

**А. Н. Байбаков, В. И. Ладыгин, А. И. Пастушенко,
С. В. Плотников, Н. Т. Тукубаев, С. П. Юношев**

(Новосибирск)

**ЛАЗЕРНЫЕ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ
В ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМАХ
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ**

Приведены результаты исследований зависимости погрешности триангуляционных измерений от алгоритмов обработки сигналов и ширины зондирующего пучка. Показано, что использование медианного алгоритма обработки и зондирующего пучка шириной 100 мкм позволяет снизить минимальную погрешность с 10 до единиц микрометров. Рассмотрены схмотехнические решения, обеспечивающие повышение быстродействия датчиков в диапазоне 1000–100000 измер./с. Это позволило решать сложные комплексные задачи и расширило область применения лазерных датчиков положения. Приведены примеры использования лазерных датчиков положения, разработанных в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН, в контрольно-измерительных системах, применяемых в металлургической и автомобильной промышленности, энергетической отрасли и на железнодорожном транспорте.

Введение. Неотъемлемой частью современного промышленного производства является контроль параметров технологического процесса и готовой продукции. В отраслях, связанных с металлообработкой (машиностроении, автомобильной, авиационной и атомной), среди операций контроля значительную долю занимает контроль геометрических параметров. Основными требованиями к приборам размерного контроля являются высокая точность (погрешность менее 10 мкм), быстродействие (сотни измерений в секунду), возможность контроля параметров сложнопрофильных изделий, а также надежность, гибкость и совместимость с автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Существующий парк контрольно-измерительных средств, состоящий в основном из пробок, шаблонов, скоб, а также систем на основе контактных датчиков, не отвечает таким требованиям, так как проводимый допусковой контроль субъективен, непроизводителен и непригоден для оперативной коррекции технологического процесса. В классе оптико-электронных измерительных устройств наиболее широкую сферу применения имеют модульные устройства, состоящие из набора универсальных измерительных и управляющих модулей. Это позволяет в кратчайшие сроки создавать новые контрольно-измерительные устройства под конкретную задачу технологического процесса.

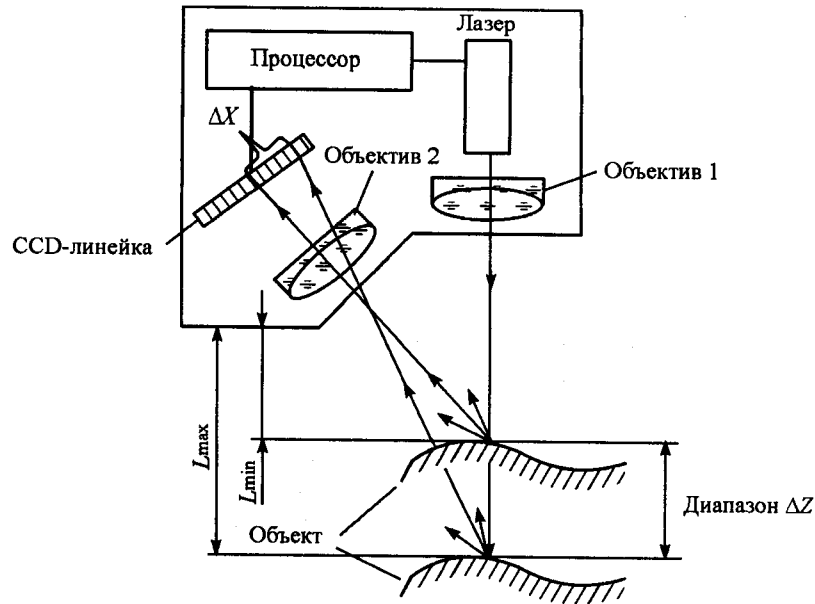


Рис. 1. Оптическая схема для диффузно рассеивающих объектов

Одним из таких устройств является лазерный датчик положения (ЛДП) серии Лабракон®, созданный на основе триангуляционного метода измерений.

Триангуляционный метод является одним из распространенных оптико-электронных методов измерения расстояний до объекта в силу простоты реализации [1]. Принцип его действия для различных объектов представлен на рис. 1 и 2. Излучение полупроводникового лазера фокусируется объективом 1 на поверхности контролируемого объекта. Рассеянное (см. рис. 1) или отраженное (см. рис. 2) поверхностью излучение собирается объективом 2

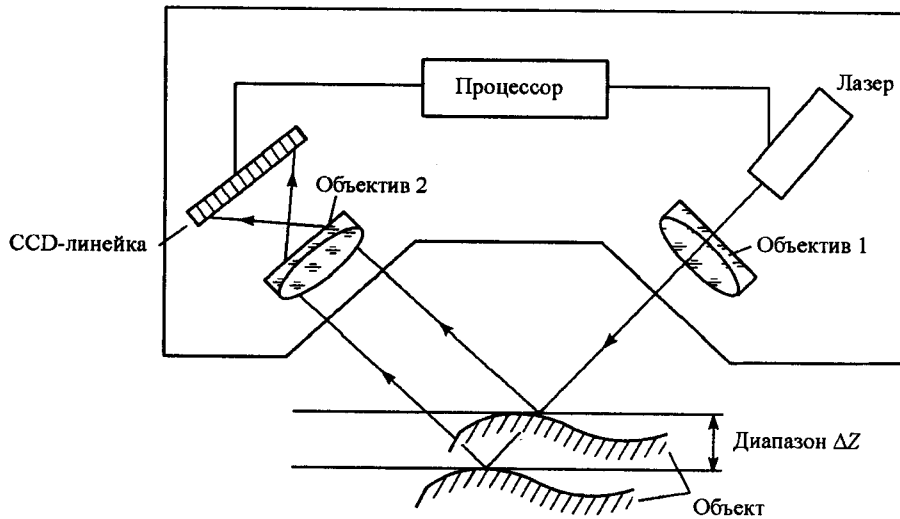


Рис. 2. Оптическая схема для зеркальных объектов

на фотоприемнике. Процессор сигналов рассчитывает расстояние до объекта ΔZ по положению изображения светового пятна на фотоприемнике ΔX .

Развитие триангуляционных технологий в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН (КТИ НП). Одна из первых моделей ЛДП серии Лабракон® на основе фотодиодной линейки, разработанная в КТИ НП в 1989 г., имела диапазон измерения расстояний до 25 мм и основную погрешность измерения 10 мкм (разрешение 1 мкм) при быстродействии до 30 измер./с.

На базе двух таких датчиков, включенных по дифференциальной схеме, разработан и создан измеритель толщины, который позволяет контролировать холоднокатаную ленту толщиной до 10 мм с погрешностью не более 12 мкм (рис. 3).

Опыт работы с ЛДП показал, что их применение на практике сдерживается большим уровнем погрешностей, возникающих при контроле объектов с так называемыми техническими поверхностями, которые имеют выраженные следы механической обработки. Поэтому проведен поиск способов улучшения точности триангуляционных измерений с учетом их функционирования в цеховых условиях (при наличии большого перепада температуры, пыли и т. д.), а также разработаны схемотехнические решения, обеспечивающие повышение быстродействия датчиков.

С целью снижения погрешности измерений была исследована эффективность различных алгоритмов обработки выходных сигналов ЛДП путем численного моделирования, а также в условиях их реальной работы с техническими поверхностями. Установлено, что среди традиционных алгоритмов обработки наиболее оптимальным по точности и быстродействию является медианный алгоритм [2], обеспечивающий при правильном выборе параметров снижение погрешности в 1,5 раза. Дальнейшее снижение (более чем в 2 раза) пространственного шума, обусловленного анизотропией микроструктуры технической поверхности, достигается при использовании бинокулярной схемы измерения. Исследовано также влияние на точность измерений степени когерентности освещающего поверхность зондирующего пучка, формы объекта и ориентации его поверхности и доказано, что при использовании частично-когерентного зондирующего пучка погрешность измерений может быть уменьшена в 4–7 раз [2, 3].

В этих работах проведено исследование зависимости погрешности измерений триангуляционных систем от ширины зондирующего пучка. На рис. 4 приведен типичный график с четким минимумом зависимости погрешности измерений dZ от ширины зондирующего пучка L для образца металлической поверхности (кривая 1). Значения ширины пучка, обеспечивающие минимум погрешности для поверхностей из различного материала и различной шероховатости Rz (от 0,7 до 4,2 мкм), оказались близкими и находятся в интервале 60–90 мкм. Эта величина сравнима с разрешением измерительной системы, используемой в исследованиях. Также установлено, что для керамических и стеклянных объектов с малой шероховатостью по-

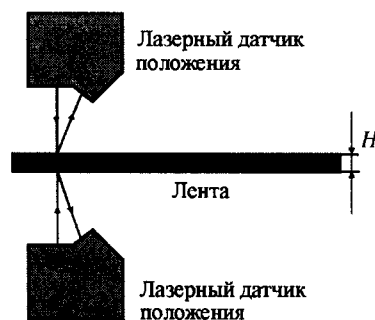


Рис. 3. Измерение толщины металлической ленты

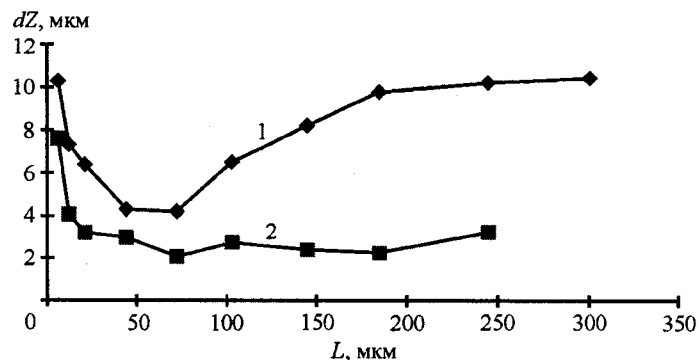


Рис. 4. Зависимость стандартного отклонения dZ от ширины пучка L : $Rz = 4,2$ мкм (кривая 1), $Rz = 0,7$ мкм (кривая 2)

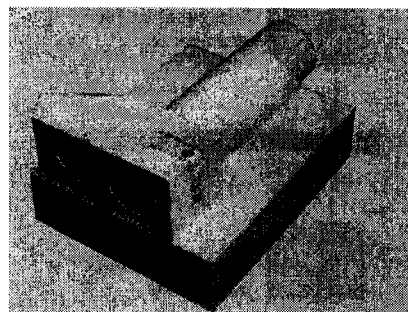
верхности при увеличении ширины пучка погрешность сначала уменьшается, а затем остается практически постоянной (кривая 2). Полученные результаты позволили сделать оптимальный выбор параметров при разработке систем на основе ЛДП, обеспечивающий наименьшую погрешность измерений.

Совместно с Институтом технической оптики Штутгартского университета (Германия) были исследованы варианты построения сканирующих триангуляционных измерительных систем. В результате создан и испытан макет триангуляционной сканирующей системы, основанный на сканировании одним зеркалом как зондирующего пучка, так и лучей, формирующих изображение пятна. Опыт эксплуатации устройства показал перспективность триангуляционного метода для построения систем трехмерного контроля [4].

Промышленное применение ЛДП серии Лабракон®. В 1996 г. на основе датчика ЛДП-25/120 (рис. 5) было разработано устройство бесконтактного контроля радиальных dR и торцевых dH биений автомобильных колес для работы в составе автоматической производственной линии. Контролируемое колесо подается на шпиндель, входящий в состав автоматической линии производства колес (рис. 6, а), дальнейшее измерение параметров колеса происходит бесконтактно и в автоматическом режиме [5].

Результаты измерений отображаются на экране монитора и сохраняются в памяти управляющего компьютера. В случае превышения биениями колеса допустимых значений формируется сигнал «Брак» и автоматическая линия помещает данное колесо в накопитель бракованной продукции.

Система на базе четырех датчиков ЛДП-25/120 эксплуатируется на АО «АВТОВАЗ» (г. Тольятти) в составе автоматической линии изготовления колесных дисков. Она заменила использовавшееся ранее контактное устрой-



во контроля, что позволило радикально повысить точность измерений и надежность линии. Верхний предел контролируемых биений до 5 мм, погрешность измерения не более 50 мкм (рис. 6, б).

При разработке данной системы, благодаря применению сигнальных процессоров типа TMS-320 и скоро-

Рис. 5. Датчик ЛДП-25/120

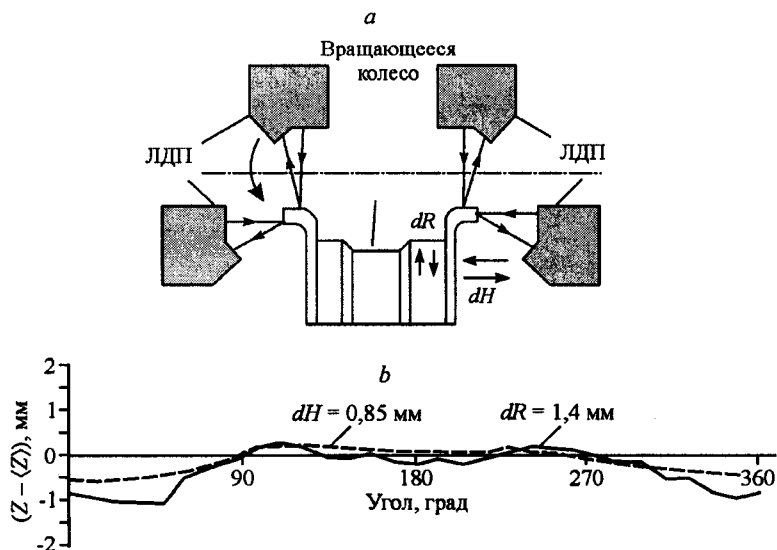


Рис. 6. Система бесконтактного контроля биений колес: измерение радиального dR и торцевого dH биений (а) и результаты контроля биений (б)

стных специализированных интерфейсов, удалось довести быстродействие ЛДП до 500 измер./с.

В отличие от предыдущей модели датчик ЛДП-20/120 (рис. 7) при тех же точностных характеристиках и диапазоне измерений позволяет работать с более широким классом поверхностей контролируемых объектов. Он имеет пылевлагозащитный корпус и адаптирован для работы в цеховых условиях при температурах от 10 до 45 °С [6]. Диапазон измерения составляет 20 мм, погрешность измерения в зависимости от шероховатости контролируемой поверхности изменяется в пределах 0,01–0,03 мм при разрешении 0,001 мм. При этом реальное быстродействие ЛДП составляет 300 измер./с. В режиме максимального быстродействия (до 1000 измер./с) обработка сигналов проводится по упрощенным пороговым алгоритмам, что приводит к увеличению погрешности измерений до 0,03–0,05 мм.

Совместно с Институтом автоматики и электрометрии СО РАН на основе ЛДП-20/120 разработан измеритель биений и смещений валов гидроагрегатов ГЭС, предназначенный для эксплуатации в составе АСУ ТП Новосибирской ГЭС. На рис. 8 приведены циклограмма и амплитудный спектр биений вращающегося вала.



Рис. 7. Датчик ЛДП-20/120

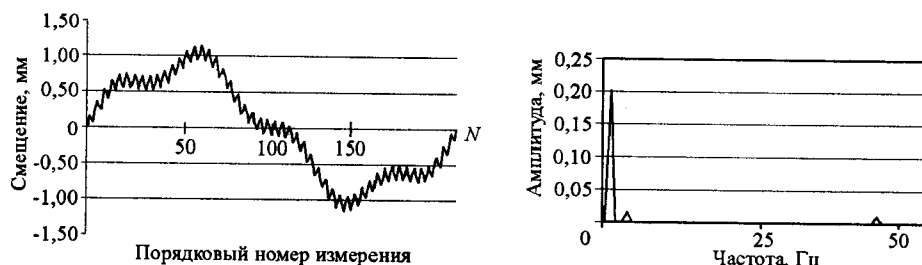


Рис. 8. Циклограмма вращающегося вала и амплитудный спектр биений

Датчик ЛДП-20/120 адаптирован для работы в сети ProfiBUS и имеет дополнительную защиту электронных модулей от электромагнитных полей. Его отличительной особенностью является наличие встроенного цифрового индикатора, который позволяет оператору быстро считывать текущие показания (расстояния до объекта или биения), что существенно расширяет возможности применения данного типа ЛДП.

Для ОАО «НЗХК» разработана установка измерения геометрических размеров цилиндрических изделий «Бурун» (рис. 9). В ней под управлением контроллера находится шесть датчиков серии Лабракон® типа ЛДП-20/39, четыре из которых предназначены для измерения диаметров изделия в четырех сечениях, а два для измерения высоты изделия и выступа сварного шва. Установленный в датчике сигнальный процессор APSP-2185 выполняет цифровую обработку сигнала фотодиодной линейки и вычисляет измеряемую величину. Диапазон измерений составляет 20 мм, погрешность измерения 0,02 мм при доверительной вероятности 0,95. При этом реальное быстродействие ЛДП-20/39 составляет 500 измер./с (в режиме максимального быстродействия до 1000 измер./с).

В 2002 г. создан автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар вагонов на подходах к станции («Комплекс»). Для решения поставленной задачи также были использованы датчики серии Лабракон® ЛДП-170/410 (рис. 10), с помощью которых измеряют профиль сечения внутренней и внешней поверхности коле-

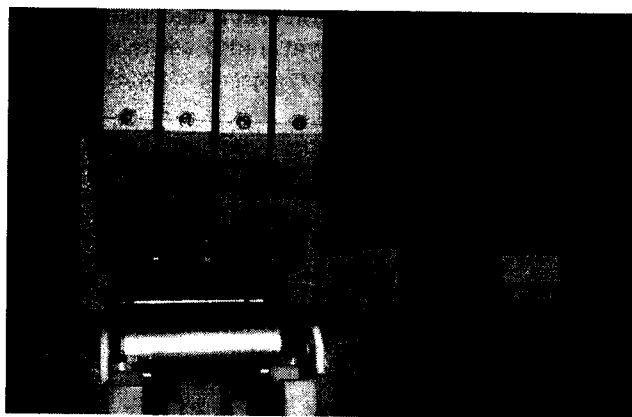


Рис. 9. Датчики ЛДП-20/39 в установке «Бурун»



Рис. 10. Датчик ЛДП-170/410 для системы «Комплекс»

са. Для этой цели каждое из колес параллельно и независимо сканируется двумя измерительными датчиками. Излучение лазерного диода фокусируется на поверхности движущегося объекта. Рассеянное излучение собирается

Т а б л и ц а 1

Сравнительные характеристики существующих ЛДП

Наименование показателя	Модель датчика			
	ЛДП-20/120	ЛДП-20/39	ЛДП-170/410	ЛДП-100/980
	Диапазон измерения, мм			
	20	20	170	100
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений (при доверительной вероятности 0,95), мм	± 0,02	± 0,02	± 0,2	± 0,2
Расстояние от базовой поверхности датчика до центра диапазона измерений, мм	120	39	410	980
Быстродействие, измер./с, не менее	1000	1000	100000	100000
Отображение измеренных параметров	ЖК-индикатор	Монитор компьютера или устройство индикации	Монитор компьютера или устройство индикации	Монитор компьютера или устройство индикации
Выход	RS-232	USB	Аналоговый (от 0 до 10 В)	Аналоговый (от 0 до 10 В)
Габаритные размеры, мм, не более	165 × 102 × 85	145 × 30 × 115	280 × 128 × 62	370 × 164 × 62
Тип исполнения	В корпусе	В корпусе	Без корпуса	Без корпуса

апертурой приемного объектива, который строит изображение освещенного участка поверхности на позиционно-чувствительном приемнике. Последующая совместная обработка сигналов позволяет определить профиль поверхности катания в системе отсчета колеса, после чего рассчитать значения требуемых геометрических параметров.

Отличительными особенностями датчика ЛДП-170/410 являются высокое быстродействие (до 100 000 измер./с), аналоговый сигнал на выходе измерителя, а также автоматическая регулировка уровня мощности зондирующего излучения.

Наряду с системой «Комплекс» разработано автоматическое устройство контроля сползания буксы с шейки оси («Букса»). Датчики ЛДП-100/980 также являются аналоговыми, но в отличие от ЛДП-140/410 имеют гораздо большее расстояние до центра измерительного диапазона – 980 мм (измерительный диапазон 100 мм). Погрешность измерения расстояния 0,2 мм.

На мировом рынке существует ряд изделий, аналогичных датчикам серии Лабракон®. Для оценки их конкурентоспособности были отобраны изделия трех ведущих зарубежных фирм (“Laser Components” (Германия), “Micro Epsilon”, “Acuity Research” (США)) с наиболее близкой областью применения и измеряемым диапазоном 20–30 мм. Прямых отечественных аналогов не обнаружено. Подобные разработки датчиков положения проводятся фирмой «ОПТЭЛ» (г. Уфа).

Сравнения технико-экономических характеристик показали, что ЛДП серии Лабракон® по потребительским качествам уступают лишь изделию компании «Micro Epsilon», но по соотношению цена/потребительские каче-

Таблица 2

Сравнительные характеристики разрабатываемых ЛДП

Наименование показателя	Модель датчика		
	ЛДП-4/6	ЛДП-30/82	ЛДП-1/10
	Диапазон измерений, мм		
	4	30	1
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений (при доверительной вероятности 0,95), мм	± 0,005	± 0,03	± 0,002
Быстродействие, измер./с, не менее	100000	100000	100000
Отображение измеренных параметров	Монитор компьютера или устройство индикации	Монитор компьютера или устройство индикации	Монитор компьютера или устройство индикации
Выход	Аналоговый (от 0 до 10 В)	Аналоговый (от 0 до 10 В)	Аналоговый (от 0 до 10 В)
Тип исполнения	В корпусе	В корпусе	В корпусе

ства лазерный датчик положения, разработанный в КТИ НП, находится вне конкуренции.

В настоящее время продолжается разработка новых ЛДП, которые пополнят модельный ряд датчиков серии Лабракон®. Эти датчики будут универсальными приборами для измерения расстояний в диапазоне 1–4 мм, а также до 30 мм с погрешностью на уровне единиц микрометров. Сравнительные характеристики существующих и разрабатываемых датчиков приведены в табл. 1 и табл. 2 соответственно.

Заключение. Проведенные в КТИ НП СО РАН теоретические и экспериментальные исследования показали, что использование медианного алгоритма обработки сигналов и оптимальный выбор ширины зондирующего пучка (100 мкм) способствуют снижению минимального уровня погрешности измерений триангуляционного метода с 10 до единиц микрометров. Рассмотренные в работе схемотехнические решения позволили повысить быстродействие лазерных датчиков положения с 1000 до 100 000 измер./с.

Создание датчиков положения с такими характеристиками, в свою очередь, обеспечивает решение более сложных задач бесконтактного контроля динамических объектов и расширение области применения лазерных датчиков положения, включая атомную и автомобильную промышленность, энергетическую отрасль и железнодорожный транспорт.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук Ю. В. Чугую за методическую помощь и полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feutlinske K., Gast Th. Berührungslose optisch-elektrische Prüfung von Lagen und Dimensionen // Qualität und Zuverlässigkeit. 1985. 30, N 7.
2. Плотников С. В. Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Автометрия. 1995. № 6. С. 58.
3. Вертопрахов В. В. Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений // Там же. С. 64.
4. Keferstein C. P., Halter B. Prüfstand für Lasertriangulationssensoren // EuroLaser. 1996. N 1.
5. Белоглазова В. А., Ладыгин В. И., Пастушенко А. И. и др. Устройство бесконтактного контроля биений колес // Датчики и системы. 1999. № 4.
6. Кашеев К. П., Ладыгин В. И., Пастушенко А. И. и др. Цифровой бесконтактный измеритель биений валов гидроагрегатов для электростанций // Распределенная обработка информации: Тр. VI Междунар. сем. Новосибирск, 1998.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: splot@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
8 октября 2003 г.*