

дающего пучка. В эксперименте использовался лазер ЛГ-75 в режиме основной моды. Измерялась скорость плоского движения поверхности магнитофонной ленты. В качестве фотоприемника применялся ФЭУ55. Спектры фотографировались с экрана анализатора спектра С4-12. Спектры сняты при следующих параметрах оптической схемы:  $F=42$  мм;  $D=0,5$  мм;  $v=4,4$  см/с;  $l=8$  мм. Апертура падающего пучка  $d$  составляла 0,5, 1 и 3 мм соответственно. Относительная ширина для всех трех спектров одинакова и составляет 12% при  $f_d = 27$  кГц.

На рис. 3 представлен доплеровский спектр, полученный при  $F=69$  мм,  $d=1$  мм,  $l=8$  мм,  $D=0,5$  мм и  $v=4,4$  см/с. Относительная ширина спектра порядка 9%, что хорошо согласуется с расчетом.

Проведенные эксперименты показывают полезность применения описанной схемы в задачах, где требуется исключить влияние геометрии падающего пучка на точность измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. S. I. Ippolito, S. Rosenberg, M. C. Teich. Velocity Measurement of Slowly Moving Surfaces Using an He—Ne Laser Heterodyne System.— The Review of Scientific Instruments, 1970, 41, № 3.
2. B. Lehmann. Geschwindigkeitsmessung mit Laser — Dopplerverfahren.— Wissenschaftliche Berichte der AEG — Telefunken, 1968, Bd. 41, № 3.
3. W. L. Kariger. A Laser Doppler Velocimeter Employing a Scanning Interferometer.— Proceeding of the IEEE, 1969, 57, № 12.

Поступило в редакцию  
10 мая 1971 г.

УДК 621.378.3

Ю. Г. ВАСИЛЕНКО, В. В. ДОНЦОВА, Ю. Н. ДУБНИЦЕВ  
(Новосибирск)

### ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ — ПЕРО

Лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС) позволяют осуществить бесконтактное измерение составляющих вектора локальной скорости движущихся объектов. Известные системы ЛДИС можно разделить на две группы. К первой относятся многочисленные схемы, в которых используется техника оптического гетеродинамирования или гомодинамирования. Вторую группу составляют измерители, использующие спектрометры, в качестве которых могут успешно применяться плоский или конфокальный интерферометр Фабри — Перо. Измерители последней группы обладают такими преимуществами, как возможность непосредственного определения знака измеряемой проекции скорости и эффективность применения для измерения высоких скоростей, тогда как ЛДИС первой группы требуют применения частотных модуляторов света и сложной обрабатывающей электроники. В ЛДИС с интерферометром Фабри — Перо в качестве источника излучения используется лазер в режиме фазовой синхронизации мод [1]; при этом требуется согласование мод лазера и интерферометра. В [2] сообщалось, что лазер работал в режиме многих поперечных мод, что не позволяло осуществить измерения доплеровского сдвига с погрешностью меньшей, чем частотный интервал, занимаемый генерируемыми модами.

В проведенном нами эксперименте по измерению линейной локальной скорости вращающегося диска с целью повышения точности измерений использовался одночастотный лазер. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Луч гелий-неонового лазера 1 проходит через объектив 2 и фокусируется на рассеивающем диске 3. Рассеянный назад свет наблюдается в плоский эталон Фабри — Перо 5, перед которым помещена ограничивающая диафрагма 4. Кольца равного наклона, образующиеся после эталона Фабри — Перо, фотографируются фотоаппаратом 6.

В качестве источника излучения использовался лазер типа ЛГ-36А. Для получения одночастотного режима работы лазера в качестве селектора мод применялась поглоща-

ющая пленка, помещенная внутри резонатора [3]. При этом мощность излучения составляла около 40% от мощности излучения в многомодовом режиме. В результате стало возможным производить измерения в рассеянном назад свете и использовать интерферометр с плотными зеркалами.

Плоский эталон Фабри — Перо имел длину 100 мм и разрешающую способность  $1,7 \cdot 10^7$ . Интерференционная картина, образующаяся за интерферометром и локализованная в бесконечности, снималась на фотопленку фотоаппаратом с телеобъективом. При этом во время экспозиции половина пятна сфокусированного лазерного пучка на поверхности вращающегося матового диска перекрывалась неподвижной диффузно-рассеивающей заслонкой. На фотопленке одновременно регистрировались две концентрические системы колец, соответствующие световым пучкам, рассеянным неподвижной и подвижной поверхностями. Разность длин волн света, образующего эти две системы колец, дает доплеровский сдвиг частоты, по которому определяется скорость вращения диска. Интенсивность обеих систем колец была приблизительно равной. Время экспозиции составляло 1—2 с. На рис. 2 приведена фотография полученных интерференционных колец. Метод регистрации колец с помощью перекрывания неподвижной заслонкой хотя и вносит некоторую погрешность в измерения (из-за увеличения размеров рассеивающего пятна), но снижает требования к стабильности лазера (оба рассеянных пучка света попадают в интерферометр одновременно за время экспозиции), что уравнивает условия рассеяния пучков от вращающейся и неподвижной поверхностей. Размер пятна от сфокусированного излучения лазера выбирался таким, чтобы ширина доплеровского спектра, соответствующего линейной скорости, усредненной по пятну, не превышала разрешающей способности интерферометра.

Ширина доплеровского спектра, усредненного по телесному углу, ограничивающему выделенный рассеянный пучок, должна быть также меньше предела, обусловленного разрешающей способностью интерферометра. Это требование определяет размер диафрагмы перед интерферометром.

Полученные на фотопленке интерферограммы измерялись на универсальном микроскопе фирмы Цейс. Доплеровский сдвиг частоты определялся по формуле [4]

$$\Delta f_d = \frac{c(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2t}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — дробная полоса для первой и второй систем колец;  $t$  — толщина эталона Фабри — Перо. Дробная часть полосы вычислялась по методу наименьших квадратов. Линейная скорость исследуемой области рассеяния диска  $v$  вычислялась из соотношения

$$\Delta f_d = \frac{1}{2\pi} \vec{v}(\vec{k}_s - \vec{k}_i), \quad (2)$$

где  $\vec{v}$  — вектор линейной скорости точки диска, от которой происходит рассеяние;  $\vec{k}_i$  и  $\vec{k}_s$  — волновые векторы падающего и рассеянного пучков света соответственно.

С учетом взаимной ориентации указанных векторов (векторы принимаются компланарными) выражение (2) для расчета линейной скорости принимает вид

$$v = \frac{\Delta f_d \lambda}{2 \sin \alpha \cos \varphi},$$

где  $2\alpha$  — угол между осевыми волновыми векторами падающего и рассеянного пучков;  $\varphi$  — угол между усредненным по пятну вектором

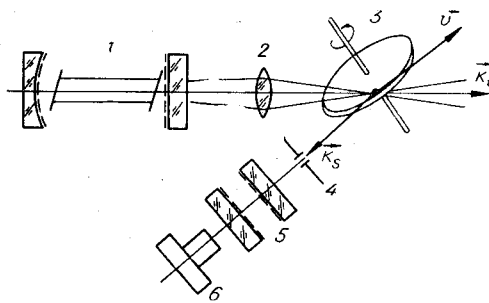


Рис. 1.

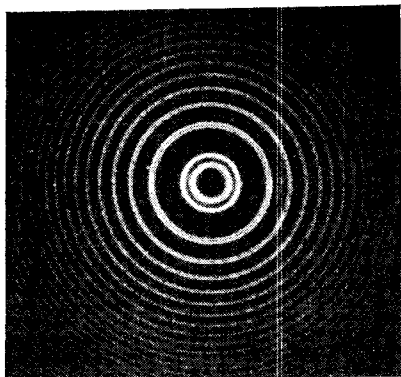


Рис. 2.

локальной скорости и разностным вектором ( $\vec{k}_s - \vec{k}_i$ );  $\lambda$  — длина волны излучения лазера.

Экспериментальные измерения проводились при линейной скорости исследуемой области диска 60 м/с. Средняя квадратическая погрешность проведенных измерений равна  $\pm 5$  м/с, относительная погрешность составляет 5%. С ростом измеряемой скорости относительная погрешность падает.

Погрешность измерений ограничивается разрешающей способностью интерферометра и стабильностью лазера. Повышение точности измерений и облегчение регистрации доплеровского частотного сдвига может быть достигнуто применением сканирующего конфокального интерферометра Фабри — Перо с большой остротой и разрешением.

Проведенные эксперименты подтверждают перспективность применения ЛДИС с интерферометром Фабри — Перо для бесконтактного измерения скорости движущихся объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. M. Jonson and T. Y. Burgess. Free Surface Velocity Measurement of an Impacted Projectile by Optical Doppler Shift.— Rev. Scient. Instr., 1968, v. 39, № 8.
2. Б. С. Ринкевичюс, А. В. Толкачев. Применение ОКГ с интерферометром Фабри — Перо для измерения скоростей частиц в двухфазных турбулентных потоках.— ЖПС, 1968, т. IX, вып. 5.
3. Ю. В. Троицкий, Н. Д. Голдина. О выделении одного типа колебаний в оптическом резонаторе.— Письма в ЖЭТФ, 1968, т. 7, вып. 2.
4. С. Толанский. Спектроскопия высокой разрешающей силы. М., Изд-во иностр. лит., 1955.

Поступило в редакцию  
29 апреля 1971 г.

УДК 621.317+621.3.078

С. Г. РАБИНОВИЧ  
(Ленинград)

#### ВЫЧИСЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ УСПОКОЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКИХ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ

Гальванометрические автокомпенсаторы (ГА) в настоящее время получили широкое распространение. Промышленность выпускает ряд измерительных приборов этого принципа действия, а также блоки, содержащие гальванометр, фотоэлементы и оптическую систему, на основе которых осуществляют всевозможные уникальные измерительные устройства и регуляторы. Естественно, что при этом вопросы расчета ГА привлекают внимание многих специалистов. Ниже приводится решение задачи о времени успокоения ГА, вычисление которого обычно сопряжено с известными трудностями.

Передаточная функция ГА с учетом инерционности схемы регулирования имеет третий порядок [1]. Рассмотрим для определенности ГА напряжения с фотоэлектрической схемой регулирования. Его передаточная функция имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{I(s)}{E_x(s)} = \frac{1}{R_k(Js^2 + Ps + W_m)(1 + \tau s) + W_{эл}} \quad (1)$$

где  $E_x(s)$ ,  $I(s)$  — изображения по Лапласу измеряемой э. д. с. и тока на выходе прибора;  $R_k$  — компенсационное сопротивление (сопротивление обратной связи);  $W_{эл}$  — удельный электрический противодействующий момент;  $J, P, W_m$  — соответственно момент инерции, коэффициент успокоения и удельный механический противодействующий момент гальванометра;  $\tau$  — постоянная времени схемы регулирования.