

УДК 621.9.048.7.06 : 621.373.826

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АНЕМОМЕТРИИ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Васильев П. Е., Ясюленис Э. И.*

Рассмотрен вопрос о применении дифференциальной оптической схемы лазерного доплеровского измерителя скорости для исследования тангенциальных составляющих вибраций ультразвуковых колебательных систем.

В ходе исследования ультразвуковых колебательных систем актуальной задачей становится выделение тангенциальных по отношению к исследуемой поверхности составляющих вибраций из общей сложной картины колебаний. Перспективным для этого является метод лазерной доплеровской анемометрии, широко применяемый в современной гидроаэродинамике для исследования потоков жидкости и газа [1-3]. В отношении измерения вибраций лазерным доплеровским измерителем скорости присущи лучшие качества оптических интерферометров [4], и в то же время схемы с двумя зондирующими лучами при соответствующей постановке эксперимента не чувствительны к нормальным составляющим вибраций.

Схема экспериментальной установки показана на фиг. 1. В ее основу положена дифференциальная оптическая схема лазерного доплеровского измерителя скорости с прямым выделением доплеровского сдвига частоты в фотодетекторе и последующей его визуализацией на экране осциллографа. Луч лазера 1 (длина волны излучения 0,63 мкм, мощность излучения 4 мВт), работающего в одномодовом режиме, пройдя оптический вентиль 2 и коллимирующую линзу 3, расщепляется в светоделительном кубе 4 на два пучка равной интенсивности, которые при помощи призм полного внутреннего отражения 5 и фокусирующих линз 9 направляются в исследуемую точку колебательной системы 10. Питание системы осуществляется от генератора 11 и контролируется частотомером 12. Рассеянное назад световое излучение собирается приемной оптикой 8 и фокусируется в плоскости ограничивающей диафрагмы 7. Световой сигнал преобразуется в фотодетекторе 6 в электрический, и последний поступает на вход осциллографа 15. С целью частичной автоматизации определения амплитуд вибраций параллельно осциллографу подключены также низкочастотный фильтр 13, широкополосный усилитель 14 и частотомер 16, работающий в режиме деления частоты.

Принцип действия данной схемы заключается в следующем. В области пересечения зондирующих световых пучков образуется измерительный объем лазерного анемометра, представляющий собой объемную интерференционную картину, полосы которой перпендикулярны плоскости схождения зондирующих пучков и параллельны биссектрисе угла схождения интерферирующих пучков  $\alpha$ . Пространственный период картины  $\Lambda$  зависит от длины волны лазерного излучения  $\lambda$  и угла  $\alpha$

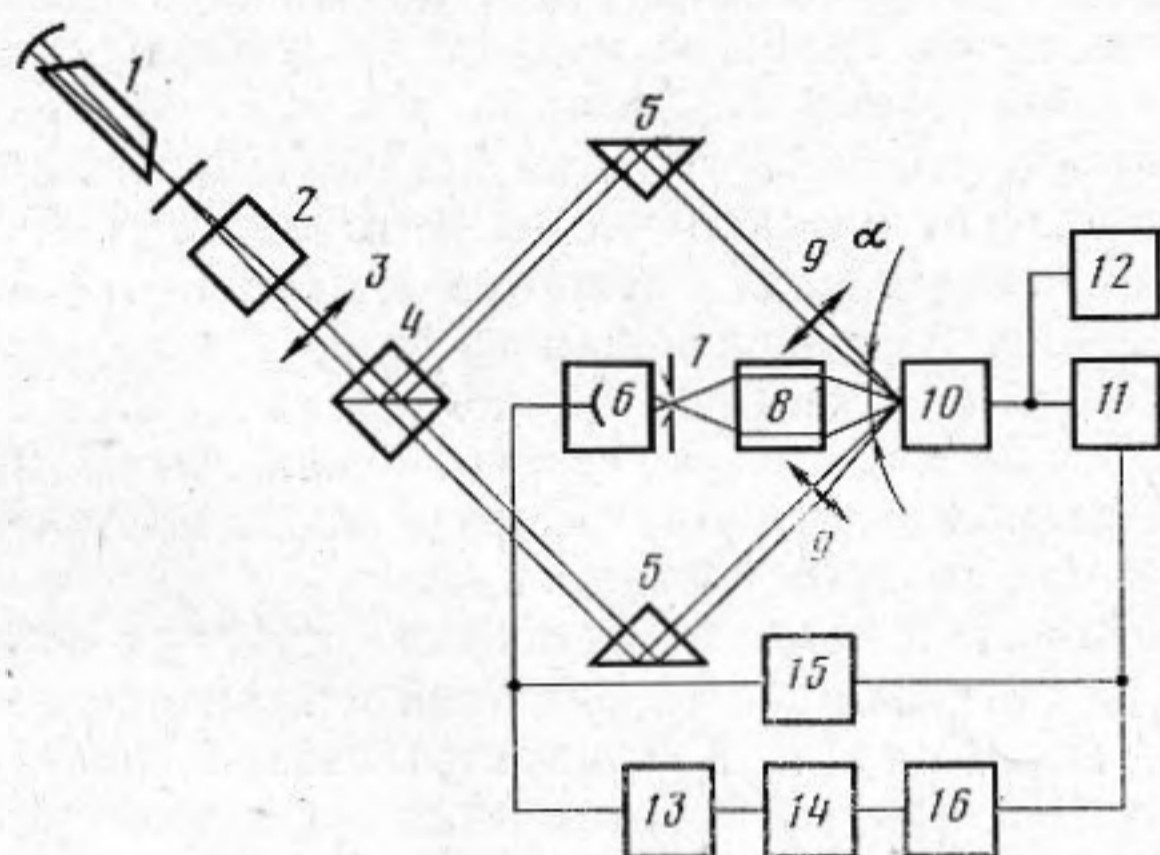
$$(1) \quad \Lambda = \lambda / 2 \sin(\alpha/2).$$

Если находящаяся в пределах измерительного объема рассеивающая свет частица (оптическая неоднородность) совершает гармонические колебания, интенсивность рассеянного ею светового излучения представляет собой частотно-модулированный сигнал, перекрывающий спектр частот от 0 до величины  $f_m$  определяемой соотношением

$$(2) \quad f_m = u_{\text{МК}} / \Lambda,$$

где  $u_{\text{МК}}$  — проекция вектора максимальной виброскорости частицы на вектор чувствительности схемы, который в данном случае лежит в плоскости схождения зондирующих пучков и перпендикулярен биссектрисе угла  $\alpha$ .

Промежуток между двумя соседними экстремумами (максимумом и



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер ЛГ-52-2, 2 — оптический вентиль, 3 — коллимирующая линза, 4 — светоделительный куб, 5 — призмы полного внутреннего отражения, 6 — фотоэлектронный умножитель ФЭУ-51, 7 — ограничивающая диафрагма, 8 — приемная оптическая система, 9 — фокусирующие линзы, 10 — исследуемый объект, 11 — генератор ГЗ-33, 12 — частотомер ЧЗ-35А, 13 — низкочастотный фильтр, 14 — широкополосный усилитель, 15 — осциллограф универсальный запоминающий С8-13, 16 — частотомер ЧЗ-34,  $\alpha$  — угол схождения зондирующих пучков

минимумом) частотно-модулированного сигнала соответствует передвижению частицы в направлении вектора чувствительности на одну интерференционную полосу.

Таким образом, об амплитуде вибраций можно судить по числу интерференционных полос, пересекаемых рассеивающей свет частицей за определенный промежуток времени. Чувствительность экспериментальной установки в данном случае определяется пространственным периодом интерференционной картины и пропорциональна  $\sin(\alpha/2)$ . Увеличение угла схождения зондирующих пучков способствует увеличению чувствительности схемы. В нашем случае  $\alpha = \pi/2$ ,  $\Lambda = \lambda/\sqrt{2}$ . Исследуемая поверхность выставлялась перпендикулярно биссектрисе угла  $\alpha$ , так как в этом случае нормальные составляющие вибраций не влияют на результат измерений. Роль рассеивающих свет частиц выполняли шероховатостью обусловленные неровности поверхности.

Пространственное разрешение схемы определяется диаметром интерференционной картины на исследуемой поверхности и увеличивается путем применения фокусирующих линз 9. Измерительный объем совмещается с зонами перетяжек сфокусированных зондирующих пучков. Этим достигается высокое пространственное разрешение схемы, а также исключается нерегулярность интерференционной картины в направлении вектора чувствительности, обусловленная дифракционной неопределенностью направления волнового вектора в области фокусировки ограниченного

по сечению лазерного луча, так как только в сечении перетяжки волновой фронт последнего является плоским [5]. Нами применялись линзы с фокусным расстоянием 0,1 м, что обеспечило пространственное разрешение 100 мкм. Фокусировка зондирующих пучков увеличивает также абсолютную яркость интерференционной картины, что позволяет в качестве источника когерентного светового излучения использовать маломощные газовые лазеры непрерывного действия.

Особенностью применения лазерного доплеровского измерителя скорости для исследования вибраций является многочастичное рассеяние лазерного излучения, что вследствие проявления когерентных эффектов [6], а также несоответствия отношения размеров рассеивающих свет частиц и пространственного периода интерференционных картин оптимальному приводит к уменьшению глубины модуляции доплеровского сигнала. Качество работы схемы, таким образом, во многом определяется контрастностью интерференционной картины на исследуемой поверхности, которая зависит как от равенства интенсивностей интерферирующих пучков, так и от их взаимной когерентности. Равенство интенсивностей пучков обеспечивается применением светоделительного куба 4 в качестве расщепителя исходного луча лазера. Взаимная когерентность пучков достигается симметричным построением схемы, т. е. оптическая часть измерителя собирается так, что разность хода интерферирующих пучков не превышает длину когерентности лазерного излучения.

Приемная оптическая система 8 состоит из двух собирающих линз. Рассеянный назад свет собирается ближней к исследуемому объекту линзой в телесном углу 0,1 ср и в виде параллельного пучка направляется на вторую линзу. На фокусном расстоянии последней находится ограничивающая диафрагма 7 диаметром в 100 мкм. Рассеянный свет также фокусируется в пятно диаметром в 100 мкм.

В применяемой в данной работе схеме определение амплитуд вибраций осуществляется методом счета интерференционных полос, пройденных рассеивающей свет частицей за определенный промежуток времени. Известно, что промежуток между двумя соседними экстремумами частотно-модулированного сигнала соответствует передвижению частицы на одну интерференционную полосу. Известно также, что за полупериод колебаний частица проходит путь, равный удвоенной амплитуде вибраций. Таким образом, подсчитывая число интерференционных полос  $n$ , пройденных рассеивающей свет частицей за полупериод колебаний, можно определить амплитуду вибраций  $A$ :

$$A = n\Lambda/4.$$

В нашем случае  $\Lambda = \lambda/\sqrt{2}$  и амплитуды вибраций определяются из осциллограмм доплеровского сигнала по формуле

$$(3) \quad A = n\lambda/4\sqrt{2}.$$

Если же амплитуды вибраций малы и  $n \leq 1$ , на экране осциллографа наблюдается синусоида, частота которой равна частоте исследуемых вибраций. Значение  $n$  в данном случае определяется путем сравнения удвоенной амплитуды синусоиды с амплитудой низкочастотных шумов на выходе фотодетектора. При этом необходимо учитывать нелинейность частотной характеристики цепи фотодетектор-осциллограф.

Амплитуды больше  $5\Lambda/2$  определяются при помощи частотомера 16 из того же соотношения (3);  $n$  в данном случае равно показанию частотомера и означает число интерференционных периодов, пересекаемых частицей за период колебаний. Осциллограф при этом используется в качестве контрольного прибора.

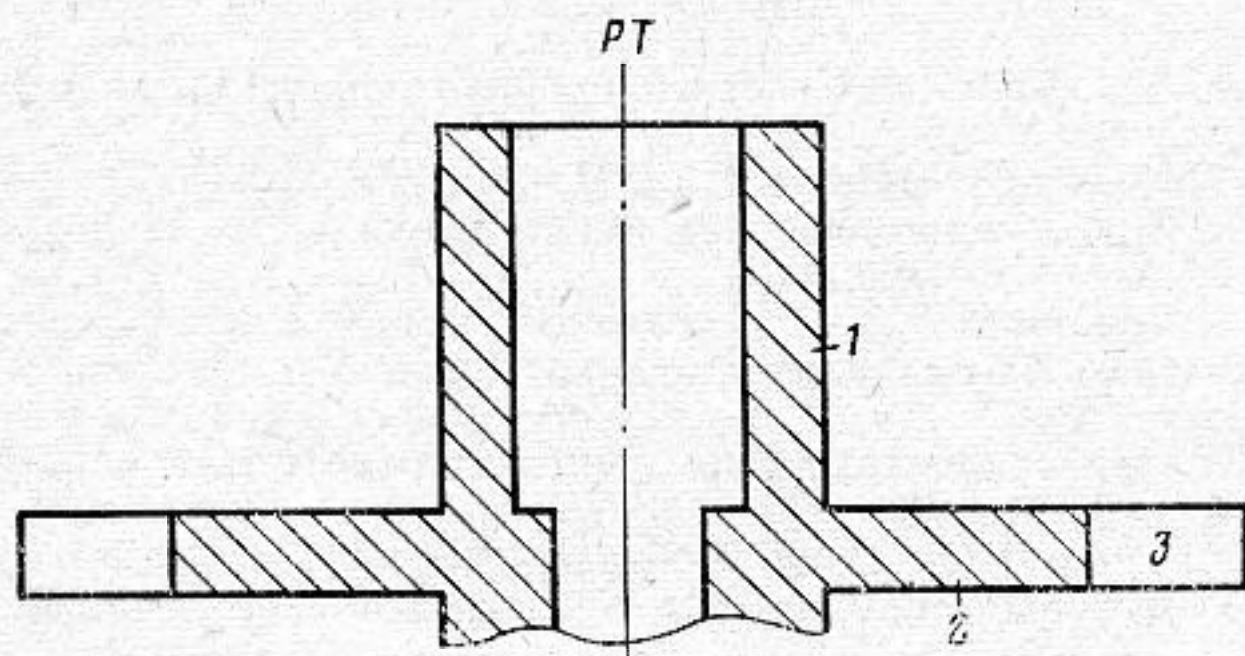
Максимальные исследуемые при помощи установок данного типа амплитуды вибраций  $A_m$  зависят от частоты  $f$  последних и ограничиваются

верхним пределом частотной характеристики приемной части схемы  $f_{пр}$

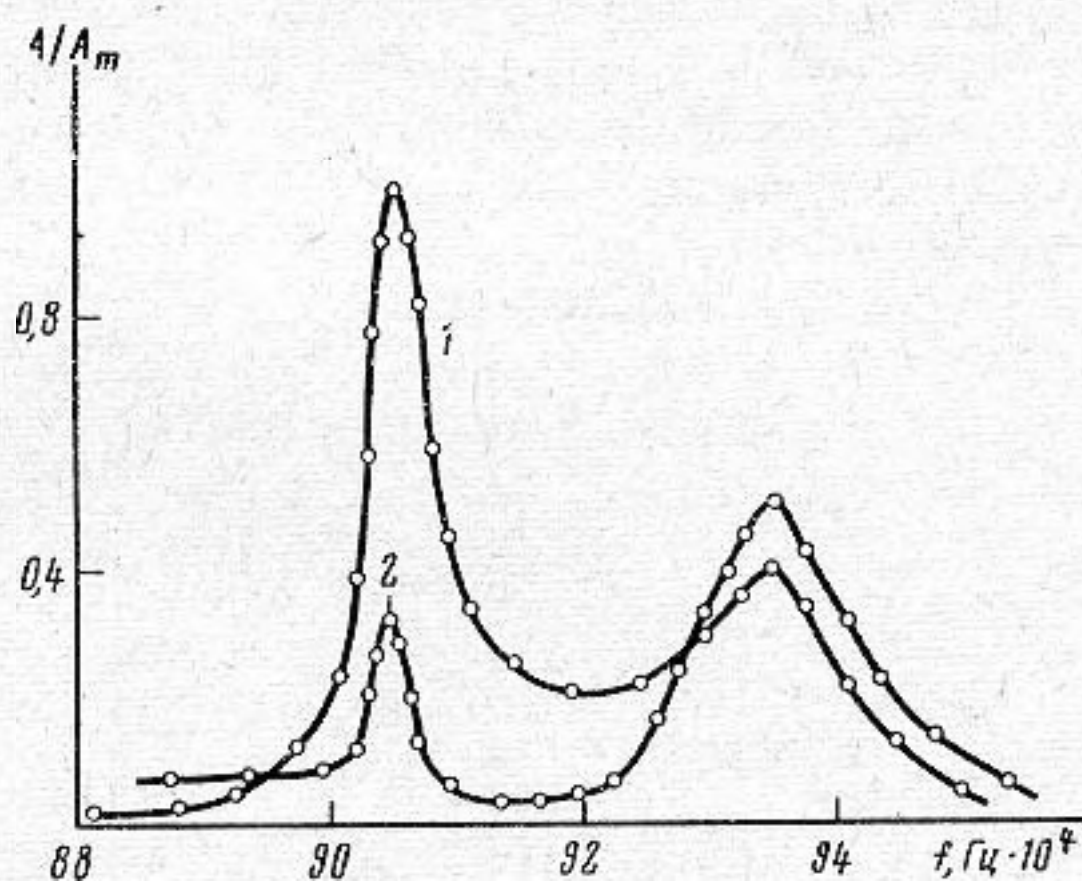
$$A_m = \lambda f_{пр} / 4\pi f \sin(\alpha/2).$$

Для использованной схемы  $f_{пр} = 3 \cdot 10^7$  Гц, что позволяет исследовать вибрации с амплитудой до 10 мкм на частоте  $10^5$  Гц.

Методом лазерной анемометрии нами исследовались составные колебательные системы продольно-крутильных колебаний, одна из которых показана на фиг. 2. Она представляет собой стержневой пакетный преобразователь продольно-крутильных колебаний 1, вблизи узловой зоны кото-



Фиг. 2. Составная колебательная система продольно-крутильных колебаний: 1 — стержневой резонатор, 2 — полуволновой дисковый резонатор, 3 — четвертьволновые стержни, РТ — рабочий торец



Фиг. 3. Амплитудно-частотная характеристика системы продольно-крутильных колебаний: 1 — продольная мода колебаний, 2 — крутильная мода колебаний,  $A_m = 2,5$  мкм

рого установлен дисковый фланец-резонатор крутильных колебаний 2. Для возбуждения крутильной моды на боковой поверхности фланца под острым углом установлены четвертьволновые стержни 3. Подобные системы применяются в вибродвигателях торцевого привода [7], ротор которых приводится в движение вследствие асимметрии сил трения в зоне контакта, обусловленной совместным действием продольных и крутильных колебаний, за период колебаний системы. Для улучшения характеристик вибродвигателя в целом важным является не только увеличение амплитуд продольных и крутильных колебаний на рабочем торце системы, но и строгое совмещение резонансов обеих мод по частоте.

Амплитудно-частотная характеристика системы продольно-крутильных колебаний показана на фиг. 3. Кривая 1 на ней соответствует продольной моде колебаний, а кривая 2 — крутильной. Как следует из ампли-

тудно-частотной характеристики в области рабочих частот системы (около  $9 \cdot 10^4$  Гц) существуют два совмещенных резонанса продольных и крутильных колебаний ( $f_1=9,1 \cdot 10^4$  Гц;  $f_2=9,35 \cdot 10^4$  Гц), которые могут использоваться как рабочие частоты вибродвигателя. Испытания системы в вибродвигателе показали, что при переходе с одной резонансной частоты на другую направление вращения ротора меняется на противоположное. Обусловлено это, по-видимому, скачком на  $\pi$  относительной фазы продольных и крутильных колебаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкявичюс Б. С. Доплеровский метод измерения локальных скоростей с помощью лазеров.— Успехи физ. наук, 1973, т. 111, № 2, с. 305–330.
2. Ринкявичюс Б. С. Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978. 159 с.
3. Рудницкий А. Л. Применение лазерной анемометрии в гидроаэродинамике.— Автометрия, 1979, № 4, с. 118–130.
4. Васильев П. Е., Ясюленис Э. И. Применение лазерной интерферометрии для исследования ультразвуковых колебательных систем.— Акуст. ж., 1980, т. 26, № 5, с. 663–666.
5. Кулеш В. П. Исследование структуры измерительного объема ЛДИС.— Автометрия, 1979, № 4, с. 68–76.
6. Ринкявичюс Б. С., Смирнов В. И. Когерентные эффекты в лазерной анемометрии.— В кн.: Голографические методы обработки информации. М.: МИРЭА, 1978, с. 93–102.
7. Васильев П. Е. Вибродвигатели и вибрационные лентопротяжные механизмы.— Электротехнич. пром-сть. Сер. Бытовая электротехника, 1978, № 2 (45), с. 6–10.

Всесоюзный научно-исследовательский  
проектно-конструкторский и технологический  
институт малых электрических  
машин, Вильнюсское отделение

Поступила в редакцию  
26.VI.1980