



В задаче не требуется оценка погрешностей!

Теоретическая справка

Ультразвук – продольные упругие волны в среде с частотой выше порога слышимости человека ≈ 20 кГц. Ультразвуковой датчик – прибор, служащий для генерации звуковой волны при подаче на него электрического сигнала на некоторой резонансной частоте. Ультразвуковой датчик обратим, то есть при попадании на него ультразвуковой волны на частоте, совпадающей с его резонансной частотой, на его контактах генерируется переменное напряжение. Поэтому каждый из выданных вам ультразвуковых датчиков может работать и в качестве передатчика, и в качестве приемника.

Указания

1. Перед началом эксперимента убедитесь, что делитель на обоих щупах стоит в положении «1X», а также в настройках обоих каналов осциллографа выбрано «Щуп 1X»/«Probe 1X».
2. Соблюдайте полярность при подключении вентилятора: его красный провод должен быть подключен к красному разъему источника, черный – к черному.
3. Запрещено подавать на вентилятор напряжение выше 12 В. Также запрещено пользоваться заклеенными рукоятками регулировки тока на источнике. Пользуйтесь рукоятками регулировки напряжения, перед включением источника выкрутив их на минимальные значения (против часовой стрелки). Поворачивайте рукоятки плавно и контролируйте напряжение (по показаниям источника), чтобы избежать резкого роста напряжения.
4. Следите, чтобы во вращающийся вентилятор не попали провода и другие предметы. Не удерживайте лопасти вентилятора: он может сгореть!
5. При использовании канцелярского ножа будьте осторожны, чтобы не порезаться и не поцарапать стол.

Задание

Часть 1: АЧХ.

Закрепите датчики на уголках с помощью магнитов (см. рис. 1). Подсоедините один из датчиков к генератору сигналов и первому каналу осциллографа, другой – ко второму. Подключайте черные крокодилы провода генератора и щупов осциллографа к черным проводам датчиков. Красный крокодил генератора и выдвигающиеся контакты щупов осциллографа подключайте к красным проводам датчиков. Поставьте датчики друг напротив друга на расстоянии 10 см. Включите осциллограф-генератор. Подайте на передат-

чик синусоидальный сигнал максимальной возможной амплитуды. Измерьте амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) системы приемник+передатчик в диапазоне 20...50 кГц, то есть отношение напряжения на приемнике U к напряжению на генераторе U_0 в зависимости от частоты генератора. Определите резонансные частоты системы с точностью до трех значащих цифр. Постройте график АЧХ системы.

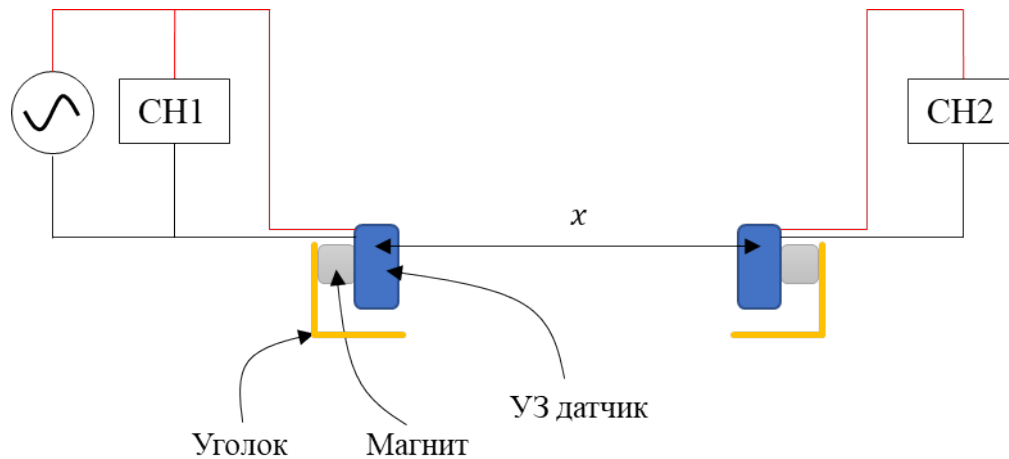


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения резонансных частот системы приемник+передатчик.

Часть 2: ИМПУЛЬС.

Подайте на передатчик прямоугольный сигнал с частотой 100 Гц. Нарисуйте качественно на одной картинке осциллограммы, наблюдаемые на приемнике и передатчике. Меняя расстояние между приемником и передатчиком, наблюдайте изменение осциллограммы и измеряйте ее характерные времена. Кратко объясните, какими эффектами они определяются. Определите, какая из найденных ранее резонансных частот колебаний системы приемник+передатчик является наиболее выраженной собственной частотой колебаний датчиков.

Часть 3: СКОРОСТЬ ЗВУКА.

Подайте на передатчик синусоидальный сигнал на одной из резонансных частот. Наблюдая изменение относительного положения сигналов на приемнике и передатчике в зависимости от расстояния между ними x , определите скорость ультразвуковых волн в воздухе.

Часть 4: СБОРКА ТРУБЫ.

Скрутите трубу из листа бумаги так, чтобы длинная сторона листа была направлена вдоль оси трубы. Получившуюся трубу вставьте ее концами в два рулона скотча, тогда скрученный лист не будет разворачиваться обратно. Между трубой и скотчем зажмите уголки с датчиками. Подвиньте датчики на магнитах так, чтобы они располагались строго

на оси трубы. К одному из рулонов скотча привинтите саморезами вентилятор так, чтобы его двигатель находился строго на оси трубы и чтобы при его включении воздух подавался в трубу (см. рис. 2). Проверьте вентилятор: он должен запускаться при ~ 2.6 В, не должно быть запаха горячей проводки. Подайте на передатчик синусоидальный сигнал на одной из резонансных частот. Медленно увеличивая напряжение на вентиляторе, наблюдайте за сигналом на приемнике. Сигнал приемника будет смещаться относительно сигнала на передатчике.

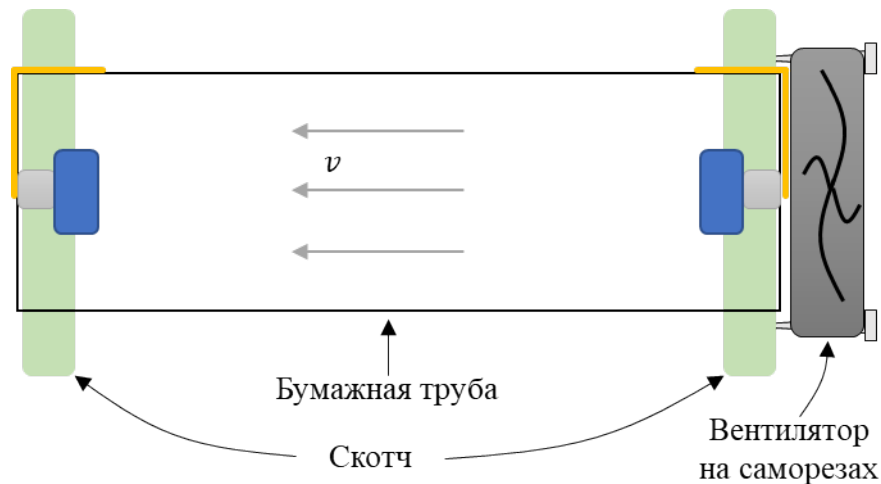


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения резонансных частот системы приемник+передатчик.

Часть 5: ФОРМУЛА СМЕЩЕНИЯ.

Запишите формулу для времени Δt , на которое смещается сигнал приемника при включении вентилятора. В формулу должны входить скорость звука в воздухе c , скорость потока воздуха v (известно, что $v \ll c$), расстояние между передатчиком и приемником x . Пренебрегите членами второго порядка малости.

Часть 6: ИЗМЕРЕНИЯ $\Delta t(U)$.

Изменяя напряжение U на вентиляторе от 3 В до 12 В с шагом 1 В, снимите зависимость $\Delta t(U)$.

Часть 7: СБОРКА ЧАСТОТОМЕРА.

Зафиксируйте кнопку включения лазера в нажатом положении, используя малярный скотч. (Не забудьте выключить лазер, когда закончите измерения). Подключите фотоприемник к осциллографу. Разместите лазер и фотоприемник так, чтобы при вращении вентилятора его лопасти периодически прерывали падающий на фотоприемник лазерный луч. Зарисуйте установку и ваш способ крепления лазера и фотоприемника. Как по измеренному периоду T сигнала с осциллографа рассчитать частоту f вращения вентилятора?

Часть 8: ИЗМЕРЕНИЯ $f(U)$.

Изменяя напряжение U на вентиляторе от 3 В до 12 В с шагом 1 В, снимите зависимость $f(U)$ и постройте ее график. Построенную зависимость $f(U)$ можно описать выражением $f = A \cdot (U - U_0)^{1/n}$, где A – не интересующая нас константа, n – натуральное число, а U_0 – некое «пороговое» напряжение. Предполагая, что такая зависимость выполняется почти для всего диапазона напряжений, постройте линеаризованный график и определите n и U_0 .

Часть 9: ГРАФИК $v(f)$.

Постройте график зависимости скорости v потока воздуха в трубе от частоты f вращения вентилятора. Какой математической функцией можно описать измеренную зависимость? Рассчитайте коэффициенты предложенной функции.

Часть 10: ИЗМЕРЕНИЯ $\Delta t(x)$ и $f(x)$.

Вы можете менять длину трубы (а вместе с ней и расстояние x между передатчиком и приемником), отрезая от трубы части канцелярским ножом. Снимите зависимости $\Delta t(x)$ и $f(x)$ при одинаковом напряжении на вентиляторе $U = 12$ В. Проанализируйте измеренные зависимости, при необходимости постройте их графики. Какой качественный вывод можно сделать о влиянии трения воздуха о стенки трубы на частоту вращения вентилятора и скорость потока воздуха внутри трубы?

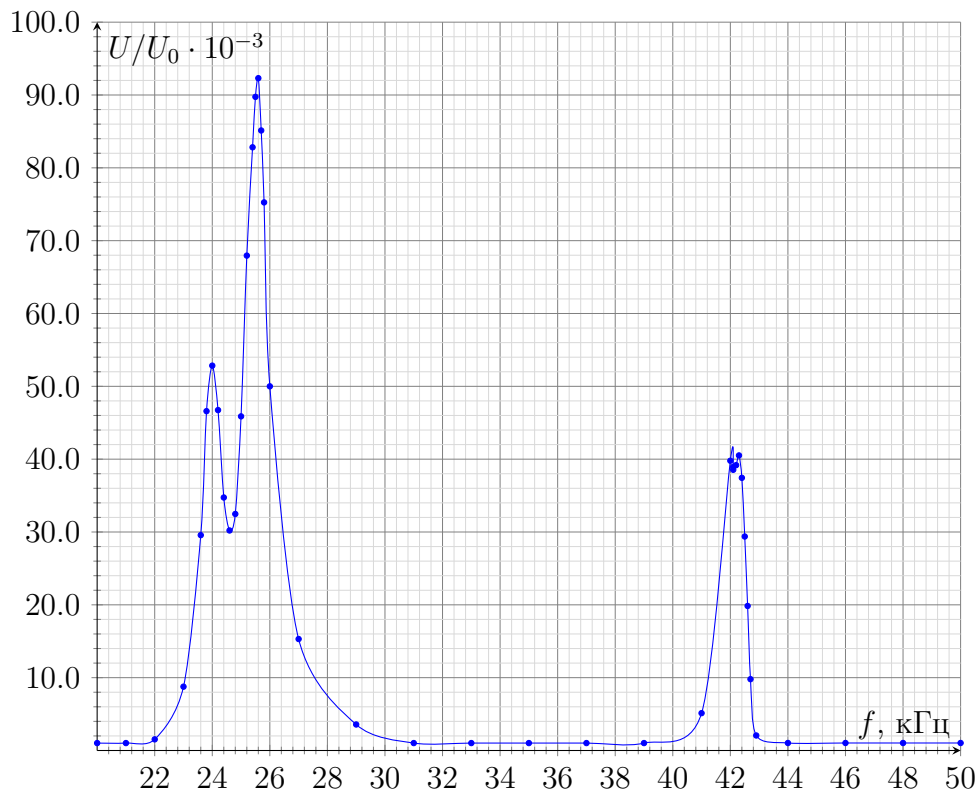
Оборудование. Осциллограф-генератор, источник питания (с выставленным ограничением напряжения 12 В), ультразвуковой датчик 2 шт., уголки с магнитами 2 шт., вентилятор, соединительные провода, саморезы 2 шт., лазер, фотоприемник, рулетка, скотч малярный 2 шт., ватман (по требованию, не более 2 листов), канцелярский нож, ножницы, отвертка (по требованию).

*Решение***Часть 1: АЧХ.**

Измерим АЧХ системы приемник+передатчик. Для этого будем подавать на передатчик синусоидальный сигнал максимальной амплитуды $U_0 = 8$ В с разными частотами в диапазоне 20-50 кГц с шагом в 1 кГц и измерять напряжение на приемнике. При двух частотах вблизи ≈ 25 кГц и ≈ 40 кГц наблюдается сильное увеличение напряжения на приемнике. Области вблизи этих частот измерим с малым шагом по частоте для нахождения точных значений резонансов. Построим график отношения напряжения на приемнике к напряжению на передатчике от частоты работы системы.

| f , кГц | U , мВ | U_0 , В | $U/U_0 \cdot 10^{-3}$ | f , кГц | U , мВ | U_0 , В | $U/U_0 \cdot 10^{-3}$ |
|-----------|----------|-----------|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------------------|
| 20.00 | 8 | 7.84 | 1.02 | 29.00 | 28 | 7.84 | 3.57 |
| 21.00 | 8 | 7.84 | 1.02 | 33.00 | 8 | 7.84 | 1.02 |
| 22.00 | 12 | 7.84 | 1.53 | 35.00 | 8 | 7.84 | 1.02 |
| 23.00 | 68 | 7.76 | 8.76 | 37.00 | 8 | 7.84 | 1.02 |
| 23.60 | 220 | 7.44 | 29.57 | 39.00 | 8 | 7.84 | 1.02 |
| 23.80 | 328 | 7.04 | 46.59 | 41.00 | 40 | 7.80 | 5.13 |
| 24.00 | 372 | 7.04 | 52.84 | 42.00 | 296 | 7.44 | 39.78 |
| 24.20 | 344 | 7.36 | 46.74 | 42.10 | 296 | 7.60 | 38.95 |
| 24.40 | 264 | 7.60 | 34.74 | 42.10 | 296 | 7.68 | 38.54 |
| 24.60 | 232 | 7.68 | 30.21 | 42.20 | 304 | 7.76 | 39.18 |
| 24.80 | 252 | 7.76 | 32.47 | 42.30 | 316 | 7.80 | 40.51 |
| 25.00 | 356 | 7.76 | 45.88 | 42.40 | 292 | 7.80 | 37.44 |
| 25.20 | 530 | 7.80 | 67.95 | 42.50 | 228 | 7.76 | 29.38 |
| 25.40 | 646 | 7.80 | 82.82 | 42.60 | 154 | 7.76 | 19.85 |
| 25.50 | 700 | 7.80 | 89.74 | 42.70 | 76 | 7.76 | 9.79 |
| 25.60 | 720 | 7.80 | 92.31 | 42.90 | 16 | 7.76 | 2.06 |
| 25.70 | 664 | 7.80 | 85.13 | 44.00 | 8 | 7.76 | 1.03 |
| 25.80 | 590 | 7.84 | 75.26 | 46.00 | 8 | 7.76 | 1.03 |
| 26.00 | 392 | 7.84 | 50.00 | 48.00 | 8 | 7.76 | 1.03 |
| 27.00 | 120 | 7.84 | 15.31 | 50.00 | 8 | 7.76 | 1.03 |

Амплитудно-частотная характеристика датчика



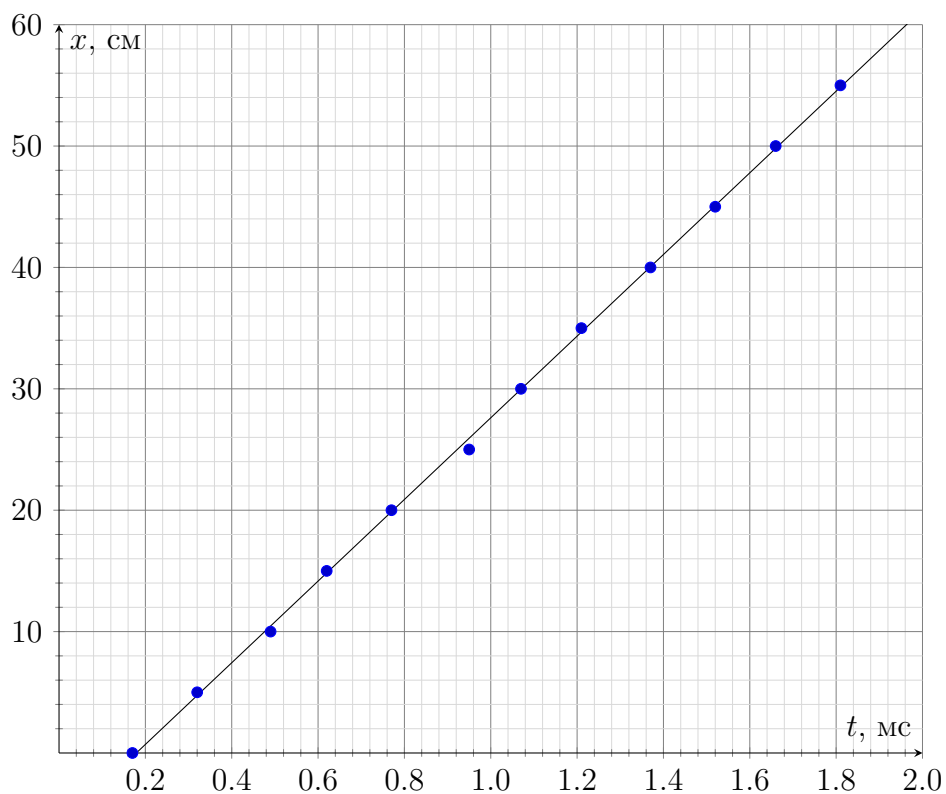
Видно, что помимо основного резонанса, для конкретной системы приемник+передатчик находящегося на 25.6 кГц, есть близкий к нему максимум на 24.0 кГц, а также побочный резонанс на ≈ 42.3 кГц. Вероятно, близкие максимумы соответствуют несколько отличающимся собственным частотам колебаний передатчика и приемника.

Часть 2: ИМПУЛЬС.

Если подать на передатчик прямоугольный сигнал с частотой 100 Гц, то на приемнике с некоторой задержкой будут возникать колебания, которые через некоторое время затухают. Можно заметить, что время задержки появления колебаний на приемнике зависит расстояния между приемником и передатчиком, а остальные параметры полученной осциллограммы, такие как частота колебаний приемника и время его затухания, от расстояния между приемником и передатчиком не зависят. Выберем некоторую характерную точку осциллограммы приемника (например, второй пик раскачивающихся колебаний приемника) и измерим время между нарастанием сигнала на передатчике и характерной точкой на осциллограмме приемника t_{delay} в зависимости от расстояния между передатчиком и приемником x . Как видно из графика зависимости $x(t_{delay})$, она может быть описана линейной функцией. Логично предположить, что данная задержка обусловлена двумя факторами - собственной задержкой колебаний приемника и передатчика (≈ 0.2 мс), а также задержкой в передаче звукового сигнала по воздуху, которая характеризуется скоростью звука в воздухе.

| x , см | t , мс |
|----------|----------|
| 0 | 0.17 |
| 5 | 0.32 |
| 10 | 0.49 |
| 15 | 0.62 |
| 20 | 0.77 |
| 25 | 0.95 |
| 30 | 1.07 |
| 35 | 1.21 |
| 40 | 1.37 |
| 45 | 1.52 |
| 50 | 1.66 |
| 55 | 1.81 |

График для определения скорости звука в воздухе



Определим угловой коэффициент измеренного графика, он составляет:

$$c_1 = 336 \text{ м/с} \quad (1)$$

Отметим, что приведенные рассуждения и расчет скорости звука не требовались в

работе, они приведены лишь в качестве подтверждения гипотезы о природе задержки колебаний.

Измерим также частоту возникающих на приемнике колебаний. Она составляет ≈ 25 кГц. После возбуждения пришедшим импульсом приемник начинает колебаться на собственной частоте, близкой к резонансной частоте системы. Неполное совпадение частот можно объяснить тем, что АЧХ системы приемник+передатчик является произведением их АЧХ по отдельности. Так как собственные частоты приемника и передатчика немного не совпадают, то и резонансная частота системы немного не совпадает с собственной частотой колебаний приемника.

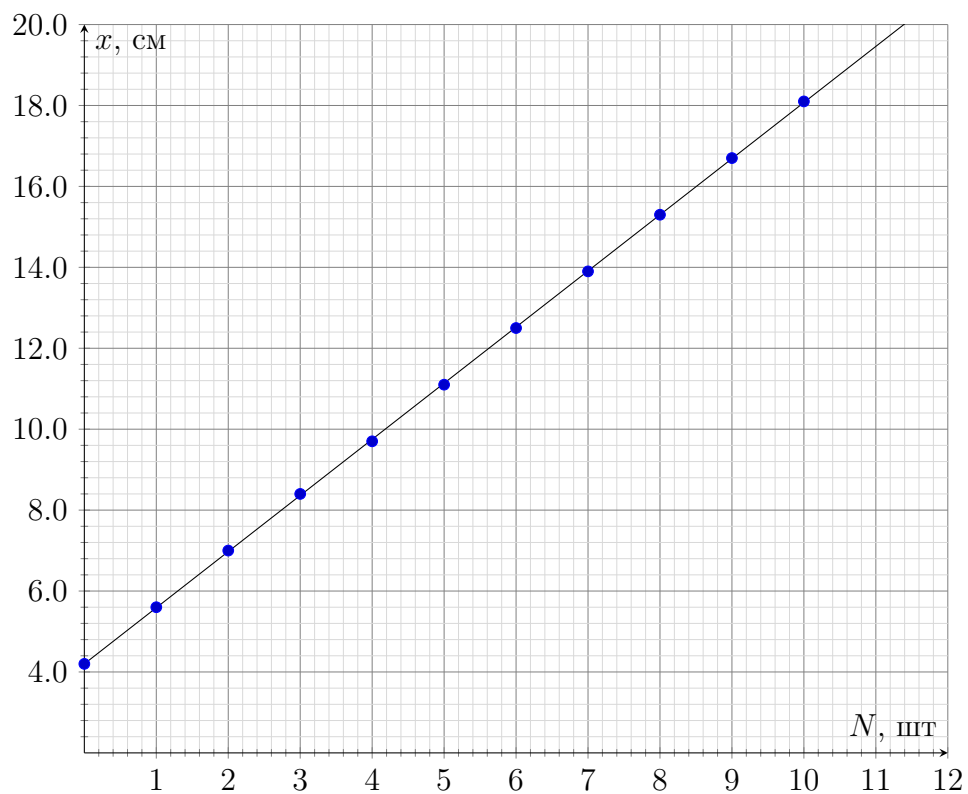
Часть 3: СКОРОСТЬ ЗВУКА.

Для более точного определения скорости звука в воздухе подадим на передатчик синусоидальный сигнал на резонансной частоте. На приемнике будем наблюдать осциллограмму в виде синуса. При смещении приемника его осциллограмма будет смещаться относительно осциллограммы передатчика. Смещение осциллограммы на период будет отвечать смещению приемника на одну длину волны. Так как длина волны мала, то для ее подсчета воспользуемся методом рядов. То есть сместим приемник на некоторое расстояние и посчитаем, сколько длин волн уложится в этом расстоянии по количеству периодов смещения осциллограммы приемника относительно осциллограммы передатчика. Далее умножим полученную длину волны на частоту колебаний передатчика и получим значение скорости звука в среде. При измерениях, проведенных на разных частотах, при прочих равных будут отличаться количества длин волн, укладывающихся на некотором расстоянии. Точность определения этого количества будет достаточно высокой и сравнимо большей, чем точность вычисления расстояния смещения. Поэтому по сути дела выбор резонансной частоты практически не влияет на точность определение скорости звука в таком эксперименте. В контрольных измерениях осциллограмма сдвинулась на N периодов при смещении приемника на x см для резонансной частоты $f_1 = 25.6$ кГц. Таким образом, скорость звука в воздухе можно найти из графика $x(N)$:

$$x(N) = \frac{c_2}{f_1} \cdot N + x_0, \quad (2)$$

где x_0 - некоторая константа, определяемая начальным взаимным расположением приемника и передатчика.

| N , шт | x , см |
|----------|----------|
| 0 | 4.2 |
| 1 | 5.6 |
| 2 | 7.0 |
| 3 | 8.4 |
| 4 | 9.7 |
| 5 | 11.1 |
| 6 | 12.5 |
| 7 | 13.9 |
| 8 | 15.3 |
| 9 | 16.7 |
| 10 | 18.1 |

График зависимости смещения x от кол-ва периодов N 

Получив коэффициент наклона графика $\alpha_2 = 1.39$ см, получим, что скорость звука:

$$c_2 = 355 \text{ м/с} \quad (3)$$

Часть 4: СБОРКА ТРУБЫ.

Собрав установку и выбрав более явную резонансную частоту 25.6 кГц, убеждаемся, что время смещения осциллограммы на приемнике зависит от скорости движения воздуха между приемником и передатчиком.

Часть 5: ФОРМУЛА СМЕЩЕНИЯ.

Можно считать, что звуковое возмущение движется относительно воздуха со скоростью звука, а сам воздух дополнительно перемещается относительно системы приемник+передатчик со скоростью ветра. Таким образом, звук будет двигаться с суммарной скоростью звука и струи воздуха в трубе. Изменение времени смещения Δt осциллограммы приемника можно описать так:

$$\Delta t = \frac{x}{c} - \frac{x}{c+v}. \quad (4)$$

Так как скорость потока воздуха много меньше скорости звука, то можно воспользоваться формулами приближенного исчисления:

$$\Delta t = \frac{xv}{c^2}. \quad (5)$$

Откуда для скорости воздушного потока получаем:

$$v = \frac{\Delta t c^2}{x}. \quad (6)$$

Видно, что время смещения не зависит от частоты сигнала.

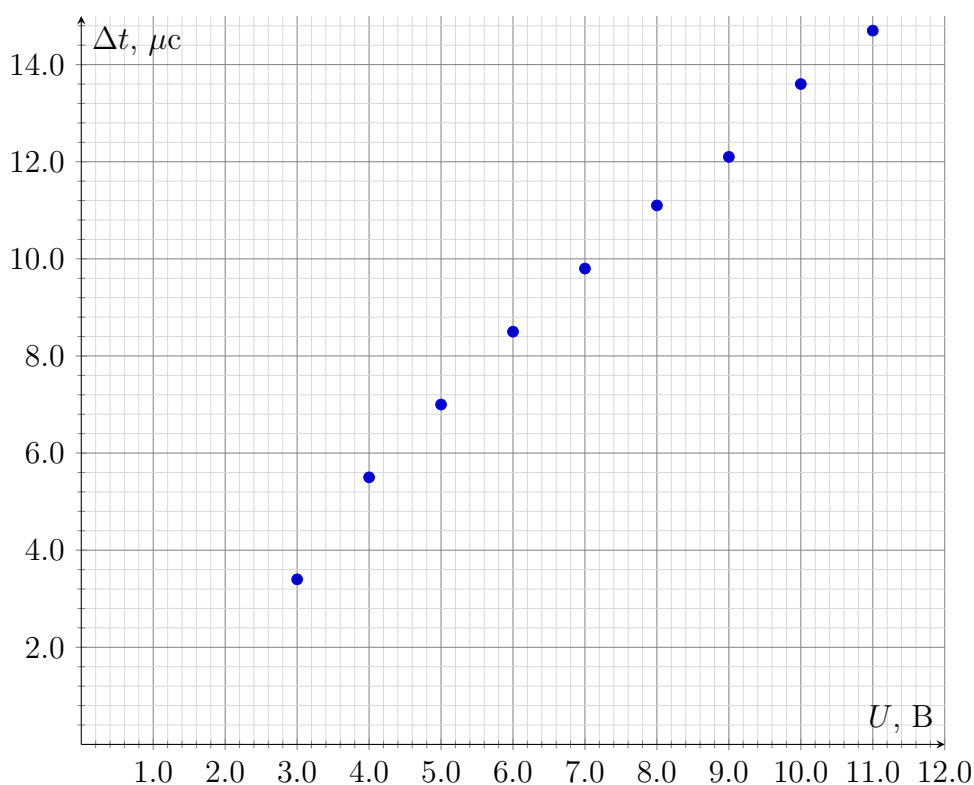
Часть 6: ИЗМЕРЕНИЯ $\Delta t(U)$.

Поставим один из вертикальных курсоров на точку, в которой горизонтальная ось пересекается с осциллограммой приемника при выключенном вентиляторе. Другой курсор будем смещать в новую точку пересечения по мере увеличения U и соответствующего сдвига осциллограммы. Рассчитаем по измеренной разности времен скорость струи воздуха в трубе.

Данные измерены для трубы $x = 82.1$ см.

| U , В | Δt , $\mu\text{с}$ |
|---------|----------------------------|
| 3.0 | 3.4 |
| 4.0 | 5.5 |
| 5.0 | 7.0 |
| 6.0 | 8.5 |
| 7.0 | 9.8 |
| 8.0 | 11.1 |
| 9.0 | 12.1 |
| 10.0 | 13.6 |
| 11.0 | 14.7 |
| 12.0 | 16.0 |

График зависимости Δt от U



Часть 7: СБОРКА ЧАСТОТОМЕРА.

Для определения частоты вращения вентилятора положим включенный лазер в свободный от вентилятора конец трубы, направим луч на лопасти вентилятора, а фотоприемник повесим на магнитном держателе на боковую стенку источника питания вентилятора так, чтобы он периодически освещался прошедшим между лопастей вентилятора лучом. Элек-

трический сигнал на фотоприемнике будет прерывистым с периодом $T = \frac{1}{7f}$ (поскольку вентилятор имеет 7 лопастей). Если пользоваться встроенным в осциллограф частотомером, то измерять T курсорами нет необходимости, и достаточно поделить измеренную осциллографом частоту f_{photo} на 7. Измерим частоту вращения вентилятора в зависимости от напряжения питания вентилятора.

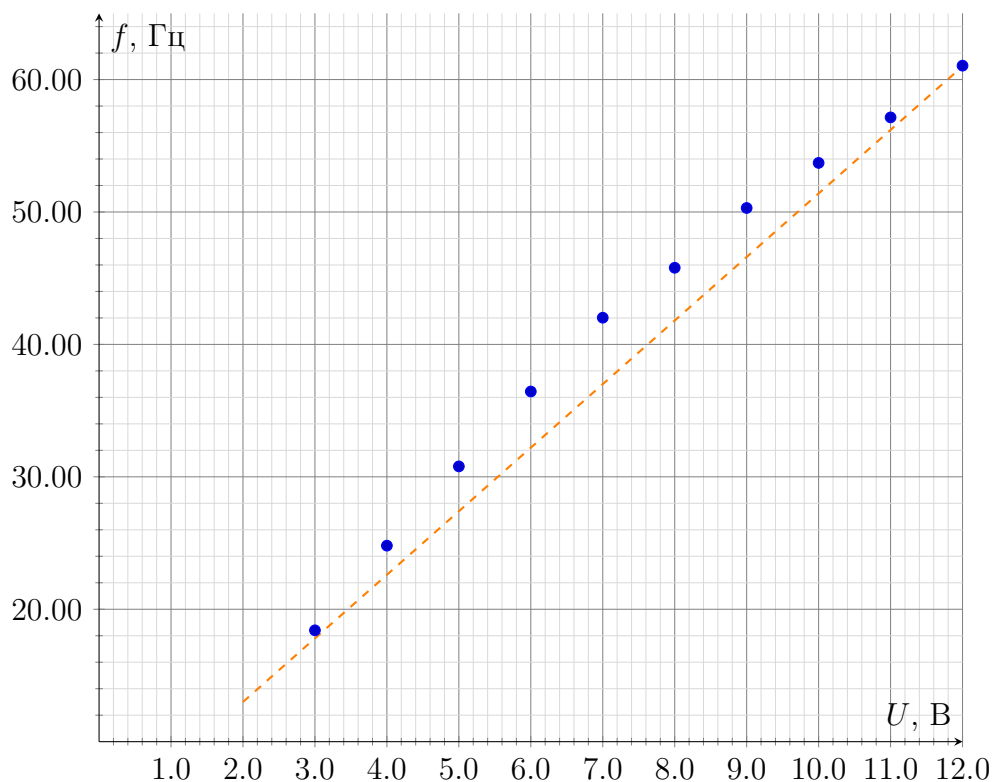
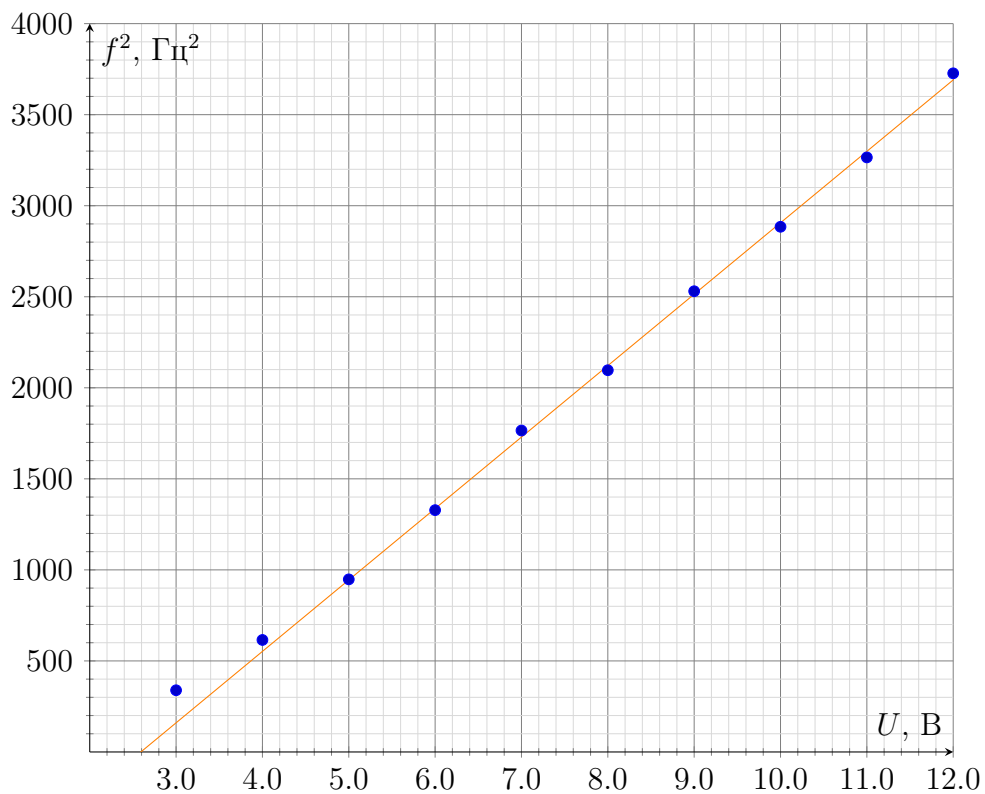
Часть 8: ИЗМЕРЕНИЯ $f(U)$.

| U , В | t , мс | f_{photo} , Гц | f , Гц | f^2 , Гц ² |
|---------|----------|------------------|----------|-------------------------|
| 3.0 | 7.76 | 128.9 | 18.41 | 338.91 |
| 4.0 | 5.76 | 173.6 | 24.80 | 615.12 |
| 5.0 | 4.64 | 215.5 | 30.79 | 947.91 |
| 6.0 | 3.92 | 255.1 | 36.44 | 1328.10 |
| 7.0 | 3.40 | 294.1 | 42.02 | 1765.41 |
| 8.0 | 3.12 | 320.5 | 45.79 | 2096.50 |
| 9.0 | 2.84 | 352.1 | 50.30 | 2530.27 |
| 10.0 | 2.66 | 375.9 | 53.71 | 2884.30 |
| 11.0 | 2.50 | 400.0 | 57.14 | 3265.31 |
| 12.0 | 2.34 | 427.4 | 61.05 | 3727.11 |

Построим график $f(U)$. Видно, что на графике нет большого линейного участка. Предположим тогда, что $n = 2$ и построим график $f^2(U)$. Видно, что полученный график может быть описан линейно функцией в диапазоне с ~ 5 В до 12 В. Следовательно, $n = 2$, то есть $f \sim \sqrt{U - U_0}$, где из графиков $U_0 = 2.6$ В и совпадает с напряжением, при котором вентилятор начинает вращаться.

Приведем также теоретическое обоснование такой зависимости. Момент электромагнитных сил, вращающих двигатель вентилятора, пропорционален току, а соответственно и превышению напряжения над неким «напряжением открытия» питающей вентилятор цепи: $M \sim I \sim (U - U_0)$. С другой стороны, этот момент уравновешен моментом сил сопротивления воздуха, при больших скоростях пропорциональным квадрату характерной скорости вращения лопастей v^2 , а значит и квадрату частоты: $M \sim v^2 \sim f^2$. Получаем требуемую зависимость: $f \sim (U - U_0)^{1/2}$.

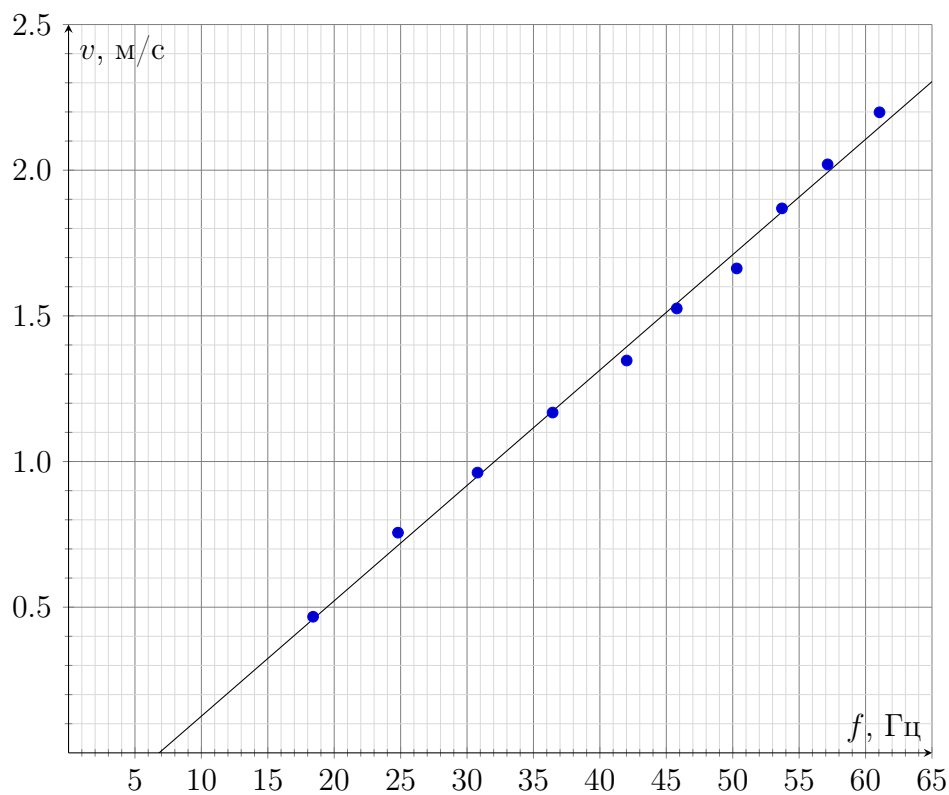
Отклонения начального участка линеаризованного графика от прямой связаны, скорее всего, с тем, что при малых скоростях лопастей сила сопротивления их движению имеет не квадратичный характер.

График зависимости f от U График зависимости f^2 от U 

Часть 9: ГРАФИК $v(f)$.

Объединим данные таблиц $v(U)$ и $f(U)$ для построения графика зависимости скорости струи воздуха от напряжения на вентиляторе.

| U , В | Δt , $\mu\text{с}$ | v , м/с | f_{rot} , Гц |
|---------|----------------------------|-----------|-----------------------|
| 3.0 | 3.4 | 0.47 | 18.41 |
| 4.0 | 5.5 | 0.76 | 24.80 |
| 5.0 | 7.0 | 0.96 | 30.79 |
| 6.0 | 8.5 | 1.17 | 36.44 |
| 7.0 | 9.8 | 1.35 | 42.02 |
| 8.0 | 11.1 | 1.53 | 45.79 |
| 9.0 | 12.1 | 1.66 | 50.30 |
| 10.0 | 13.6 | 1.87 | 53.71 |
| 11.0 | 14.7 | 2.02 | 57.14 |
| 12.0 | 16.0 | 2.20 | 61.05 |

График зависимости v от f 

Заметим, что полученная зависимость может быть описана линейной зависимостью с угловым коэффициентом:

$$K \approx 40 \text{ мм} \quad (7)$$

Часть 10: ИЗМЕРЕНИЯ $\Delta t(x)$ и $f(x)$.

Отрежем от трубы небольшую часть, уменьшив тем самым ее длину, и измерим время смещения осциллограммы приемника при включении вентилятора. А также измерим частоту вращения вентилятора при 12 В. Повторим процедуру для еще меньших длин трубы. Из полученных данных видно, что частота вращения вентилятора не зависит от длины трубы. То есть можно утверждать, что трение воздуха о стенки трубы не влияет на скорость вращения вентилятора. Если же построить график зависимости времени смещения осциллограммы приемника от длины трубы, то можно обнаружить, что зависимость может быть также описана прямой пропорциональностью. Последнее возможно в том случае, если скорость воздуха в трубах разной длины остается одинаковой. Таким образом скорость струи воздуха не зависит от трения о стенки трубы в данном случае и определяется лишь скоростью движения лопастей вентилятора.

| $\Delta t, \mu\text{с}$ | $x, \text{см}$ | $f_{\text{rot}}, \text{Гц}$ |
|-------------------------|----------------|-----------------------------|
| 14.2 | 82.3 | 62.11 |
| 12.4 | 77.6 | 61.05 |
| 11.2 | 65.8 | 61.58 |
| 10.4 | 59.9 | 62.11 |
| 9.4 | 53.0 | 60.02 |
| 8.7 | 45.2 | 60.53 |
| 7.3 | 40.7 | 59.52 |
| 5.8 | 33.1 | 59.52 |
| 4.6 | 26.6 | 60.53 |

График зависимости Δt от x

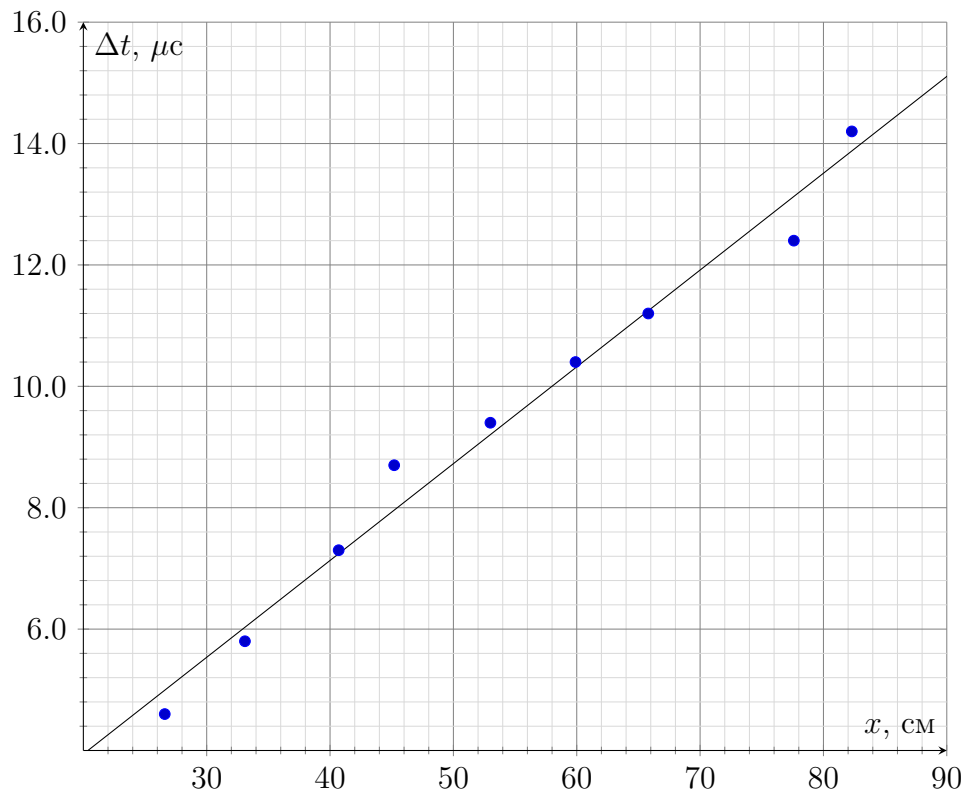


График зависимости f от x

