

УДК 681.787 : 621.373

В. М. Ведерников, В. П. Кирьянов
(Новосибирск)

**ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
В ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

Рассмотрены примеры использования лазерных интерферометров перемещений в составе контрольно-измерительных и управляющих систем при выпуске и аттестации машиностроительной продукции.

С появлением лазерных интерферометров промышленность получила инструмент, который по своим метрологическим параметрам намного превосходил существующие измерительные средства. Высокая точность, широкие пределы измерений и малая дискретность сочетаются в лазерных интерферометрах с таким фактором, как высокая стабильность «световой шкалы», определяемая свойствами атомов. Достоинством лазерных интерферометров является также отсутствие периодических и нерегулярных ошибок, характерных для традиционных измерительных средств. Интерферометры обеспечивают высокую линейность «световой шкалы», так как процессы деформации в них отсутствуют.

Бесконтактный принцип интерференционных измерений и модульность конструкций лазерно-интерферометрических систем позволяют располагать модули интерферометра вблизи рабочей зоны станка и корректировать погрешность компарирования (ошибку Аббе), а в ряде случаев производить непрерывный контроль угловых поворотов исполнительных элементов станка и вносить соответствующие поправки в результаты контроля. Лазерные интерферометры могут быть органично включены в измерительные системы многокоординатных станков и измерительных машин. При этом они выполняют не только измерительные функции, но и функции управления и контроля во время обработки, гарантируя тем самым высокое качество продукции.

Наши первые работы по созданию координатно-измерительной машины с лазерными интерферометрами были начаты в 1969 г. Трехкоординатная машина КИМ-600 была спроектирована и построена в ОКБ ПО «Техника» (Владимир), и для нее разработаны лазерные интерферометры типа ИПЛ [1–3]. Как показал последующий анализ литературы, это был первый в мировой практике опыт встраивания лазерных интерферометров в состав отсчетных систем прецизионных станков и координатно-измерительных машин. Почти десятилетний срок эксплуатации системы в составе КИМ-600 показал, что по сравнению с традиционными средствами лазерные интер-

ферометры позволяют практически на порядок повысить точность измерений и контроля размеров сложных машиностроительных деталей и узлов.

Не менее значительный эффект проявился в результате применения лазерных интерферометрических преобразователей в тяжелом станкостроении при контроле и аттестации измерительных датчиков систем числового программного управления (ЧПУ). Возможность применения лазерных интерферометров в технологическом процессе создания уникальных крупногабаритных станков возникла в результате появления лазерно-интерферометрических систем с улучшенными эксплуатационными показателями (интерферометры третьего поколения [4]). Лазерный измеритель перемещений модели ИПЛ-10, созданный в ИАиЭ СО АН СССР в 1973 г., по праву относился к этим приборам [5]. Он представлял собой многофункциональную измерительную систему, обеспечивавшую проведение высокоточных измерений длины, скорости и угловых разворотов контролируемых объектов. Конструкция прибора и его электронного блока обработки позволяла усреднять результаты измерений, вводить поправку на непрямолинейность, если ось интерферометра не совпадала с линией измерений. В ИПЛ-10 использовался способ измерения линейных перемещений, реализующий принцип внутренней фазовой модуляции [6, 7]. В результате удалось осуществить передачу информации с помощью сигналов переменного тока, что повысило надежность прибора и упростило его эксплуатацию. Испытания прибора ИПЛ-10 в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС, Москва) подтвердили его высокие технические характеристики. Было выяснено, что прибор имел собственный дрейф нуля в пределах 1 мкм за восемь часов работы, а погрешность измерений не превышала 0,5 мкм/м. При этом в приборе была реализована разрешающая способность по перемещению в основном режиме 0,1 мкм, а в режиме с усреднением – 0,01 мкм. Скорость перемещения объектов измерялась с погрешностью порядка 0,01 м/мин. Прибор обеспечивал измерения размеров в диапазоне до 10 м при максимально допустимой скорости перемещений до 12 м/мин. Диапазон измерений угловых разворотов объекта составлял $\pm 30^\circ$. В последующем пределы измерений были увеличены до 40 м, а допустимая скорость перемещений – до 15 м/мин. В целом основные параметры ИПЛ-10 соответствовали показателям лучших мировых лазерных интерферометров того времени [8].

В 1976 г. с помощью прибора ИПЛ-10 впервые в практике отечественного тяжелого станкостроения были выставлены и проконтролированы отсчетные системы уникального станка НС33Ф2 [9], созданного на Новосибирском заводе «Тяжстанкогидропресс». Станок НС33Ф2 предназначался для полустововой и чистовой обработки корпусов паровых турбин и был выполнен по схеме с подвижным порталом [10]. Рабочий диапазон перемещения портала достигал 15,4 м.

Стабильность пространственного положения портала во всем рабочем диапазоне, определяющая точность обработки деталей, обеспечивалась специальными системами статического и динамического выравнивания. Точность работы обеих систем в значительной степени зависела от идентичности линейных датчиков, установленных на левой и правой станинах станка. Линейные датчики станка имели чувствительность 0,01 мм и представляли собой индуктивные шкалы типа развернутого сельсина. Измерительная шкала набиралась из 44 секций длиной по 350 мм. В этом

наборе и заключалась основная сложность получения для обеих направляющих двух идентичных шкал, длиной 15400 мм каждая.

Первоначально измерительные шкалы отсчетных систем левой и правой сторон были выставлены соответственно на левых и правых «санях» портала традиционным способом – с помощью двух штриховых мер и отсчетных микроскопов с ценой деления 0,001 мм. Необходимость многократных перестановок отсчетных микроскопов, быстрая утомляемость операторов при снятии отсчетов приводили к существенному затягиванию процесса юстировки шкал (до 10–12 ч) и к возрастанию разного рода ошибок (инструментальных, методических, неточности наведения). Именно этот результат и был зарегистрирован с помощью ИПЛ-10 при контроле погрешности шкалы левой (ведущей) станины станка, юстировка которой была выполнена традиционным способом. На рис. 1 (кривая 1) приведен график погрешности шкалы данной направляющей. Накопленная ошибка составила величину, равную 170 мкм (участок шкалы от 0 до 4,9 м не юстировался).

На втором этапе работы была проведена переюстировка обеих шкал с помощью ИПЛ-10. Один из контрольных результатов проверки такой переюстировки шкалы левой станины приведен на рис. 1 (кривая 2). Накопленная ошибка отъюстированной шкалы не превысила 20 мкм. При использовании режима работы системы ЧПУ с преднабором позиционируемой координаты время контроля шкалы в 44 точках составляло 40–45 мин. Скорость перемещения портала достигала 8,9–9,3 м/мин. Полученный результат указывал на высокое качество юстировки шкалы. Для примера на рис. 1 (кривая 4) приведена погрешность шкалы, отъюстированной с помощью двухчастотного интерферометра HP5526B фирмы "Hewlett Packard" на тяжелом станке портального типа западногерманской фирмы "Waldrich Coburd".

На третьем этапе работы был проведен контроль динамики выравнивания движения портала. Параллельность перемещения портала контролировалась угловым интерферометром ИПЛ-10. Степень идентичности шкал левой и правой направляющих иллюстрируется кривой 5 рис. 1, вид которой позволяет сделать вывод, что максимальное рассогласование шкал не превышало ± 20 мкм.

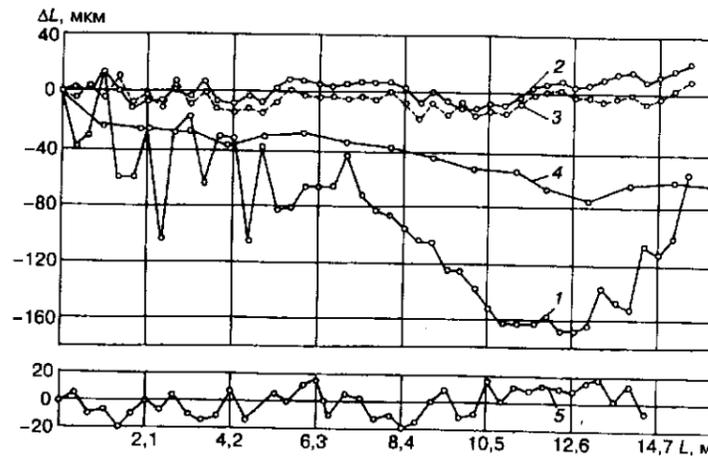


Рис. 1

В конце цикла юстировок была проведена отдельная обработка верхней и нижней половины турбины. В программу обработки входили: проточка кольцевых пазов, обработка торцов и расточка четырех контрольных отверстий. После наложения обеих половин турбины несовпадение торцов составило 13 и 20 мкм (соответственно для переднего и заднего торцов при расстоянии между ними, равном 5000 мм), несовпадение пазов – 20 и 22 мкм. В контрольные отверстия легко вставлялись четыре калибра, диаметр которых на 0,07 мм меньше диаметра отверстий. После окончательной штифтовки секций датчиков вторично была измерена погрешность шкалы (см. рис. 1, кривая 3). Несмотря на то, что кривая 2 снималась при температуре станины 19,7, а кривая 3 – при 23,1 °С, расхождение между ними не превышает 20 мкм. Это указывает на высокую воспроизводимость результатов измерений интерферометром ИПЛ-10 в широком диапазоне изменения температур.

Полученные результаты создали основу для широкого применения лазерных интерферометров в производственной практике сборки уникальных крупногабаритных станков. За короткое время совместно со специалистами Новосибирского завода «Тяжстанкогидропресс» был изготовлен лазерный измеритель перемещений ИПЛ-20 (модернизированный вариант ИПЛ-10), специально ориентированный на выполнение прецизионных измерений непосредственно в условиях промышленного производства. При разрешении в 0,1 мкм прибор ИПЛ-20 позволял измерять перемещения в диапазоне от 0 до 60 м при максимальной скорости движения, достигающей 20 м/мин. ИПЛ-20 до настоящего времени используется на заводе «Тяжстанкогидропресс» для выполнения плановых работ по метрологическому обеспечению крупногабаритных станков и контролю точностных характеристик отсчетных систем при их сборке.

В связи с резко увеличившимся спросом на лазерные измерительные системы во второй половине 70-х годов появилось несколько конструкций лазерно-интерферометрических датчиков, предназначенных для встраивания их непосредственно в состав систем ЧПУ. На базе интерферометра ИПЛ-10 в ИАиЭ был разработан унифицированный вариант лазерного датчика перемещений с внутренней фазовой модуляцией. Датчик был построен по блочному принципу и состоял из отечественного одночастотного лазера, выносного интерферометра, блока фотоприемников – ресивера и блока сопряжения – адаптера. Блочный принцип позволял на основе одного лазера собирать двух- или трехкоординатные измерительные системы. Электроника датчика обеспечивала его функционирование при десятикратных изменениях мощности входного сигнала и допускала скорость перемещений до 35 м/мин при измерениях с дискретностью $\lambda/2$ или $\lambda/8$. Для преобразователя был разработан целый набор адаптеров, позволивший строить измерительные системы различного назначения на основе почти всех отечественных ЭВМ [11–13].

В начале 80-х годов в ИАиЭ совместно со Специальным конструкторским бюро научного приборостроения СО АН СССР был разработан промышленный образец интерференционного преобразователя линейных перемещений (ИПЛП), предназначенный для применения в системах позиционного и контурного управления перемещениями координатного стола [14] в различного типа станках. Адаптер ИПЛП был спроектирован для совместного использования с серийными отечественными ЧПУ. В 1984–1985 гг. в Сасовском станкостроительном производственном объединении прошли испытания серийного токарного полуавтомата модели 1725РФ3 с устройствами

ЧПУ [15, 16], оснащенными лазерными системами обратной связи на основе ИПЛП. Результаты испытаний продемонстрировали целесообразность замены штатных датчиков перемещений на интерферометрические. Для более широкого применения лазерно-интерферометрических преобразователей в промышленности были разработаны модернизированные модели ИПЛП-1 и ИПЛП-2 с использованием волоконно-оптических кабелей для передачи выходных сигналов интерферометра [17].

В начале 90-х годов ПО «Новосибирский приборостроительный завод» (ПО НПЗ) освоил серийный выпуск фотоэлектрических преобразователей линейных перемещений типа ПЛФ. Для их аттестации в ЭНИМС (Москва) были разработаны специальные компараторы со встроенными лазерными интерферометрами. Однако измерительные системы компараторов обеспечивали их работу в низкопроизводительном статическом режиме контроля. Для повышения точности и производительности компараторов в 1995–1996 гг. было разработано несколько вариантов измерительных систем.

Обобщенная структурная схема компаратора приведена на рис. 2. Компаратор представляет собой массивную станину 1, на которой закреплены неподвижная площадка 2 и подвижная каретка 3. Каретка 3 с помощью электродвигателя 4 и шарико-винтовой пары 5 перемещается по направляющим 6. В состав измерительной системы компаратора входят лазерный интерферометр, состоящий из He-Ne-лазера 7, интерферометра 8, поворотного зеркала 9 и двух отражателей 10 и 11; образцовая штриховая мера 12 с фотоэлектрическим микроскопом 13; поверяемый ПЛФ, состоящий из растровой линейки 14 и индикаторного раstra 15; блок сопряжения 16; персональный компьютер (ПК) 17; пульт ручного управления 18 и силовой электропривод 19. Растровая линейка 14 поверяемого ПЛФ закрепляется на подвижной каретке компаратора 3 таким образом, чтобы ось перемещения линейки совпадала с визирной осью измерительного плеча интерферометра 8. Считывающий растр 15 датчика закрепляется на неподвижной платформе компаратора.

Процедура аттестации начинается с ввода в ПК всех необходимых для протокола данных о поверяемом ПЛФ. Затем выбирается один из двух воз-

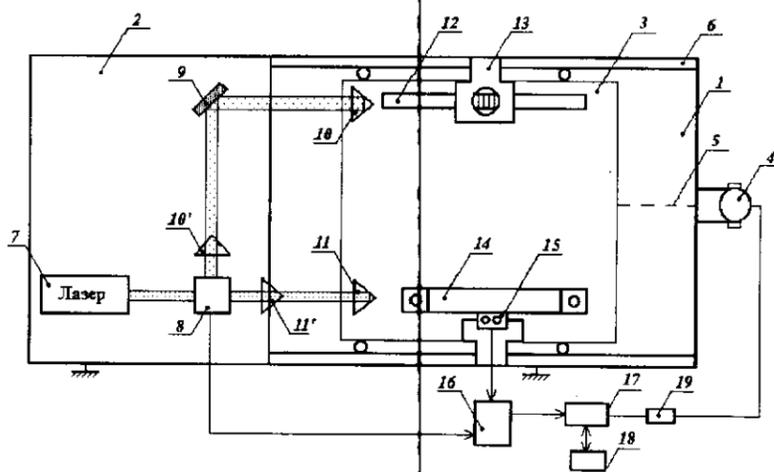


Рис. 2

можных методов измерений с помощью лазерных интерферометров, различающихся принципом определения длины волны лазера в воздухе. В измерительной системе предусмотрено применение абсолютного и относительного методов измерений. При использовании относительного метода предварительно измеряется длина образцовой штриховой меры 12, а затем по результатам измерений вычисляется текущее значение длины волны лазера. При этом отражатель 11 переносится в положение 11', а отражатель 10 остается на своем месте. При проведении рабочих измерений, наоборот, отражатель 10 переносится в положение 10', а отражатель 11 остается на месте. Процедура рабочих измерений проводится по программе в соответствии с ТУ на ПЛФ. Определяется систематическая погрешность ПЛФ, ее максимальное значение, а также максимальная величина вариаций показаний. Если в состав ПЛФ входит универсальный преобразователь импульсов, то дополнительно определяется внутришаговая погрешность. Все измерения осуществляются в динамическом режиме. При этом через заданный интервал контроля, значение которого отсчитывается по показаниям поверяемого ПЛФ, производится считывание показаний образцового интерферометра. Полученная информация обрабатывается в компьютере 17. Результаты измерений оформляются в виде соответствующего протокола. Точностные показатели измерительной системы определяются типом лазерного интерферометра и способом предварительной обработки его выходных сигналов в блоке сопряжения 16.

Для решения текущих задач завода были реализованы три варианта измерительных систем.

Первая измерительная система была разработана для компаратора МС10ЛП. В качестве образцового лазерного интерферометра в системе применялся лазерный датчик перемещений ИПЛП-1. Блок сопряжения 16 обеспечивал разрешающую способность системы, равную $\lambda/8$ (0,08 мкм). Измерительная система компаратора позволяла поверять ПЛФ третьего и четвертого классов точности с диапазоном измерений до 1 м. Погрешность контроля не превышала 1 мкм.

Вторая измерительная система, созданная для трехметрового компаратора МС3000, обладает более высокими метрологическими характеристиками. В качестве образцового лазерного интерферометра в этой системе использован интерферометр от серийного прибора ИПЛ-МП, выпускаемого ПО НПЗ. Блок сопряжения в системе обеспечивает разрешение 0,01 мкм. Система позволяет поверять ПЛФ более высокого класса точности с диапазоном измерений до 3000 мм. Погрешность контроля не превышает 0,5 мкм/м.

Третья измерительная система, созданная на основе нового гомодинного интерферометра поляризационного типа [18], обладает субнанометровым разрешением. Для достижения такого разрешения в блоке сопряжения 16 реализован алгоритм преобразования квадратурных сигналов с предварительной оцифровкой данных с помощью быстродействующих аналогоцифровых преобразователей [19]. При использовании восьмиразрядных АЦП блок сопряжения обеспечивает разрешение, равное 0,6 нм. Система позволяет поверять линейные преобразователи самых высоких классов точности.

На рис. 3 приведен типичный протокол поверки ПЛФ. Поверка производится в автоматическом режиме. Время поверки датчика с диапазоном перемещений, равным 100 мм, не превышает 1 мин.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРОТОКОЛ

Тип преобразователя ПЛФ-3К
 Заводской номер 960521
 Диапазон измерения 100 мм
 Величина переезда за репер 0,000 мм
 Температура при измерениях 20,98 °С
 Максимальная системная погрешность 2,7 мкм
 Максимальная вариация 1,7 мкм

ГРАФИК ОСНОВНОЙ СИСТЕМНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

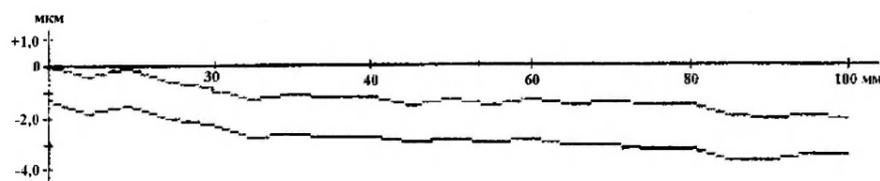


ТАБЛИЦА ОСНОВНОЙ СИСТЕМНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

| Координата, мм | Погрешности | | | |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------|---------------|
| | Прямой ход, мкм | Обратный ход, мкм | Средняя, мкм | Вариация, мкм |
| 0 | 0,0 | -1,3 | -0,6 | 1,3 |
| 10 | 0,0 | -1,4 | -0,7 | 1,4 |
| 20 | -0,7 | -2,1 | -1,4 | 1,4 |
| 30 | -1,0 | -2,5 | -1,7 | 1,5 |
| 40 | -1,1 | -2,6 | -1,8 | 1,5 |
| 50 | -1,2 | -2,7 | -1,9 | 1,5 |
| 60 | -1,2 | -2,7 | -1,9 | 1,5 |
| 70 | -1,3 | -2,9 | -2,1 | 1,6 |
| 80 | -1,4 | -3,1 | -2,2 | 1,7 |
| 90 | -1,9 | -3,5 | -2,7 | 1,6 |
| 100 | -1,9 | -3,3 | -2,6 | 1,4 |

ГРАФИК ВНУТРИШАГОВОЙ СИСТЕМНОЙ ПОГРЕШНОСТИ



Рис. 3

Рассмотренные нами примеры применения лазерных интерферометров в машиностроении и приборостроении наглядно иллюстрируют пути повышения точности и качества продукции в этих отраслях промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А.** Лазерный интерферометр для измерения длины // Автометрия. 1971. № 1. С. 4.
2. **Кирьянов В. П., Клисторин И. Ф., Щербаченко А. М.** Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений // Там же. С. 21.
3. **Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Матиенко Б. Г., Щербаченко А. М.** Микроэлектронный счетно-вычислительный блок лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2 // Автометрия. 1975. № 5. С. 53.
4. **Кирьянов В. П., Коронкевич В. П.** Лазерные интерферометры перемещений // Автометрия. 1998. № 6. С. 65.
5. **Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Коронкевич В. П., Ленкова Г. А.** Многофункциональный лазерный измеритель перемещений ИПЛ-10 // Лазерные интерферометры. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1978.
6. А. с. 469359 СССР. Способ измерения линейных перемещений /В. М. Ведерников, В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин и др. Опубл. 1975, Бюл. № 16.
7. **Кирьянов В. П., Коронкевич В. П.** Лазерный интерферометр с низкочастотной фазовой модуляцией // Квантовая электроника. 1982. 9, № 7.
8. **Dukes J. N., Gordon G. B.** A two-hundred-foot yardstick with graduations every microinch // Hewlett-Packard Journ. 1970. 21, N 12.
9. **Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Лебедев Г. А.** Применение лазерного интерферометра для контроля и юстировки измерительных систем тяжелых станков // Станки и инструмент. 1978. № 4.
10. **Непрякин А. Г.** Тяжелый продольно-обрабатывающий станок модели НС33Ф2 с ЧПУ // Станки и инструмент. 1977. № 5.
11. **Алькаев М. И., Клисторин И. Ф., Курочкин В. В., Щербаченко А. М.** Система на основе малой ЭВМ для измерения перемещений с помощью лазерных интерферометров // Автометрия. 1973. № 3. С. 52.
12. **Ведерников В. М., Петрашкевич Л. А., Тарасов Г. Г. и др.** Измерительные системы с лазерными датчиками на основе программируемых ЭВМ типа «Электроника-70» // Автометрия. 1976. № 3. С. 47.
13. **Баев С. Г., Ведерников В. М., Кирьянов В. П.** Система сбора и обработки данных гидрофизического лазерного зондирующего комплекса // Автометрия. 1987. № 4. С. 75.
14. **Интерференционный преобразователь линейных перемещений** // Информационный листок № 85-6. Новосибирск: ЦНТИ, 1985.
15. **Коронкевич В. П., Мороз Ю. И., Табачников Э. Б., Ханов В. А.** Анализ результатов испытаний лазерного преобразователя ИПЛП на станке с ЧПУ. Новосибирск, 1985. (Препр. /АН СССР, Сибирское отд-ние. ИАиЭ; 296).
16. **Коронкевич В. П., Мороз Ю. И., Табачников Э. Б. и др.** Исследование токарного станка с ЧПУ, оснащенного лазерными преобразователями перемещений ИПЛП. Новосибирск, 1986. (Препр. /АН СССР, Сибирское отд-ние. ИАиЭ; 324).
17. **Дегтярев И. С., Коронкевич В. П., Ханов В. А., Чуринов Е. Г.** Интерференционный преобразователь угловых перемещений. Новосибирск, 1987. (Препр. /АН СССР, Сибирское отд-ние. ИАиЭ; 352).
18. **Кирьянов В. П., Ленкова Г. А., Лохматов А. И., Тарасов Г. Г.** Лазерный интерферометр линейных и угловых перемещений // Автометрия, 1994. № 4. С. 61.
19. **Кирьянов В. П., Кокарев С. А.** Лазерно-интерферометрический преобразователь перемещений с субнанометровым разрешением // Автометрия. 1998. № 2. С. 3.

Поступила в редакцию 9 октября 1998 г.