, а световое пятно на поверхности ПЧФ 4 будет получаться круглым, т.к. луч лазера направляется на поверхность ПЧФ 4 под углом  $\psi$ , как это было описано выше.

Для того, чтобы ЛЗ на поверхности ПЧФ 4 был круглым, необходимо с помощью оптической системы 12 расширить луч по оси, перпендикулярной оси расширения на поверхности ПЧФ 4, при этом коэффициент расширения должен быть равен

$$K_{раси} = \frac{1}{\cos(\psi)}. \quad (10)$$

Для получения круглого светового пятна на поверхности ПЧФ 4, можно также с помощью оптической системы 12 не расширять луч согласно уравнения (10), а сужать его по той оси, по которой расширится световое пятно при падении луча на ПЧФ 4, при этом коэффициент сужения должен быть обратно пропорционален коэффициенту расширения:



$$K_{\text{сужения}} = \frac{1}{K_{\text{раси}}} = \cos(\psi). \quad (11)$$

В этом случае выходящий из оптической системы 12 ЛЗ будет сужен по одной из осей, а ось эллипса после сужения выходящего из оптической системы 12 луча будет равна

$$d_{\text{эл\_суженный}} = d_{\text{исх}} \cdot K_{\text{сужения}} = d_{\text{исх}} \cdot \cos(\psi). \quad (12)$$

Описанные закономерности иллюстрируются на рис. 3 и рис. 4.

Оптическая система 12 (рис. 5) юстируется таким образом, чтобы ЛЗ на поверхности ПЧФ 4 имел круглую форму. При этом есть два способа:

- сужать оптической системой 12 луч по одной оси;
- расширять оптической системой 12 луч по одной (другой) оси.

В первом случае окончательный диаметр светового пятна на поверхности ПЧФ 4 после юстировки системы будет равен исходному диаметру луча, выходящему из излучателя:

$$d_{\text{пятна}} = d_{\text{эл\_суженный}} \cdot K_{\text{раси}} = d_{\text{исх}}. \quad (13)$$

Во втором случае окончательный диаметр светового пятна на поверхности ПЧФ 4 после юстировки системы будет равен

$$d_{\text{пятна}} = d_{\text{исх}} \cdot K_{\text{раси}} = \frac{d_{\text{исх}}}{\cos(\psi)}. \quad (14)$$

При этом диаметр пятна на ПЧФ 4 будет больше исходного диаметра луча, и с увеличением угла  $\psi$  падения луча на ПЧФ 4, будет увеличиваться и окончательный диаметр пятна на поверхности ПЧФ 4.

Таким образом, предлагаемая система позволяет изменением угла  $\psi$  падения луча на ПЧФ 4 влиять на окончательный диаметр ЛЗ. Эта возможность может использоваться при необходимости одновременно увеличить диаметр ЛЗ, если того требует конструктивная особенность использования ЛИС. Выбор типа оптической системы (сужающая или расширяющая) определяется на основании предъявляемых требований к измерительной системе. Тот факт, что в любом случае применение оптической системы 12 позволяет получить на ПЧФ 4 ЛЗ круглой формы, позволяет располагать ПЧФ 4 в любой пространственной координатной ориентации.

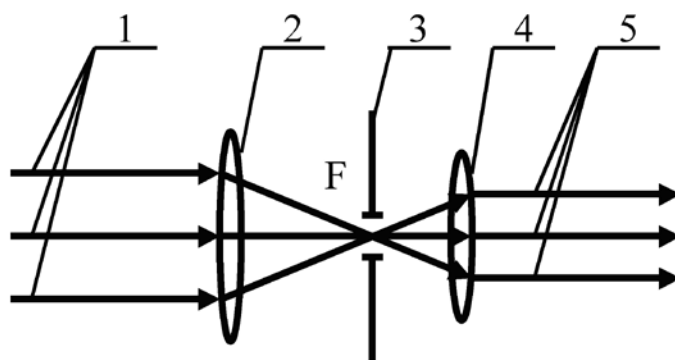


Рис. 6. Дополнительный оптический блок системы СОЛ

На рис. 6 изображена оптическая система сужения пучка луча, состоящая из профилированной (цилиндрической) линзы 2, диафрагмы 3 и обычной или профилированной (цилиндрической) линзы 4. Входящий пучок 1 попадает на собирающую цилиндрическую линзу 1, фокусируется в точке F, нормируется диафрагмой 3, и далее расширяется до нужного размера линзой 4, причем фокусы линз 2 и 4 совмещены в точке F, являющейся фокусом одновременно обеих линз. Особенностью данной схемы является использование специальных линз, являющихся плоскими (нефокусирующими) в одной плоскости, например, вертикальной, и профилированными в другой плоскости.

Таким образом, сечение пучка излучения, выходящего из оптической системы, будет иметь вид, показанный на рис. 3, а вид ЛЗ, формирующегося на поверхности ПЧФ 4 (рис. 5), будет иметь вид, показанный на рис. 4.

В процессе работы ЛИС СОЛ, при перемещениях в пространстве ПЧФ 4 (рис. 5) в ортогональной системе координат относительно пространственного положения лазерного луча, ЛЗ на фоточувствительной поверхности ПЧФ 4 не будет изменять геометрической формы ввиду того, что угол падения  $\psi$  луча на поверхность ПЧФ 4 остается при этих условиях постоянным.

Таким образом, обеспечивается получение круглого ЛЗ на поверхности измерительного ПЧФ при одновременном угловом его расположении по отношению лазерному лучу. Отражённый от поверхности измерительного ПЧФ лазерный луч направляется на дополнительный ФП, который регистрирует интенсивность излучения, и выполняет функции лазерного датчика дополнительных измерений интенсивности излучения (обратной связи). Это позволяет компенсировать погрешности измерения,

которые могут возникнуть при флуктуациях интенсивности лазерного излучения во времени.

### **Заключение**

Предложенная СОЛ как способ повышения точности и помехоустойчивости ЛИС характеризуется тем, что направляют световой поток излучателя через оптическую систему на ПЧФ, закреплённый в измерительном блоке, по выходному сигналу которого судят о перемещениях измерительного блока, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерений и ликвидации амплитудно-фазовых флуктуаций светового луча, формируют оптической системой световой луч с сечением, обеспечивающим получение круглого светового пятна на поверхности ПЧФ, направляют его к плоскости светочувствительной поверхности ПЧФ под углом, при котором исключается попадание отражённого луча обратно в излучатель, отражённый от поверхности ПЧФ луч направляют на дополнительный фотоприёмник, выходной сигнал которого используют для учёта нестабильности интенсивности светового потока излучателя.

Аналитические и экспериментальные исследования показывают, что за счёт применённых технических решений погрешности измерений снижаются на 20% - 30%, что обусловлено практически полным исключением из факторов возникновения погрешностей амплитудных флуктуаций лазерного излучения.

### **Список литературы**

1. Веденов В.М., Сиротский А.А. Фотоэлектрический способ измерения механических перемещений : пат. 2196300 РФ. 2001.
2. Karabegov M.A. A method of increasing the accuracy of industrial analyzers by automatic correction with respect to a "reference" quantity // Measurement Techniques. Scientific and Production Association Central Research, Institute of Machine Building Technology (NPO TsNIITmash), 2010. Vol. 53, no. 6. P. 699-707.
3. Бугров А.В., Латышенко К.П., Левин А.В. Способ определения отклонения амплитуды сигнала датчика : пат. 2121149 РФ. 1998.
4. Пинаев Л.В., Леонтьева Г.В., Бутенко Л.Н., Серегин А.Г. Лазерный измеритель непрямолинейности : пат. 2457434 РФ. 2010.
5. Сиротский А.А. Контроль отливок автоматизированными лазерными измерительными системами // Литейщик России. 2002. № 7-8. С. 27-29.

6. Сиротский А.А. Программное и математическое обеспечение автоматизированных прецизионных лазерных измерительных систем с двумя оптически обращёнными каналами // Известия МГТУ «МАМИ». 2008. № 2. С. 157-165.
7. Сиротский А.А. Средства и методы автоматизации технологических процессов литейного производства // Автомобильная промышленность. 2007. № 1. С. 35-37.
8. Сиротский А.А. Повышение точности позиционных лазерных измерительных систем // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. № 12. С. 72-74.
9. Сиротский А.А., Дорохов И.Н., Володин В.М. Лазерные измерительные системы с двумя оптически обращёнными каналами и отражателем для контроля геометрии протяжённых нефтегазовых трубопроводов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 7. С. 29-31.

**Positional laser measuring systems with feedback on intensity of laser radiation**

# 10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0623318

Sirotskii A.A.

Moscow, Russian State Social University

[hotwater2009@yandex.ru](mailto:hotwater2009@yandex.ru)

This article deals with increase in accuracy of positional (photo-electric) laser measuring systems. Amplitude instability of laser radiation represents the most significant part of total measurement error. A method for introducing feedback on intensity of laser radiation into the structure of a laser measuring system was proposed; this feedback allows one to stabilize the measuring system parameters. Introduction of this feedback was provided by mounting an additional photoreceiver which registers the reflected laser beam; a signal from the photoreceiver is used for correction of information received from the main measuring channel.

---

**Publications with keywords:** [dimensions](#), [measuring](#)[system](#), [error](#), [control](#), [exactness](#), [amplitude](#), [laser](#), [compensation](#), [reflection](#), [photodetector](#), [fluctuations](#)**Publications with words:** [dimensions](#), [measuring](#)[system](#), [error](#), [control](#), [exactness](#), [amplitude](#), [laser](#), [compensation](#), [reflection](#), [photodetector](#), [fluctuations](#)

---

## References

1. Vedenov V.M., Sirotskiy A.A. *Fotoelektricheskiy sposob izmereniya mekhanicheskikh peremeshcheniy* [Photo-electric way of measurement of mechanical movements]. Patent RF, no. 2196300, 2001.
2. Karabegov M.A. A method of increasing the accuracy of industrial analyzers by automatic correction with respect to a "reference" quantity. *Measurement Techniques*. Scientific and Production Association Central Research, Institute of Machine Building Technology "NPO TsNIITmash", 2010, vol. 53, no. 6, pp. 699-707.
3. Bugrov A.V., Latyshenko K.P., Levin A.V. *Sposob opredeleniya otkloneniya amplitudy signala datchika* [Way of definition of a deviation of amplitude of a signal of the sensor]. Patent RF, no. 2121149. 1998.

4. Pinaev L.V., Leont'eva G.V., Butenko L.N., Seregin A.G. *Lazernyy izmeritel' nepryamolineynosti* [Laser measuring instrument of not straightforwardness]. Patent RF, no. 2457434. 2010.
5. Sirotskiy A.A. Kontrol' otlivok avtomatizirovannymi lazernymi izmeritel'nyimi sistemami [Control of castings by the automated laser measuring systems]. *Liteyshchik Rossii* [Russia Caster], 2002, no. 7-8, pp. 27-29.
6. Sirotskiy A.A. Programmnoe i matematicheskoe obespechenie avtomatizirovannykh pretsizionnykh lazernykh izmeritel'nykh sistem s dvumya opticheski obrashchennymi kanalami [Program and software of the automated precision laser measuring systems with two optically turned channels]. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [News of MSTU "MAMI"], 2008, no. 2, pp. 157-165.
7. Sirotskiy A.A. Sredstva i metody avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov liteynogo proizvodstva [Means and methods of automation of technological processes of foundry production]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2007, no. 1, pp. 35-37.
8. Sirotskiy A.A. Povyshenie tochnosti pozitsionnykh lazernykh izmeritel'nykh sistem [Increase of accuracy of position laser measuring systems]. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2008, no. 12, pp. 72-74.
9. Sirotskiy A.A., Dorokhov I.N., Volodin V.M. Lazernye izmeritel'nye sistemy s dvumya opticheski obrashchennymi kanalami i otrazhatelem dlya kontrolya geometrii protyazhennykh neftegazovykh truboprovodov [Laser measuring systems with two optical inverse channels and deflector for control over geometry of distant oil-gas pipelines]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2008, no. 7, pp. 29-31.