

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского
(Национальный исследовательский университет)

Продольные ультразвуковые волны в проволоке

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
03.03.03 «Радиофизика», 10.05.02 «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем», 02.03.02 «Фундаментальная информатика и
информационные технологии» и 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы»

Нижний Новгород
2014

Продольные ультразвуковые волны в проволоке. Составитель: Е.А. Машкович. Практикум. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. - 10 с.

Редактор: доктор физ.-мат. наук, профессор **М.И. Бакунов**

Рецензент: кандидат физ.-мат. наук, доцент **В.А. Яшнов**

В лабораторной работе исследуется кинематика упругих волн в никелевой проволоке.

Практикум предназначен для студентов 2-го курса радиофизического факультета, выполняющих работы в лабораториях общего практикума кафедры общей физики.

Ответственный за выпуск:
зам. председателя методической комиссии факультета
д.ф.-м.н., профессор Е.З. Грибова

В работе исследуется кинематика непрерывных и импульсных волн на примере упругих продольных волн в никелевой проволоке. Рассматривается магнитострикционный метод возбуждения и приёма волн. Определяется длина и скорость распространения волн. Изучается затухание волн при распространении и отражении волн в местах закрепления проволоки.

Введение

Рассмотрим стержень представленный на рис. 1 и выберем ось x параллельно длине стержня. Предположим, что стержень не изгибается. Назовём $\xi(x, t) = x' - x$ смещением сечения x , $\Delta\xi = \xi(x + \Delta x, t) - \xi(x, t)$ абсолютной деформацией участка стержня длины Δx и

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta\xi}{\Delta x} = \frac{\partial\xi}{\partial x} = \varepsilon$$

относительной деформацией. Функция $\xi(x, t)$ зависит не только от координаты x , но и времени t , поэтому используем знак частной производной.

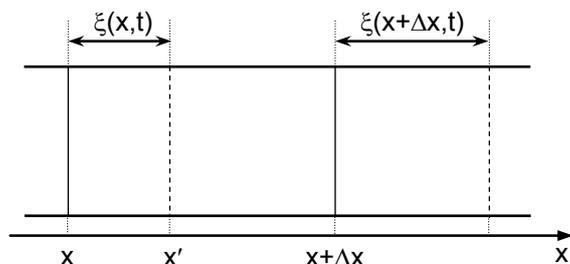


Рис. 1: Смещение и деформация

Обозначим за σ величину напряжения - силу взаимодействия частей стержня в сечении x приложенную на единицу площади. В области малых относительных деформаций ($\varepsilon \ll 1$) напряжение можно считать пропорциональным деформации. Данное утверждение было экспериментально установлено Р. Гуком в 1660 году ($\sigma = E\varepsilon$ закон Гука). Применив второй закон Ньютона к участку стержня, получим волновое уравнение распространения продольных упругих волн в проволоке в отсутствии поглощения:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где E - модуль Юнга и ρ - плотность материала в отсутствии деформации. Общее решение этого уравнения представляет собой суперпозицию волн бегущих в положительном и отрицательном направлениях вдоль оси x

$$\xi = f_1(x + ut) + f_2(x - ut),$$

где $u = \sqrt{E/\rho}$ - скорость распространения волн, f_1 и f_2 - произвольные функции. Вид функций зависит от способа возбуждения волн и от граничных условий.

Синусоидальные упругие волны

Важным частным случаем волны, удовлетворяющей уравнению (1) является бегущая плоская синусоидальная волна

$$\xi = A \cos(\omega t \pm kx), \quad (2)$$

где знак «-» соответствует волне бегущей в положительном направлении а знак «+» волне бегущей в отрицательном направлении, A - амплитуда волны, ω - циклическая частота и k - волновое число. Связь между ω и k (дисперсионное уравнение) получим подставляя любое из двух решений (2) в уравнение (1): $\omega = uk$. Связь частоты волны с волновым числом линейная, что говорит об отсутствии дисперсии (скорость u не зависит от частоты волны ω).

Суперпозиция бегущих волн отвечает за образование стоячей волны

$$\xi = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx) = 2A \cos(kx) \cos(\omega t). \quad (3)$$

Величина ξ совершает гармонические колебания с частотой ω и амплитудой $|2A \cos(kx)|$. Точки, где амплитуда колебаний равна нулю в любой момент времени, называются узлами стоячей волны. Точки, где амплитуда колебаний максимальна, называются пучностями стоячей волны. Расстояние между соседними пучностями, как и расстояние между соседними узлами, равно половине длины волны. Пучности и узлы сдвинуты относительно друг друга на четверть длины волны.

Заметим, что множитель $\cos(kx)$ меняет знак при переходе через нулевое значение, что соответствует изменению фазы колебаний на π . В соответствии с этим фаза колебаний по разные стороны от узла отличаются на π . Точки, заключённые между двумя соседними узлами, колеблются синфазно.

На практике образованию чисто бегущей или стоячей волны препятствует затухание волны при распространении и не полное отражение в местах закрепления проволоки. В результате образуется суперпозиция волн (излучённой и отражённых) с разными амплитудами. Рассмотрим поэтому более общий случай суперпозиции двух бегущих волн одинаковой частоты, когда их амплитуды равны $A_2 = A$ и $A_1 = A + a$. Легко видеть, что решение есть суперпозиция стоячей волны, описываемой уравнением (3), и бегущей волны $a \cos(\omega t - kx)$. Отношение наибольшего значения амплитуды к наименьшему

$$\frac{A_{max}}{A_{min}} = \frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2}$$

называется коэффициентом стоячей волны (КСВ). Очевидно, что в стоячей волне КСВ равен бесконечности, а в чисто бегущей - единице. Величина обратная коэффициенту стоячей волны называется коэффициентом бегущей волны.

При распространении волны в достаточно длинной проволоке заметно затухание. Затухающая волна описывается функцией

$$\xi = A \exp(-\alpha x) \cos(\omega t - kx),$$

где α - коэффициент поглощения, который характеризует превращение энергии упругой волны в тепловую. Поглощение вызывается вязкостью (внутренним трением) и теплообменом.

Метод возбуждения и приёма упругих волн

Под действием магнитного поля происходит деформация некоторых веществ. Это явление было открыто Джоулем в 1842 году и получило название магнитострикции. В одних материалах, например железе, поле вызывает удлинение (положительная магнитострикция), в других, например никеле, - укорочение (отрицательная магнитострикция). Величина и знак деформации не зависят от направления магнитного поля. Относительная деформация образца ε в полях намагничивающих до насыщения ($H \approx 10^5$ А/м) обычно имеет порядок $10^{-5} \div 10^{-6}$. На рис. 2 изображена зависимость относительной деформации ε от напряжённости магнитного поля H для никеля(Ni) и железа(Fe).

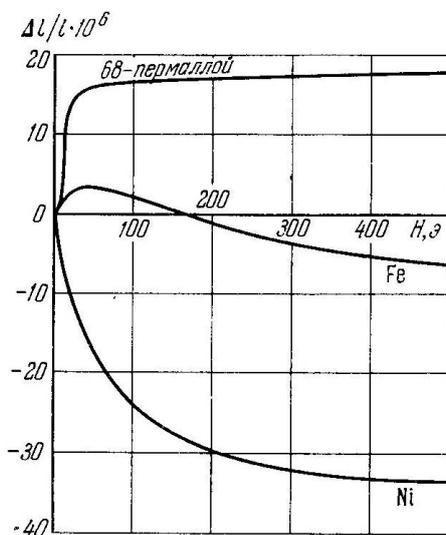


Рис. 2: Относительная деформация никеля(Ni) и железа(Fe) от напряжённости магнитного поля

Для возбуждения упругих волн в проволоке в ней создаётся переменное магнитное поле, которое меняется по гармоническому закону. Представим напряжённость магнитного поля в виде

$$H = H_0 + H_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_H} t\right),$$

где H_0 - постоянная составляющая, H_m - амплитуда колебаний и T_H - период колебаний напряжённости. Из рис. 3 видно, что оптимальные условия (максимальная амплитуда колебаний деформации ε_m при минимальной амплитуде колебания магнитного поля H_m) возбуждения волн можно получить соответствующим выбором величины постоянного подмагничивания $H_0 \neq 0$.

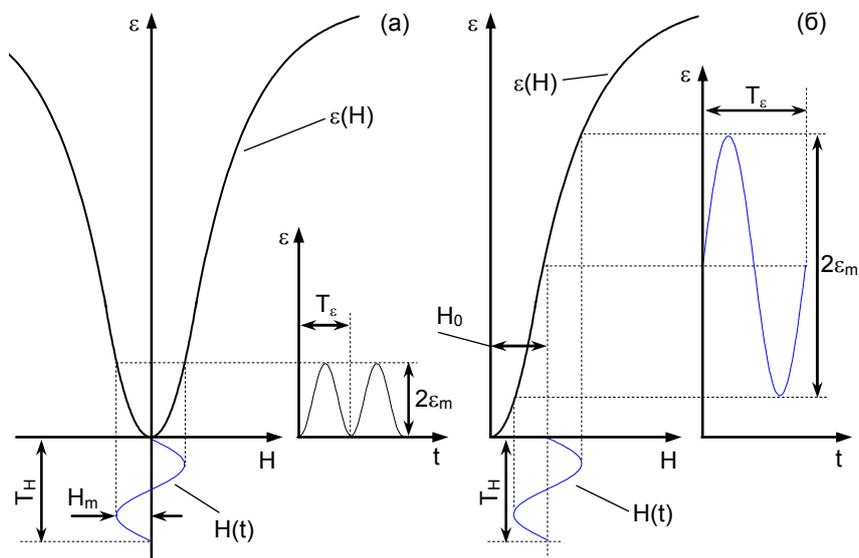


Рис. 3: Метод возбуждения и приёма упругих волн

Существует и обратный магнитострикционный эффект: возникновение намагниченности при деформациях. Этот эффект используется для приёма ультразвуковых волн.

Описание установки

На рис. 4 изображена блок-схема экспериментальной установки. Установка состоит из передатчика, натянутой никелевой проволоки, передающей и приёмной катушек, приёмника и осциллографа. Передатчик и приёмник собраны в одном корпусе.

Разберём основные элементы передатчика и их предназначение. Генератор высокой частоты (ГВЧ) предназначен для генерации непрерывного синусоидального напряжения на частоте около 500 кГц (рис. 4а). Генератор импульсов выдаёт прямоугольные видеоимпульсы с периодом T большим времени пробега импульсов упругих колебаний вдоль проволоки и значительно большим времени длительности импульса τ (рис. 4б). При этом скважность, определяемая как T/τ , оказывается достаточно большой. Модулятор пропускает напряжение от ГВЧ только в моменты прихода прямоугольных импульсов от генератора импульсов. Таким образом, формируются радиоимпульсы, т.е. импульсы длительностью τ с синусоидальным заполнением, частота которых определяется частотой ГВЧ (рис. 4в). Усилитель усиливает подводимое

напряжение до величины, необходимой для нормальной работы передающей катушки.

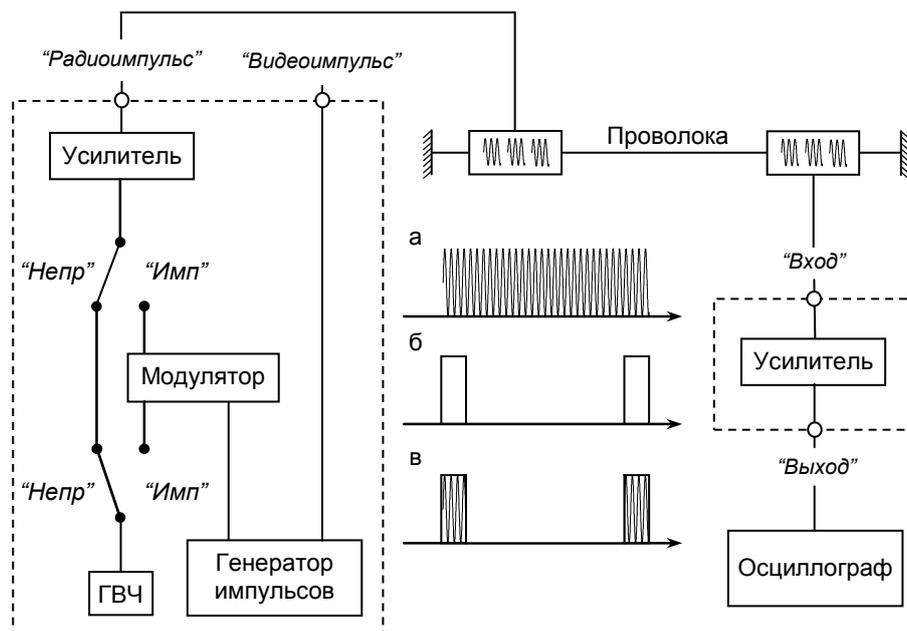


Рис. 4: Схема установки. (а) - сигнал с ГВЧ, (б) - сигнал с генератора импульсов и (в) - сигнал с модулятора

В зависимости от положения переключателя «Непр/Имп» передатчик работает в двух режимах: непрерывном режиме, когда напряжение от ГВЧ подаётся непосредственно на выходной усилитель и импульсном режиме, когда напряжения от ГВЧ и генератора импульсов подаются на модулятор и уже с него на выходной усилитель. Выходное напряжение снимается с разъёма «Радиоимпульс» (для удобства этот разъём запараллелен). С разъёма «Видеоимпульс» снимается напряжение от генератора импульсов.

Постоянное магнитное поле H_0 в передающей и приёмной катушке создаётся с помощью постоянных магнитов. Обе катушки намотаны несколькими секциями, по 2 мм каждая. В месте расположения отдельных секций передающей катушки при подаче на неё переменного напряжения от разъёма «Радиоимпульс» возникают упругие колебания. В приёмной катушке переменное магнитное поле, возникающее из-за обратного магнитострикционного эффекта, создаёт ЭДС индукции. Напряжение с приёмной катушки поступает на разъём «Вход» приёмника.

Приёмник представляет собой усилитель с полосой пропускания, достаточной для неискажённого усиления принимаемых сигналов. С разъёма «Выход» приёмника сигнал поступает на осциллограф.

Задание

Импульсный режим

Установить переключатель в положение «Имп».

1. Получить осциллограммы напряжений с разъемов «Радиоимпульс» и «Видеоимпульс» передатчика. Определить длительность импульса τ и скважность T/τ . Проверить, что длительность радиоимпульса равна длительности видеоимпульса.
2. Получить осциллограмму напряжения, снимаемого с приёмной катушки. Для этого подключить разъем «Радиоимпульс» передатчика к передающей катушке, разъем «Вход» приёмника к приёмной катушке и разъем «Выход» приёмника к вертикально отклоняющим пластинам осциллографа.
Выделить среди наблюдаемых импульсов тот, который создаётся волной, пришедшей в приёмную катушку без отражения от концов проволоки, и те импульсы, которые отразились от левого и правого концов однократно и двукратно. Для этого рекомендуется посмотреть, как влияет на импульсы зажим проволоки рукой в разных местах, и как смещаются импульсы на осциллограмме при перемещении приёмной катушки.
3. Определить скорость распространения упругой волны. Для этого выбрать несколько разных путей, по которым распространяются импульсы при фиксированных положениях катушек. Измерить длины этих путей. Время распространения определить по осциллограмме с учётом цены деления.
4. Переместить приёмную катушку на определённое расстояние и, измерив величину происшедшего при этом смещения импульсов на осциллограмме, вычислить снова скорость распространения волны. Сравнить с предыдущим результатом измерения и оценить точность обоих измерений.

Непрерывный режим

Установить переключатель в положение «Непр».

1. Получить осциллограммы напряжения с ГВЧ. Определить период и частоту колебаний.
2. Изучить зависимость величины сигнала в приёмной катушке от её положения на проволоке. По расстоянию между максимумами и минимумами определить длину волны. Зная частоту и длину волны, вычислить скорость её распространения.

3. Определить коэффициент стоячей волны (КСВ), т.е. отношение амплитуды в максимуме к амплитуде в минимуме. Выяснить, зависит ли КСВ от положения приёмной и передающей катушек и влияет ли на КСВ зажим проволоки рукой в разных местах.
4. Изучить зависимость фазы принимаемого сигнала от положения приёмной катушки. За изменением фазы можно следить по эллипсу, полученному на экране осциллографа, когда на вертикально отклоняющие пластины подаётся усиленное напряжение с приёмной катушки (снимаемое с разъёма «Выход»), а на горизонтально отклоняющие пластины напряжение с передающей катушки (снимаемое с разъёма «Радиоимпульс»). По результатам наблюдений определить длину волны.

Вопросы

1. Вывести волновое уравнение распространения упругих волн в проволоке - формулу (1).
2. Пояснить назначение каждого элемента на блок-схеме рис. 4.
3. Почему режим непрерывной развёртки непригоден при исследовании импульсных процессов с большой скважностью?
4. Какая зависимость фазы от расстояния в стоячей и бегущей волнах?
5. Какая скорость, фазовая или групповая определяется в каждом задании?
6. Какое оптимальное расстояние между соседними секциями в приёмной и передающей катушках?
7. Чем определяется выбор периода следования импульсов T ? Оценить в каких пределах можно изменять T в данной установке.
8. Чем определяется величина постоянного подмагничивания при оптимальных условиях возбуждения волн?

Литература

1. Горелик. Г.С. Колебания и волны. М.: ГИФМЛ, 1959. С. 157-159, 182-189, 198-199.
2. Вонсовский С.В. Магнетизм М.: Наука, 1971. С. 918-925.

-

**Продольные ультразвуковые волны
в проволоке**

Составитель:
Евгений Александрович **Машкович**

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского".
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.