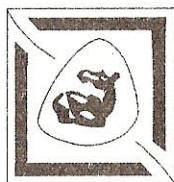


53(07)
P851

№1062



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра физики

**РУКОВОДСТВО
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
ПО РАЗДЕЛУ
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

ЕГФ

Таганрог 2006

Составители: М.И. Сластен (№ 401, 402), А.В. Третьякова (№ 401)

Руководство к лабораторным работам по физике по разделу «Колебания и волны». – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 28 с.

Руководство содержит описания лабораторных работ и предназначено для студентов, выполняющих лабораторные работы по разделу «Колебания и волны». Представлен цикл лабораторных работ по затухающим колебаниям в колебательном контуре и измерению скорости звука в воздухе. Имеются краткие теоретические сведения.

Табл. 4. Ил. 8. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент А.Б. Колпачев, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики Таганрогского государственного радиотехнического университета.

401. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

401.1. Цель работы

Изучение свободных колебаний в колебательном контуре и определение их основных характеристик.

[2. С. 262 – 265; 3. С. 229 – 232].

401.2. Разделы теории

Параллельный колебательный контур. Уравнение затухающих колебаний. Коэффициент затухания. Логарифмический декремент затухания. Добротность.

401.3. Приборы и принадлежности

Электронный осциллограф С1-55 и лабораторный стенд.

401.4. Теоретическое введение

Параллельный колебательный контур представляет собой цепь, содержащую емкость C , индуктивность L и электрическое сопротивление R (рис. 401.1).

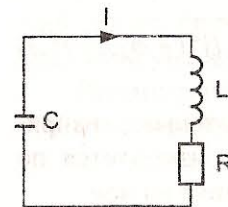


Рис. 401.1

Колебания в электрическом контуре можно вызвать, сообщив обкладкам конденсатора C некоторый начальный заряд или возбудив в катушке индуктивности L индукционный ток внешним магнитным полем.

Первоначальная энергия, запасенная в контуре, постепенно будет уменьшаться вследствие потерь на активном сопротивлении, и, следовательно, свободные колебания в таком контуре будут с течением времени затухать.

Дифференциальное уравнение, описывающее свободные затухающие колебания в контуре, имеет вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0.$$

Это уравнение запишем следующим образом:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (401.1)$$

где $\beta = R/2L$ – коэффициент затухания; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – частота собственных колебаний (в колебательном контуре без потерь, т.е. при $R = 0$).

При условии, что $\beta^2 < \omega_0^2$, то есть $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$, решением уравнения (401.1) является функция

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (401.2)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота затухающих колебаний.

Отсюда видно, что с течением времени амплитудное значение заряда на конденсаторе убывает по экспоненциальному закону (рис. 401.2), причем, чем больше β , тем быстрее затухают колебания в контуре.

Учитывая, что напряжение на конденсаторе $U = q/C$, из (401.2) найдем

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi), \quad (401.3)$$

где $U_0 = q_0/C$. Следовательно, напряжение на конденсаторе изменяется по тому же закону, что и заряд на нем.

Для нахождения тока в контуре необходимо продифференцировать по времени выражение (401.2), поскольку $I = dq/dt$.

Тогда

$$I = \omega q_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi + \psi),$$

где $\operatorname{tg} \psi = -\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} / \beta$.

Величина ψ определяет разность фаз между током и напряжением

на конденсаторе, причем ψ принимает значения в интервале от $\pi/2$ до π .

Таким образом, при наличии потерь в контуре ($\beta > 0$) ток опережает по фазе напряжение на конденсаторе более чем на $\pi/2$. При $\beta = 0$ $\psi = \pi/2$.

Период затухающих колебаний $T = 2\pi/\omega$ не совпадает с периодом собственных колебаний $T_0 = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{LC}$:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4\pi^2}{T_0^2} - \beta^2}},$$

откуда

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2}}. \quad (401.4)$$

Из выражения (401.4) видно, что чем больше β , тем сильнее различие между T и T_0 .

Рассмотрим основные характеристики затухающих колебаний. Возьмем момент времени $t = 1/\beta$, тогда из (401.3) для амплитуды колебаний получим $U(t) = U_0/e$, где e – основание натурального логарифма. Следовательно, коэффициент затухания численно равен обратной величине такого промежутка времени $t = \tau$, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в e раз (τ – время релаксации).

Рассмотрим теперь два момента времени t и $t+T$. Им соответствуют амплитуды колебаний

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t} \quad \text{и} \quad U(t+T) = U_0 e^{-\beta(t+T)}.$$

Натуральный логарифм отношения этих амплитуд

$$\ln \frac{U(t)}{U(t+T)} = \beta T = \delta \quad (401.5)$$

называется логарифмическим декрементом затухания.

С учетом (401.5) закон убывания амплитуды колебаний можно записать в виде

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{\delta}{T}t} \quad (401.6)$$

Если выбрать момент времени $t = \tau$, то из (401.6) следует, что $\delta\tau/T = 1$ и $\delta = T/\tau = 1/N_e$. Таким образом, логарифмический декремент затухания обратно пропорционален числу колебаний N_e , совершаемых за время τ .

Из выражения (401.5) также следует, что

$$\delta = \beta T = \frac{RT}{2L}.$$

Поскольку период колебаний T , а следовательно, и логарифмический декремент затухания δ определяются параметрами контура L, C, R , то δ также является характеристикой колебательного контура.

На практике часто пользуются другой характеристикой контура — добротностью Q , которая равна

$$Q = \frac{\pi}{\delta} = \pi N_e.$$

Добротность определяют как отношение энергии W , запасенной в контуре в данный момент времени, к убыли этой энергии ΔW за один период колебаний, умноженное на 2π :

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W}. \quad (401.7)$$

Если учесть, что энергия колебаний W пропорциональна квадрату амплитуды, то на основании выражения (401.6) формулу (401.7) можно представить в другом виде:

$$Q = 2\pi \frac{U^2(t)}{U^2(t) - U^2(t+T)}, \quad (401.8)$$

где $U(t) = A_1$ и $U(t+T) = A_2$ — амплитуды двух колебаний, разделенных по времени на период. Отсюда видно, что, измерив амплитуды двух соседних колебаний, можно экспериментально определить добротность контура Q .

401.5. Описание установки

Для исследования затухающих колебаний используется схема, представленная на рис. 401.3.

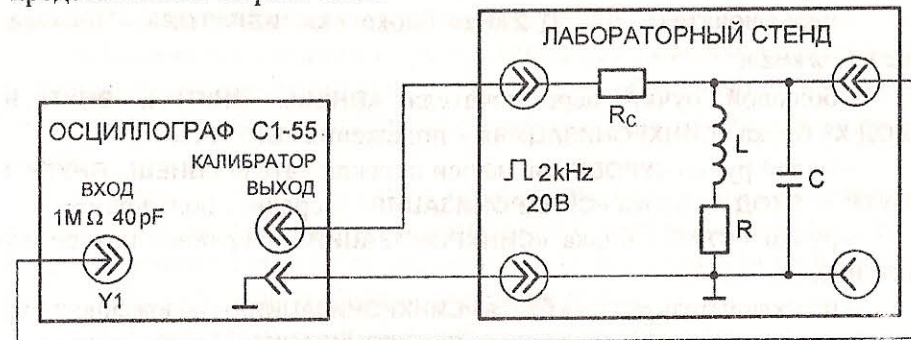


Рис. 401.3. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из электронного осциллографа С1-55 с имеющимся в нем импульсным генератором (калибратором) и лабораторного стенда.

Внешний вид осциллографа С1-55 представлен на рис. 401.4.

Прямоугольные импульсы с амплитудой 20 В и частотой следования 2 кГц с выхода калибратора поступают через согласующее сопротивление R_c в колебательный контур и возбуждают в нем затухающие колебания, которые можно наблюдать на экране осциллографа.

401.6. Порядок выполнения работы

1. Собрать экспериментальную установку, приведенную на рис. 401.3.

2. Исходные положения органов управления осциллографа:

- ручки «ЯРКОСТЬ I» — среднее;
- ручки «ЯРКОСТЬ II» — крайнее левое;
- большой ручки переключателя «ВОЛЬТ / ДЕЛ.» блока «УСИЛИТЕЛЬ Y1» — положение «0,02»;
- малой ручки «УСИЛЕНИЕ» на оси переключателя «ВОЛЬТ / ДЕЛ.» блока «УСИЛИТЕЛЬ Y1» — крайнее правое («КАЛИБР.»);
- переключателя «*1, *0,2» блока «РАЗВЕРТКА» — положение «*1»;

- большой ручки переключателя «ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЯ / ДЕЛ.» блока «РАЗВЕРТКА» – положение «2 μ s»;
- малой ручки «ПЛАВНО» на оси переключателя «ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЯ / ДЕЛ.» блока развертки – крайнее правое («КАЛИБР.»);
- переключателя «V» блока «КАЛИБРАТОР» – положение «20»;
- переключателя « \equiv \perp 2 kHz» блока «КАЛИБРАТОР» – положение « \perp 2 kHz»;
- большой ручки переключателя «ВНЕС., ВНУТР. I, ВНУТР. II, ВХОД X» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» – положение «ВНУТР. I»;
- малой ручки «УРОВЕНЬ» на оси переключателя «ВНЕС., ВНУТР. I, ВНУТР. II, ВХОД X» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» – среднее положение;
- ручки «СТАБ.» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» – крайнее правое положение;
- переключатель « \approx \sim » блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» – положение « \sim »;
- переключатель «+ –» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» – положение «+»;
- положения остальных органов управления осциллографа – произвольные.

3. Включить тумблер «ВКЛ. ПИТАНИЕ» осциллографа и дать прибору прогреться в течение 5 мин.

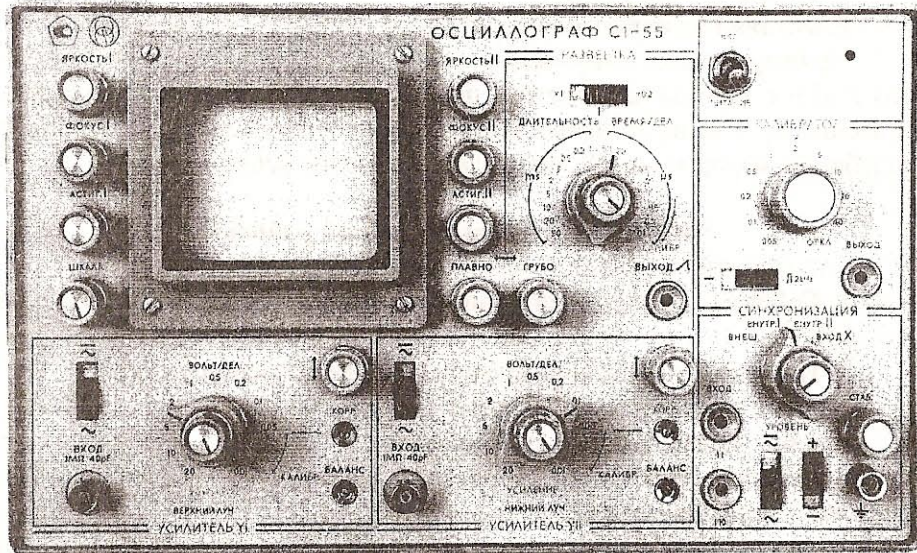


Рис. 401.4. Внешний вид электронного осциллографа С1-55

4. Получить на экране осциллографа неподвижное изображение затухающих колебаний. Для этого, плавно поворачивая ручку «СТАБ.» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ», установить ее в положение, когда изображение сигнала исчезает. Затем, плавно поворачивая малую ручку «УРОВЕНЬ» на оси переключателя «ВНЕС., ВНУТР. I, ВНУТР. II, ВХОД X» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ», получить неподвижное изображение сигнала.

5. Получить с помощью ручек «ЯРКОСТЬ I», «ФОКУС I», «АСТИГ. I» и ручки для перемещения луча по вертикали, обозначенной « \updownarrow » блока «УСИЛИТЕЛЬ У1», четкое изображение затухающих колебаний в центре экрана.

6. Установить изображение затухающих колебаний симметрично относительно центральной горизонтальной оси шкалы с помощью ручки для перемещения луча по вертикали, обозначенной « \updownarrow » блока «УСИЛИТЕЛЬ У1». При необходимости повторить п. 4.

7. Совместить с крайней левой вертикальной осью шкалы экрана осциллографа точку, соответствующую максимальной амплитуде затухающих колебаний, с помощью ручки для перемещения луча электронно-лучевой трубки по горизонтали, обозначенной « \leftrightarrow » с надписями «ПЛАВНО» и «ГРУБО».

8. Измерить период затухающих колебаний T . Для этого определить длительность N колебаний ($5 \div 10$) t_N как произведение цены деления шкалы по горизонтали t_{x0} на число делений масштабной сетки n_N на экране осциллографа и разделить ее на число колебаний.

9. Нарисовать осциллограмму вместе с масштабной сеткой. При этом амплитудные значения колебаний изображать точками и соединять их прямыми линиями. Указать цену деления масштабной сетки по горизонтали t_{x0} и вертикали U_{y0} . Записать значение R колебательного контура, указанное на лабораторном стенде.

10. Определить интервал времени τ , по истечении которого амплитуда колебаний уменьшается в e раз, как произведение цены деления шкалы по горизонтали на число делений масштабной сетки между колебаниями, отношение амплитуд которых равно 2,7.

11. Определить число полных колебаний N_e за время τ .

12. Измерить амплитуды первого и второго колебаний как произведение цены деления шкалы по вертикали U_{y0} на соответствующее число делений A_1 и A_2 .

13. Результаты измерений занести в табл. 401.1.

Результаты измерений

N	n_N	t_{x0} , с/дел	t_N , с	τ , с	N_e	A_1 , дел.	A_2 , дел.	U_{y0} , В/дел.

401.7. Обработка результатов измерений

1. Рассчитать:

- период затухающих колебаний T ;
- коэффициент затухания по формуле $\beta = 1/\tau$;
- период собственных колебаний T_0 по формуле (401.4);
- логарифмический декремент затухания по формуле $\delta = 1/N_e$;
- добротность контура по формуле $Q = \pi/\delta$;
- величину индуктивности L по формуле $L = R/2\beta$;
- емкость конденсатора по формуле $C = T_0/(4\pi^2 L)$.

2. Результаты расчетов занести в табл. 401.2.

3. Рассчитать логарифмический декремент затухания δ и добротность Q по формулам (401.5) и (401.8) на основании измерений в п. 12 и сравнить их с результатами расчетов в п. 1.

4. Оценить абсолютную и относительную погрешности измерений.

Таблица 401.2

Параметры колебательного контура

R , Ом	T , с	β , с ⁻¹	T_0 , с	δ	Q	L , Гн	C , Ф

Контрольные вопросы

1. Выведите дифференциальное уравнение, описывающее затухающие колебания в контуре.
2. Объясните, каким образом возникают колебания в контуре.
3. Приведите и объясните решение дифференциального уравнения.
4. Как зависят от времени заряд и напряжение на конденсаторе, а также ток в контуре? Запишите соответствующие выражения.
5. Дайте определение коэффициента затухания и объясните его физический смысл.
6. Дайте определение логарифмического декремента затухания и

объясните его физический смысл.

7. От чего зависит период затухающих колебаний в контуре?

8. Как меняется заряд конденсатора во времени, если $\beta > \omega_0$?

9. Дайте определение добротности, поясните ее физический смысл.

10. Объясните, почему происходит затухание колебаний в контуре.

11. Объясните, как получены выражения (401.7) и (401.8) для добротности контура.

402. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

402.1. Цель работы

Изучение методов измерений скорости звука в воздухе и ее экспериментальное определение.

[1. С. 201 – 204; 2. С. 289 – 291, 295 – 300; 3. С. 227 – 229, 243 – 245, 247 – 249].

402.2. Разделы теории

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Уравнение плоской механической волны. Скорость и длина волны. Стоячие волны, узлы и пучности стоячей волны.

402.3. Приборы и принадлежности

Электронный осциллограф С1-55, генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109 и лабораторный стенд.

402.4. Теоретическое введение

Скорость звука зависит от физических характеристик среды, в которой распространяются звуковые волны. Так, для газа скорость звука v определяется по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}, \quad (402.1)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – отношение молярных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме (для воздуха $\gamma = 1,4$); ρ – средняя плотность; P – среднее давление.

Учитывая, что

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{\mu},$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температу-

ра; μ – молярная масса (для воздуха $\mu = 29$ г/моль), выражение (402.1) можно переписать в виде

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}. \quad (402.2)$$

Скорость звука в воздухе также может быть определена на основе анализа распространения звуковых волн в нем. Пусть мы имеем две звуковые волны, прошедшие различные пути в одной среде (воздухе) и оказавшиеся в одной точке:

$$\begin{aligned} x_1 &= A \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} l_1\right), \\ x_2 &= B \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} l_2\right), \end{aligned}$$

где l_1 и l_2 – пути, пройденные волнами; A и B – амплитуды колебаний; $\omega = 2\pi\nu$; ν – частота колебаний; λ – длина волны.

В точке наблюдения частицы среды участвуют в колебаниях, связанных с обеими волнами, поэтому результирующее колебание есть сумма колебаний рассматриваемых волн. Результат сложения этих волн зависит от разности фаз $\Delta\varphi$, которая определяется как

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l_2 - \frac{2\pi}{\lambda} l_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (l_2 - l_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l, \quad (402.3)$$

где $\Delta l = l_2 - l_1$ – разность хода волн.

Из формулы (402.3) определяется длина звуковых волн:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \Delta l. \quad (402.4)$$

Длина волны λ связана со скоростью распространения v и частотой ν следующим образом:

$$\lambda = v/\nu. \quad (402.5)$$

Сравнивая выражения (402.4) и (402.5), получаем

$$v = \frac{2\pi\Delta l}{\Delta\varphi} v. \quad (402.6)$$

Разность фаз $\Delta\varphi$ легко определить, если колебания происходят во взаимно перпендикулярных направлениях. Для определения $\Delta\varphi$ складываемых волн проанализируем колебание, представляющее результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты.

Пусть имеются два колебания:

$$\begin{aligned} x &= A \cos \omega t, \\ y &= B \cos(\omega t + \Delta\varphi). \end{aligned} \quad (402.7)$$

Найдем результат сложения этих колебаний в обычной форме, исключив из уравнений (402.7) время t :

$$\begin{aligned} \cos \omega t &= \frac{x}{A}, \\ \sin \omega t &= \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}. \end{aligned} \quad (402.8)$$

Применяя формулу косинуса суммы и заменяя $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ их значениями из (402.8), получим

$$\frac{y}{B} = \frac{x}{A} \cos \Delta\varphi - \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}} \sin \Delta\varphi. \quad (402.9)$$

Уравнение (402.9) приводится к виду

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi. \quad (402.10)$$

Полученный результат (402.10) представляет собой уравнение эллипса с произвольной ориентацией его полуосей относительно координатных осей.

Ориентация эллипса сложным образом зависит от разности фаз колебаний $\Delta\varphi$.

Проведем анализ формы траектории результирующего колебания для некоторых частных случаев.

1. Разность фаз $\Delta\varphi = 0$. Тогда уравнение (402.10) принимает вид

$$\left(\frac{x}{A} - \frac{y}{B}\right)^2 = 0,$$

откуда получается уравнение прямой

$$y = \frac{B}{A}x.$$

Следовательно, колеблющаяся точка будет перемещаться по прямой, длина которой от начала координат равна $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Таким образом, зависимость перемещения от времени определяется как

$$r(t) = \sqrt{A^2 + B^2} \cos \omega t. \quad (402.11)$$

Из (402.11) следует, что результирующее колебание является гармоническим с частотой ω и амплитудой $\sqrt{A^2 + B^2}$.

2. Разность фаз $\Delta\varphi = +\pi$. В этом случае уравнение (402.10) принимает вид

$$\left(\frac{x}{A} + \frac{y}{B}\right)^2 = 0.$$

Отсюда получается, что результирующее колебание представляет собой гармоническое колебание вдоль прямой

$$y = -\frac{B}{A}x.$$

3. При разности фаз $\Delta\varphi = \pm \pi/2$ уравнение (402.10) преобразуется в уравнение эллипса, полуоси которого совпадают с координатными осями:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1.$$

При значениях $\Delta\varphi = \pi/2$ и $\Delta\varphi = -\pi/2$ направления движения по эллипсу противоположны.

Таким образом, при равенстве амплитуд исходных колебаний ($A=B$) и изменении разности фаз $\Delta\varphi$ от 0 до π траектория результирующего колебания принимает формы, представленные на рис. 402.1. При изменении разности фаз $\Delta\varphi$ от π до 2π формы результирующего колебания будут аналогичными, но наклон полуосей эллипсов изменяется на $\pi/2$.

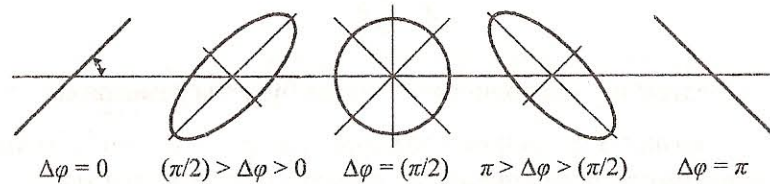


Рис. 402.1. Фигуры Лиссажу

Из анализа форм кривых результирующего колебания (называемых фигурами Лиссажу) вытекает возможность по виду и положению этих кривых определить разность фаз $\Delta\varphi$ складываемых колебаний. Тогда на основании соотношения (402.6) легко может быть определена и искомая скорость звука в воздухе.

В данной работе используется и другой способ определения скорости звука в воздухе – метод стоячей волны. Если расположить источник звуковых волн и отражающую поверхность на расстоянии L друг от друга, то между ними возникает стоячая волна с характерным распределением максимумов и минимумов смещения частиц среды относительно положения равновесия.

Рассмотрим две плоские волны с различными амплитудами, движущиеся навстречу друг другу:

$$\begin{aligned}\xi_1(x, t) &= A_1 e^{i(\omega t - kx)}, \\ \xi_2(x, t) &= A_2 e^{i(\omega t + kx)},\end{aligned}$$

где A_1 и A_2 – амплитуды падающей и отраженной волн соответственно. В реальных условиях всегда $A_1 > A_2$.

Результат сложения волн $\xi_1(x, t)$ и $\xi_2(x, t)$ представим в виде

$$\begin{aligned}\xi(x, t) &= \xi_1(x, t) + \xi_2(x, t) = A_1 e^{i(\omega t - kx)} + A_2 e^{i(\omega t + kx)} = \\ &= e^{i(\omega t - kx)} (A_1 + A_2 e^{2ikx}) = (A_1 - A_2) e^{i(\omega t - kx)} + \\ &+ A_2 (1 + e^{2ikx}) e^{i(\omega t - kx)} = (A_1 - A_2) e^{i(\omega t - kx)} + 2A_2 (\cos kx) e^{i\omega t}.\end{aligned}\quad (402.12)$$

Первое слагаемое в выражении (402.12) представляет собой волну, бегущую в направлении возрастающих значений x , амплитуда которой равна разности $(A_1 - A_2)$ двух встречных волн. Второе слагаемое описывает колебательный процесс, локализованный в пространстве, с частотой ω и амплитудой $2A_2 \cos kx$, т.е. стоячую волну.

Положение максимумов (пучностей) в результирующей волне определяется из условия

$$kx = \frac{2\pi}{\lambda} x = \pm n\pi, \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

причем амплитуда волны A' в этих точках равна

$$A' = A_1 - A_2 + 2A_2 = A_1 + A_2$$

или сумме амплитуд встречных волн.

Положение минимумов (узлов) определяется из условия

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots.\quad (402.13)$$

Амплитуда волны A'' в этих точках равна

$$A'' = A_1 - A_2,$$

т.е. разности амплитуд встречных волн.

Из соотношений (402.5) и (402.13) следует, что для образования стоячей волны нужно, чтобы расстояние между источником и отражаю-

щей поверхностью L удовлетворяло условию

$$L = \frac{1}{2} n \lambda = \frac{n v}{2 \nu}, \quad (402.14)$$

где n – целое число, ν – частота.

Из соотношения (402.14) следует, что если минимум, который будем считать нулевым, наблюдается при значении L_0 , а n -й при L_n , то искомая скорость

$$\nu = \lambda \nu = \frac{2(L_n - L_0)}{n} \nu. \quad (402.15)$$

402.5. Описание экспериментальной установки и методики измерений

Схема экспериментальной установки для измерения скорости звука в воздухе методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний и методом стоячей волны показана на рис. 402.2.



Рис. 402.2. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка содержит: 1 – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109; 2 – тройник СР-50-95ФВ; 3 – лабораторный стенд и 4 – электронный осциллограф С1-55.

Лабораторный стенд представляет собой два установленных соосно излучающего 5 и приемного 6 ультразвуковых преобразователя, расстояние между которыми можно изменять. Положение приемного преобразователя 6 относительно излучающего преобразователя 5 можно измерять по линейке.

Внешний вид генератора сигналов низкочастотного ГЗ-109 представлен на рис. 402.3.

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 402.4. Внешний вид электронного осциллографа С1-55 представлен на рис. 401.4.

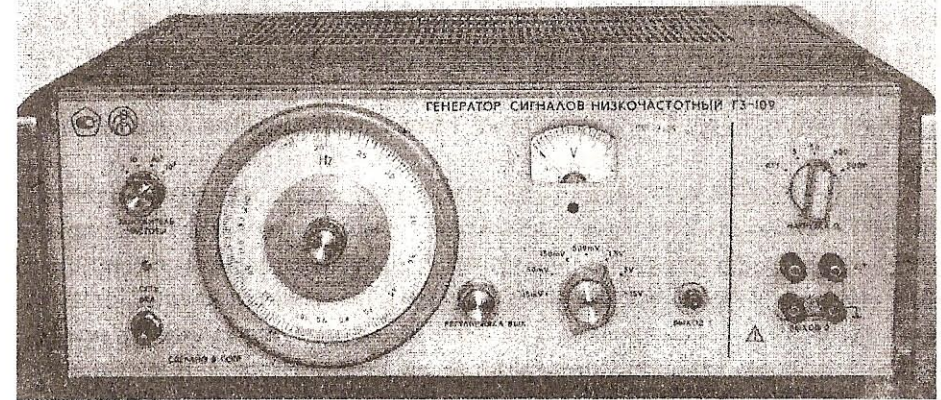


Рис. 402.3. Внешний вид генератора сигналов низкочастотного ГЗ-109

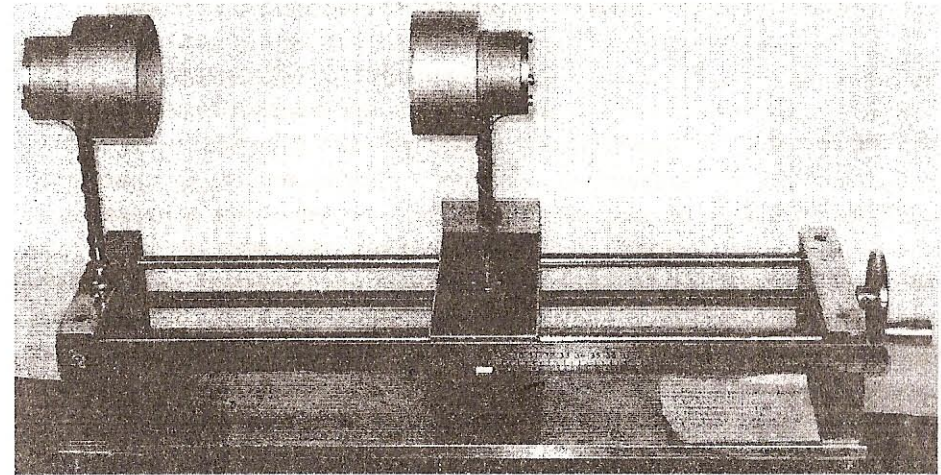


Рис. 402.4. Внешний вид лабораторного стенда

При использовании метода сложения взаимно перпендикулярных колебаний электрические колебания от генератора 1 одновременно по-

даются на пластины X осциллографа 4 и излучающий преобразователь 5. Это – одно из складываемых колебаний. Второе колебание подается на пластины Y осциллографа 4 от приемного преобразователя 6, который принимает звуковую волну, излученную преобразователем 5, и преобразует ее в электрический сигнал. Эти колебания различаются по фазе на $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi$ определяется из уравнения (402.3)) за счет прохождения звуковой волной расстояния между преобразователями Δl . Длину Δl можно измерить линейкой и изменять ее путем перемещения преобразователя 6.

Весь процесс измерения сводится к получению известных кривых (фигур Лиссажу) результирующего колебания (см. рис. 402.1) на экране осциллографа при перемещении преобразователя 6. Например, при одном положении преобразователя 6 на экране получается эллипс, одна из осей которого горизонтальна. Это $\Delta\varphi = \pi/2$. Далее перемещают преобразователь 6 до тех пор, пока эллипс не превратится в прямую, при этом $\Delta\varphi = 0$. Таким образом, за счет дополнительной разности хода звуковых волн изменилась разность фаз $\Delta\varphi$ складываемых колебаний. Подставляя полученные значения $\Delta\varphi$, Δl и частоту генератора ν в формулу (402.6), находят скорость распространения звука v в воздухе.

При использовании метода стоячей волны электрические колебания от генератора 1 подаются на излучающий преобразователь 5. Излученная преобразователем 5 звуковая волна, пройдя расстояние L , попадает на приемный преобразователь 6, частично отражается от него и накладывается на падающую, образуя стоячую волну. С приемного преобразователя 6 электрический сигнал поступает на вертикальные пластины Y осциллографа 4 (горизонтальная развертка осциллографа при этом отключена). Перемещая приемный преобразователь 6 с помощью винта, находят положение одного из минимумов (по минимальному размеру вертикальной линии на экране осциллографа) и записывают расстояние L_0 между преобразователями 5 и 6. Затем, перемещая далее преобразователь 6, записывают порядковый номер минимумов n и соответственно расстояния L_n . Полученные значения L_0, \dots, L_n , n и частоту генератора ν подставляют в формулу (402.15) и определяют скорость звука v в воздухе.

Для снижения влияния размеров преобразователей на результаты измерений необходимо, чтобы расстояние между преобразователями удовлетворяло условию $L > d^2/\lambda$ (d – диаметр преобразователя).

402.6. Порядок выполнения работы

402.6.1. Измерение скорости звука методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний

1. Собрать экспериментальную установку, приведенную на рис. 402.2, и ознакомиться с работой используемых в работе приборов.

2. Установить по линейке лабораторного стенда расстояние между ультразвуковыми преобразователями 250 мм (см. рис. 402.4).

3. Установить переключатель «15 mV ÷ 15 V» генератора в положение «1,5 V» (см. рис. 402.3).

4. Включить тумблер «СЕТЬ ВКЛ» генератора и дать генератору прогреться в течение 15 мин.

5. Установить уровень выходного напряжения генератора 1,5 В.

6. Установить частоту выходного напряжения генератора ν , равную резонансной частоте ультразвуковых преобразователей $\nu_{рез}$ и указанную на лабораторном стенде.

7. Исходные положения органов управления электронного осциллографа С1-55 (см. рис. 401.4):

– ручки «ЯРКОСТЬ I» – среднее;

– ручки «ЯРКОСТЬ II» – крайнее левое;

– большой ручки переключателя «ВОЛЬТ / ДЕЛ.» блока «УСИЛИТЕЛЬ YI» – положение «0,1»;

– малой ручки «УСИЛЕНИЕ» на оси переключателя «ВОЛЬТ / ДЕЛ.» блока «УСИЛИТЕЛЬ YI» – крайнее правое («КАЛИБР.»);

– переключателя «ВНЕШ., ВНУТР. I, ВНУТР. II, ВХОД X» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» – положение «ВХОД X»;

– переключателя «×1, ×0,2» блока «РАЗВЕРТКА» – положение «×0,2»;

– положения остальных органов управления осциллографа – произвольные.

8. Включить тумблер «ВКЛ. ПИТАНИЕ» осциллографа и дать прибору прогреться в течение 5 мин.

9. Получить с помощью ручек «ЯРКОСТЬ I», «ФОКУС I», «АСТИГ. I», ручки, обозначенной «↑» блока «УСИЛИТЕЛЬ YI» для перемещения луча по вертикали, и ручек, обозначенных «↔» с надписями «ПЛАВНО» и

«ГРУБО», для перемещения луча электронно-лучевой трубки по горизонтали, четкое изображение в центре экрана одной из фигур Лиссажу (прямой линии, эллипса или круга).

10. Отключить штеккер от гнезда «ВХОД 1:1» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ».

11. Плавно изменяя частоту генератора вблизи $\nu_{рез}$, получить максимальный размер вертикальной линии на экране осциллографа.

12. Подключить штеккер к гнезду «ВХОД 1:1» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ».

13. Принять одну из фигур Лиссажу (например, прямую линию, $\Delta\varphi = 0$) за исходную и измерить расстояние между преобразователями 5 и 6 по линейке лабораторного стенда. Затем, медленно перемещая преобразователь 6, пронаблюдать прямые линии, соответствующие разности фаз π , 2π , 4π , 6π , записать расстояния между преобразователями 5 и 6 и определить разности хода Δl .

14. Результаты измерений занести в табл. 402.1.

Таблица 402.1

Разность фаз $\Delta\varphi$, рад.	0	π	2π	4π	6π
Отсчет по линейке l_i , мм					
Разность хода Δl , мм	—				
Скорость звука ν , м/с	—	—			

402.6.2. Измерение скорости звука методом стоячей волны

1. Отключить штеккер от гнезда «ВХОД 1:1» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» осциллографа. Медленно перемещая преобразователь 6, проверить наличие максимумов и минимумов по изменению размера вертикальной линии на экране осциллографа.

2. Принять один из минимумов за начало отсчета. Перемещая преобразователь 6 с помощью винта, найти последующие 4 ÷ 5 четных минимумов и по линейке измерить соответствующие этим минимумам расстояния L_n между преобразователями. Измерения начинать от значения $L > 250$ мм.

3. Результаты измерений записать в табл. 402.2.

Таблица 402.2

Номер минимума n	0	2	4	6	8
Отсчет по линейке L_n , мм					
Разность хода $L_n - L_0$, мм	—				
Скорость звука ν , м/с	—				

402.7. Обработка результатов измерений и оценка погрешностей

1. Рассчитать скорость звука ν в воздухе по формуле (402.6), используя результаты измерений Δl и $\Delta\varphi$ из табл. 402.1.

2. Оценить погрешность измерения скорости, полагая $\Delta\nu = 0$. Результат записать в виде

$$\nu = \nu_0 \pm \Delta\nu.$$

3. Определить температуру T , соответствующую условиям данного эксперимента, по формуле (402.2), используя табличные значения R и μ , а также измеренное значение скорости звука ν в воздухе.

4. Оценить погрешность измерения температуры T . Результат представить в виде

$$T = T_0 \pm \Delta T.$$

5. Рассчитать скорость звука ν в воздухе по формуле (402.15), используя значения n , L_0 и L_n из табл. 402.2 и значение частоты ν генератора.

6. Оценить погрешность измерения скорости, считая погрешности ΔL_0 и ΔL_n одинаковыми, а $\Delta\nu = 0$.

7. Сравнить полученные в п. 1 и п. 5 результаты и сделать соответствующие выводы.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит скорость звука в воздухе?
2. В чем состоит сущность измерения скорости звука по методу сложения взаимно перпендикулярных колебаний?
3. При каких фазовых соотношениях между исходными колебаниями на экране осциллографа наблюдаются прямая линия, круг или эллипс?

4. Выведите уравнение (402.10), описывающее результирующее колебание.

5. Объясните, почему при перемещении преобразователя б происходит изменение формы кривой результирующего колебания, наблюдаемого на экране осциллографа.

6. Объясните, что представляют собой фигуры Лиссажу.

7. В чем состоит сущность измерения скорости звука в воздухе по методу стоячей волны?

8. От каких параметров зависит положение максимумов и минимумов (узлов и пучностей) в стоячей волне?

9. Напишите уравнение стоячей волны и дайте ее определение.

10. Получите формулы для нахождения погрешностей измерений.

11. Выведите уравнение стоячей волны (402.12).

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1986. – Т.1. – 432 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1988. – Т.2. – 496 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.

Содержание

401. Исследование затухающих колебаний.....	3
402. Определение скорости звука в воздухе.....	12
Библиографический список.....	25

Сластен Михаил Иванович
Третьякова Алина Васильевна

РУКОВОДСТВО
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
ПО РАЗДЕЛУ
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Ответственный за выпуск Сластен М.И.
Редактор Белова Л.Ф.
Корректор Селезнева Н.И.

ЛР № 020565 от 23.06.97 г.

Формат 60×84¹/₁₆

Офсетная печать Усл. п. л. – 1,75

Заказ № 91.

Подписано к печати 17.03.2006 г.

Бумага офсетная

Уч.-изд. л. – 1,6

Тир. 500 экз.

«С»

Издательство Таганрогского государственного
радиотехнического университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Таганрогского государственного
радиотехнического университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1