

Лабораторная работа 1.4.5

Изучение колебаний струны (дополнительное описание)

Цель работы: изучение поперечных стоячих волн в струне: определение собственных частот колебания струны в зависимости от натяжения струны и определение скорости распространения поперечных волн в струне.

В работе используются: звуковой генератор, двухканальный осциллограф, частотомер, набор грузов, станина, с закрепленной на ней струной.

Теоретическое введение

Ограниченная, закрепленная на концах струна, может совершать собственные колебания, представляющие собой стоячие волны вида

$$y(x, t) = A \sin(2\pi f \cdot t) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right),$$

где A — амплитуда колебаний в пучностях, f — частота, λ — длина волны, x — координата вдоль струны. В конечных точках должны располагаться узлы стоячей волны (амплитуда колебаний равна нулю), откуда следует, что на струне длиной L должно укладываться целое число полу-волн:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Скорость распространения поперечных волн u зависит от силы натяжения струны F и массы струны на единицу длины ρ_ℓ (погонной плотности струны $\rho_\ell = \rho S$):

$$u = \sqrt{\frac{F}{\rho_\ell}} \tag{1}$$

Возможные частоты собственных колебаний струны (обертоны):

$$f_n = \frac{u}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\rho_\ell}}. \tag{2}$$

Если частота внешней поперечной синусоидальной силы совпадает с какой либо собственной частотой колебания струны, то возникает явление резонанса и образуется синусоидальная стоячая волна.

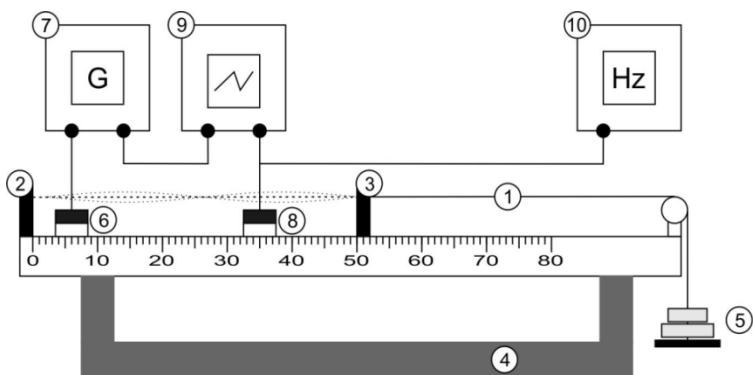
В предлагаемой работе возможно наблюдать стоячие волны в струне как визуально, так и на экране осциллографа; исследовать форму стоячей волны в зависимости от силы возбуждения колебаний; измерять частоты

собственных колебания струны (вплоть до 15 гармоник) при различных натяжениях струны.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Схема установки показана на рисунке. Металлическая гитарная струна (1) закреплена в горизонтальном положении между двумя стойками (2) и (3), расположенными на массивной станине (4). Натяжение в струне создают грузы (5), подвешенные к концу струны, перекинутому через блок.

Возбуждение и регистрация колебаний струны осуществляются с помощью электромагнитных катушек (датчиков), расположенных на станине под струной. На датчик (6), возбуждающий колебания струны в вертикальной плоскости, подаётся переменный синусоидальный сигнал от звукового генератора (7). Колеблущаяся струна возбуждает сигнал в регистрирующей катушке (8), который можно наблюдать на экране двухканального осциллографа (9). Датчики можно перемещать по станине. Разъёмы, соединяющие датчики с генератором и осциллографом, расположены на корпусе станины. Датчики следует повернуть так, чтобы магниты катушек были расположены перпендикулярно струне. Возбуждающий датчик следует расположить вблизи неподвижного конца струны, а регистрирующий — в максимуме отклонения струны от положения равновесия (пучности).



- | | | |
|------------|-----------------------|-------------------------|
| ① Струна | ⑤ Груз | ⑧ Регистрирующий датчик |
| ② ③ Стойки | ⑥ Возбуждающий датчик | ⑨ Осциллограф |
| ④ Станина | ⑦ Генератор | ⑩ Частотомер |

Подготовка приборов к выполнению эксперимента

1. Для регистрации колебаний струны в работе используется осциллограф GOS-620. **Перед включением осциллографа в сеть необходимо ознакомиться с назначением ручек управления осциллографа** (см. Приложение).

2. Перед включением осциллографа в сеть убедитесь, что органы управления осциллографа установлены следующим образом:

А). Блок горизонтальной развертки (HORIZONTAL):

Ручка **POSITION** — в среднем положении.

Кнопка **×10 MAG** — отжата.

Ручка **SWP.VAR** — в крайнем правом положении (риска CAL).

Ручка **TIME/DIV** — 2 ms.

Б). Блок вертикального отклонения (VERTICAL):

Ручки **POSITION** — в среднем положении.

Внешние ручки **VOLTS/DIV** обоих каналов в положении 5 V/дел, а внутренние — утоплены.

Тумблеры **AC-GND-DC** обоих каналов — в положении **GND** (отключены).

Кнопки **ALT/CHOP** и **INV CH 2** — отжаты.

Вход канала 1 **CH 1(X)** соединен с выходом опорного сигнала генератора.

Вход канала 2 **CH 2(Y)** соединен с регистрирующим датчиком.

Переключатель **MODE** — в положении **DUAL**.

В). Блок синхронизации (TRIGGER):

TRIG.ALT — отжата.

LEVEL — в среднем положении.

Переключатель **MODE** — в положении **AUTO**.

SOURCE — в положении **LINE**.

SLOPE — отжата.

Выполнение эксперимента

Включите осциллограф в сеть. Поставьте ручку развертки **TIME/DIV** в положение **X/Y**. На экране появится точка. Отрегулируйте яркость и четкость изображения точки ручками **INTEN** и **FOCUS**. Ручками **POSITION** расположите точку в центре экрана осциллографа. Верните ручку **TIME/DIV** в положение 2 ms развертки сигнала.

Внимание! Нельзя долго держать светящуюся точку на экране во избежание прогорания экрана.

Включите в сеть генератор и частотомер. Подайте на вход **CH 1** осциллографа сигнал с генератора (режим «синус» выходного сигнала), частотой ~135 Гц. Точное значение частоты определяется по частотомеру. Включите режим **AC** канала **CH 1** осциллографа и убедитесь, что уровень опорного

сигнала достаточен (амплитуда размаха синусоиды 2-3 клетки). В дальнейшем усиление канала **CH 1** не меняем!

Освободите зажим струны на стойке 3, установить длину струны $L = 50$ см. Нагрузите струну, поставив груз (≈ 1 кг) на платформу. Осторожно зажмите струну в стойке, не деформируя струну. Возбуждающий датчик 6 должен располагаться рядом с неподвижной стойкой, а регистрирующий датчик 8 — в центре под струной. Магнетики датчиков должны быть расположены строго перпендикулярно струне (для обеспечения колебаний в вертикальной плоскости).

Для возбуждения колебаний струны синусоидальный сигнал с основного выхода генератора подается на возбуждающий датчик 6. Исследуемый сигнал колебаний струны с регистрирующего датчика 8 подается на вход канал **CH 2** осциллографа. Поставьте тумблер режима работы канала **CH 2** в положение **AC**, а ручку усиление (**VOLTS/DIV**) переключите на деление 10 мВ.

Очень медленно вращая ручку частоты звукового генератора, добейтесь установления устойчивой картинкой стоячей волны, наблюдая за колебаниями струны визуально и на экране осциллографа. Если струна при колебаниях касается датчика, следует уменьшить уровень возбуждения, ослабляя выходной сигнал генератора.

При длине струны 50 см и суммарной массе груза 1 кг (с учетом массы подвески и платформы) частота первой гармоники (одна пучность) должна быть приблизительно равна 131 Гц (уточните расчёт по данным, указанными на установке).

При чрезмерном возбуждении форма струны может искажаться. Контролировать «синусоидальность» формы колеблющейся струны и возникающие искажения, связанные с нелинейными эффектами, можно на экране осциллографа двумя способами: в режиме временной развертки измеряемого сигнала и в режиме сложения сигналов **X–Y** по форме эллипса.

При работе осциллографа в режиме **X–Y** происходит сложение двух взаимно перпендикулярных сигналов — опорного от генератора **CH 1** (ось **X**) и сигнала от регистрирующего датчика **CH 2** (ось **Y**). При нормальной (синусоидальной) форме струны на экране будет прорисовываться эллипс правильной формы. При искажениях, связанных с нелинейными эффектами, — искаженный эллипс. Для установления линейного режима возбуждения струны следует уменьшать уровень возбуждения (ослабляя уровень выходного сигнала генератора, подаваемого на датчик 6) и подстраивать частоту на генераторе до получения эллипса правильной формы. Частота, при которой на экране установится эллипс правильной формы, и будет частотой стоячей волны.

ЗАДАНИЕ

Целью работы является исследование зависимости скорости u распространения поперечной волны в струне в зависимости от силы натяжения струны F .

1. Проведите измерение частот 5 *нечетных* ($n = 1, 3, 5, 7, 9$) гармоник стоячих волн при длине струны 50 см и массе грузов ~ 1 кг, *зафиксировав регистрирующий датчик в центре*. Затем, осторожно смещая датчик 8 по станине, определите положение *четных* ($n = 2, 4, \dots$) гармоник и измерьте их частоты.

2. Постройте график зависимости частоты f от номера n гармоники $y = f(n)$. Определите по графику скорость волны, бегущей по струне.

3. Проведите опыт для 5 грузов, каждый раз изменяя натяжение струны. При изменении нагрузки *следует ослабить зажим струны в стойке (3)*, положить груз на чашку и вновь осторожно зажать струну (максимальная нагрузка не выше 2,5 кг).

4. Для каждого значения натяжения струны постройте график зависимости частоты резонансов от номера резонанса. Из графика определите значения скоростей u для всех значений F . Оцените погрешности измерения скоростей.

5. Постройте график зависимости квадрата скорости u^2 от силы натяжения F . Определить по графику погонную плотность струны и оцените погрешность результата. Сравните полученное значение ρ_ℓ со значением погонной плотности струны, указанной на установке.

17.10.2014

ПРИЛОЖЕНИЕ

Назначение органов управления осциллографа GOS 620.

1. Экран осциллографа показан на рисунке 1.

POWER (выключатель сетевого питания) — при включении выключателя загорается индикатор под кнопкой «POWER».

INTEN (яркость) — регулирует яркость изображения.

FOCUS (фокус) — регулировка фокуса изображения.

TRACE ROTATION (поворот) — регулировка угла наклона линии развертки изображения относительно линий шкалы экрана.



Рис.1.Экран осциллографа GOS-620.

2. Органы управления развёрткой расположены в блоке «HORIZONTAL» передней панели осциллографа (рис.2).

TIME/DIV — устанавливает коэффициент развёртки от 0,2 μ с/дел (микросекунд на деление) до 0,5 с/дел (секунд на деление) 20 ступенями. При переводе в положение **X-Y** (крайнее левое) обеспечивается наблюдение фигур Лиссажу.

SWP.VAR (развертка плавно) — обеспечивает плавную регулировку коэффициента развёртки с перекрытием 2,5 раза в каждом положении переключателя время/дел. **Обратите внимание!** При измерении промежутков времени по расстоянию на экране осциллографа эта ручка должна находиться в *крайнем правом положении (риска CAL)*.

POSITION (положение) — перемещает изображение по горизонтали.

×10 MAG (увеличение в 10 раз) — при нажатой кнопке скорость развёртки увеличивается в 10 раз.



Рис.2. Расположение ручек управления на передней панели осциллографа.

3. Органы управления тракта вертикального отклонения (VERTICAL):

CH 1(X) (канал 1) — вход канала 1. В режиме X–Y — входной канал X-оси.

CH 2(Y) (канал 2) — вход канала 2. В режиме X–Y — входной канал Y-оси.

AC–DC–GND — переключатели режима входов усилителя.

DC: открытый вход (на вход усилителя пропускается весь сигнал, включая постоянную составляющую);

AC: закрытый вход (на вход пропускается только переменная составляющая сигнала, то есть последовательно с источником сигнала и осциллографом включается конденсатор емкостью ~ 1 мкФ).

GND: вход усилителя отключается от источника сигнала и заземляется.

POSITION (положение) — регулировка положения лучей обоих каналов по вертикали.

ALT/CHOP — при нажатии на кнопку коммутатор принудительно переключается в режим «попеременный». Происходит одновременная прорисовка обоих каналов — эффект двухлучевого осциллографа. Когда кнопка отжата в двухканальном режиме, режим работы коммутатора выбирается автоматически, исходя из положения ручки время/дел.

INV CH 2 (инвертирование в канале 2) — инвертирование сигнала в канале 2.

VOLTS/DIV (вольт/дел) — дискретные переключатели, устанавливающие коэффициенты отклонения каналов от 5 мВ/дел до 5 В/дел в 10 диапазонах. В середине — ручка плавного изменения коэффициентов отклонения каналов с перекрытием не менее, чем в 2,5 раза в каждом положении переключателей В/дел. Когда ручка вытянута (режим $\times 5$), происходит увеличение размера изображения (чувствительности усилителя) в 5 раз. *Для измерения амплитуд ручка плавной регулировки должна находиться в крайнем левом положении (до щелчка).*

Переключателями **VERTICAL-MODE** устанавливается режим работы для наблюдения двух сигналов одновременно или по очереди:

CH 1: на экране наблюдается сигнал канала 1.

CH 2: на экране наблюдается сигнал канала 2.

DUAL: на экране наблюдаются изображения сигналов обоих каналов.

ADD: На экране наблюдается алгебраическая сумма или разность (при нажатии кнопки **CH 2 INV**) сигналов каналов 1 и 2.

4. Органы управления синхронизации (TRIGGER).

TRIG.ALT — при нажатии развертка поочередно синхронизируется сигналом с 1-го и 2-го каналов. В результате на экране осциллографа появляется устойчивая картина 1-го и 2-го каналов.

TRIGGER MODE — выбор режима работы запуска развертки:

AUTO: автоматический режим запуска развертки; используется, если нет сигнала синхронизации, или его частота меньше 25 Гц;

NORM: ждущий режим: развертка запускается только при наличии входного сигнала;

TV-V: синхронизация по вертикали (по кадрам, в работе не используется);

TV-H: синхронизация по горизонтали (по строкам, в работе не используется).

SOURCE (источник) — выбирает режим внутренней и (или) внешней синхронизации:

CH 1 (канал 1) (X-Y): развертка синхронизируется сигналом с первого канала.

CH 2 (канал 2): развертка синхронизируется сигналом со второго канала.

LINE (сеть): развертка синхронизируется от питающей сети переменного напряжения.

EXT (внешний): развертка синхронизируется внешним сигналом.

LEVEL (уровень) — выбирает уровень исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развертки.

SLOPE (полярность) — переключатель полярности синхронизирующего сигнала:

“+”: развертки синхронизируются положительным перепадом исследуемого сигнала;

“-”: развертки синхронизируются отрицательным перепадом исследуемого сигнала.