

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

534.171:53.05

ДЕМОНСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДОППЛЕРА

В. В. Майер, Р. В. Майер

(Глазовский пединститут им. В. Г. Короленко, Удмуртия)

Акустический эффект Допплера заключается, как известно, в изменении частоты воспринимаемого приемником звука при относительном движении приемника и источника в упругой среде [1]. Приближенное соотношение между частотой ν_0 источника звука и абсолютным изменением частоты $\Delta\nu$ звуковой волны, воспринимаемой приемником, имеет вид $\Delta\nu = (\nu_0 v/c) \cos \alpha$, где c — скорость звука в среде, v — скорость приемника относительно источника, α — угол между направлениями распространения звука и движения приемника. Существенно, что движения источника и приемника звука относительно среды неэквивалентны. Однако при малых скоростях этих движений различием в доплеровских сдвигах частот можно пренебречь, так как оно определяется величиной второго порядка малости относительно отношения скорости источника или приемника к скорости звука.

Обычно рекомендуемые демонстрации эффекта Допплера [2] основаны на непосредственных слуховых ощущениях аудитории, которые нередко бывают обманчивы. Что касается биений, возникающих при наложении волн от движущихся с разными скоростями источников, которые также часто используют при демонстрации эффекта Допплера, то их можно объяснить не только доплеровским сдвигом частоты, но и перемещением интерференционного распределения интенсивности относительно приемника. Поэтому убедительная и наглядная демонстрация акустического эффекта Допплера может быть поставлена только средствами современной техники учебного эксперимента, позволяющей объективно измерить небольшой сдвиг частоты звука.

Функциональная схема предлагаемой установки приведена на рис. 1. Источником звука является неподвижный динамик 1 мощностью 0,5—1 Вт, подключенный к звуковому генератору 2 типа ГЗ-33. Частота колебаний источника определяется с помощью цифрового частотомера 3 типа ЧЗ-33. Приемником звука служит микрофон 4 типа ДЭМШ-1, соединенный посредством экранированного проводника 5 с малоинерционным узкополосным частотомером 6, предназначенным для измерения доплеровского смещения частоты. Микрофон установлен почти на конце дюралевой штанги 7 маятника длиной 0,5 м с возможностью поворота вокруг штанги. Ось качания маятника создана парой конусных подшипников скольжения и находится в держателе 8, который закреплен на стойке 9

стандартного штатива. На штанге маятника имеется жестяная обжимка 10, которая позволяет электромагнитом 11, соединенным с источником питания 12, удерживать маятник в отклоненном положении. Для измерения максимальной скорости движения микрофона на нижнем конце маятника закреплена непрозрачная пластина 13 длиной $d = 50$ мм. При прохождении маятником положения равновесия пластина на некоторое время τ перекрывает световой пучок, который испускается светодиодом 14, соединенным с источником питания 15. На держателе 16 против светодиода находится фотодиод 17, сигнал с которого подается на секундомер,

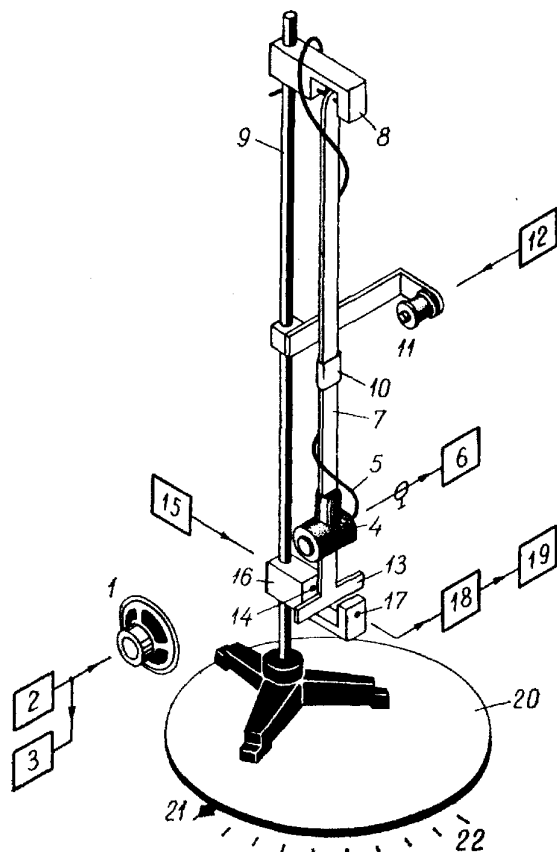


Рис. 1

состоящий из кварцевого генератора 18 с частотой 10 кГц с ключевым устройством и трехразрядного счетчика импульсов 19. Погрешность измерения времени этим секундомером 10^{-3} с. Скорость микрофона в нижней точке траектории вычисляют по формуле $v = dl_m/\tau l_n$, где l_m и l_n — расстояния от оси качания маятника до микрофона 4 и пластины 13 соответственно. Чтобы изменить и измерить угол α между направлениями распространения звуковой волны и скорости микрофона вблизи положения равновесия, штатив с маятником установлен на столике 20 с указателем 21, причем столик может поворачиваться относительно неподвижной шкалы 22, отградуированной в угловых градусах.

Принципиальная схема малоинерционного узкополосного частотомера изображена на рис. 2. Снимаемый с микрофона ВМ1 сигнал усиливается операционными усилителями DA1 и DA2 и после преобразования буферными элементами DD1.1, DD1.2 в прямоугольные импульсы пода-

ется на одновибратор DD2. На выходе одновибратора получают прямоугольные импульсы, длительность которых не зависит от интенсивности звука, а определяется параметрами времязадающей цепочки R8, C3. Это необходимо для того, чтобы прибор реагировал только на изменение частоты звука. Величины R8 и C3 подобраны так, чтобы в рабочем диапазоне длительность импульсов одновибратора была примерно равна полупериоду звука. Эти импульсы поступают на параллельный колебательный контур L1, C4, катушка которого намотана на ферритовом сердечнике диаметром 8 мм, длиной 30 мм и содержит 500 витков провода ПЭЛ 0,29. Рабочая частота прибора порядка 4,63 кГц находится на середине правой ветви резонансной кривой указанного контура. Понятно, что колебательный контур может быть сделан регулируемым, например, изменением индуктивности катушки, и тогда окажется возможным подобрать какое-то «круглое» значение рабочей частоты. Однако оно должно лежать в пределах 4–5 кГц, поскольку в этом диапазоне рекомендованный микрофон имеет один из максимумов чувствительности. Эксперимен-

тально подтверждено, что в пределах доплеровского смещения частоты, соответствующего скоростям движения от 0 до ± 2 м/с, рабочий участок резонансной кривой контура практически линеен. Напряжение с колебательного контура выпрямляется диодом VD1 и фильтруется ячейкой

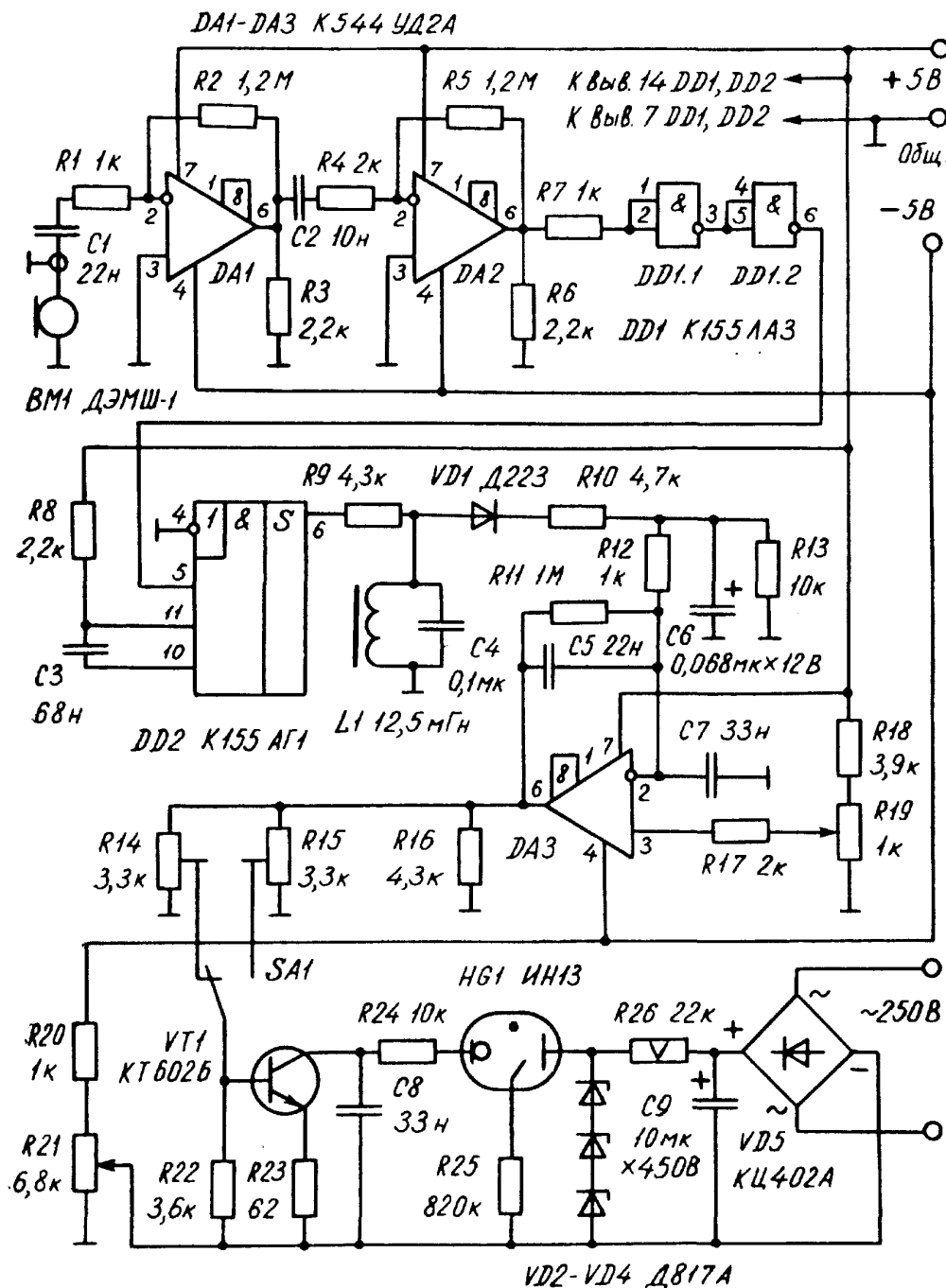


Рис. 2

C6, R13, после чего подается на инвертирующий вход усилителя ВА3. На неинвертирующий вход этого усилителя поступает постоянное напряжение с переменного или подстроечного резистора R19, величина которого определяет положение рабочей точки на резонансной кривой контура и подбирается при налаживании прибора. Если к выходу операционного усилителя DA3 подключить вольтметр, то получится требуемый узкополосный частотомер.

Поскольку при колебаниях маятника скорость движения микрофона, а следовательно, и воспринимаемая им частота звука довольно быстро меняются, инерционность вольтметра должна быть низкой. Таким малоинерционным вольтметром может служить осциллограф, подойдет также современный графопостроитель. Однако мы находим, что предпочтительнее вольтметр на основе линейного газоразрядного индикатора. Именно такой вольтметр и входит в схему, представленную на рис. 2. Индикатор НГ1 включен в коллекторную цепь транзистора VT1, на базу которого поступает постоянное напряжение с выхода усилителя ДА3. Рядом с индикатором, рабочая длина которого 100 мм, расположена линейка с миллиметровыми делениями. Сопроотивления подстроечных резисторов R14 и

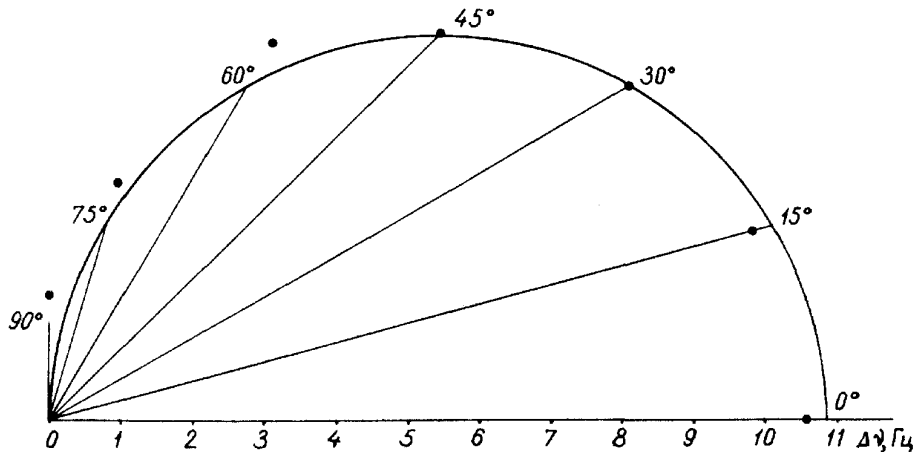


Рис. 3

R15 подобраны так, чтобы в одном положении переключателя SA1 чувствительность частотомера по шкале индикатора составляла 1 Гц/см, а в другом 2 Гц/см. Переменный резистор R21 предназначен для установки нуля прибора.

Целесообразен следующий порядок работы с описанной экспериментальной установкой.

Поясняют принцип действия узкополосного частотомера, обращая внимание на функциональные блоки: усилитель-ограничитель, формирователь импульсов постоянной амплитуды и неизменной формы с частотой звукового сигнала, колебательный контур, детектор, фильтр низкой частоты, малоинерционный вольтметр.

Включают звуковой генератор, цифровой частотомер на выходе этого генератора и узкополосный малоинерционный частотомер. Изменением частоты звука показывают линейность шкалы последнего прибора. Сообщают, что погрешность измерения смещения частоты этим прибором не хуже 5%. Резким, но не большим изменением частоты звука показывают, что цифровой частотомер, несмотря на его высокую точность, не в состоянии за малое время обнаружить доплеровское смещение частоты. Уменьшением громкости звука показывают нижнюю границу чувствительности по интенсивности узкополосного частотомера. Поясняют, что при наличии в рабочем объеме стоячей звуковой волны микрофон может оказаться в настолько глубоком минимуме, что частотомер не воспримет сигнала.

Включают питание электромагнита, кварцевый генератор с ключевым устройством, счетчик импульсов и светодиод. Показывают процесс измерения скорости микрофонами сообщают погрешность такого измерения, которая составляет не более 1%.

Запускают маятник с микрофоном так, чтобы вначале он приближался к динамику, а затем удалялся от него и демонстрируют доплеровское увеличение и уменьшение частоты звука соответственно. При необходимости проводят измерения, подтверждая эффект Доплера количественно.

Поворачивают плоскость колебаний маятника с микрофоном так, чтобы угол между скоростью микрофона в нижней точке его траектории и направлением распространения звуковой волны увеличивался от 0 до 90°. Показывают, что при этом доплеровский сдвиг частоты монотонно уменьшается до нуля. На рис. 3 представлены полученные в подобном эксперименте результаты и теоретическая кривая.

Микрофон оставляют неподвижным, перемещают относительно него динамик и показывают, что в пределах погрешности эксперимента получается тот же сдвиг частоты, что и при движении микрофона.

Описанные опыты, если не пытаться получить количественные оценки, занимают на лекции не более нескольких минут и с высокой степенью убедительности демонстрируют существование и особенности акустического эффекта Доплера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г. С. Оптика.—М.: Наука, 1976.—С. 433—436.
2. Лекционные демонстрации по физике / Под ред. В. И. Ивероновой.—М.: Наука, 1972.— С. 235—236.

Статья поступила 27.09.90 г.,
после переработки 29.11.90 г.