

*Роман ГРИНЬОВ, Олег САЄНКО*

# КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З ФІЗИКИ

Полтава  
ТОВ «АСМІ»  
2023

**УДК 53:004.77-047.42(072)**

**Г85**

*Затверджено та рекомендовано до друку вченою радою Полтавського  
національного педагогічного університету імені В. Г. Короленка.*

*Протокол №11 від 27 квітня 2023 року*

**Рецензенти:**

Сорокін О. В., доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Хорольський О. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної фізики і математики Полтавського національного педагогічного університету імені В. Г. Короленка

**Гриньов Р. С., Саєнко О. В.**

**Г85** Комп'ютеризовані експерименти з фізики : посібник. /  
Р. С. Гриньов, О. В. Саєнко. – Полтава : ТОВ «АСМІ», 2023. – 90 с.  
ISBN 978-966-182-717-1

Використання персональних комп'ютерів (ПК) як вимірювальних комплексів відповідає сучасним технічним і науковим запитам. Основними перевагами такого підходу є швидкість виконання завдання, зручність користування, а також виключення впливу людського фактору на одержаний результат. Для роботи ПК у цій ролі необхідні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП), які дозволяють працювати з аналоговими сигналами. У посібнику показано як у ролі АЦП і ЦАП використовувати звукову карту комп'ютера для експериментування з фізики. Наведені приклади такого використання для проведення фізичних демонстрацій та виконання навчальних і навчально-дослідницьких експериментів у закладах освіти.

Посібник може бути корисним, вчителям та керівникам гуртків, учням, студентам та широкому колу дослідників-аматорів.

**УДК 53:004.77-047.42(072)**

**ISBN 978-966-182-717-1**

© Гриньов Р. С., Саєнко О.В., 2023  
© ПНПУ імені В.Г. Короленка, 2023  
© ТОВ «АСМІ», 2023

## ПЕРЕДМОВА

Використання ПК в якості вимірювального комплексу є реалією сучасних методів проведення досліджень чи не в усіх областях людської діяльності. Перевагами цього способу проведення експериментальних досліджень в першу чергу є швидкість їх виконання, оскільки автоматизований спосіб збору інформації з наступною чи навіть одночасною її обробкою та аналізом на тому ж ПК потребує значно менше часу ніж їх класичне проведення, з фіксацією даних у лабораторних журналах. Важливим аргументом є також простота та зручність користування, адже на дисплеї ПК, зручнішому за екрани вимірювальних приладів, можна одночасно відслідковувати роботу та фіксувати покази, якщо не усіх вимірювальних пристроїв устаткування то, принаймні, переважної їх більшості, перебуваючи при цьому в комфортних умовах. Крім цього, автоматизований спосіб збору інформації значно зменшує або навіть виключає потрапляння промахів у масив вимірюваних даних, оскільки виключає людський фактор.

Для забезпечення роботи ПК у якості вимірювального комплексу необхідно за допомогою інтерфейсу передати в комп'ютер величину, що вимірюється. Відомо, інформація у цифровій техніці кодується у двійковій системі, де існує лише два дискретні значення напруги – високий та низький рівні. Для того, щоб можна було працювати з аналоговими сигналами, які є неперервними у часі, необхідно використати пристрій, який зміг би перетворити аналоговий сигнал у цифровий і навпаки. Такі пристрої називаються аналого-цифровими перетворювачами, для перетворення аналогового сигналу в цифровий і цифро-аналоговими перетворювачами для зворотного перетворення. Розроблено багато апаратних пристроїв, які підключаються до портів вводу-виводу комп'ютера і реалізують необхідні функції. До таких приладів можна віднести осцилографи, частотоміри, аналізатори спектру та різноманітні системи збору інформації. Для роботи з даним устаткуванням створено відповідне програмне забезпечення. Але, необхідно врахувати, що професійне обладнання має високу ціну. Навіть призначені для школи вимірювальні комплекси типу «Nova5000», Einstein™ «Фізика» та інші, є досить дороговартісним обладнанням і його використання при виконанні аматорських домашніх, а інколи і навчальних досліджень навряд чи доцільне.

У той же час для шкільного експерименту, а також при виконанні учнями досліджень при написанні навчально-дослідницьких робіт по лінії МАН, при заняттях у гуртках любителів радіотехніки для участі у різноманітних конкурсах або задоволення власної цікавості, такі високі

параметри вимірювальних приладів не є необхідними, що дозволяє обійтися без професійного обладнання і передбачає використання базової комплектації ПК.

Прикладом такого застосування може бути використання звукової плати, яка являє собою АЦП та ЦАП з частотою дискретизації 44,1 кГц з розрядністю не менше 16 біт. На виході АЦП отримується сигнал з амплітудою до 1,5 В. Всі сучасні звукові плати можуть працювати у дуплексному режимі, що забезпечує можливість одночасного перетворення різних сигналів з цифрової форми у аналогову і навпаки. Також слід зазначити, що звукові карти мають по два канали на виході та вході, що дозволяє одночасно генерувати та приймати два різних сигнали. Для обробки сигналів, що надходять у ПК створено велику кількість програм. Більшість із цих програм було створено ентузіастами для своїх потреб, тому розповсюджуються вони безкоштовно і не вимагають ліцензії на використання. Найбільш раціональною, на наш погляд, видається заміна комп'ютерною технікою електронних приладів, а саме осцилографа та генератора звукової частоти.

Звукова карта дозволяє генерувати сигнал у звуковому діапазоні частот від 1 до 20 кГц який може мати довільну форму. Слід пам'ятати, що вихід звукової карти не розрахований на значні навантаження, а тому, за необхідності отримати сигнали великої амплітуди, бажано використати підсилювач звукової частоти.

Лінійний вхід звукової карти розрахований на амплітуду вхідного сигналу до 1,5 В та частоту до 20 кГц. Зазначимо також, що на вході звукової карти стоять розділювальні конденсатори, які не пропускають постійну складову сигналу, що треба враховувати при постановці дослідів.

Серед програм що емулюють генератори звукової частоти можна виділити SweepGen, Signal Generator, ці програми дозволяють генерувати сигнал синусоїдальної та інших форм, а також шум, змінювати частоту сигналу з точністю 1 Гц, а також регулювати амплітуду сигналу. Більшість програм має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, деякі відтворюють зовнішній вигляд приладів.

Програми емулятори осцилографів працюють як двоканальні осцилографи, що дозволяють змінювати частоту розгортки у широких межах, запам'ятовувати сигнал та вимірювати його параметри. Існують також програми для аналізу частотного спектру сигналу, вимірювання його частоти та амплітуди. Всі ці прилади можуть бути корисними у домашній або шкільній лабораторії та дозволять провести цікаві досліді.

У цій роботі ми хочемо представити ряд експериментальних демонстрацій та лабораторних робіт реалізація яких здійснюється на ПК базової комплектації, вільнопоширюваних програм-емуляторів переважно осцилографів та генераторів і лабораторних установок, які складаються із обладнання виготовленого учнями та студентами при написанні науково-дослідницьких робіт МАН, курсових та дипломних проектів. Слід сказати, що для проведення експериментів використовувалися персональні комп'ютери з достатньо «скромними», навіть за тодішніми уявленнями, технічними і програмними характеристиками, що не впливало на значення вимірюваних фізичних величин. Значна частина лабораторних робіт, була апробована під час проведення лабораторних занять у ПНПУ імені В. Г. Короленка.

На завершення слід зазначити, що стем-технологія, широко обговорювана і популярна в світі на даний час, передбачає встановлення тісних, перехресних взаємодій між широким колом науково-технічних, інженерних та математичних напрямків. Реалізація такої ідеї може проводитися різними шляхами і засобами, зокрема, й запропонованим у даному посібнику.

## Розділ I

# КОМП'ЮТЕР У ЯКОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

### Дещо про звукові карти персональних комп'ютерів

Як і будь-який електронний пристрій, персональний комп'ютер має свої характеристики. Для підключення зовнішніх пристроїв ПК обладнаний портами вводу-виводу та спеціальними роз'ємами. Для того, щоб використати його практично у якості вимірювального комплексу необхідно знати призначення цих роз'ємів та їх характеристики, оскільки неправильне підключення зовнішніх пристроїв може призвести до виходу обладнання з ладу.

Сучасна звукова карта являє собою компонент ПК для виведення звуку. Комп'ютери, що обладнані звуковою картою та накопичувачем для читання оптичних дисків CD-ROM часто називають мультимедійними комп'ютерами (Multimedia PC). Перший стандарт MPC-1 було ухвалено у 1990 році, а останній – у 1995. Внаслідок розвитку промисловості можливості сучасних комп'ютерів значно перевищили вимоги цих стандартів, тому можна говорити, що всі сучасні комп'ютери обладнані цим пристроєм.

За способом підключення до ПК звукові карти поділяються на 3 види:

- плати розширення, що підключається до материнської плати ПК за допомогою роз'єму PCI, або ISA;
- інтегровані в системну плату мікросхеми;
- окремі зовнішні пристрої, що підключаються до комп'ютера за допомогою роз'ємів USB.

Більшість недорогих ПК, які не використовуються для високоякісного звуковідтворення обладнані або інтегрованою звуковою картою, або недорогою платою розширення PCI, можливостей яких цілком вистачає для досягнення поставленої мети.

Для забезпечення можливості звуковідтворення кожна звукова карта містить мікросхему для перетворення аналогового сигналу у цифровий – аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та цифрового у аналоговий цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Перший стандарт мультимедійного ПК MPC-1 передбачав 8-бітну розрядність цих перетворювачів, що дозволяло використовувати 8 біт для кодування рівня сигналу у деякий момент часу. При такій розрядності кількість

дискретних рівнів сигналу складала  $2^8 = 256$ , отже сигнал з амплітудою 1,5 В міг вимірюватись із точністю  $\frac{1,5}{256} \approx 0,006\text{В}$ . Зараз звукові карти мають розрядність 16 або 24 біти, що теоретично дозволяє вимірювати сигнал з точністю  $9,3 \cdot 10^{-8}\text{В}$ . Звісно така точність є лише теоретична, на практиці через наявність різноманітних завад та інших факторів, що впливають на вимірюваний сигнал, така точність не досягається, але наведені характеристики свідчать про те, що можливостей звукової карти цілком вистачить для використання при проведенні дослідів з шкільного курсу фізики або аматорських досліджень.

Процес перетворення аналогового сигналу у цифрову форму називається дискретизацією. Згідно з теоремою Котельникова будь-який сигнал з обмеженим спектром може бути точно відтворений за допомогою послідовності дискретних відліків взятих через період часу, що рівний половині періоду коливань найвищої частоти, що присутні у сигналі. Частота цих відліків називається частотою дискретизації. Очевидно, що чим вища частота дискретизації — тим ширший спектр частот може бути закодовано. Оскільки звукові карти призначені для роботи із сигналом звукової частоти, то їх частота дискретизації становить 44100 Гц, що дозволяє охопити весь спектр сигналу звукової частоти.

Слід згадати, що перші звукові карти могли в один і той же момент часу або перетворювати аналоговий сигнал у цифровий, або навпаки, що не дозволяло одночасно виконувати запис і відтворення звуку. Такі типи звукових адаптерів є непридатними реалізації поставленої задачі. Сучасні ж пристрої є повнодуплексними і не мають такого обмеження.

Всі звукові карти обладнані роз'ємами для підключення пристроїв відтворення та джерел звуку, до яких відносяться акустичні системи, мікрофони та інша звукова апаратура. Колірні позначення роз'ємів кожного типу визначені в керівництві PC99 Design Guide, але інколи



Рис. 1 Виходи звукової карти

вони варіюються для різних типів звукових карт. Для використання плати для наших цілей необхідно 3 роз'єми, які є стандартними рис. 1:

**Лінійний вихід** – стереофонічний вихід, призначений для подачі сигналу на пристрої відтворення, такі як акустичні системи, навушники чи стереопідсилювач. Максимальна амплітуда сигналу — до 1,5 В. Зазвичай позначається салатовим кольором.

**Лінійний вхід** – використовується для запису сигналу від зовнішніх джерел. Лінійний вхід є стереофонічним, допускає амплітуду вхідного сигналу до 1.5 В, але у більшості випадків, для нормального функціонування пристрою, амплітуда вхідного сигналу не повинна перевищувати 0.5 В. Зазвичай має блакитний колір.

**Мікрофонний вхід** – до цього входу підключається мікрофон для запису голосу чи інших звуків. Мікрофонний вхід є монофонічним. У багатьох звукових картах мікрофонний вхід обладнаний підсилювачем, що збільшує його чутливість та автоматичним регулюванням підсилення (Automatic Gain Control — AGC). Автоматичне регулювання підсилення підтримує постійний рівень сигналу, та призначене для забезпечення найкращої якості запису, але у випадку використання мікрофонного входу для підключення джерел сигналу, AGC не дозволить виміряти їх амплітуду, оскільки рівень сигналу автоматично буде змінюватись.

З урахуванням зазначеного раніше можна зробити висновок, що для забезпечення можливості використання ПК у якості вимірювального комплексу під час проведення навчальних досліджень, останній повинен бути обладнаний повнодуплексною звуковою картою з встановленими драйверами та справними лінійним виходом та лінійним входом, і навіть достатньо застарілий, за теперішніми мірками, комп'ютер можна використати у цій ролі.

### **Про особливості підключення лабораторного устаткування до звукової карти**

Лінійний вхід та лінійний вихід звукової карти зазвичай мають роз'єми типу miniJack розміром 1/8 дюйма рис.2. Стереороз'єм цього



Рис. 2 Роз'єм типу miniJack

типу має такі виводи:

Для покращення якості роботи бажано використовувати екранований провід, який має дві жили для сигналів, що захищені екраном. Це дозволяє зменшити кількість завад, що спотворюють сигнал.

Важливим питанням є забезпечення захисту звукової карти і всього комп'ютера від виходу з ладу, або пошкодження внаслідок неправильних дій користувача. Звукова карта розрахована на рівень вхідного сигналу до 2 В, але нормальна робота забезпечується при амплітуді сигналу близько 1 В. Перевищення амплітудою вхідного сигналу даного рівня призведе до значного спотворення форми сигналу на екрані, або виходу з ладу звукової карти ПК. Для захисту лінійного входу звукової карти від перевищення амплітуди бажано виготовити простий пристрій, що зображений на рис. 3:

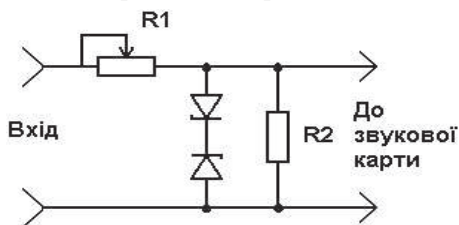


Рис. 3. Схема пристрою для захисту лінійного входу звукової карти

При перевищенні амплітудою сигналу величини напруги пробною стабілітрона – відбудеться його пробій, струм піде через стабілітрон, внаслідок чого, напруга на виході не перевищить напруги пробною стабілітрона. Другий стабілітрон, увімкнений у протилежному напрямі призначений для захисту від напруги протилежної полярності. Очевидно, що потрібно підібрати стабілітрони з напругою пробною меншою за 2 В. Резистори R1 та R2 утворюють дільник напруги, при цьому за допомогою змінного резистора R1 можна змінювати коефіцієнт поділу напруги, а отже і амплітуду сигналу на лінійному виході.

Окрім цього необхідно враховувати те, що звукова карта через свою орієнтованість на вузьку сферу застосування не є повноцінним аналого-цифровим перетворювачем. На входах цього перетворювача встановлені конденсатори, які не пропускають постійну складову сигналу. Також неможливо з високою точністю відкалібрувати шкалу віртуального вимірювального приладу для знаходження амплітуди

сигналу, оскільки на цю величину впливає дільник напруги, що присутній у пристрої захисту входів, налаштування мікшера операційної системи, та самих програм. Звісно, знаючи коефіцієнт поділу напруги дільника, виставивши налаштування мікшера на відсутність ослаблення сигналу, та за передбаченої можливості калібровки в програмах емуляторів вимірювальних приладів, можна проградувати їх шкалу, але точність її буде відносно невеликою. У той же час, із задачею генерування сигналів заданого типу, та частоти і спостереженням форми досліджуваних сигналів ці пристрої добре справляються.

Як зазначалося раніше звукова карта ПК не забезпечує достатньої вихідної потужності та не розрахована на низький опір навантаження, тож для використання комп'ютера за таких умов необхідно виготовити підсилювач звукової частоти.

Підсилювач виконано на інтегральній мікросхемі TDA2003 рис.4. яка є монофонічним підсилювачем звукової частоти з вихідною потужністю 10 Вт.

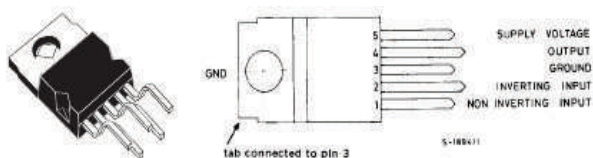


Рис. 4 Зовнішній вигляд мікросхеми TDA2003

Перевагами використання саме цієї мікросхеми є:

- низька ціна;
- широка доступність;
- номінальний опір навантаження 2 Ом;
- широкий інтервал напруги живлення: 8-18 В;
- мінімум додаткових деталей;
- вбудований захист від короткого замикання виходу та від перегріву.

Важливо, що підсилювач розрахований на опір навантаження 2 Ом, чого легко досягти, взявши струну із тонкого дроту. Оскільки мікросхема є підсилювачем потужності, то для роботи сигнал повинен мати достатню амплітуду, що легко реалізується при використанні звукової карти, яка забезпечує амплітуду вихідного сигналу до 1,5 В. При цьому у провіднику опором 2 Ом. Буде протікати струм  $I = \frac{P}{U} =$

$\frac{10\text{Вт}}{1,5} \approx 6,67\text{А}$ , а використання потужного магніту, який створить необхідне магнітне поле забезпечить достатню для проведення досліду силу Ампера. Слід зазначити, що для забезпечення нормальної роботи підсилювача та запобігання виходу мікросхеми з ладу внаслідок перегріву необхідно її закріпити на масивному радіаторі. При цьому бажано використати теплопровідну пасту типу КПТ-8 яка покращить тепловий контакт між мікросхемою та радіатором.

Оскільки мікросхема розрахована на напругу від 8 до 18 вольт, то для живлення підсилювача можна використати наявні у шкільній лабораторії випрямлячі, такі як ВУП-2 та ВС-4-12, при цьому потрібно поставити конденсатор великої ємності для згладжування пульсацій напруги. Використання простого випрямляча у цьому випадку є виправданим, бо за мету поставлене створення максимально простої та недорогої установки, до того ж підсилювач використовується не для високоякісного звуковідтворення, а для підсилення синусоїдального сигналу постійної частоти, тому використання нестабілізованого джерела живлення ніяк не вплине на параметри приладу. У нашому випадку було використано наявний знижувальний трансформатор та зібрано у одному корпусі випрямляч за типовою схемою з підсилювачем рис. 5.

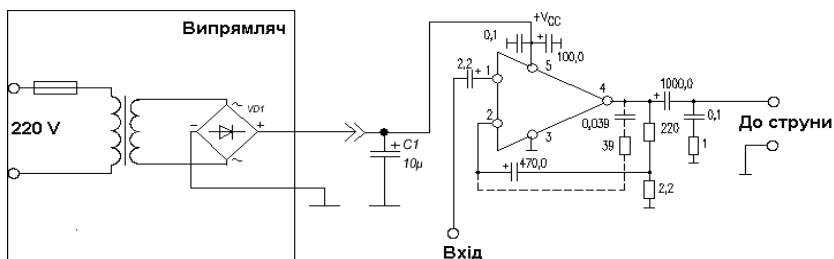


Рис. 5. Принципова схема підсилювача та випрямляча

У разі використання готового випрямляча, частина схеми, обведена пунктирною лінією виключається. Підсилювач збирається у корпусі підходящих розмірів, з'єднання зі струною виконується за допомогою роз'ємів або клем. До виходу звукової карти підсилювач підключається за допомогою роз'єму типу miniJack, при цьому використовується лише один канал. З'єднання з іншим каналом не відбувається. Для запобігання виходу з ладу звукової карти не рекомендується з'єднувати між собою канали, також потрібно слідкувати за тим, щоб не було замикання виходу на корпус приладу.

## Емулятори- генератори і осцилографи

Для використання комп'ютера у фізичних експериментах на ньому необхідно встановити відповідне програмне забезпечення. На наш погляд, в першу чергу, необхідно мати програми які дозволяють використовувати ПК у якості генератора сигналів і програми, що призначені для спостереження форми досліджуваного сигналу, та вимірювання деяких його параметрів – осцилографи.

Такі програми створюють ентузіасти-радіолюбители для своїх власних потреб – їх називаються програмами емуляторами фізичних приладів. Програм, віртуальних генераторів і осцилографів, створена велика кількість. Вони бувають безкоштовними але існують продукти, що вимагають придбання ліцензії на право використання. Ми користувалися лише безкоштовними варіантами таких програми, використовуємо їх у постановці лабораторних робіт та при проведенні демонстрацій, а тому можемо рекомендувати і нашим читачам. В першу чергу зупинимося на звукових генераторах.

**Sweep Generator v2.2** – призначений для генерування коливань

звукової частоти у діапазоні 1-20000 Гц та можливості автоматичної зміни частоти у заданих межах. Даний генератор має широкі межі застосування і придатний для проведення всіх робіт, де необхідна генерація сигналу звукової частоти. Але у багатьох випадках його можливості є надлишковими, а велика кількість параметрів генерації лише утруднюватиме користування. Тому для робіт, де потрібна генерація сигналу постійної частоти пропонується використовувати більш прості генератори.

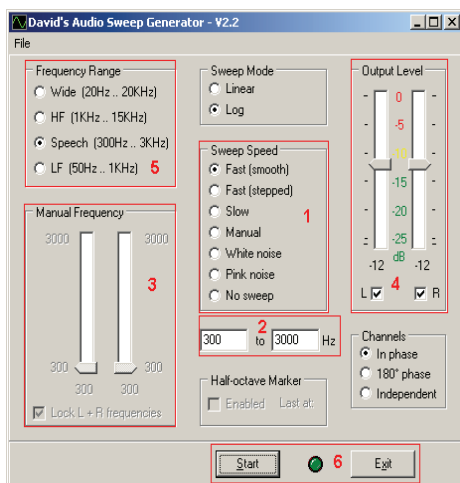


Рис. 6 Головне вікно програми Sweep Generator

Програма розповсюджується безкоштовно. Після запуску на екрані з'являється головне вікно з органами керування рис. 6. За допомогою перемикачів у області 1 можна задати швидкість зміни частоти та тип сигналу. Можлива швидка і плавна зміна частоти,

швидка покрокова зміна та режим ручного задавання частоти сигналу. Крім цього доступний вибір генерації білого та рожевого шумів. У область 2 вводяться межі автоматичної зміни частоти сигналу у тому випадку, коли стандартні межі не влаштовують.

Органи керування у області 3 призначені для ручного встановлення частоти генерованого сигналу з точністю до 1 Гц. Вони стають доступні при виборі пункту Manual (ручне) в області 1. Амплітуда вихідного сигналу встановлюється за допомогою повзунків 4. Слід зазначити, що можливо встановлювати амплітуду як для обох каналів разом, так і для кожного окремо. Генератор має чотири попередньо встановлені діапазони генерації сигналу, які можна вибрати за допомогою перемикачів у області 5:

- Wide (20-20000 Гц) – увесь діапазон звукових частот;
- HF (1000 – 15000 Гц) – діапазон звукових частот, який використовується на радіо;
- Speech (300 – 3000 Гц) – спектр частот телефонного зв'язку;
- LF (50 – 1000 Гц).

Після того, як було налаштовано всі параметри сигналу, генератор запускається за допомогою кнопки Start, що розташована в області 6. Зупиняється генерація цією ж кнопкою.

**Signal Generator** – програма має мінімальні вимоги до конфігурації комп'ютера. Дозволяє генерувати синусоїдальний, трикутний, прямокутний та деякі інші сигнали із частотою від 20 до 20000 Гц, а також білий та рожевий шум. Головне вікно програми має мінімальні розміри з мінімумом органів керування (рис.7.)

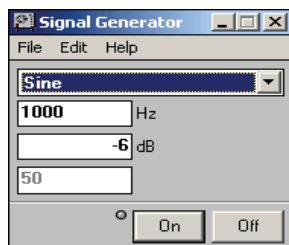


Рис. 7 Головне вікно програми Signal Generator

Зверху донизу йде випадаючий список для вибору форми генерованого сигналу, поле для вводу частоти, рівня вихідного сигналу, та деякого параметра, який змінюється залежно від типу генерованого сигналу. Для вмикання та вимикання генератора є дві кнопки. Перевагами цієї програми є малий розмір, невеликі системні вимоги та простота використання. Може застосовуватись там, де не потрібні зайві налаштування та параметри.

Лінійний вхід звукової карти має два канали, то і осцилографи здебільшого є двоканальними і дозволяють одночасно спостерігати два різних канали. Крім цього такі програми дозволяють запам'ятовувати зображення сигналу, мають широкі можливості з

налаштування відображення даних на екрані, та дозволяють розгортати зображення на весь екран, що значно покращує сприйняття інформації. Серед усіх існуючих нами використовувалися наведені нижче програми-емулятори осцилографів.

**Oscilloscope** – простий двохканальний осцилограф який має майже всі необхідні функції. Дозволяє одночасно спостерігати один або два канали з лінійного чи мікрофонного входу. Дуже корисною є можливість відключення розгортки і емуляція ходу електронного

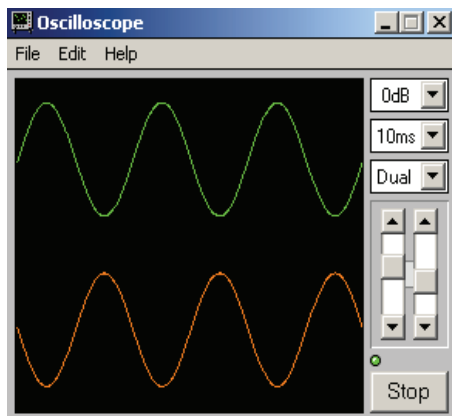


Рис. 8 Головне вікно програми Oscilloscope

на весь екран.

**Oscilloscope 2.51** – осцилограф та аналізатор спектру. До переваг цього приладу можна віднести не дуже високі системні вимоги,

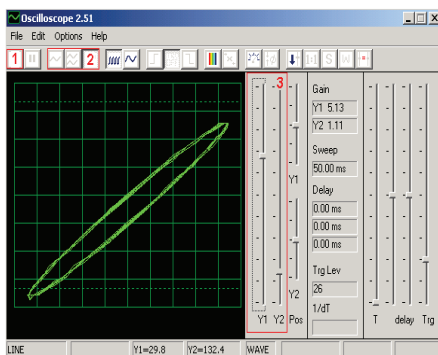


Рис. 9. Головне вікно програми Oscilloscope 2.51

променя, що дозволяє демонструвати фігури Лісажу.

Головне вікно містить мінімум органів керування: справа вертикально розмішені «випадаючі» списки для вибору рівня підсилення сигналу, частоти розгортки та джерела сигналу. За допомогою двох повзунків можна змінювати положення осцилограм по вертикалі, що дозволяє оптимально розмістити їх на екрані.

Недоліком цієї програми є неможливість розгорнути вікно

можливість відключення розгортки, та керування електронним променем по вертикалі та горизонталі з двох каналів лінійного входу, робота у режимі чекання, наявність засобів для вимірювання частоти сигналу, зсуву фаз та інших параметрів.

Інтерфейс програми дещо перевантажений органами керування, але для початку роботи необхідний

мінімум з них. Для запуску використовується кнопка 1 на панелі інструментів, за допомогою трьох кнопок у області 2 перемикають режими роботи осцилографа: однопроменевий, двопроменевий та відключена розгортка. Чутливість входів регулюється за допомогою повзунків у області 3.

Програма має широкі можливості при відносній простоті, тому її можна рекомендувати до використання у випадках, коли можливостей найпростіших приладів не достатньо.

**VisualAnalyser** – програма з величезними можливостями аналізу сигналів рис. 10. Містить у собі осцилограф, генератор звукової частоти, аналізатор спектру, вольтметр та багато інших можливостей. Через це є досить складною у використанні.

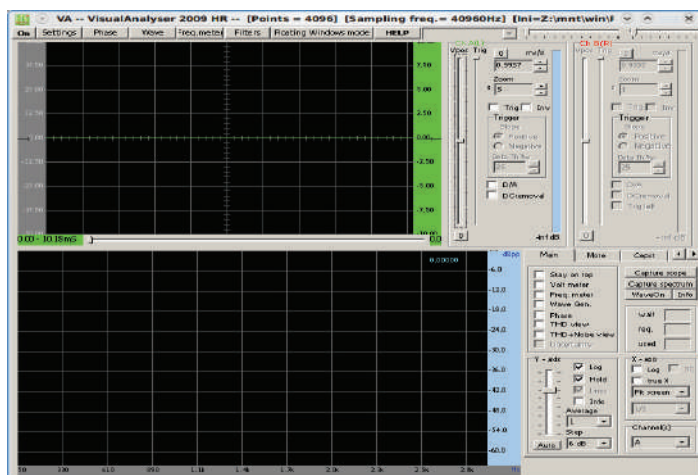


Рис. 10 Головне вікно програми VisualAnalyser

Інтерфейс можна налаштовувати згідно зі своїми уподобаннями, але при першому запуску головне вікно програми має вигляд, зображений на рис. 10. Робоча область поділена на дві частини: осцилограф, який розміщено у верхній частині вікна, та аналізатор спектру у нижній. Органи керування кожним із цих приладів є незалежними і розміщені у відповідних частинах вікна. Оскільки інтерфейс є достатньо складним і для використання всіх можливостей програми необхідна наявність деяких навичок користування, то даний продукт можна рекомендувати лише у тих випадках, коли дійсно потрібні широкі можливості з аналізу сигналу. Це може бути, наприклад, при проведенні дослідної роботи сильними учнями. Для

використання на лабораторних роботах доцільно використовувати простіші прилади.

Крім зазначених до використання можна також рекомендувати програму Audio Tester 1.4. Дана програма має достатньо зрозумілий нерусифікований інтерфейс її вікно складається з трьох вкладок.

Spectrumanaliser - аналізатор спектру. Дозволяє виявляти максимальну амплітуду коливань із заданого діапазону частот. Може використовуватися, наприклад, при побудові резонної кривої.

Frequency Generator - генератор звукових коливань. Частоту можна задавати вручну або плавно змінювати з кроками в 100 і 1 Герц, що доволі зручно при визначенні власної частоти контура. Можна регулювати амплітуду коливань окремо по правому і лівому каналах. Програма дозволяє створювати не тільки синусоїдальні коливання, а й прямокутні, «білий» та «рожевий» шум. Для запуску та вимикання генератора призначені кнопки *Start* та *Stop* відповідно.

Oscilloscope - осцилограф. Дозволяє досліджувати коливання окремо по кожному з каналів, регулювати чутливість від 100 пВ до 2 В, час відгуку від 50 пс до 10 мс. Можна також використовувати правий та лівий канали, як входи X та Y. За необхідності можна «закоротити» входи.

## Налаштування операційної системи

Правильне функціонування апаратних пристроїв комп'ютера під керуванням операційної системи сімейства Microsoft Windows

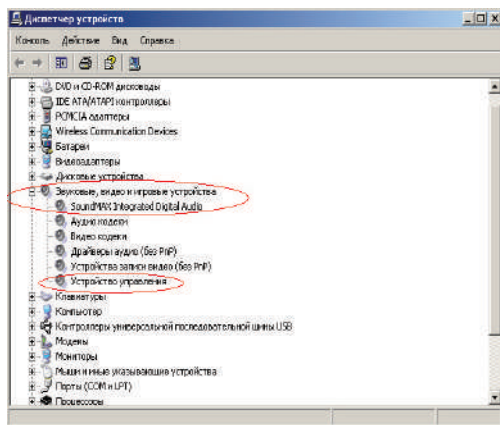


Рис. 11 Диспетчер пристроїв операційної системи

можливе лише за наявності драйверів цих пристроїв. Окрім того для правильної роботи необхідне налаштування параметрів мікшера операційної системи. Розглянемо детальніше ці аспекти в операційній системі Windows XP.

За правильного встановлення драйверів звукової карти у диспетчері пристроїв операційної системи, який викликається за

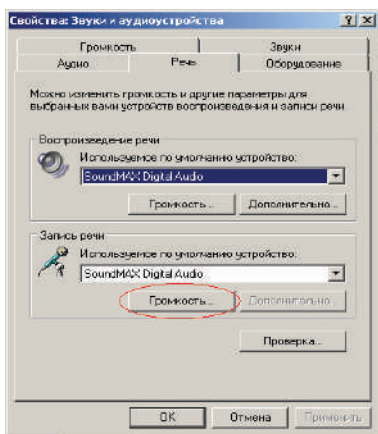


Рис. 12 Вікно налаштування аудіопараметрів

потрібно слідкувати, щоб повзунок “Баланс” займав середнє положення, бо інакше рівні сигналу на правому та лівому каналах будуть неоднаковими. Для налаштування параметрів лінійного входу необхідно клацнувши правою кнопкою миші на значку мікшера у треї вибрати пункт “Настройка аудиопараметров” і на вкладці “Речь” натиснути кнопку “Громкость” біля значка мікрофона.

З’явиться вікно, аналогічне за виглядом до вікна налаштувань параметрів відтворення звуку, але з налаштуваннями звукових входів. Джерело звуку вибирається встановленням прапорця “Выбрать” біля потрібного джерела.

Для виконання робіт необхідно відмітити вхід “Линейный”, також

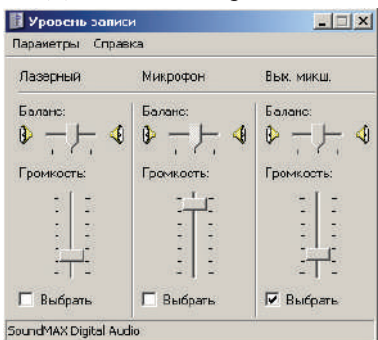


Рис. 13 Вікно налаштування звукових входів

допомогою однойменної кнопки на вкладці “Оборудование” вікна властивостей системи, повинні відображатися піктограми пристроїв звукової карти та аудіомікшера, при чому коло їх піктограм не повинно бути знаків запитань.

У системному треї біля годинника має відображатись значок мікшера, після клацання по якому з’явиться вікно із налаштуваннями рівня вихідного сигналу. Повзунками “Громкость” та “Звук” встановлюється рівень вихідного сигналу, при цьому бажано не виставляти їх на максимум без крайньої на те потреби. Також

у деяких випадках може знадобитися вхід “Микрофон”. Слід пам’ятати, що одночасно не можна вибрати два входи, тому може виникнути необхідність перемикатись між ними у ході роботи.

Як бачимо існує широкий вибір програм-емуляторів вимірювальних приладів під операційну систему Microsoft Windows, які дозволять виконати поставлену задачу. При цьому слід пам’ятати, що дані прилади мають обмеження, зв’язані з

особливостями конструкції та призначенням звукової карти комп'ютера і деякі можливості, такі як вимірювання напруги сигналу можна використовувати лише після калібровки приладу, але і після цього їх точність буде невисокою. Також для роботи програм-емуляторів віртуальних приладів необхідна настройка аудіопараметрів операційної системи та наявність всіх необхідних драйверів пристроїв.

Підсумовуючи вище згадане робимо висновок: для проведення експериментів згодиться будь-який стаціонарний або портативний комп'ютер у якого наявна інтегрована або дискретна звукова карта; встановлена операційна система (у нашому випадку Windows XP); інсталюваний пакет драйверів для звукової карти; встановлено програми-емулятори вимірювальних приладів.

## Розділ II

### ДЕМОНСТРАЦІЙНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИЛАДІВ-ЕМУЛЯТОРІВ

#### Демонстрація механічних коливань і звукових хвиль

Нижче, наведено опис деяких демонстрацій, які можуть бути показані під час вивчення фізики, а саме у темах, механічні та електричні коливання і хвилі.

Для всіх демонстрацій використовується ЕОМ, до виходу звукової карти якої підключені активні акустичні системи (комп'ютерні колонки тощо), а до мікрофонного входу – мікрофон. Можна застосовувати будь-яке доступне обладнання, наприклад, електретний мікрофон зі старого касетного магнітофону. Замість активних акустичних систем можна використовувати звичайний динамік або телефон, але потрібно брати до уваги можливу обмеженість гучності та частотного діапазону. В операційній системі слід встановити необхідні настройки звукового обладнання: пристроєм запису обрати мікрофон, встановити максимальний рівень чутливості відповідного входу звукової карти та найбільшу гучність вихідного сигналу. Спочатку розглянемо механічні коливання. Зазначимо, що дані демонстрації виглядають значно ефектніше за використання проектора та інтерактивної дошки.

#### *Демонстрація 1. Коливання тіл як джерело звуку.*

Легко продемонструвати, що тіла, які коливаються, випромінюють звук, можна, використовуючи камертон, музичний інструмент (гітару, балалайку, бандуру), металеву пластину (наприклад, лінійку). Якщо піднести до цих джерел звукових коливань мікрофон, то з комп'ютерних колонок лунатиме вже підсилений сигнал, який зможуть почути навіть учні з задніх парт. Окрім того, в

цьому випадку можна спостерігати сигнал, що вловлюється мікрофоном, на екрані емулятора осцилографа. Для нескладних демонстрацій чудово підходить віртуальний прилад Oscilloscope з пакету програм WaveTools Version 1.0 (рис. 14.).

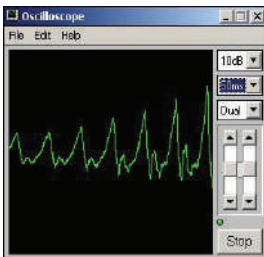


Рис. 14. Осцилограма людської

Поступово підводячи до більш складних понять і відповідних

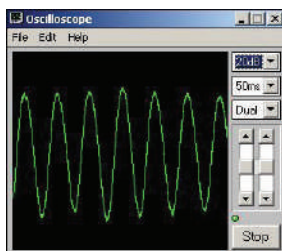


Рис. 15. Осцилограма звучання гітарної струни

Відображується синусоїда (рис. 15), варто зауважити, що ці коливання є гармонічними. Спостерігаючи на осцилограмі поступове зменшення амплітуди сигналу аж до повного припинення коливального процесу, легко підвести учнів під поняття затухаючих коливань.

Прообраз вимушених коливань можна отримати, використовуючи емулятор звукового генератора, наприклад, Signal Generator з пакету WaveTools Version 1.0. Створений віртуальним

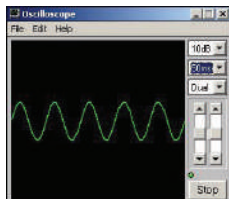
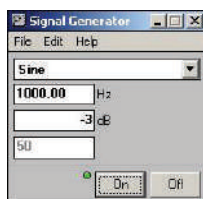


Рис. 16. Емулятор звукового генератора та осцилограма сигналу з мікрофона

приладом синусоїдальний сигнал заданої частоти та амплітуди випромінюється комп'ютерними колонками, а потім вловлюється мікрофоном. При цьому на екрані емулятора осцилографа можна спостерігати незатухаючі коливання (рис. 16). У цей момент слід пояснити учням, що динамік акустичної системи випромінює звук завдяки коливанням його дифузору. А останній приводиться у рух шляхом перетворення електричних коливань у механічні за допомогою електромагніту.

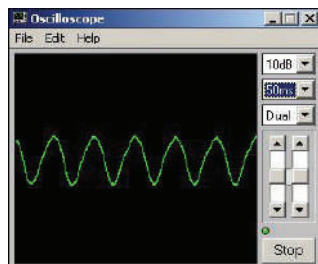


Рис. 17. Осцилограма співу голосного звуку

демонстрацій, найкраще розпочати з простого. Варто показати школярам осцилограму коливань камертона або струни музичного інструменту (рис. 15.), зазначаючи при цьому, що ми можемо спостерігати, як механічні коливання породжують звук.

Звернувши увагу учнів на те, що на екрані віртуального приладу

спостерігати незатухаючі коливання (рис. 16). У цей момент слід

Також можна продемонструвати, що мова – це теж коливання, створені голосовими зв'язками людини. Якщо запропонувати комусь із учнів проспівати в мікрофон голосний звук, то на екрані віртуального осцилографа відобразиться сигнал за формою близький до

синусоїдального (рис. 17). Якщо ж просто поговорити в мікрофон, то учні побачать на осцилограмі неперіодичні коливання складної форми (рис. 14).

### ***Демонстрація 2. Резонанс.***

Для того, щоб підвести школярів до поняття резонансу варто спочатку розглянути накладання звукових коливань. Для постановки цієї демонстрації можна, наприклад, попросити учня щипнути струну гітари та одночасно проспівати голосний звук. При цьому на екрані віртуального осцилографа ми бачимо криву, що фактично являє собою суму двох кривих, які відображалися б на осцилограмах при окремому спостереженні кожного з коливальних процесів (рис. 18).

Далі потрібно, щоб два джерела звуку створювали коливання однакової частоти. Для цього можна використати камертон та

музичний інструмент, на якому слід грати ноту «ля», на яку настроєний камертон. Слід показати осцилограми коливань, створені кожним з цих джерел. Якщо добувати з камертона та інструменту звук одночасно (при фіксованому положенні мікрофона та випромінювачів звуку), то амплітуда результуючого коливання на екрані емулятора осцилографа буде в кілька разів більшою, ніж кожної з його складових.

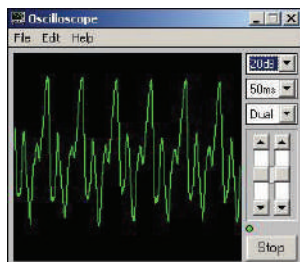


Рис. 18. Осцилограма, що демонструє накладання звукових коливань

### ***Демонстрація 3. Залежність гучності звуку від амплітуди коливань.***

Залежність гучності звуку від амплітуди коливань можна показати кількома способами. Чим далі відвести гітарну струну або металеву пластину від положення рівноваги, задаючи таким чином початкове значення амплітуди коливань, тим гучнішим буде їх звучання після того, як їх відпустити. Наочніше спостерігати за збільшенням амплітуди коливань за допомогою віртуального осцилографа, піднесши мікрофон до джерела звуку.

Також зв'язок гучності та амплітуди можна показати наступним чином. У програмі-емуляторі звукового генератора створити гармонічний сигнал деякої частоти і за допомогою мікрофона вловлювати звук, що випромінюють динаміки комп'ютерних колонок. Сигнал з мікрофона відображується на екрані віртуального осцилографа. Далі, змінюючи рівень гучності створених генератором

звукових коливань, чуємо зміну гучності звучання та спостерігаємо зміну амплітуди сигналу на екрані емулятора приладу.

#### ***Демонстрація 4. Залежність висоти тону від частоти коливань.***

Цю демонстрацію можна також провести, використовуючи віртуальні осцилограф та звуковий генератор з пакету WaveTools

Version 1.0. Програма Signal Generator дозволяє генерувати звукові коливання, не лише введенням значення їх частоти, а й задаючи потрібну музичну ноту та октаву (рис. 19).

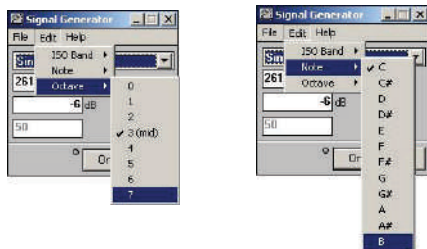


Рис. 19. Вибір музичної ноти та октави у віртуальному звуковому генераторі

Обираючи послідовно ноти зі списку, легко простежити, що і частота, яка відповідає цій ноті, у спеціальному полі програми

збільшується. На слух же можна помітити підвищення тону звучання. Школярі, знайомі з основами теорії музики, знають, що поняття тон і нота тотожні та що при переході до вищої ноти зростає і висота звуку.

Окрім програм-емуляторів з пакету WaveTools Version 1.0 існують й інші, більш складні програмні засоби, які дозволяють не

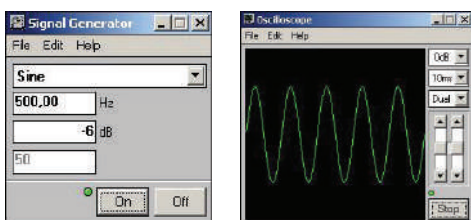


Рис. 20. Гармонічний сигнал частотою 500 Гц

лише демонструвати певні процеси, а й визначати конкретні величини. Однак, велика кількість вікон, полів введення даних та елементів керування може відволікти увагу школярів від власне спостереження самого явища. Проте, навіть

використовуючи програму Oscilloscope, можна проводити певні оцінки та вимірювання.

Наприклад, створимо за допомогою емулятора звукового генератора гармонічний сигнал певної частоти (рис. 20). Зафіксуємо це значення та попросимо учнів порахувати на екрані віртуального осцилографа кількість періодів синусоїди. Потім збільшимо частоту у відповідному полі програми-емулятора генератора. Зміниться і кількість періодів синусоїди, що відображаються на екрані осцилографа. Якщо попросити учнів підрахувати їх кількість та

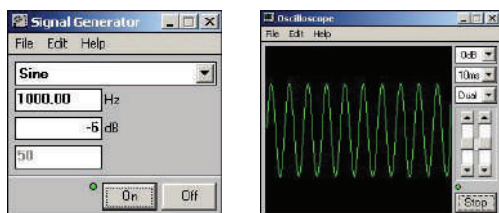


Рис. 21. Гармонічний сигнал частотою 1000 Гц

провести відповідні підрахунки, то виявиться, що вона зросла у стільки ж разів, у скільки збільшилася частота (рис. 21). Така демонстрація дозволяє школярам, зокрема, краще зрозуміти фізичний зміст цієї величини.

Можна за допомогою програм-емуляторів з пакету WaveTools

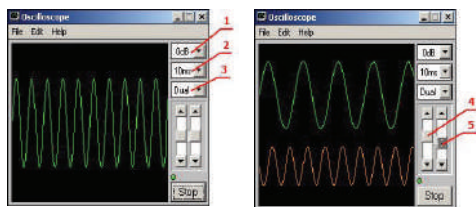


Рис. 22. Елементи керування програмою

Version 1.0 також знайти значення частоти та оцінити амплітуду. Величина, виражена у мілісекундах, що обирається у випадяючому меню 2 програми Oscilloscope (рис. 22) – це час, за який світлова точка, яка відповідає точці, що коливається, проходить шлях від правого краю екрану віртуального приладу до лівого. А отже, якщо порахувати кількість періодів синусоїди, які відображаються на цьому екрані, та поділити на цю величину, то ми отримаємо частоту коливання. Обернене ділення дає значення його періоду.

Керуючись показами випадяючого меню 1 (рис. 9) можна оцінити значення амплітуди коливань. Значення 0 dB означає, що висота екрану віртуального приладу відповідає максимально допустимому рівню вхідного сигналу. Додатні числа показують, що це значення зменшилося на обрану величину децибел, від'ємні свідчать про відповідне збільшення.

За допомогою меню 3 (рис. 22) можна обрати, сигнал якого з двох каналів буде відображатися на екрані. При обранні режиму *Dual* бачимо сигнали двох каналів одночасно. Для зручності спостереження їх можна рознести по висоті за допомогою повзунків 4 та 5 (рис. 22). У

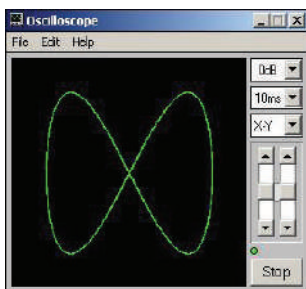


Рис. 23. Фігура Ліссажу, отримана за допомогою програми Oscilloscope

функцій. Цікавим є режим  $X-Y$ , при якому на екрані будуються фігури Ліссажу (рис. 23).

Програма-емулятор Signal Generator дозволяє створювати сигнали різної форми.

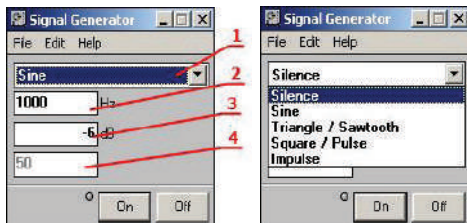


Рис. 24. Елементи керування програмою Signal Generator

Обрати останню можна у випадаючому меню 1 (рис. 24). Це може бути синусоїда, трикутник, пилка, меандр тощо. У полі 2 можна задати частоту, в 3 – рівень гучності сигналу. Параметр поля 4 дозволяє додатково керувати зміною форми деяких сигналів.

### Демонстраційні експерименти з послідовним і паралельним коливальними контурами

У наступних, описаних нижче дослідах, пропонується вивчення властивостей коливальних контурів. Коливальні контури можуть бути

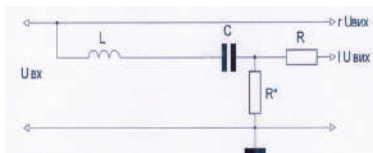


Рис 25. Послідовний коливальний контур

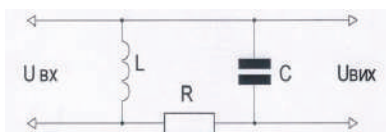


Рис.26. Паралельний коливальний контур

паралельні і послідовні. Принципові схеми таких контурів наведені на рис.25 і 26.

Демонстрації можна проводити використовуючи звичайні, стандартні демонстраційні прилади але при цьому змінювати характеристики компонентів контуру, ємність, індуктивність, активний опір ми не зможемо. Це можна виправити, використовуючи, за наявності, стандартні набори магазинів ємностей і опорів або виготовити коливальні контури зі змінним набором компонентів. Саме такий шлях ми і пропонуємо адже виготовлення коливальних контурів сприяє формуванню і розвитку політехнічних компетентностей. Схеми виготовлених контурів, вигляд монтажних плат та специфікація деталей подані у додатках А, Б, В.

Коливальні контури виготовлені на текстолітових платах розміром  $120 \times 60$  мм, друкованим монтажем. Для зміни ємності і опору використовуються 10 конденсаторів і 10 резисторів, які вмикаються у коло перемикачами типу RS-10.

Перед проведенням експериментів обов'язково звертаємо увагу на амплітуду вхідного сигналу (не більше 1,5 В), при підключенні до ПК спочатку бажано встановити знижені рівні сигналів входу і виходу, а потім відкоригувати. Бажано використовувати інтервал частот в межах 0,1 – 10 кГц. Якщо на роботу аналізатора впливають зовнішні перешкоди, то установку необхідно екранувати.

Для проведення дослідів з коливальними контурами використовували програму-емулятор Audio Tester 1.4.

**Дослід 1.** Спостереження коливань за допомогою програми-емулятора електронного осцилографа.

У вкладці Oscilloscope натискаємо кнопку Start, виставляємо чутливість 100 мВ (розмах по осі Y), час 1 мс (розмах по осі X). Переходимо до вкладки Frequency Generator, вибираємо стартову частоту 100 Гц. Натискаємо Start. Повертаємось до осцилографа і спостерігаємо синусоїду на одному з каналів. Тепер змінюємо частоту коливань, форму, розмах коливань. Відповідно змінюється і форма кривої на осцилографі.

**Дослід 2.** Порівняння амплітуди коливань, що подаються безпосередньо з джерела з тими, що пройшли через контур.

Встановлюємо перемикачі S1.1 та S2.1 у ввімкнуте положення. Після цього на екрані осцилографа спостерігаються коливання на обох каналах. Однак на тому з каналів, де коливання проходять через контур, їх розмах значно менший, тому на цьому каналі зменшуємо чутливість до 50 мВ. Починаємо збільшувати частоту генератора. Амплітуда на контрольному каналі залишається сталою, а на

контурному починає зростати, досягає максимуму на певній частоті і далі спадає. Отже наш контур працює і частота залежить від його характеристик.

**Дослід 3.** Визначення резонансної частоти за допомогою аналізатора спектру.

Переходимо до вкладки Frequency Generator. Генератор встановлюємо на частоту 100 Гц. Ємність контура — максимальна. Вмикаємо аналізатор спектра. Спостерігаємо дві криві: більшу, що відповідає сигналу контрольного каналу, та меншу - контурний канал. Тепер збільшуємо частоту генератора з кроком 100 Гц. Перша крива незмінна, друга зростає, досягає максимуму на певній частоті і починає спадати. Максимум відповідає резонансній частоті. Аналогічно визначаємо резонансну частоту для інших значень ємності.

**Дослід 4.** Визначення індуктивності котушки резонансним методом.

Знаючи ємність конденсаторів та резонансну частоту з попереднього дослідів, неважко знайти індуктивність котушки за формулою Томсона.

**Дослід 5.** Вплив активного опору.

На магазині ємностей встановлюємо середнє значення з усіх можливих варіантів. Визначаємо резонансну частоту. Тепер змінюючи активний опір контуру, проводимо дослідів, аналогічні 3-4. Можна зробити висновки, що резонансна частота від активного опору не залежить, однак змінюється амплітуда контуру, а отже і форма резонансної кривої, тобто відбувається вплив на добротність.

Результати кожного з дослідів подані в додатку Д.

Для вивчення паралельного коливального контуру можна за аналогією використати дослідів 3-5 з попереднього пункту. Різниця буде лише у ввімкненні схеми. На відміну від послідовного контуру використовується лише один канал. Результати досліджень наведені в додатку Е.

Зазначимо, що дослід 3 додатку Д і дослідів додатку Е можна пропонувати до виконання не лише як демонстрації, а, наприклад, виконати як фронтальні лабораторні роботи або, взагалі, при відповідному оформленні проводити як повноцінні лабораторні роботи.

### Розділ III

## ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИЛАДІВ-ЕМУЛЯТОРІВ

### Лабораторна робота № 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ СТРУНИ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ

**Мета роботи:** спостерігати форму власних коливань струни при її незмінному натязі та дослідити залежність швидкості поширення поперечної хвилі в струні від її характеристик.

**Прилади і матеріали:** 1) струна з мідного дроту; 2) платформа для закріплення струни; 3) підсилювач звукової частоти; 4) набір важків; 5) постійний магніт; 5) комп'ютер зі встановленою програмою SweepGen v.2.2; 6) мікрометр; 7) лінійка.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У роботі власні коливання струни досліджуються методом резонансу. Явище резонансу полягає в наступному: якщо частота змушуючої сили, що періодична в часі й прикладена до малої ділянки струни, стає рівною одній з власних частот струни, то в ній встановлюються стоячі хвилі з максимальною амплітудою коливань. При цьому необхідно, щоб ділянка прикладення змушуючої сили збігалася із однією з пучностей відповідної стоячої хвилі. Стояча хвиля утворюється в результаті накладання хвиль однакової частоти й амплітуди, що поширюються в протилежних напрямках (окремий випадок інтерференції)

У натягнутій між двома закріпленими точками струни при збудженні коливань встановлюються стоячі хвилі. Оскільки точки закріплення є вузлами стоячих хвиль, то в струні збуджуються коливання лише таких частот, при яких на довжині струни  $l$  укладається ціле число півхвиль  $\lambda/2$ .

Звідси

$$l = n \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{або} \quad \lambda_n = \frac{2l}{n}, \quad (1)$$

де  $l$  – довжина струни.

Врахувавши зв'язок швидкості поширення коливань  $v$  із частотою  $\nu$  і довжиною хвилі  $\lambda$ , одержуємо для швидкості

$$v = \frac{2l\nu_n}{n} \quad (2)$$

Швидкість поширення хвилі залежить тільки від власних характеристик струни і визначається формулою

$$v = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{P}{\pi\rho}}, \quad (3)$$

де  $P, d, \rho$  – натяг, діаметр та густина матеріалу струни відповідно. Підставляючи значення швидкості у формулу (2), одержуємо остаточний вираз для власних частот коливань струни:

$$\nu_n = \frac{n}{ld} \sqrt{\frac{P}{\pi\rho}} \quad (4)$$

Найнижча частота (або найнижчий тон, який відтворює струна), що одержується при  $n=1$

$$\nu_n = \frac{1}{ld} \sqrt{\frac{P}{\pi\rho}} \quad (5)$$

називається *основною частотою*, або *основним тоном*. Більш високі частоти, кратні  $\nu_1$ , називаються *обертонами основної частоти*, або *гармоніками*. Основна частота називається першою гармонікою, подвоєна основна частота або перший обертона – другою гармонікою і т.д.

Прийнявши за початок координат одну із точок закріплення струни й направивши вісь  $Ox$  уздовж струни, напишемо рівняння  $n$ -ї стоячої хвилі:

$$\zeta_n = a_n \sin \frac{2\pi x}{\lambda_n} \sin 2\pi \nu_n t \quad (6)$$

де  $\zeta_n$  – поперечне відхилення точки струни з абсцисою  $x$  у момент  $t$ ,  $a_n \sin \frac{2\pi x}{\lambda_n}$  – амплітуда,  $\lambda_n = \frac{2l}{n}$ . Профіль стоячої хвилі у будь-який момент часу має форму синусоїди і являє собою графік розподілів зсувів і амплітуд по осі  $Ox$ . Частоти коливань усіх точок струни однакові і визначаються за формулою (4).

Отже струна, закріплена на двох кінцях, не може перебувати у простому гармонічному коливанні з будь-якою частотою, допустимі лише частоти, обумовлені формулою (4).

У загальному випадку в струні можуть встановлюватись одночасно коливання різних частот, але кратних основній частоті, оскільки струна являє собою систему з гармонічними обертонами.

## ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На схемі, що показана на рис. 1, струна з мідного дроту закріплюється на масивній основі. Один кінець струни закріплюється нерухомо, а інший перекидається через нерухомий блок і до нього підвішують важок, масою 20-50 гр., за допомогою якого у струні створюється натяг. До зачищених кінців струни підпаюють дроти з клемами, до яких підключають підсилювач. Для забезпечення можливості зміни довжини частини струни, що коливається зроблено рухомий масивний упор, який закріплює струну в потрібній точці. За допомогою емулятора звукового генератора на струну подається регульована за частотою змінна напруга. Уздовж струни може вільно переміщуватися постійний магніт.

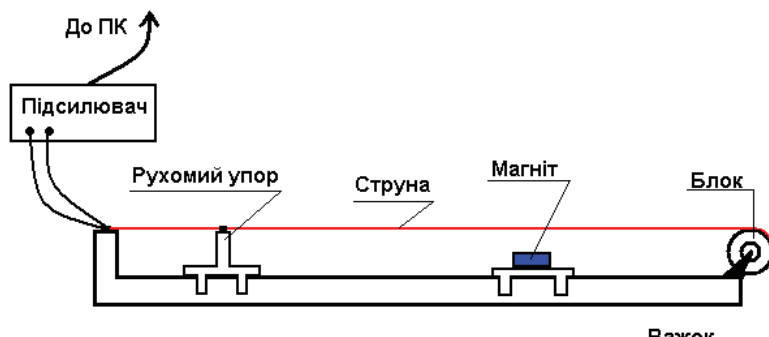


Рис. 1. Схема експериментальної установки для визначення швидкості поширення поперечних коливань у струні.

Ділянка струни зі змінним струмом, що по ній протікає, потрапляє в поле постійного магніту. При цьому виникає періодична сила, прикладена до струни. Частота зміни цієї сили дорівнює частоті змінного струму. У випадку, коли частота створеного генератором сигналу буде збігатися з однією із власних частот струни, а положення полюсів магніту – з пучністю стоячої хвилі, що відповідає даній частоті, спостерігатиметься явище резонансу: у струні встановлюється стояча хвиля.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Створити натяг у струні, помістивши на платформу для важків, важок масою 30 — 50 г. При цьому враховується маса платформи.
2. За допомогою мікрометра виміряти діаметр струни, а за допомогою лінійки — її довжину.
3. Встановити постійний магніт посередині струни.
4. Запустити програму SweepGen. Встановити максимальний рівень вихідного сигналу — 0 дБ (крайнє верхнє положення повзунка 1, рис. 2).
5. Обрати межі зростання можна у полях, що знаходяться у нижній частині вікна програми (рис.2 4). У полі “Sweep Speed” вибрати ручний режим зміни частоти - Manual (рис. 2, 2) та натиснути кнопку Start. Активними стануть повзунки 3 (рис. 2). Після натискання лівої кнопки миші, навівши курсор на ці повзунки, можна змінювати частоту з точністю до 1 Гц, натискаючи клавіші управління курсором на клавіатурі. При наближенні до резонансної частоти амплітуда коливань струни та її гучність зросте.

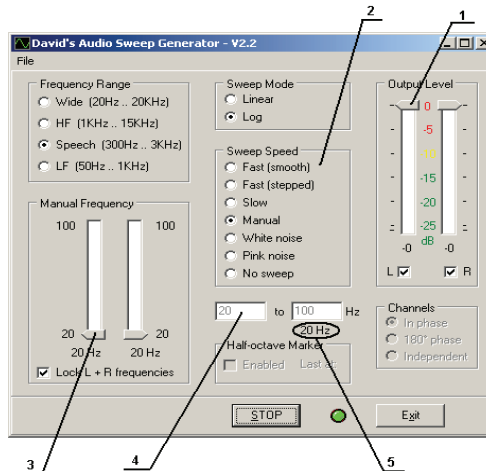


Рис.2 Налаштування програми SweepGen при пошуку резонансних частот коливань струни.

6. Далі потрібно збільшити частоту коливань у кратне число разів і пересуваючи магніт вздовж струни, отримати стійкі коливання наступних обертонів.

7. Записати у таблицю 1 звіту в порядку зростання значення частот звукового генератора, при яких на струні встановлюються стоячі хвилі. Накреслити профілі стоячих хвиль.

**Таблиця 1.** Результати вимірювання швидкості поширення поперечної хвилі в струні.

|                                            |              |  |                         |             |              |             |                         |             |       |
|--------------------------------------------|--------------|--|-------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------------------|-------------|-------|
| P= _____, Н;                    d= _____ м |              |  |                         |             |              |             |                         |             |       |
|                                            | L= _____, м  |  |                         |             |              | L= _____, м |                         |             |       |
| Експеримент                                | $\nu_1$ , Гц |  | $\nu_1$ ,м/с            |             | $\nu_1$ , Гц |             | $\nu_1$ ,м/с            |             |       |
|                                            | $\nu_2$ , Гц |  | $\nu_2$ ,м/с            |             | $\nu_2$ , Гц |             | $\nu_2$ ,м/с            |             |       |
|                                            | $\nu_3$ , Гц |  | $\nu_3$ ,м/с            |             | $\nu_3$ , Гц |             | $\nu_3$ ,м/с            |             |       |
|                                            |              |  | $\nu_{\text{сєр}}$ ,м/с |             |              |             | $\nu_{\text{сєр}}$ ,м/с |             |       |
|                                            | Розрахунок   |  |                         | $\nu$ , м/с | _____        |             |                         | $\nu$ , м/с | _____ |

8. Підставивши у формулу (2) отримані значення резонансних частот, обрахувати швидкість хвилі в струні для різних дослідів. Знайти середнє значення швидкості при даному натягу струни. Оцінити похибку вимірювань швидкості. При цьому можна використати результати прешого досліду. Похибка у вимірюванні власних частот коливань струни дорівнює половині ціни поділки емулятора генератора (різниця двох значень поля 5, рис. 2, що слідує одне за одним).
9. Змінити довжину струни, у результаті зміниться набір власних частот. Провести обрахунки згідно пп. 4 — 8 при інших довжинах.
10. За формулою (3) розрахувати теоретичні значення швидкості хвилі в струні при різних натягах. (розрахунки проводити в системі СІ; густина міді  $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) оцінити похибку таких розрахунків.
11. У висновку порівняти виміряні та обраховані значення швидкості.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому суть явища резонансу?
2. Дайте визначення довжини хвилі та її частоти.
3. Що називають стоячою хвилею.
4. Яка роль магніту у даному досліді.

Лабораторна робота № 2  
**ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ ТА  
ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ  
РЕЗОНАНСУ**

***Мета роботи:***

Ознайомитися з явищем виникнення стоячих звукових хвиль, визначити довжину звукової хвилі та швидкість поширення звуку в повітрі.

***Прилади і матеріали:***

1) труба з рухомим поршнем; 2) комп'ютер з пакетом програм WaveTools Version 1.0; 3) телефон; 4) мікрофон; 5) вимірювальна лінійка.

**ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Процес поширення коливань у будь-якому середовищі називається хвилею. У результаті поширення хвилі частинки, які утворюють середовище, здійснюють коливання біля положення рівноваги.

Якщо в середовищі поширюється одночасно декілька хвиль, то коливання частинок виявляються геометричною сумою коливань, які здійснювали б частинки при поширенні кожної із хвиль окремо. Це твердження називається принципом суперпозиції (накладання) хвиль.

У випадку, коли коливання, обумовлені окремими хвилями, в кожній точці середовища мають постійну в часі різницю фаз, хвилі називаються когерентними. Очевидно, що когерентними можуть бути лише хвилі, що мають однакову частоту.

При додаванні когерентних хвиль виникає явище інтерференції, яке полягає в тому, що коливання в одних точках підсилюються, а в інших послабляють один одного.

Цікавий випадок інтерференції спостерігається при накладенні двох зустрічних хвиль із однаковою амплітудою й різницею фаз, що дорівнює  $\pi/2$ . Коливальний процес, що виникає в результаті цього, називається стоячою хвилею. Практично стоячі хвилі виникають при відбитті хвиль від перешкод. Падаюча на перешкоду хвиля (рис. 1,1) та біжуча їй назустріч відбита (рис. 1, 2), накладаючись одна на одну, утворюють стоячу хвилю. Стоячі хвилі характеризуються точками, в яких коливання відсутні (точки А на рис. 1), – вузлами, і точками,

амплітуда коливань у яких максимальна (точки В на рис. 1) – пучностями.

Коливання в усіх точках стоячої хвилі, що лежать між двома сусідніми вузлами, відбувається з різними амплітудами, але однаковими фазами. Відстань між сусідніми вузлами або пучностями

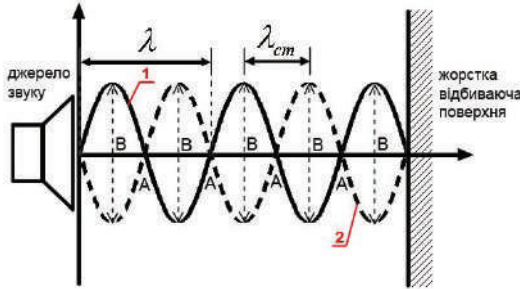


Рис. 1. Хвиля поширюється вздовж вісі  $Ox$ , вздовж вісі  $Oy$  відкладають величину зсуву точок.

називається довжиною стоячої хвилі ( $\lambda_{cm}$ ). Довжина біжучої хвилі пов'язана з  $\lambda_{cm}$  співвідношенням:

$$\lambda = 2\lambda_{cm}. \quad (1)$$

## ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Вимірювання проводяться за допомогою комп'ютера, до звукової карти якого підключені телефон та мікрофон, програмного забезпечення, яке емулює роботу звукового генератора та осцилографа, та труби з рухомих поршнем (рис. 2). З виходу звукової карти сигнал синусоїдальної форми, згенерований програмою-емулятором, подається на телефон, що встановлений впритул до відкритого отвору труби. Інший її отвір закритий поршнем, який може переміщуватися, змінюючи довжину стовпа повітря в трубі. Звукова хвиля у трубі утворюється в обмеженому з обох боків стовпі повітря з хвилі, що випромінюється телефоном у трубу, і відбитої від торця поршня, фаза якої змінилася на обернену, оскільки відбиття відбувається від акустично щільнішого середовища. При певних умовах у трубі виникає резонанс.

Резонанс – це явище зростання амплітуди вимушених коливань у коливальній системі при наближенні частоти зовнішньої сили, що збуджує вимушені коливання, до будь-якої з власних частот коливань даної коливальної системи.

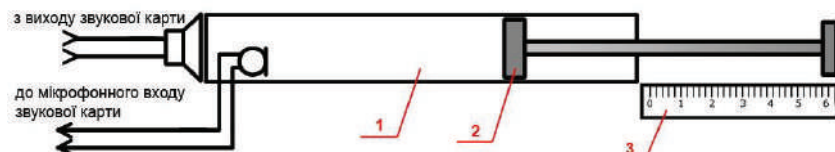


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – труба, 2 – поршень, 3 – вимірювальна лінійка. Телефон, мікрофон та спосіб їх підключення позначені елементом електричної схеми.

У даному випадку маємо акустичний резонанс, тобто явище, при якому коливання стовпа повітря в трубі досягають максимальної амплітуди. Це відбувається тоді, коли частота звукових коливань мембрани телефону (зовнішня сила) дорівнює одній з власних частот коливань повітряного стовпа в трубі. Ця частота називається резонансною частотою. При резонансній частоті гучність звучання повітряного стовпа в трубі максимальна.

Мікрофон розташовується поряд з телефоном і підключається до мікрофонного входу звукової карти комп'ютера. Сигнал, що вловлює мікрофон, відображується на екрані віртуального осцилографа. При переміщенні поршня в трубі далі від телефону на екрані осцилографа спостерігаються по чергові вузли стоячої хвилі, коли амплітуда коливань зменшується майже до нуля, та пучності, коли амплітуда синусоїди значно збільшується. Відстань між сусідніми пучностями, яка і є довжиною стоячої хвилі, вимірюється лінійкою за положенням ручки поршня.

Знайшовши з (1) довжину звукової хвилі  $\lambda$ , та знаючи її частоту (задається у програмі-емуляторі звукового генератора), можна визначити швидкість поширення хвилі в повітрі:

$$c = \lambda f. \quad (2)$$

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Перемістити поршень до кінця в напрямку джерела звуку – телефону.
2. Вимірювальну лінійку розмістити впритул до отвору труби, який закритий поршнем.

### 3. Перевірити настройки звукової карти комп'ютера.

Якщо на панелі задач відображується значок регулятора гучності,

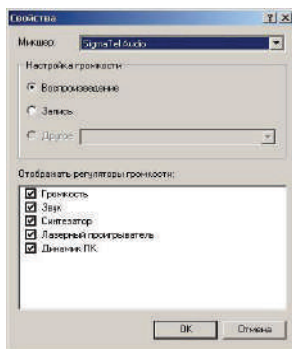


Рис. 3.

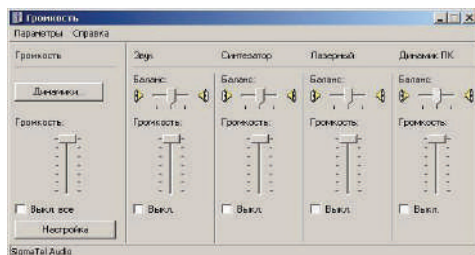


Рис. 4.

наведіть на нього курсор, викличте контекстне меню натисненням правої кнопки миші та виберіть пункт «Настройка аудиопараметров». У вікні «Свойства: Звуки и аудиоустройства» на закладці «Громкость» натисніть кнопку «Дополнительно». У пункті меню «Параметры» вікна, що з'явилось, виберіть «Свойства».

При обраному за замовченням пункті «Воспроизведение» слід пересвідчитись, щоб у полі «Отображать регуляторы громкости» були відмічені «Громкость» та «Звук» (рис. 3) і натиснути кнопку «ОК». У вікні «Громкость», яке відображує мікшер звукового пристрою (рис. 4), встановіть два перших повзунки зліва («Громкость» та «Звук») у крайнє верхнє положення (максимальна гучність); перевірте, щоб біля написів «Выкл. все» та «Выкл.» відповідно не був встановлений прапорець. Переконайтесь, що повзунки «Баланс» обраних пристроїв встановлені у середнє положення. Решту пристроїв бажано відключити (поставити прапорці біля напису «Выкл.»).

Далі знову оберіть «Свойства» пункту меню «Параметры». Відмітивши пункт «Запись» (рис. 5), переконайтесь, що на панелі «Отображать регуляторы громкости» обрано «Микрофон» і натисніть кнопку «ОК».

У вікні, що з'явилося (рис. 6), поставте прапорець біля напису «Вибрати» на панелі «Мікрофон» та встановіть відповідний повзунок у крайнє верхнє положення (максимальна чутливість мікрофонного входу звукової карти). Решта пристроїв відключаться автоматично. Переконайтесь, що повзунок «Баланс» даного пристрою встановлений у середнє положення. Тепер можна закрити всі вікна настройки аудіопараметрів.

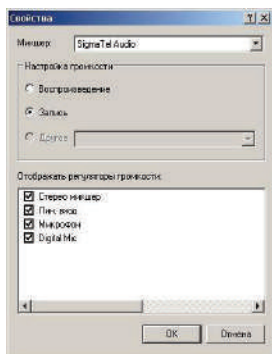


Рис. 5.

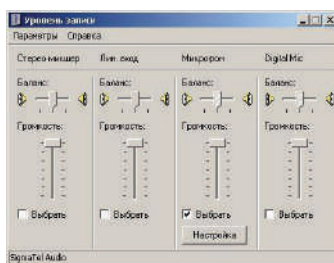


Рис. 6.

Якщо значок регулятора гучності на панелі задач відсутній, слід перейти до панелі керування («Пуск» → «Настройка» → «Панель управления») та відкрити «Звуки и аудиоустройства». Далі виконати дії описані вище.

4. Запустити програми Signal Generator (віртуальний звуковий генератор) та Oscilloscope (осцилограф) з пакету програм WaveTools Version 1.0.

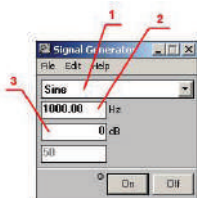


Рис. 7. Програма-емулятор звукового генератора

5. У робочому полі програми Signal Generator вибрати синусоїдальну форму сигналу – Sine (рис. 7, 1), частоту  $f$ , яку вкаже викладач (рис. 7, 2), максимальну гучність звуку – 0 дБ (рис. 7, 3) та натиснути кнопку «On». При правильному виконанні вказівок пункту 3 телефон почне випромінювати звук.

6. Натиснути кнопку «Run» вікна програми Oscilloscope. У робочому полі програми-емулятора встановити такий масштаб по вертикальній вісі (амплітуда) (рис. 8, 1), щоб на екрані віртуального осцилографа розмах синусоїди у початковому положенні поршня становив від третини до половини екрану «приладу». Масштаб по горизонтальній вісі (час) (рис. 8, 2) вибрати так, щоб на екрані

відображувалися 4-5 періодів коливань. Оскільки використовується лише один канал, зі списку 3 на рис. 8 слід вибрати Ch. 1 або Ch. 2. Переміщуючи відповідний обраному каналу повзунок (рис. 8, 4), встановити відображуваний сигнал посередині екрана віртуального осцилографа.

7. Повільно та рівномірно переміщуючи поршень далі від телефону, фіксувати точки різкого зростання амплітуди на екрані віртуального осцилографа та на слух. За допомогою лінійки за положеннями ручки поршня визначити відстань між кожною парою сусідніх максимумів (пучностей) – довжину стоячої хвилі  $\lambda_{cm}$ .

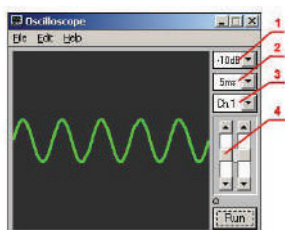


Рис. 8. Програма-емулятор електронного осцилографа.

8. Довжину звукової хвилі  $\lambda$  визначити за формулою (1).
9. За формулою (2) визначити швидкість звуку в повітрі.
10. Виміряти температуру повітря в аудиторії та розрахувати теоретичне значення швидкості звуку за формулою  $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ .
11. Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю 1.

Таблиця 1

| Експеримент      |                           |                    |               |                     |                     |                            | Розрахунок |                     |
|------------------|---------------------------|--------------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------------|------------|---------------------|
| $f$ , Гц         | Номери сусідніх пучностей | $\lambda_{cm}$ , м | $\lambda$ , м | $\Delta\lambda$ , м | $c$ , $\frac{м}{с}$ | $\Delta c$ , $\frac{м}{с}$ | $T$ , °C   | $c$ , $\frac{м}{с}$ |
|                  |                           |                    |               |                     |                     |                            |            |                     |
|                  |                           |                    |               |                     |                     |                            |            |                     |
|                  |                           |                    |               |                     |                     |                            |            |                     |
|                  |                           |                    |               |                     |                     |                            |            |                     |
| Середні значення |                           |                    |               |                     |                     |                            |            |                     |

12. Обчислити абсолютні похибки вимірювань  $\lambda$  та  $c$ . Кінцевий результат записати у вигляді:  $\lambda = \lambda_{сер} \pm \Delta\lambda_{сер}$ ,  $c = c_{сер} \pm \Delta c_{сер}$ .

13. З урахуванням абсолютної похибки порівняти експериментальне та розрахункове значення швидкості поширення звукової хвилі в повітрі.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке стояча хвиля? Що таке вузол, пучність стоячої хвилі?
2. Яким процесом з точки зору термодинаміки слід вважати процес поширення звуку в повітрі?
3. Як довести, що вузли і пучності стоячих хвиль в трубі не переміщуються?
4. Як обчислити швидкість звуку в газі із інших величин, що характеризують даний газ?
5. Як залежить швидкість поширення звуку в повітрі від температури?
6. Чи залежить швидкість поширення звукових хвиль від частоти коливань джерела? Пояснити.

### Лабораторна робота № 3

#### ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ ТА ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ В ПОВІТРІ ФАЗОВИМ МЕТОДОМ

**Мета роботи:**

Визначити довжину звукової хвилі та швидкість поширення звуку в повітрі фазовим методом.

**Прилади і матеріали:**

1) динамік з акустичним оформленням;  
2) мікрофон; 3) підсилювач електричних сигналів;  
4) комп'ютер з програмним забезпеченням Visual Analyser v 8.10;  
5) вимірвальна лінійка.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Звук за своєю фізичною сутністю являє собою хвильовий процес, що поширюється в середовищі у вигляді збурення речовини і переносить у різних напрямках енергію цих збурень.

Найпростіший математичний опис має хвильовий процес у формі гармонічних коливань стану середовища, що поширюються в одному напрямку. У повітрі такого роду збурення середовища являють собою ущільнення й розрідження газу, що змінюються за гармонічним

законом, в напрямку поширення звукової хвилі. Органами слуху вони сприймаються як звук певної гучності (інтенсивності) і тону (частоти).

Нехай деяка частинка  $O$  на осі  $OX$  (рис. 1) є джерелом збурень, що змінюються за гармонічним законом:

$$\xi(0, t) = A \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

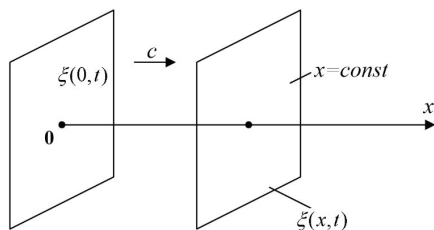


Рис. 1. До виведення рівняння хвилі

Ці коливання частинки в результаті пружної взаємодії негайно передаються сусідній частинці, від неї – наступній частинці тощо. Цей процес поширення взаємодій відбувається з кінцевою швидкістю  $c$ , внаслідок чого довільна частинка на осі  $OX$  буде залучена в коливальний рух із запізненням на час  $\tau = \frac{x}{c}$ , тобто коливання будь-якої точки, розташованої на осі  $OX$  з такою ж фазою коливань, що й у точці  $O$  запишуться у вигляді:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos \left( \omega t - \frac{\omega}{c} x \right). \quad (2)$$

У такому найпростішому описі хвильового процесу передбачається, що, втрат енергії при передачі впливів від однієї частинки до іншої немає, тому амплітуда коливань  $A$  всіх часток середовища однакова.

Для опису хвильового процесу поширення звуку в повітрі замінімо точкове джерело коливань на нескінченну плоску мембрану, розташовану перпендикулярно осі  $OX$  у її початку.

Всі точки цієї мембрани в напрямку осі  $OX$  коливаються з амплітудою  $A$  та частотою  $\omega$  за законом (1) і створюють ущільнення й розрідження прилягаючого шару повітря, які відповідно до рівняння (2) виникнуть у всьому просторі уздовж напрямку  $OX$ . Хвиля, у якій коливання відбуваються з однією і тією ж частотою, називається *монохроматичною*.

У рівнянні (2) аргумент функції  $\cos$  є фаза коливань хвилі. Для фіксованого значення  $x$  фаза коливань всіх точок площини  $x = \text{const}$  однакова. Ця поверхня рівних фаз називається *фазовою поверхнею*.

Якщо фазова поверхня – площина, то хвиля називається *плоскою*. Фазова поверхня може бути сферою або циліндром, відповідно хвилі називаються сферичними або циліндричними. Зобразимо залежність коливань у хвилі для двох фіксованих моментів часу  $t_1$  та  $t_1 + \Delta t > t_1$  (рис. 2).

Для цих двох моментів часу виділимо у хвилі будь-які дві найближчі точки з однаковою фазою коливань, наприклад, точки  $x_1$  та  $x_2$  і запишемо для них рівняння рівності фаз:

$$\omega t_1 - \frac{\omega}{c} x_1 = \omega(t_1 + \Delta t) - \frac{\omega}{c} x_2,$$

звідки маємо

$$\frac{\omega}{c} (x_2 - x_1) = \omega(t_1 + \Delta t - t_1),$$

$$\frac{\omega}{c} \Delta x = \omega \Delta t,$$

де  $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  – фазова швидкість, тобто швидкість переміщення фази коливаннях хвилі.

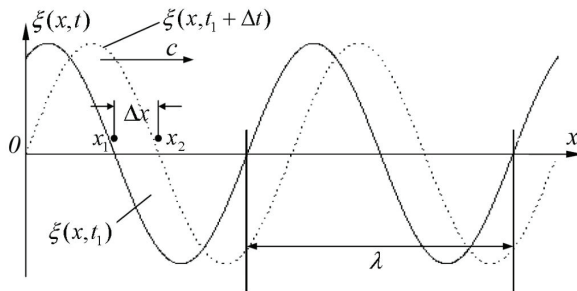


Рис. 2. Залежності коливань у хвилі для двох фіксованих моментів часу  $t_1$  та  $t_1 + \Delta t > t_1$

З рівняння (2) відповідно до рис. 2 випливає, що фази коливань у хвилі через просторовий період  $\lambda$  відрізняються на  $2\pi$ , тобто маємо:

$$\left( \omega t_1 - \frac{\omega}{c} x \right) - \left( \omega t_1 - \frac{\omega}{c} (x + \lambda) \right) = 2\pi,$$

звідки

$$\frac{\omega}{c} \lambda = 2\pi, \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}.$$

З огляду на те, що циклічна частота  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ , де  $T$  – період коливань, а  $f = \frac{1}{T}$  – частота (Гц), одержимо:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}. \quad (3)$$

Таким чином,  $\lambda$  – відстань, на яку відбудеться переміщення фази коливань за один період, і називається довжиною хвилі. Вона визначається фазовою швидкістю хвилі та її частотою. Співвідношення (3) може бути використане для визначення швидкості звуку, якщо виміряти частоту  $f$  та довжину хвилі  $\lambda$ :

$$c = \lambda f. \quad (4)$$

Рівняння плоскої монохроматичної хвилі (2) може бути представлене в іншій формі. Для цього вводиться поняття хвильового числа

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{cT} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (5)$$

З урахуванням (5) рівняння (2) запишеться у вигляді:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) = A \cos(\omega t - kx). \quad (6)$$

Хвильовому числу  $k$  може бути поставлений у відповідність хвильовий вектор  $\vec{k} = k \left( \frac{\vec{c}}{c} \right)$ , де  $\left( \frac{\vec{c}}{c} \right)$  – має зміст одиничного вектора, що співпадає за напрямом з напрямком поширення хвилі. Якщо вісь  $OX$  вибирати в напрямку поширення, то рівняння хвилі запишеться у вигляді:

$$\xi(\vec{x}, t) = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{x}). \quad (6')$$

Цьому рівнянню відповідає рівняння руху, що одержало назву хвильового рівняння:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (7)$$

Дане рівняння, записане для звукової хвилі у щільностей-розряджень газу (тиску або концентрації частинок) визначає швидкість поширення звуку:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (8)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт Пуассона (показник адіабати),  $R$  – універсальна газова стала,  $\mu$  – молярна маса газу,  $T$  – абсолютна температура.

Для повітря при нормальних умовах ( $T=300\text{ K}$ ), вважаючи  $\gamma=1,4$ ;  $\mu=0,029\text{ кг/моль}$ , розрахунок за формулою (8) дає значення швидкості звуку  $c=347\text{ м/с}$ .

Визначити швидкість звуку в повітрі можна багатьма способами. Один із них – фазовий метод визначення швидкості, який полягає у визначенні довжини звукової хвилі заданої частоти шляхом спостережень на екрані осцилографа змін фігур Ліссажу, та знаходженні швидкості поширення звуку в повітрі за формулою (4).

*Фігури Ліссажу* утворюються в результаті накладання сигналів двох взаємно перпендикулярних коливань. Їх можна спостерігати на екрані віртуального осцилографа, якщо подавати на обидва канали входу звукової карти комп'ютера (режим стерео) одночасно різні змінні напруги.

Розглянемо результат додавання взаємно перпендикулярних гармонічних коливань однакової частоти. Відповідне відхилення світлової точки на екрані осцилографа по осям координат  $X$  та  $Y$  вважаємо пропорційним прикладеним напругам  $U_X$  та  $U_Y$ , кожне з яких можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned}x &= A \cos \omega t, \\y &= B \cos(\omega t + \varphi).\end{aligned}\tag{9 і 10}$$

Знайдемо результуючий рух у явній залежності відхилення у від відхилення  $x$ . Представимо спочатку (10) за допомогою тригонометричного розкладу у формі:

$$y = B(\cos \omega t \cdot \cos \varphi - \sin \omega t \cdot \sin \varphi).\tag{11}$$

З (9) виражаємо  $\cos \omega t = \frac{x}{A}$ , і через нього:

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2}.$$

Ці вирази підставимо в (11):

$$y = \frac{B}{A} \cos \varphi \cdot x - B \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2} \cdot \sin \varphi.\tag{12}$$

Виділивши в одній частині рівності квадратний корінь та решту доданків іншої частини, позбувшись від кореня шляхом піднесення до квадрату, після деяких алгебраїчних перетворень одержимо рівняння:

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 - 2 \frac{xy}{AB} \cos \varphi + \left(\frac{y}{B}\right)^2 = \sin^2 \varphi.\tag{13}$$

Це рівняння еліпса, що для фазового зсуву  $\varphi = 0$  та  $\varphi = \pi$  вироджується в рівняння прямої або з додатним нахилом ( $\varphi = 0$ ):

$$y = \frac{B}{A}x, \quad (14)$$

або з від'ємним нахилом ( $\varphi = \pi$ ):

$$y = -\frac{B}{A}x. \quad (15)$$

Для всіх інших значень  $\varphi$  фігура матиме форму еліпса (при амплітудах  $A=B$  – коло). Таким чином при безперервній зміні фази коливань від  $0$  до  $2\pi$  відбудеться послідовна трансформація фігури Ліссажу від прямої з додатним нахилом (14) через ряд фігур у формі еліпса з переходом до прямої з від'ємним нахилом (15) при  $\varphi = \pi$  і після проходження послідовності еліпсів повернення знову до прямої (15) (рис. 3).

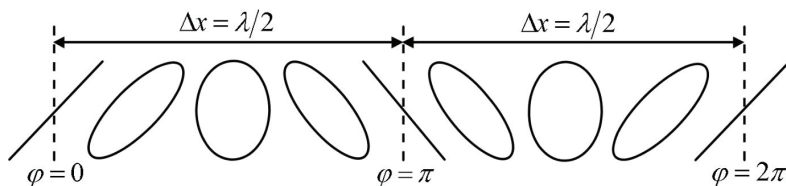


Рис. 3. Трансформація фігури Ліссажу.

Найзручніше фіксувати форму фігури у вигляді прямої, коли фазовий зсув кратний  $\pi$ . При цьому перехід від прямої при  $\varphi = 0$  до прямої при  $\varphi = \pi$  відповідає переміщенню мікрофона в лабораторній установці на  $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$ . Таким чином, фіксуючи за допомогою лінійки низку послідовних положень мікрофона, при яких на екрані осцилографа утвориться пряма додатного й від'ємного нахилів, проводяться багаторазові виміри довжини хвилі:

$$\lambda_i = 2\Delta x_i = 2(x_i - x_{i-1}). \quad (16)$$

## ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка для визначення швидкості звуку фазовим методом складається з комп'ютера, на якому встановлена програма Visual Analyser v 8.10. До звукової карти машини через підсилювачі сигналів підключені динамік та мікрофон (рис. 4).

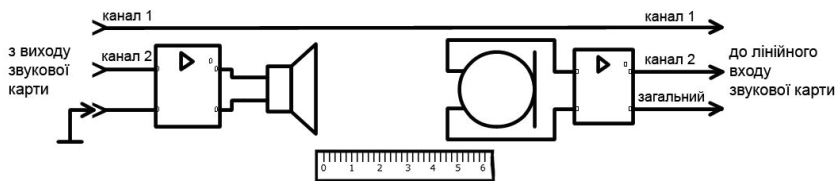


Рис. 4. Схема установки для визначення швидкості звуку фазовим методом

Створений за допомогою вбудованого у Visual Analyser v 8.10 генератора гармонічний сигнал поступає на вихід звукової карти. Цей генератор дозволяє випромінювати різні сигнали у різні звукові канали. В даному випадку форма та частота сигналів обох каналів будуть однаковими, амплітуда ж для збільшення інформативності експерименту для одного з каналів буде коригуватися.

З першого каналу сигнал через підсилювач надходить до динаміку в акустичному оформленні (акустичної системи), який випромінює звукову хвилю заданої генератором частоти. Ця хвиля вловлюється мікрофоном і після підсилення подається у вигляді електричного сигналу до першого каналу лінійного входу звукової карти. З другого каналу сигнал надходить безпосередньо на другий канал того ж лінійного входу.

Таким чином сигнал другого каналу буде приходити на вхід звукової карти без зсуву фази, а сигнал першого каналу – з деяким зсувом фази, обумовленим певною відстанню між динаміком та мікрофоном. А отже, при ввімкненому режимі «ХУ» віртуального осцилографа на його екрані будуть спостерігатися фігури Ліссажу – еліпси (оскільки частота сигналу обох каналів однакова), які при відсуванні мікрофону далі від динаміку будуть переходити по чергову то в прямі, то знову в еліпси (рис. 3).

Динамік та мікрофон бажано розмішувати на лабораторному столі на одній осі. Лінійка розташовується паралельно цій осі впритул до бокових кришок коробок з динаміком та мікрофоном. За її допомогою вимірюються відстані між динаміком та мікрофоном, при яких на екрані осцилографа спостерігаються прямі лінії.

**Зауваження!** Сигнал з мікрофону потрібно підсилювати тому, що при проведенні лабораторної роботи використовується менш чутливий, ніж мікрофонний, лінійний вхід звукової карти. Використовувати для дослідів мікрофонний вхід забороняється, оскільки до одного з каналів сигнал надходить безпосередньо з виходу

звукової карти, його амплітуда може бути зависокою для мікрофонного входу і звукова карта може вийти з ладу.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Перевірити правильність підключення експериментальної установки відповідно до опису наведеного вище.

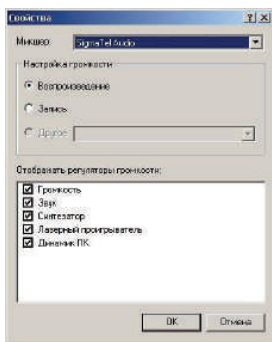


Рис. 5.

2. Увімкнути підсилювачі (зібрані у одному корпусі) у мережу змінного струму 220 В.

3. Перевірити настройки звукової карти комп'ютера. Якщо на панелі задач відображується значок регулятора гучності, наведіть на нього курсор, викличте контекстне меню натисненням правої кнопки миші та виберіть пункт «Настройка аудиопараметров». У вікні «Свойства: Звуки и аудиоустройства» на закладці «Громкость» натисніть кнопку «Дополнительно». У пункті меню «Параметры» вікна, що з'явилось,

виберіть «Свойства».

При обраному за замовченням пункті «Воспроизведение» слід пересвідчитись, щоб у полі «Отображать регуляторы громкости» були відмічені «Громкость» та «Звук» (рис. 5) і натиснути кнопку «ОК». У вікні «Громкость», яке відображує мікшер звукового пристрою (рис. 6), встановіть

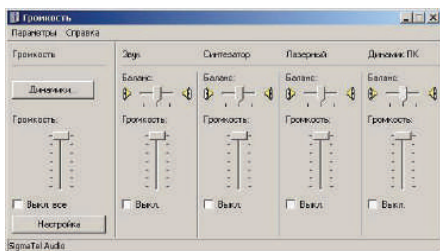


Рис. 6.

два перших повзунки зліва («Громкость» та «Звук») у крайнє верхнє положення (максимальна гучність); перевірте, щоб біля написів «Выкл. все» та «Выкл.» відповідно не був встановлений прапорець. Переконайтесь, що повзунки «Баланс» обраних пристроїв встановлені у середнє

положення. Решту пристроїв бажано відключити (поставити прапорці біля напису «Выкл.»).

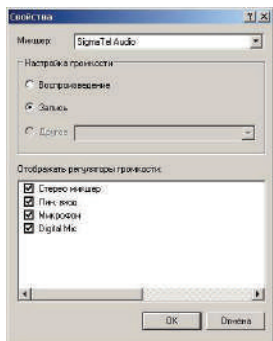


Рис. 7.

Далі знову оберіть «Свойства» пункту меню «Параметры». Відмітивши пункт «Запись» (рис. 7), переконайтесь, що на панелі «Отображать регуляторы громкости» обрано «Микрофон» і натисніть кнопку «OK».

У вікні, що з'явилося (рис. 8), поставте прапорець біля напису «Выбрать» на панелі «Микрофон» та встановіть відповідний повзунок у крайнє верхнє положення (максимальна чутливість мікрофонного входу звукової карти). Решта пристроїв відключаться автоматично.

Переконайтесь, що повзунок «Баланс» даного пристрою встановлений у середнє положення. Тепер можна закрити всі вікна настройки аудіопараметрів.

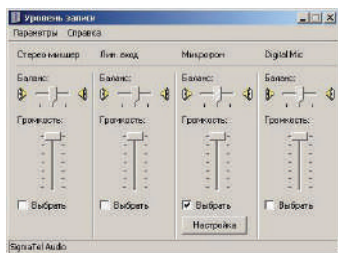


Рис. 8.

Якщо значок регулятора гучності на панелі задач відсутній, слід перейти до панелі керування («Пуск» → «Настройка» → «Панель управления») та відкрити «Звуки и аудиоустройства». Далі виконати дії описані вище.

4. Запустити програму Visual Analyser v 8.10.

5. Викликати генератор сигналів натисненням кнопки «Wave» у верхній частині вікна програми Visual Analyser. Для ініціалізації генератора сигналів натисніть кнопку «Wave» у верхній частині вікна програми Visual Analyser. Далі виконати дії описані вище.

У вікні, що з'явилося (рис. 9), перевірити чи обидва звукові канали обрані (біля написів «Enable» у правому кінці поля кожного каналу повинні бути встановлені прапорці); обрати синусоїдальну форму сигналу (Sine)

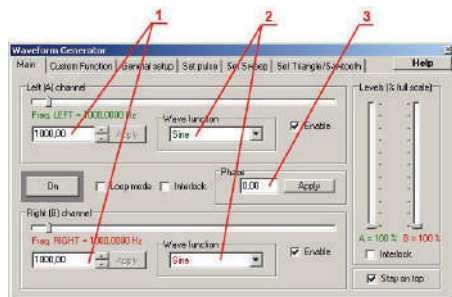


Рис. 9.

для обох каналів (рис. 9, 2); встановити частоту, яку задав викладач (рис.9, 1), підтвердити натисненням кнопки «Apply» праворуч від вікна для введення значення частоти. Для початку встановити у обох каналах максимальну гучність звуку, перемістивши обидва повзунки

у правій частині екрану у крайнє нижнє положення (напис під повзунком має змінитися на  $A=100\%$ ,  $B=100\%$ ). Прапорець біля напису «Interlock» нижче має бути відсутній. Початкового зсуву фаз між каналами бути не повинно, а отже прослідкуйте, щоб у полі «Phase» було встановлене нульове значення (рис. 9, 3). Для початку генерації сигналу натисніть кнопку «On». При правильному виконанні попередніх дій динамік почне випромінювати звук заданої частоти.

6. У головному вікні програми Visual Analyser в правому нижньому куті у полі «Channel(s)» оберіть «Ch A and B». Запустіть емулятор осцилографа натисненням кнопки «On». На екрані повинні з'явитися дві синусоїди. На рисунку 10 верхня синусоїда відповідає сигналу, що надходить до правого каналу. Це сигнал, який без зсуву фази поступає з виходу звукової карти комп'ютера на вхід. Нижня синусоїда – сигнал лівого каналу, що вловлюється мікрофоном. З рисунку видно, що для цього сигналу спостерігається деякий зсув фази відносно сигналу з правого каналу.

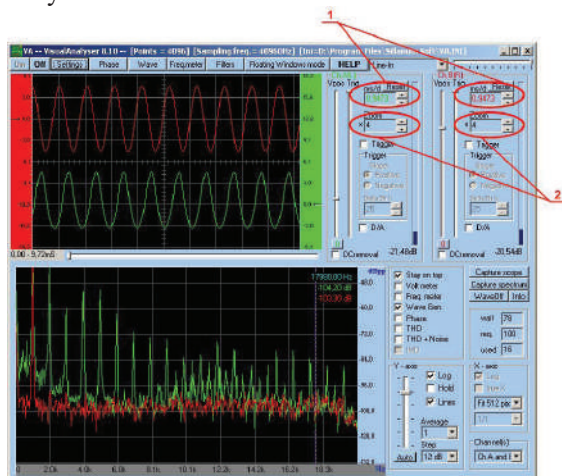


Рис. 10.

Для зручності спостереження приведіть візуальне відображення вхідних сигналів до такого ж вигляду як на рис. 10. Для цього спочатку встановіть однаковий масштаб по горизонтальній (рис. 10, 1) та по вертикальній (рис. 10, 2) осі. Далі при відстані між динаміком та мікрофоном 30-40 см потрібно добитися приблизно однакової амплітуди відображуваного сигналу. Для цього потрібно зменшити у

вікні генератора коливаний рівень сигналу, що з виходу звукової карти надходить безпосередньо на вхід (рис. 11). В нашому випадку – це канал *B* (*Ch B*, правий).

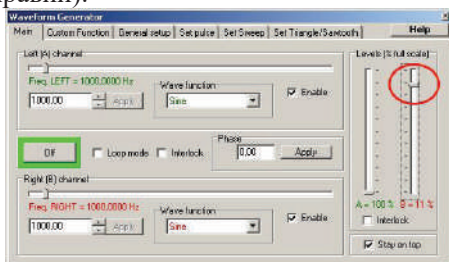


Рис. 11.

Тепер можна переходити до спостереження фігур Ліссажу. Для цього у полі «*Channel(s)*» головного вікна програми Visual Analyser оберіть «*XY*». На екрані віртуального осцилографа з'явиться фігура у формі еліпса (рис. 12). Для зручності можна змінювати її розміри зміною масштабу «*Zoom*» (рис. 10,2) (значення для обох каналів повинні бути однаковими).

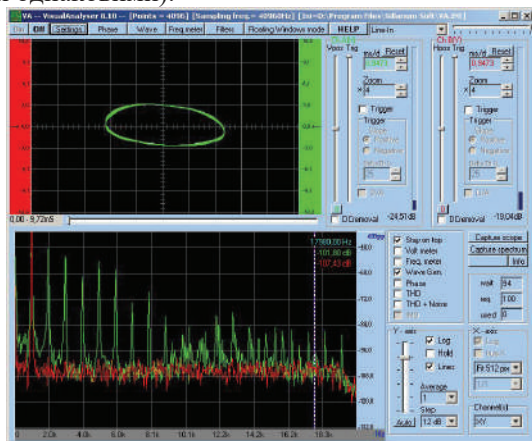


Рис. 12.

- Встановіть мікрофон на відстані 3-5 см від динаміка. Плавню відсуваючи мікрофон від джерела звуку спостерігайте за зміною форми фігури Ліссажу на екрані емулятора осцилографа. При утворенні на екрані прямої лінії фіксуйте відстань від динаміка до мікрофона  $r_i$ .

8. Довжину звукової хвилі  $\lambda$  визначити як подвійний шлях, який проходить при переміщенні мікрофон при кожній зміні зсуву фази на  $\pi$  (рис. 3), за формулою (16).
9. Швидкість поширення звуку в повітрі розрахувати за формулою (4).
10. Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю 1.

Таблиця 1

| $f, \text{Гц}$   | $x_i, \text{м}$ | $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \text{м}$ | $\lambda, \text{м}$ | $\Delta \lambda, \text{м}$ | $c, \frac{\text{м}}{\text{с}}$ | $\Delta c, \frac{\text{м}}{\text{с}}$ |
|------------------|-----------------|----------------------------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
|                  |                 |                                        |                     |                            |                                |                                       |
|                  |                 |                                        |                     |                            |                                |                                       |
|                  |                 |                                        |                     |                            |                                |                                       |
|                  |                 |                                        |                     |                            |                                |                                       |
| Середні значення |                 |                                        |                     |                            |                                |                                       |

11. Обчислити абсолютні похибки вимірювань  $\lambda$  та  $c$ . Кінцевий результат записати у вигляді:  $\lambda = \lambda_{\text{сер}} \pm \Delta \lambda_{\text{сер}}$  і  $c = c_{\text{сер}} \pm \Delta c_{\text{сер}}$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Записати формулу плоскої біжучої хвилі.
2. Чому дорівнює хвильове число? Що таке довжина хвилі?
3. Що називається фазовою і груповою швидкостями звуку?
4. Дати означення дисперсії звуку.
5. Чи спостерігається дисперсія звуку в газах? Пояснити.
6. Що таке фігури Ліссажу?

### Лабораторна робота № 4

### ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ, МОДУЛЯ ЮНГА Й ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ

#### Мета роботи:

Використовуючи динамічний метод вимірювання характеристик деформацій, визначити модуль Юнга, швидкість поширення звуку в металевих стержнях.

**Прилади і матеріали:** 1) набір металевих стержнів; 2) комп'ютер з встановленими програмами SweepGen та Visual Analyser; 3) два телефони.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Деформацією твердого тіла називається зміна форми або об'єму тіла під дією зовнішніх сил. Деформації, які повністю зникають після припинення зовнішніх впливів, називаються пружними. Деформації, які не зникають після припинення дії зовнішніх сил, називаються пластичними. Деформації реальних тіл, після припинення дії зовнішніх сил, ніколи повністю не зникають. Однак, якщо залишкові деформації малі, то ними можна знехтувати й розглядати деформації як пружні. Найпростішою деформацією є поздовжнє або однобічне розтягання (стиснення), тобто без урахування зміни поперечних розмірів збільшення (зменшення) довжини, наприклад, стержня під дією зовнішньої сили  $\vec{F}$ , прикладеної уздовж осі стержня.

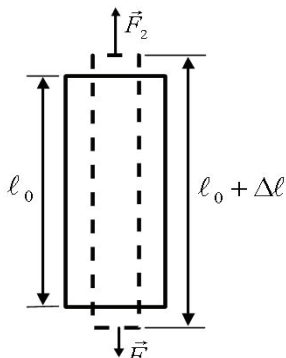


Рис. 1 Стержень та прикладені до нього сили

Розглянемо однорідний стержень довжиною  $\ell$  та площею поперечного перерізу  $S$ , до кінців якого прикладені напрямлені вздовж його осі сили  $\vec{F}_1$  та  $\vec{F}_2$  ( $F_1=F_2=F$ ), у результаті чого довжина стержня зміниться на величину  $\Delta\ell$  (рис. 1). Деформацію розтягання (стиснення) характеризують абсолютним

$$\Delta\ell = \ell - \ell_0 \quad (1)$$

та відносним

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad (2)$$

видовженнями, де  $\ell_0$  – початкова довжина стержня,  $\ell$  – кінцева довжина.

Характеристикою стану деформованого тіла є механічне напруження або просто напруження  $\sigma$  – відношення модуля сили пружності  $\vec{F}$  до площі поперечного перерізу  $S$  стержня

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (3)$$

Досвід показує, що при малих деформаціях напруження прямо пропорційне відносному видовженню  $\varepsilon$ . Ця залежність називається законом Гука і записується так:

$$\Delta\ell = E|\varepsilon|. \quad (4)$$

Відносне видовження  $|\varepsilon|$  приводиться по модулю, оскільки закон Гука справедливий як для деформації розтягання, так і деформації стиснення, коли  $\Delta\ell \sim 0$ . Підставивши (2) і (4) в (3), одержимо

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta\ell}{\ell_0}. \quad (5)$$

Коефіцієнт пропорційності  $E$ , що входить у закон Гука, називається модулем поздовжньої деформації або модулем Юнга. З (5) модуль Юнга чисельно дорівнює нормальному напруженню  $\sigma$ , при якому довжина стержня змінюється у два рази ( $\Delta\ell = \ell_0$ ). Для металів величина модуля Юнга лежить у діапазоні  $10^{10}$ – $10^{11}$  Па.

Приведемо (5) до вигляду

$$F = \frac{SE}{\ell_0} |\Delta\ell|. \quad (6)$$

Позначимо  $SE / \ell_0 = k$ . Тоді

$$F = k|\Delta\ell|, \quad (7)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності.

Згідно (7), видовження стержня при пружній деформації прямо пропорційне діючій на стержень силі.

Для визначення величини модуля Юнга користуються або вимірюваннями пружних деформацій при статичних випробуваннях матеріалу, або різними динамічними способами, заснованими на залежності частоти вимушених коливань від модуля пружності (від модуля Юнга при поздовжніх коливаннях та коливаннях при вигині й від модуля зсуву при крутильних коливаннях). При статичному методі при заданому напруженні вимірюється відносне видовження та за формулою (5) обчислюється модуль Юнга. При динамічному методі вимірюється швидкість поширення пружних хвиль у тілі, густина тіла та за відповідними формулами обчислюється модуль Юнга.

Модуль пружності при малих деформаціях можна вважати практично незалежним від швидкості деформації. Про це свідчить рівність результатів, отриманих статичними й динамічними методами.

У лабораторній роботі використовується один з динамічних методів – резонансний метод вимірювання модуля Юнга.

При виконанні роботи в металевому стержні, закріпленому посередині, збуджуються за допомогою звукового генератора поздовжні коливання. У стержні утвориться стояча хвиля – на вільному кінці стержня виникає пучність коливань, а в точці закріплення – вузол. При резонансній частоті на половині довжини стержня укладається непарне число чвертей довжин хвиль, тобто

$$\frac{\ell}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (8)$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$ . При резонансі  $k$  приймається рівним нулю.

Швидкість поширення пружних хвиль  $c$  у стержні пов'язана із частотою коливань співвідношенням

$$c = \lambda f. \quad (9)$$

Тоді (при  $k = 0$ )

$$c = 2\ell f_{\text{рез}}. \quad (10)$$

Якщо довжина стержня набагато більша його поперечних розмірів, то швидкість поширення поздовжніх коливань у стержні

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (11)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу стержня.

Звідси

$$E = c^2 \rho. \quad (12)$$

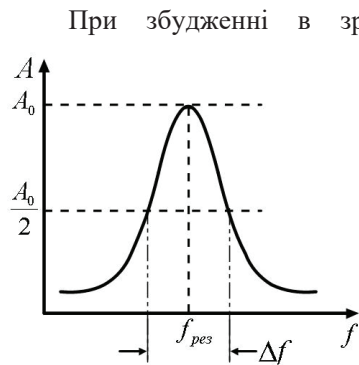


Рис. 2. Резонансна крива

При збудженні в зразку вимушених коливань частина коливальної енергії перетворюється в енергію хаотичного руху. Цей процес називається внутрішнім тертям. Мірою внутрішнього тертя є добротність коливальної системи  $2\pi \frac{W}{\Delta W}$ , яка пов'язана з відношенням  $\frac{w}{\Delta w}$ , що характеризує гостроту резонансної кривої залежності амплітуди  $A$  вимушених коливань від частоти коливань  $f$  (рис. 2) співвідношенням

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = \frac{w}{2\Delta w} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} = \frac{2\pi \cdot f_{рез}}{2\pi \cdot \Delta f} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2\pi} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{f_{рез}}{\Delta f}, \quad (13)$$

де  $\Delta W$  – енергія, що розсіюється за період коливань;  $W$  – запасена енергія в момент досягнення максимальної деформації (при резонансі);  $\Delta w = 2\pi \cdot \Delta f$  – різниця значень  $w_1$  і  $w_2$  циклічної частоти, що відповідають половині амплітуди вимушених коливань  $A_0$  при резонансі (рис. 2).

## ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка складається з комп'ютера, на який встановлені програми-емулятори осцилографа та свіп-генератора гармонічного сигналу, двох телефонів, з яких зняті кришки та мембрани, підключених до виходу звукової карти та до мікрофонного входу та досліджуваних стержнів, до торців яких прикріплені сталеві пластини (рис. 3).

Стержні закріплені на стенді строго посередині їх довжини. Телефони без мембран фактично виконують роль електромагнітів, а

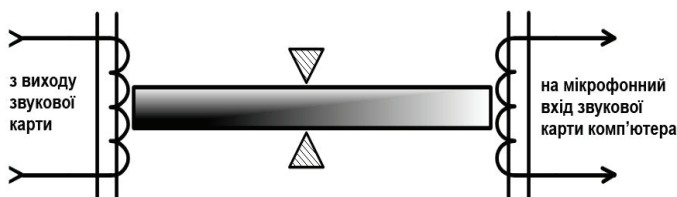


Рис. 3. Схема експериментальної установки

пластинки на кінцях стержнів – мембран, що коливаються. Телефони розташовуються на близькій відстані від торців стержнів (близько 1 мм), але не повинні торкатися їх.

Сигнал створений віртуальним свіп-генератором подається на вихід звукової карти, а далі на телефон, який перетворює електричні коливання в механічні. У стержні збуджуються вимушені коливання, які фіксуються за допомогою іншого телефону і, після перетворення з механічних в електричні, подаються до мікрофонного входу звукової

карти комп'ютера. Отриманий сигнал відображується на екрані віртуального осцилографа.

За допомогою емулятора свіп-генератора можна плавно змінювати частоту звукового сигналу. При наближенні до резонансної частоти стержня гучність звучання стержня та амплітуда сигналу на екрані осцилографа, пропорційна амплітуді вимушених коливань металевого стержня, різко зростає. Визначена резонансна крива амплітуди вимушених коливань від частоти (рис. 2) містить всю необхідну інформацію для оцінки модуля Юнга, швидкості звуку та внутрішнього тертя.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зафіксувати у затискачі металевий стержень (метал вказує викладач) чітко посередині його довжини.
2. Перевірити чи телефони розміщені у відповідності до вимог опису експериментальної установки.
3. Перевірити настройки звукової карти комп'ютера.

Якщо на панелі задач відображується значок регулятора гучності, наведіть на нього курсор, викличте контекстне меню натисненням правої кнопки миші та виберіть пункт *«Настройка*

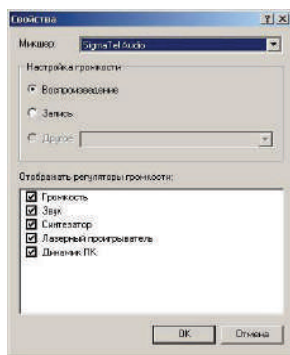


Рис. 4.

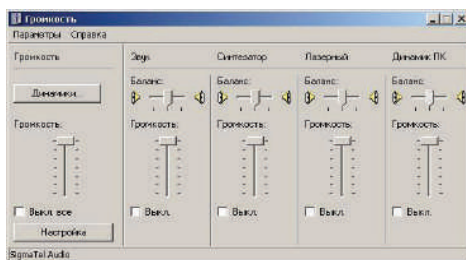


Рис. 5.

аудиопараметров». У вікні *«Свойства: Звуки и аудиоустройства»* на закладці *«Громкость»* натисніть кнопку *«Дополнительно»*. У пункті меню *«Параметры»* вікна, що з'явилося, виберіть *«Свойства»*.

При обраному за замовченням пункті «Воспроизведение» слід пересвідчитись, щоб у полі «Отображать регуляторы громкости» були відмічені «Громкость» та «Звук» (рис. 4) і натиснути кнопку «ОК». У вікні «Громкость», яке відображує мікшер звукового пристрою (рис. 5), встановить два перших повзунки зліва («Громкость» та «Звук») у крайнє верхнє положення (максимальна гучність); перевірте, щоб біля написів «Выкл. все» та «Выкл.» відповідно не був встановлений прапорець. Переконайтесь, що повзунки «Баланс» обраних пристроїв встановлені у середнє положення. Решту пристроїв бажано відключити (поставити прапорці біля напису «Выкл.»).

Далі знову оберіть «Свойства» пункту меню «Параметры». Відмітивши пункт «Запись» (рис. 6), переконайтесь, що на панелі «Отображать регуляторы громкости» обрано «Микрофон» і натисніть кнопку «ОК».

У вікні, що з'явилося (рис. 7), поставте прапорець біля напису «Выбрать» на панелі «Микрофон» та встановить відповідний повзунок у крайнє верхнє положення (максимальна чутливість мікрофонного входу звукової карти). Решта пристроїв відключаться автоматично. Переконайтесь, що повзунок «Баланс» даного пристрою встановлений у середнє положення. Тепер можна закрити всі вікна настройки аудіопараметрів.

Якщо значок регулятора гучності на панелі задач відсутній, слід перейти до панелі керування («Пуск» → «Настройка» → «Панель управления») та відкрити «Звуки и аудиоустройства». Далі виконати дії описані вище.

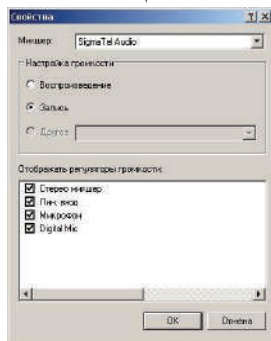


Рис. 6.

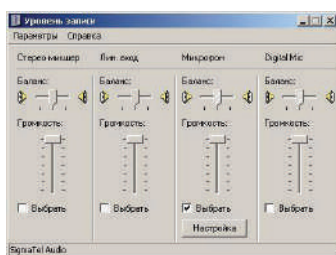


Рис. 7.

4. Запустити програми SweepGen (віртуальний свіп-генератор) та Visual Analyser, який ми будемо використовувати як осцилограф, що дозволяє визначити амплітуду коливань.
5. У лівому верхньому куті програми Visual Analyser натиснути кнопку «On», увімкнувши таким чином віртуальний осцилограф. У правому нижньому куті у полі «Channel(s)» оберіть «Ch A».
6. Визначити резонансну частоту металевого стержня необхідно шляхом підбору за допомогою віртуального свіп-генератора. Потрібно встановити максимальний рівень вихідного сигналу емулятора приладу – 0 дБ (крайнє верхнє положення повзунка 1 на рис. 8). У полі «Sweep Speed» слід для початку вибрати повільне зростання частоти – *Slow* (рис. 8, 2). Обрати межі зростання можна у полі, що знаходиться нижче (рис. 8, 4). Встановіть початкову частоту 3 кГц, а кінцеву – 4 кГц та натисніть кнопку «Start». Якщо всі попередні дії виконані правильно, то металевий стержень почне випромінювати звук слабкої гучності, а на екрані емулятора осцилографа з'явиться сигнал, форма якого близька до синусоїдальної.

Віртуальний свіп-генератор буде повільно збільшувати частоту у вказаних користувачем межах. При наближенні до резонансної частоти гучність звучання стержня суттєво підвищиться, на екрані осцилографа амплітуда коливань значно зросте. Слід бути дуже уважним, адже амплітудна крива дуже крута, і явище резонансу при автоматичній зміні частоти, яка збуджує коливання у стержні, досить короткотривале.

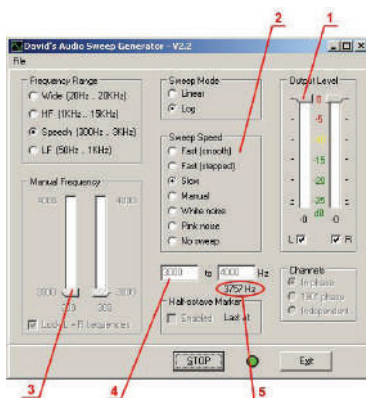


Рис. 8.

Для зручності спостереження сигналу на екрані віртуального осцилографа, слід настроїти масштаб відображення сигналу. Розмах коливань потрібно встановити в межах третини екрану приладу, змінюючи значення у полі «Zoom» (рис. 9, 2). Масштаб по горизонтальній осі (час) встановлюється зміною значень поля «ms/d» (рис. 9, 1).

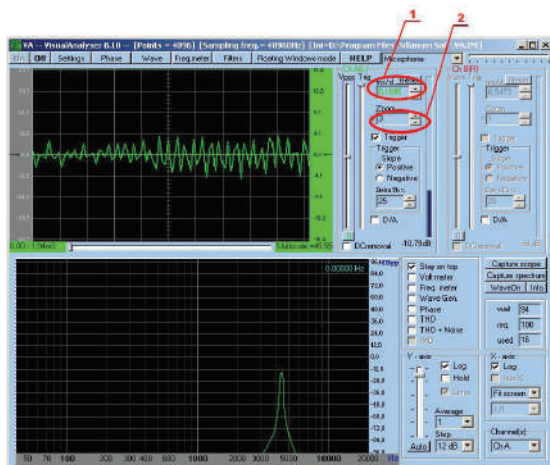


Рис. 9.

Якщо при проходження вказаного частотного діапазону не спостерігалося суттєвого зростання амплітуди коливань та підвищення гучності звучання стержня, то резонансна частота в цьому діапазоні не лежить. А отже після зупинки свіп-генератора, слід збільшити початкове та кінцеве значення частоти на 1 кГц. Дослід слід повторювати таким чином до тих пір, поки не відбудеться резонанс.

7. При різкому зростанні амплітуди на екрані осцилографа, потрібно зафіксувати приблизне значення резонансної частоти за показаннями рядку вікна генератора, що позначений 5 на рис. 8.
8. Для більш точного визначення резонансної частоти металевого стержня слід вимкнути свіп-генератор натисненням кнопки «Stop», перевести його в ручний режим – *Manual* (поле 2 на рис. 8), встановити межі зміни частоти (рис. 8, 4) так: початкова – приблизне значення резонансної частоти мінус 50 Гц, кінцева – приблизне значення резонансної частоти плюс 50 Гц та знову натиснути кнопку «Start». Активними стануть повзунки 3 (рис. 8). Після того, як натиснути ліву кнопку миші, навівши на ці повзунки курсор, можна змінювати частоту з точністю до 1 Гц,

обертаючи коліщатко миші або натискаючи кнопки курсору на клавіатурі. Таким чином, спостерігаючи за сигналом на екрані віртуального осцилографа, потрібно точно визначити частоту  $f_{рез}$ , при якій амплітуда коливань має найбільший розмах.

9. Знаючи резонансну частоту за формулою (10) визначити швидкість поширення звукових хвиль у металі, з якого виготовлений стержень та, знаючи густину матеріалу, за формулою (12) знайти модуль Юнга.
10. Для визначення добротності коливальної системи потрібно знайти  $\Delta f = f_2 - f_1$ , де  $f_1$  та  $f_2$  – частоти, при яких амплітуда коливань, досягнута при резонансі, зменшується вдвічі (рис. 2),  $f_2 > f_1$ . А отже слід виміряти амплітуду сигналу при визначеній резонансній частоті. Потім, збільшуючи частоту за допомогою свіп-генератора в режимі *Manual*, та періодично вимірюючи розмах синусоїдального сигналу на екрані осцилографа, визначити частоту  $f_2$ , при якій амплітуда зменшується в 2 рази порівняно з резонансом.

Програма Visual Analyser дозволяє виміряти амплітуду сигналу у відсотках висоти екрану віртуального осцилографа та у вольтах. Оскільки нас цікавить не абсолютне значення амплітуди, то ми будемо використовувати вимірювання у відсотках висоти екрану. Перед тим як розпочати, слід перевірити правильність налаштувань. Натисніть кнопку «*Settings*» вікна програми Visual Analyser. Оберіть закладку «*Scope*». У правому полі «*Y-axis*» вкажіть *Percent* та натисніть кнопку «*OK*», підтверджуючи зміни.

Тепер, якщо натиснути лівою кнопкою миші, підвівши курсор у вигляді знака «+» до мінімумів синусоїдального сигналу, та провести курсор, утримуючи кнопку натиснутою, до максимумів цієї синусоїди, то у спливаючому віконці буде відображатися значення амплітуди сигналу, виражене у відсотках висоти екрану віртуального осцилографа (рис. 10).

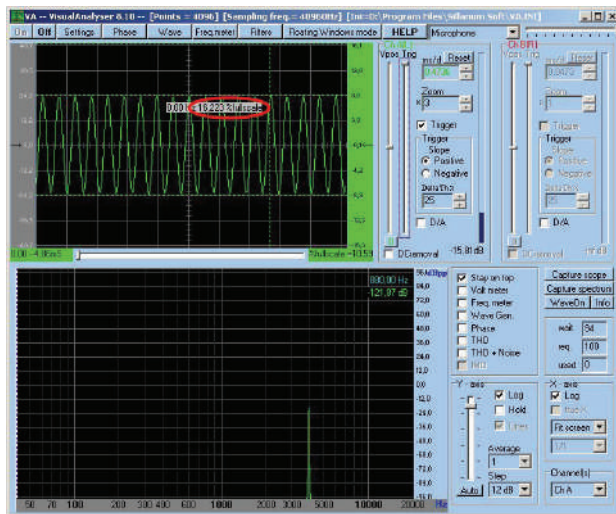


Рис. 10.

Аналогічно, зменшуючи частоту, визначити частоту  $f_1$ , при якій амплітуда порівняно з резонансом зменшується в 2 рази. Далі знайти  $\Delta f = f_2 - f_1$  та з виразу (13) визначити добротність  $Q$  коливальної системи.

Таблиця 1

| Матеріали | Модуль Юнга,<br>Е $10^{10}$ Н/м <sup>2</sup> | Швидкість<br>звуку С при<br>20°C, м/с | Густина $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|-----------|----------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Алюміній  | 7,0                                          | 5200                                  | 2,7                                   |
| Латунь    | 9,0                                          | 3400-3450                             | 8,4÷8,7                               |
| Сталь     | 20-22                                        | 5100-5180                             | 7,8                                   |
| Залізо    | 21                                           | 5000                                  | 7,85                                  |

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які деформації називають пружними й пластичними?
2. Який фізичний зміст модуля Юнга?
3. Який принцип дії установки, що використовується в роботі?
4. Який фізичний зміст добротності коливальної системи?
5. При яких за величиною деформаціях справедливий закон Гука?

6. Що називається резонансною кривою та резонансною частотою?
7. Від чого залежить швидкість поширення хвиль у твердих тілах?
8. Від чого залежить частота власних коливань стержня?

### Лабораторна робота № 5

## ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

#### **Мета роботи:**

Вивчення явищ електромагнітної індукції, самоіндукції, взаємної індукції; експериментальна перевірка закону електромагнітної індукції та визначення взаємної індуктивності двох котушок, розташованих у безпосередній близькості одна від одної

#### **Прилади і матеріали:**

1) довга та коротка котушки; 2) комп'ютер з встановленою програмою Visual Analyser.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електричні струми, як виявив у 1820 р. відомий датський фізик Х. Ерстед, збуджують навколо себе магнітне поле, яке має спрямований характер і повинне визначатися векторною величиною, названою магнітною індукцією  $\vec{B}$ . Одиницею магнітної індукції є тесла (Тл).

Для магнітного поля, як і для електричного, справедливий принцип суперпозиції (або накладення) полів: магнітне поле, породжуване декількома струмами (або зарядами, що рухаються), дорівнює векторній сумі магнітних полів, створюваних кожним струмом (зарядом) окремо, тобто

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i. \quad (1)$$

Магнітне поле, як і електричне, можна зобразити графічно за допомогою силових ліній (ліній індукції магнітного поля), напрямком яких визначається правилом правого гвинта або буравчика.

Силові лінії магнітного поля замкнені, вони не мають ні початку, ні кінця. Це свідчить про те, що в природі відсутні магнітні заряди, на яких починалися б і закінчувалися лінії вектора індукції  $\vec{B}$ . Узагальненням цих експериментальних даних стала *теорема Гаусса*

для магнітного поля: потік вектора індукції магнітного поля через будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю:

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad (2)$$

або в диференціальній формі

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (3)$$

Нагадаємо, що у випадку електричного поля теорема Гаусса (для вектора напруженості) в інтегральній і диференціальній формах має вигляд

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n q_i, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (5)$$

де  $\rho$  – об'ємна щільність заряду.

Силоне поле, дивергенція якого в будь-якій точці дорівнює нулю, називається *вихровим* або *соленоїдальним* полем.

Те, що магнітне поле є вихровим, підтверджується також *теоремою про циркуляцію* вектора індукції магнітного поля (у вакуумі): циркуляція вектора індукції магнітного поля постійних струмів по всякому замкненому контуру дорівнює добутку магнітної постійної  $\mu_0$  на алгебраїчну суму струмів, що охоплюються даним контуром:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_{k=1}^n I_k. \quad (6)$$

Для оцінки числа силових ліній (ліній індукції магнітного поля), що проходять через одиницю поверхні, вводять поняття магнітного потоку.

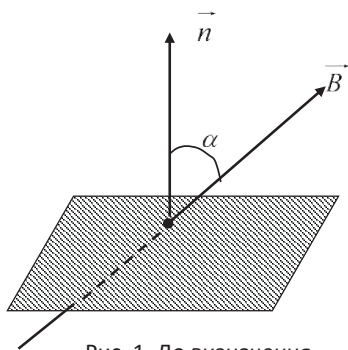


Рис. 1. До визначення магнітного потоку

У випадку однорідного магнітного поля ( $\vec{B} = \text{const}$ ) і плоскої поверхні  $S$  *магнітний потік* або потік вектора магнітної індукції визначається величиною

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B_n \cdot S, \quad (7)$$

де  $B_n = B \cdot \cos \alpha$  – проекція вектора  $\vec{B}$  на нормаль  $\vec{n}$  до поверхні площі  $S$ ;  $\alpha$  – кут між векторами  $\vec{B}$  й  $\vec{n}$  (рис. 1).

Магнітний потік вимірюється у веберах:  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

Отже, електричний струм створює навколо себе магнітне поле. Виникли численні спроби виявити зворотнє явище, що полягає в порушенні струму в контурі за допомогою магнітного поля. Це явище було відкрито у 1831 р. англійським фізиком М. Фарадеєм і одержало назву електромагнітної індукції.

Явище *електромагнітної індукції* полягає в тому, що при змінах магнітного потоку в контурі виникає електрорушійна сила індукції  $\mathcal{E}_i$  або індукційний струм, якщо контур замкнеть.

ЕРС індукції, що виникає, визначається наступною формулою:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (8)$$

де знак мінус відповідає *закону (правилу) Ленца*, який говорить, що індукційний струм у контурі спрямований так, що створюваний ним магнітний потік прагне перешкоджати тій зміні потоку, яка викликає даний струм.

Якщо контур складається з  $N$  витків, то ЕРС індукції, що виникає в складному контурі (котушці), визначається згідно (8) формулою

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (9)$$

де  $\Psi = N \cdot \Phi$  – повний магнітний потік.

На підставі (8) і (9) можна зробити висновок, що явище електромагнітної індукції спостерігається, коли магнітний потік крізь контур змінюється або за рахунок руху контуру, або за рахунок зміни магнітного поля з часом. Причина виникнення індукційного струму в нерухомому контурі (провіднику), що перебуває в змінному магнітному полі, була пояснена Дж. Максвеллом. Він припустив, що змінне магнітне поле породжує в просторі електричне поле (незалежно від наявності провідника), причому циркуляція вектора напруженості цього поля по нерухомому замкнутому контуру визначається як

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (10)$$

Оскільки циркуляція вектора напруженості  $\vec{E}$  поля, що порушена змінним магнітним полем, відмінна від нуля, то це означає, що це електричне поле (як і магнітне) є вихровим.

З вищесказаного випливає, що трактування явища електромагнітної індукції за Фарадеєм та Максвеллом мають істотні відмінності. Якщо за Фарадеєм електромагнітна індукція полягає у виникненні індукційного струму в провідному замкнутому контурі, то за Максвеллом – у збудженні електричного поля (а не струму).

Окремим випадком електромагнітної індукції є *самоіндукція*, що полягає у виникненні ЕРС індукції в провідному контурі при зміні в ньому сили струму.

*Струм, що тече в провідному (складному) контурі та створюваний ним повний магнітний потік, що пронизує контур, прямо пропорційні один одному (у випадку відсутності феромагнетиків):*

$$\Psi = L \cdot I, \quad (11)$$

де  $L$  – індуктивність або коефіцієнт самоіндукції контуру.

Одиницею індуктивності є генрі (Гн). Це індуктивність такого контуру, в якому при силі струму в 1 А виникає (повний) магнітний потік в 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}.$$

Індуктивність контуру залежить від його форми, розмірів та від магнітних властивостей середовища, що оточує контур.

Застосовуючи до явища самоіндукції закон електромагнітної індукції (9), одержимо для ЕРС самоіндукції наступний вираз:

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(L \cdot I)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (12)$$

У (12) індуктивність контуру  $L = \text{const}$  при умовах, що конфігурація контуру не змінюється, і феромагнетики поблизу контуру відсутні. Знак мінус показує, що (відповідно до правила Ленца) ЕРС самоіндукції спрямована так, щоб перешкоджати зміні сили струму в контурі.

У даній лабораторній роботі досліджується явище взаємної індукції, в якому проявляється магнітний зв'язок двох (або більше) контурів (котушок, соленоїдів).

Нехай два нерухомі контури розташовані в безпосередній близькості один від одного й у контурі 1 (рис. 2) тече струм  $I_1$ . Цей струм створює через контур 2 повний магнітний потік  $\Psi_2$ , що дорівнює (при відсутності феромагнетиків):

$$\Psi_2 = L_{21} \cdot I_1. \quad (13)$$

Аналогічно, струм  $I_2$ , що протікає в контурі 2, створює повний магнітний потік  $\Psi_1$  через контур 1:

$$\Psi_1 = L_{12} \cdot I_2. \quad (14)$$

У (13) і (14) коефіцієнти пропорційності  $L_{21}$  та  $L_{12}$  називаються *коефіцієнтами взаємної індукції контурів 2 та 1* або *взаємною індуктивністю* контурів. Взаємна індуктивність контурів залежить від розмірів і форми контурів, відстані між ними, від їхнього взаємного

розташування й від магнітної проникності навколишнього середовища (магнітна проникність вакууму й повітря  $\mu = 1$ ).

При відсутності феромагнетиків виконується теорема взаємності, згідно з якою взаємні індуктивності  $L_{12}$  та  $L_{21}$  однакові:

$$L_{12} = L_{21}. \quad (15)$$

Взаємна індуктивність вимірюється в тих самих одиницях, що й індуктивність контуру, тобто

$$[L] = [L_{12}] = [L_{21}] = 1 \text{ Гн.}$$

Явище взаємної індукції полягає в тому, що при зміні струму в одному з контурів, в іншому контурі виникає ЕРС індукції (див. рис. 2).

Дійсно, згідно із законом електромагнітної індукції при зміні в контурі 1 струму  $I_1$  у контурі 2 індукується ЕРС:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (16)$$

При змінах у контурі 2 струму  $I_2$  у контурі 1 виникає ЕРС

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (17)$$

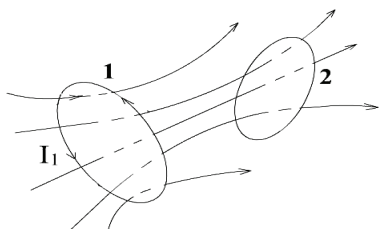


Рис. 2. Виникнення ЕРС взаємоіндукції

Явище взаємної індукції лежить в основі дії трансформаторів, які застосовуються для перетворення змінних струмів і напруг.

У даній лабораторній роботі запропонований наступний спосіб експериментального визначення взаємної індуктивності двох контурів (катушок).

На довгу катушку-соленоїд подається напруга від генератора звукової частоти, що змінюється за законом

$$U = U_{0r} \cos \omega t, \quad (18)$$

де  $U_{0r}$  – амплітудне значення змінної напруги, яку можна регулювати залежно від поставлених завдань;  $\omega$  – кругова частота змінної напруги, тобто частота зміни магнітного поля соленоїда, причому вона пов'язана із простою частотою  $\nu$  відомим співвідношенням

$$\omega = 2\pi \nu. \quad (19)$$

Соленоїд підключається до звукового генератора через резистор, опір якого повинний бути значно більше повного опору соленоїда змінному струму  $Z$ , тобто

$$R \gg Z, \quad (20)$$

де  $Z = \sqrt{R_c^2 + (L_c \cdot \omega)^2}$ ;  $R_c$  – омичний опір соленоїда;  $L_c \cdot \omega$  – індуктивний опір соленоїда;  $L_c$  – власна індуктивність соленоїда.

За виконання умови (20) струм, що проходить через соленоїд, визначається як:

$$I = I_{0c} \cos \omega t, \quad (21)$$

де  $I_{0c}$  – амплітудне значення струму, що дорівнює

$$I_{0c} \frac{U_{0c}}{R}. \quad (22)$$

Внаслідок явища взаємної індукції в короткій котушці виникає ЕРС, що згідно (16) дорівнює:

$$\varepsilon_K = -L_{21} \cdot \frac{dI_c}{dt} = -L_{21} \cdot I_{0c} \cdot \omega \cdot (-\sin \omega t).$$

З іншого боку ЕРС індукції, що виникає в короткій котушці, можна представити в загальному вигляді

$$\varepsilon_K = \varepsilon_{0K} \cdot \sin \omega t.$$

З останніх двох виразів випливає, що амплітудне (максимальне) значення ЕРС індукції дорівнює

$$\varepsilon_{0K} = L_{21} \cdot I_{0c} \cdot \omega,$$

або з урахуванням (22):

$$\varepsilon_{0K} = L_{21} \cdot \frac{U_{0c}}{R} \cdot \omega. \quad (23)$$

Отже, взаємна індуктивність двох котушок ( $L_{12}$ ) може бути обчислена з урахуванням (19) за формулою:

$$L_{21} = \frac{\varepsilon_{0K} \cdot R}{2\pi \nu \cdot U_{0c}}. \quad (24)$$

## ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

У даній роботі експериментально визначають взаємну індуктивність двох котушок. Коротка (вимірювальна) котушка **2** ( $L_2$ ), що надягнута на довгу котушку-соленоїд **1** ( $L_1$ ), може переміщуватися уздовж шкали, яка закріплена паралельно осі соленоїда. Поділка «0» на шкалі відповідає середині довгої котушки-соленоїда **1**. Можна вважати, що осі соленоїда **1** та вимірювальної котушки **2** збігаються. Принципова схема установки показана на рис. 3.

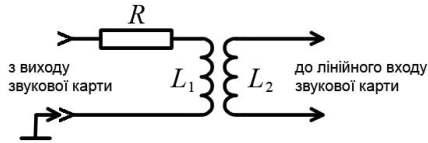


Рис. 3 Принципова схема установки

Сигнал створений емулятором звукового генератора зі звукової карти подається до довгої котушки 1. ЕРС індукції, що виникає в короткій котушці 2 (внаслідок взаємної індукції), реєструється емулятором вольтметра, також можна візуально спостерігати й фіксувати змінну ЕРС індукції на екрані осцилографа завдяки під'єднанню її до лінійного входу звукової карти комп'ютера. Для експериментального обґрунтування виконання теореми взаємності, тобто справедливості рівності  $L_{12}=L_{21}$  (див. формулу 15), передбачено підключати коротку котушку 2 до виходу аудіоплати, а соленоїд 1 – до її лінійного входу.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

### 1. Перевірити настройки звукової карти комп'ютера.

Якщо на панелі значок регулятора гучності, наведіть на нього курсор, викличте контекстне лінійне меню відображує меню натисненням правої кнопки миші та виберіть пункт «*Настройка аудиопараметров*». У вікні «*Свойства: Звуки и аудиоустройства*» на закладці «*Громкость*» натисніть кнопку «*Дополнительно*». У пункті меню «*Параметры*» вікна, що з'явилось, виберіть «*Свойства*».

При обраному за замовченням пункті «*Воспроизведение*» слід пересвідчитись, щоб у полі «*Отображать регуляторы громкости*» були відмічені «*Громкость*» та «*Звук*» (рис. 4) і натиснути кнопку «*ОК*». У вікні «*Громкость*», яке відображує мікшер звукового пристрою (рис. 5), встановіть два перших повзунки зліва («*Громкость*» та «*Звук*») у крайнє верхнє положення (максимальна

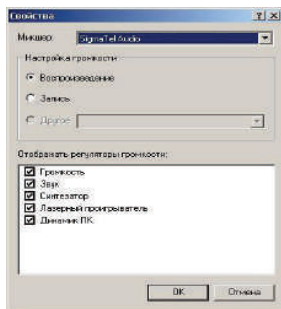


Рис. 4.

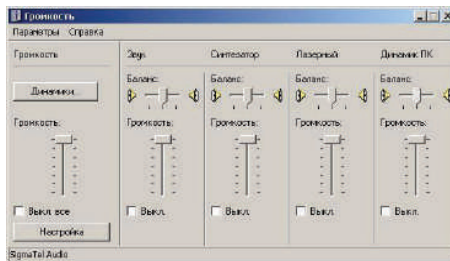


Рис. 5.

гучність); перевірте, щоб біля написів «*Выкл. все*» та «*Выкл.*» відповідно не був встановлений прапорець. Переконайтесь, що повзунки «*Баланс*» обраних пристроїв встановлені у середнє положення. Решту пристроїв бажано відключити (поставити прапорці біля напису «*Выкл.*»).

Далі знову оберіть «*Свойства*» пункту меню «*Параметры*». Відмітивши пункт «*Запись*» (рис. 6), переконайтесь, що на панелі «*Отображать регуляторы громкости*» обрано «*Лин. вход*» (лінійних вхід) і натисніть кнопку «*ОК*».

У вікні, що з'явилося (рис. 7), поставте прапорець біля напису «*Выбрать*» на панелі «*Лин. вход*» та встановіть відповідний повзунок

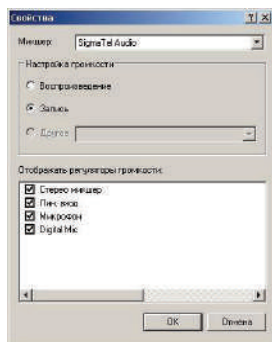


Рис. 6.

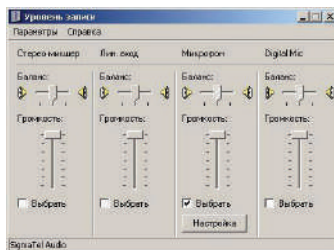


Рис. 7.

не більше, ніж на дві треті максимального рівня гучності. Решта пристроїв відключаються автоматично. Переконайтесь, що повзунок «*Баланс*» даного пристрою встановлений у середнє положення. Тепер можна закрити всі вікна настройки аудіопараметрів.

Якщо значок регулятора гучності на панелі задач відсутній, слід перейти до панелі керування («Пуск» → «Настройка» → «Панель управления») та відкрити «Звуки и аудиоустройства». Далі виконати дії описані вище.

2. Запустити програму Visual Analyser.

## **І. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ (дослідження залежності ЕРС індукції від частоти зміни магнітного поля)**

3. Викликати емулятор звукового генератора, встановивши прапорець біля напису *Wave Gen.* закладки *Main* в правому нижньому куті головного вікна програми. Для обох каналів обрати синусоїдальну форму сигналу, частоту встановити  $\nu = 10$  кГц, амплітуду – близько 50% максимального рівня.
4. З'єднати за допомогою кабелю напрямку вихід та лінійний вхід звукової карти.
5. Запустити генерацію сигналу, натиснувши у вікні емулятора звукового генератора кнопку «On».
6. Викликати вольтметр, встановивши прапорець біля напису *Volt meter* закладки *Main*. За його показами визначити вихідну напругу  $U_{0r}$ .
7. Підключити до аудіоплати комп'ютера котушки відповідно до схеми на рис. 3.
8. Встановити котушку 2 посередині соленоїда 1 (поділка «0»,  $r_1 = 0$  см).
9. Змінюючи частоту звукового генератора від 10 до 18 кГц з інтервалом 2 кГц, виміряти за показами емулятора вольтметра значення ЕРС індукції  $\varepsilon_{0K}$ , що виникає в короткій котушці, одночасно спостерігаючи візуально на екрані осцилографа зміну амплітуди коливань ЕРС індукції, що виникає.
10. Перемістити коротку котушку відносно соленоїда до поділки  $r_2 = 5$  см та провести вимірювання, аналогічні до п. 9. Результати вимірювань записати до табл. 1.

Таблиця 1

| $U_{0\Gamma} = \dots \text{ В}$ |                        |                      |
|---------------------------------|------------------------|----------------------|
| $\nu$ , кГц                     | $\varepsilon_{0K}$ , В |                      |
|                                 | $r_1 = 0 \text{ см}$   | $r_2 = 5 \text{ см}$ |
|                                 |                        |                      |
|                                 |                        |                      |
|                                 |                        |                      |
|                                 |                        |                      |
|                                 |                        |                      |
|                                 |                        |                      |

11. За даними табл. 1 побудуйте графіки залежності ЕРС індукції від частоти зміни магнітного поля, що дорівнює частоті звукового генератора, тобто  $\varepsilon_{0K} = f(\nu)$ .

## II. ВИЗНАЧЕННЯ ВЗАЄМНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РОЗТАШУВАННЯ КОТУШОК

12. Встановивши котушку 2 посередині соленоїда 1 (поділка «0»,  $r_1 = 0 \text{ см}$ ), виміряти за показами емулятора вольтметра значення ЕРС індукції  $\varepsilon_{0K}$ , що виникає в короткій котушці.
13. Пересуваючи котушку 2 до краю з кроком 1 см, виміряти та записати до табл. 2 й інші значення  $\varepsilon_{0K}$ .

Таблиця 2

| $\nu = \dots \text{ кГц}; U_{0\Gamma} = \dots \text{ В}; R = \dots \text{ Ом}$ |                        |               |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------|
| $r_i$ , см                                                                     | $\varepsilon_{0K}$ , В | $L_{21}$ , Гн |
|                                                                                |                        |               |
|                                                                                |                        |               |
|                                                                                |                        |               |
|                                                                                |                        |               |
|                                                                                |                        |               |
|                                                                                |                        |               |

14. За даними табл. 2 та формулою (24) обчислити взаємну індуктивність  $L_{21}$  для кожного положення короткої котушки щодо довгої котушки-соленоїда.
15. Підключити коротку котушку 2 до виходу звукової карти, а довгу 1 – до її лінійного входу.
16. Повторити вимірювання пп. 8-10 та заповнити табл. 3.

Таблиця 3

| $\nu = \dots$ кГц; $U_{0r} = \dots$ В; $R = \dots$ Ом |                        |               |
|-------------------------------------------------------|------------------------|---------------|
| $r_i$ , см                                            | $\varepsilon_{0c}$ , В | $L_{12}$ , Гн |
|                                                       |                        |               |
|                                                       |                        |               |
|                                                       |                        |               |
|                                                       |                        |               |
|                                                       |                        |               |

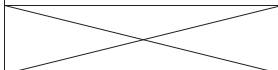
У табл. 3  $\varepsilon_{0c}$  – величина ЕРС індукції, що виникає в довгій котушці-соленоїді;  $L_{12}$  – взаємна індуктивність, що залежить від взаємного положення короткої й довгої котушок.

17. Обчисливши взаємні індуктивності  $L_{21}$  та  $L_{12}$  (табл. 2 та 3), можна переконатися в справедливості теореми взаємності (15), тобто рівності  $L_{21}=L_{12}$ . Розбіжності, що виникають, можна пояснити неточністю встановлення короткої котушки щодо соленоїда (розбіжністю величини  $r_i$ ) і, головне, різними індуктивними опорами короткої та довгої котушок, що не враховується при розрахунках взаємної індуктивності.
18. Побудуйте графіки залежності взаємної індуктивності від взаємного розташування котушок, тобто  $L_{21}=L_{21}(r_i)$  або  $L_{12}=L_{12}(r_i)$ .

### ІІІ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЗАЄМНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ ВІД ЧАСТОТИ ЗМІНИ Й ВЕЛИЧИНИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

19. Аналогічно до пп. 3-9 виміряти ЕРС індукції  $\varepsilon_{0K}$  в короткій котушці при її фіксованому положенні  $r_i$  та постійній частоті звукового генератора  $\nu$  (задаються викладачем) для декількох значень напруг звукового генератора  $U_{0r}$  (зменшуючи амплітуду вихідного сигналу кожного разу на 10%). Результати вимірювань  $\varepsilon_{0K}$  та розрахунків  $L_{21}$  (за формулою (24)) записати до табл. 4.

Таблиця 4

| $\nu = \dots$ кГц; $R = \dots$ Ом; $r_i = \dots$ см                                 |                        |                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
| $U_{0r}$ , В                                                                        | $\varepsilon_{0K}$ , В | $L_{21}$ , Гн                                |
|                                                                                     |                        |                                              |
|                                                                                     |                        |                                              |
|                                                                                     |                        |                                              |
|  |                        | Середнє значення<br>$\langle L_{21} \rangle$ |

20. Використовуючи дані табл. 1, розрахуйте для кожної частоти звукового генератора й відстані  $r_i$  взаємну індуктивність, результати обчислень занесіть у табл. 5.

Таблиця 5

| $U_{0r} = \dots \text{В}; R = \dots \text{Ом}; r_i = \dots \text{см}$ |                        |               |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------|
| $\nu$ , кГц                                                           | $\varepsilon_{0K}$ , В | $L_{21}$ , Гн |
|                                                                       |                        |               |
|                                                                       |                        |               |
|                                                                       |                        |               |
|                                                                       |                        |               |
|                                                                       |                        |               |
| Середнє значення<br>$\langle L_{21} \rangle$                          |                        |               |

При виконанні вимірювань і розрахунків пп. 19-20 ви повинні переконатися в тому, що частота зміни магнітного поля, що задається звуковим генератором, і величина напруги на вході системи контурів (катушок) практично не впливають на взаємну індуктивність контурів.

21. Обрахуйте відносну похибку визначення величини взаємної індуктивності за формулою:

$$E_L = \frac{\Delta L_{21}}{\langle L_{21} \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{0r}}{U_{0r}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon_{0K}}{\varepsilon_{0K}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}.$$

Абсолютна похибка величини взаємної індуктивності рівна

$$\Delta L_{21} = E_L \cdot \langle L_{21} \rangle,$$

де  $\langle L_{21} \rangle$  – середнє значення взаємної індуктивності (див. табл. 4).

22. Остаточний запис результату вимірювання й обчислення взаємної індуктивності представити у формі:

$$L_{21} = \langle L_{21} \rangle \pm \Delta L_{21}.$$

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яка основна характеристика магнітного поля (у вакуумі), які одиниці її вимірювання?
2. Який напрямок вектора індукції  $\vec{B}$  в центрі колового струму  $I$ ?
3. Сформулюйте теорему Гауса для магнітного поля.
4. Дайте визначення потоку магнітної індукції (магнітного потоку) і одиниці його виміру.

5. Що таке повний магнітний потік або потокозчеплення?
6. Поясніть явище електромагнітної індукції.
7. Напишіть формулу основного закону електромагнітної індукції та поясніть причину наявності знака мінус у цій формулі.
8. Як пов'язані струм у контурі й виникаючий при цьому магнітний потік через цей контур? При якій умові виконується ця залежність?
9. Що таке індуктивність контуру, від чого вона залежить? Дайте визначення одиниці вимірювання індуктивності.
10. Поясніть явище самоіндукції та дайте приклади прояву самоіндукції.
11. Чому дорівнює ЕРС самоіндукції та який зміст знака мінус у цій формулі?
12. Опишіть явище взаємної індукції. Дія якого обладнання заснована на цьому явищі.
13. Що таке взаємна індуктивність контурів та при яких умовах виконується теорема взаємності?
14. За яким законом змінюється напруга, створена генератором звукової частоти?
15. Згідно з теоремою взаємності маємо:  $L_{12} = L_{21}$ . Які причини деякого відхилення експериментальних даних від цієї рівності?
16. Поясніть, як змінюється ЕРС взаємної індукції при переміщенні короткої котушки від середини соленоїда до краю?
17. Поясніть, як впливає частота змінного сигналу генератора на виниклу в соленоїді ЕРС індукції?
18. Як впливає частота змінного струму на величину взаємної індуктивності?

#### Лабораторна робота №6

### КАЛІБРУВАННЯ ПРОГРАМИ-ЕМУЛЯТОРА ВОЛЬТМЕТРА

**Мета роботи:** з'ясувати суть процесу калібрування; провести калібрування програми-емулятора Visual Analyser.

**Прилади і матеріали:** комп'ютер зі встановленим програмним забезпеченням (Visual Analyser), що емулює роботу вольтметра, джерело струму (звуковий генератор), зразковий мілівольтметр.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Перед використанням програм-емуляторів у тому чи іншому експерименті їх необхідно прокалібрувати.

Калібрування — комплекс дій, що проводяться під час регулювання та періодичного підтвердження градуовальних характеристик контрольно-вимірювального приладу чи системи вимірювання спеціально для того, щоб встановити кореляцію (залежність) між показаннями приладу та кінцевим (що має бути повідомленим) результатом.

Програма Visual Analyser дозволяє моделювати такі електронні інструменти: двоканальний осцилограф, що має критичний режим; двоканальний аналізатор спектру; двоканальний генератор сигналів; двоканальний частотомір (у часі і в частотній області) і лічильник; двоканальний вольтметр класу True RMS (необхідна калібрування) з функцією утримання; фільтри.

Visual Analyser є повністю безкоштовним софтом, який можна завантажити з інтернету.

Visual Analyser не вимагає для роботи ніякого додаткового апаратного забезпечення або спеціалізованого зовнішнього обладнання. Вимірювань залежить від класу звукової плати. Програма підтримує 8, 16, 24-бітові звукові карти.

## ОПИС УСТАНОВКИ І МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ

Установка складатиметься із джерела змінного струму (1) (генератор звукових коливань), зразкового мілівольтметра (2), конденсатора (3),

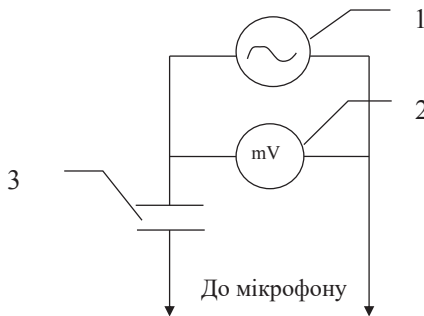


Рис.1. Схема експериментальної установки

## ХІД РОБОТИ

1. Запускаємо програму Visual Analyser, яка емує роботу мілівольтметра, та відкриваємо вкладку Settings, а в ній Calibrate. Перед нами з'являється вікно

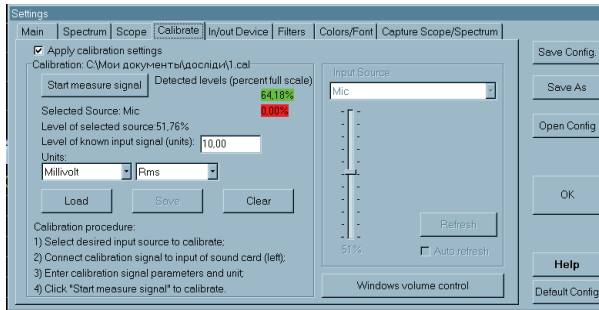


Рис.2. Вікно вкладки Calibrate

2. Обираємо відповідні поля Millivolt (мілівольти) та Rms (середньоквадратичне відхилення) під заголовком Units:



Рис.3. Поля Millivolt та Rms

3. Встановлюємо у полі Level of known input signal граничне значення напруги:

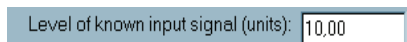


Рис.4. Поле Level of known input signal

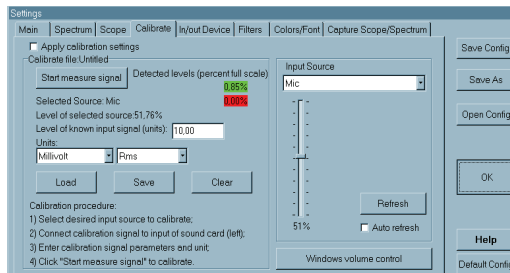


Рис. 5. Вікно програми після виконання попередніх вказівок

4. Вмикаємо кнопку Start measure signal, знімаємо прапорець біля заголовка Apply calibration settings та натискаємо ОК.
5. Встановлюємо навпроти поля Volt Meter прапорець та отримуємо вікно програми-емулятора Volt Meter (мал.6).

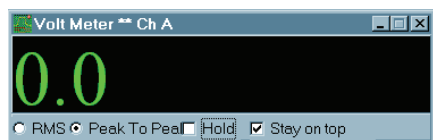


Рис.6. Вікно програми-емулятора Volt Meter

6. По завершенні налаштувань, подаємо на вхід з генератора напругу деякої величини та повторюємо дослід декілька разів для встановлення залежності. Отримані дані заносимо до таблиці 1.

*Таблиця 1.Результати калібрування*

| № п/п | Мілівольтметр, мВ | Volt meter, мВ |
|-------|-------------------|----------------|
| 1.    |                   |                |
| 2.    |                   |                |
| 3.    |                   |                |
| 4.    |                   |                |
| 5.    |                   |                |
| 6.    |                   |                |
| 7.    |                   |                |
| 8.    |                   |                |
| 9.    |                   |                |
| 10.   |                   |                |

7. Використовуючи дані таблиці, будуємо графік отриманої залежності калібровки емулятора Volt Meter.
8. Зробити висновки.

#### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ:

1. Що таке калібрування?
2. Які фізичні прилади може емулявати програма Visual Analyser?
3. Від чого залежить вимірювання за допомогою емуляторів?
4. Які звукові карти підтримує програма Visual Analyser?

## ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ МАЛЮСА

### Мета роботи:

дослідити залежність інтенсивності плоскополяризованого світла після проходження його через аналізатор від кута між площинами поляризації поляризатора і аналізатора.

### Прилади і матеріали:

1) штатив; 2) комп'ютер зі встановленим програмним забезпеченням; 3) обійма з нанесеними мітками і закріпленими; 4) аналізатором; 5) поляризатором; 6) фоторезистором.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

З точки зору електромагнітної теорії, світлові хвилі є електромагнітними хвилями, при чому вектори напруженості електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів коливаються у взаємно перпендикулярних площинах. При взаємодії світла з речовиною більшу дію на електрони речовини має вектор  $E$ , тому будемо враховувати тільки електричне поле світлової хвилі.

Світло, в якому коливання вектора  $E$  відбувається хаотично у всіх напрямках, перпендикулярних променю, називається *природним*.

Всі джерела світла (крім лазерів) випромінюють *природне світло*. Світло називається *плоскополяризованим* (або *лінійнополяризованим*), якщо коливання вектора напруженості електричного поля  $E$  світлової хвилі відбувається в одній площині, яку називають *площиною поляризації*.

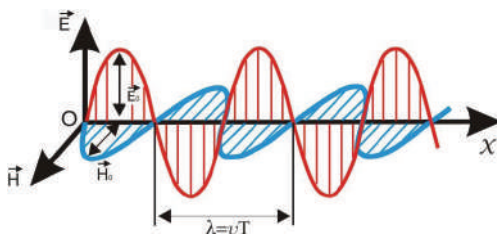


Рис. 1. Плоскополяризована хвиля.

Для випадку плоскополяризованого світла коливання вектора  $E$  в площині (рис. 1), перпендикулярній променю, характеризується одним напрямом.

Можливі випадки коливання вектора  $E$  в площині, перпендикулярній напрямку поширення світла (променю), показані на рис. 2 (схематично):

- 1.) для світла, частково поляризованого;
- 2.) для плоскополяризованого світла;
- 3.) для природного світла.

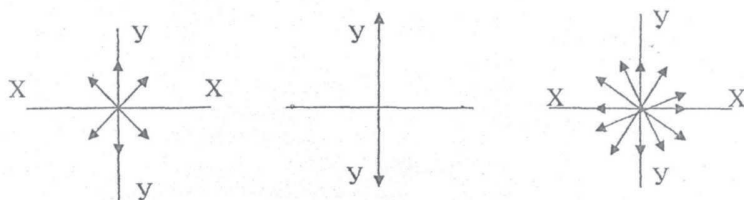


Рис. 2.

Щоб з природного світла дістати лінійно поляризоване, використовують:

- a) поляризацію світла при відбиванні під кутом Брюстера;
- b) при проходженні світла через сталу Столетова (сталу плоскопаралельних діелектричних пластинок, на яку світло падає під кутом Брюстера.);
- c) явище подвійного променезаломлення в анізотропних кристалах.

Пристрої, які виявляють поляризацію світла, називаються *аналізаторами*. Аналізатори і поляризатори нічим не відрізняються.

Відомо, що при проходженні природного світла через анізотропні кристали (наприклад, кристал ісландського шпату) світловий пучок розділяється на два пучки, що названі звичайним і незвичайним, при чому вони поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах. Поляризатори і аналізатори, оснований на явищі подвійного променезаломлення, на практиці виготовляють не з простих кристалів, а з їх комбінацій, які називаються *поляризаційними призмами*.

Виготовляють призми двох типів:

- 1.) призми, які дають тільки один лінійнополяризований промінь (однопроменеві поляризаційні призми Ніколя, Глана-Томська та ін.);
- 2.) призми, з яких виходять два промені взаємно перпендикулярної поляризації (двопроменеві призми Волластона, Рошона та ін.).

Однопроменеві поляризаційні призми діють на основі повного відбивання. Природний промінь розділяється призмою на два: звичайний і незвичайний. Один з них на межі склеювання повністю відбивається і виводиться з призми, другий проходить через призму і дає лінійнополяризоване світло.

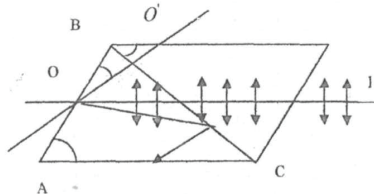


Рис. 3 Призма Ніколя

Найбільш поширеним поляризатором є призма Ніколя, який винайшов її у 1828 році.

Призма Ніколя складається з двох частин, склеєних по діагональній

площині канадським бальзамом ( $n_{к.б.} = 1,550$ ).

Кристал ісландського шпату, якому надають форму нахиленої чотирикутної призми, розрізають по діагональній площині  $BC$  на дві частини, які потім склеюють канадським бальзамом вздовж цієї площини.

Оптична вісь  $OO'$  спрямована під кутом  $48^\circ$  до входньої грані  $AB$ . Природний промінь при падінні на грань  $AB$  внаслідок подвійного заломлення поділяється на звичайний ( $n_o = 1,658$ ) і незвичайний ( $n_i = 1,486$ ) промені. При певному наборі кутів призми звичайний промінь падає на шар бальзаму під кутом  $76^\circ$ , який більший за граничний, зазнає повного внутрішнього відбивання, падає на зачорнену грань  $AC$  і нею поглинається. Незвичайний промінь виходить з призми паралельно грані  $BD$ , майже не змінюючи свого напрямку.

Недоліком Ніколя є поглинання канадським бальзамом ультрафіолетової частини спектра і значні втрати інтенсивності при відбиванні від нахиленої грані  $AB$ .

Явище дихроїзму використовується також для створення штучних поляризаторів, які називають поляроїдами. В даній лабораторній роботі користуються поляроїдами. *Поляроїд* – це плівка завтовшки  $0,1$  мм, на яку нанесено кристалики гепатиту.

При проходженні через поляроїд світло стає лінійно поляризованим. Поляроїд може бути як поляризатором, так і аналізатором.

Інтенсивність природного світла, яке пройшло через аналізатор ( $A$ ) і поляризатор ( $P$ ), залежить від кута  $\alpha$  між головними перерізами і змінюється за законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

де  $I_0$  – інтенсивність світла, що пройшло через  $P$  і  $A$ , коли їх площини коливань співпадають.

У даній роботі замість зміни інтенсивності поляризованого світла, яке пройшло через  $P$  і  $A$ , досліджують зміну фотоструму, викликаного цим світлом.

## ОПИС УСТАНОВКИ І МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ

Установка монтується на штативі, на якому закріплюються обойма (1) з вмонтованими поляризатором (2), аналізатором (3) та фоторезистором (4). На корпусі обойми нанесено мітки, від  $0$  до  $90^\circ$  з кроком  $10^\circ$ .

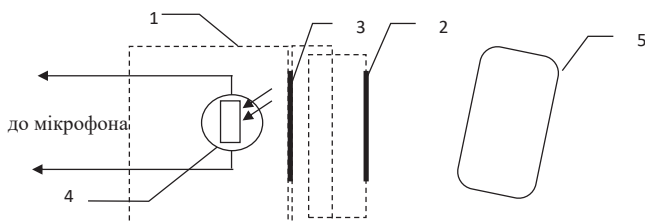


Рис.4. Схема експериментальної установки

Як джерело світла можна використовувати екран монітора (5), стробоскоп або інше змінне джерело світла.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати схему згідно рис. 4.
2. Повертаючи лімб від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , через кожні  $10^\circ$  зафіксувати показники величини фотоструму використовуючи програму емулятор. Результати вимірювань занести до таблиці.

Таблиця 1. Залежність величини фотоструму від кута між поляризатором і аналізатором.

| Положення лімба,<br>$\angle \alpha$ | $0^\circ$ | $10^\circ$ | $20^\circ$ | $30^\circ$ | $40^\circ$ | $50^\circ$ | $60^\circ$ | $70^\circ$ | $80^\circ$ | $90^\circ$ |
|-------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Величина фотоструму, мкА            |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| $\cos^2 \alpha$                     |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |

3. Побудувати графік залежності інтенсивності світла, яке пройшло через поляризатор ( $P$ ) і аналізатор ( $A$ ), від  $\cos^2\alpha$  кута між площинами  $P$  і  $A$ . Для цього на осі абсцис відкласти  $\cos^2\alpha$ , а на осі ординат – покази міліамперметра.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дати визначення поляризаторів і аналізаторів?
2. Чим відрізняється лінійнополяризоване світло від природного?
3. Що називається площиною поляризації?
4. Що таке поляроїд?
5. Поляризаційні призми, їх будова (на прикладі призми Ніколя)?

## Література

1. Дима Я. Ю., Красницький М. П., Сасенко О. В. Програми-емулятори фізичних приладів і вивчення тригонометричних функцій. *Нові технології навчання* : наук.-метод. зб. / Інститут інноваційних технологій і змісту освіти МОН України. Київ, 2011. Вип. 68. С. 119–126.
2. Дима Я. Ю., Лапека І. В., Сасенко О. В. Використання програм-емуляторів вимірювальних приладів для дослідження базових електричних кіл та їх елементів. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна*. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський нац. ун-т імені Івана Огієнка, 2011. Вип. 17: Іноваційні технології управління компетентісно-світоглядним становленням учителя: фізика, технології, астрономія. С. 204–206. URL: <http://ped-series.kpnu.edu.ua/article/view/32296/28956>
3. Дима Я. Ю., Лапека І. В., Сасенко О. В. Використання програм-емуляторів вимірювальних приладів для дистанційного проведення фізичних дослідів. *Розвиток інтелектуальних умінь і творчих здібностей учнів та студентів у процесі навчання дисциплін природничо-математичного циклу «ІТМ\*плюс – 2011»* : матеріали Всеукр. дистанційної наук.-метод. конф. з міжнар. участю (11 лют. 2011 р., м. Суми): у 3 т. Суми : Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2011. Том 3. С. 30–31.
4. Дима Я. Ю., Лапека І. В., Сасенко О. В. Програми-емулятори вимірювальних приладів як засіб підвищення якості навчального процесу з фізики. *Инновационные технологии в образовании: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. (г. Ялта, 15-17 сент. 2011 г.)*: зб. статей. Ялта : РИО КГУ, 2011. С. 53–54.
5. Дима Я. Ю., Руденко О. П., Сасенко О. В. Сучасні підходи до постановки фізичних експериментів. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського університету. Серія педагогічна*. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський нац. ун-т імені Івана Огієнка, 2009. Вип. 15: Управління якістю підготовки майбутніх учителів фізики та трудового навчання. С. 132–135. URL: <http://ped-series.kpnu.edu.ua/article/view/33197/29776>
6. Дима Я. Ю., Сасенко О. В. Інтеграція ІКТ у навчальний процес для реалізації міжпредметних зв'язків. *Науково-педагогічна спадщина Михайла Остроградського і сучасні проблеми освіти* : матеріали XI Всеукр. пед. читань, присвяч. пам'яті М. В. Остроградського, 26-27 верес. 2011 р. Полтава : АСМІ, 2011. С. 127–130.
7. Дима Я. Ю., Сасенко О. В. Методичні аспекти використання програм-емуляторів вимірювальних приладів у демонстраційному експерименті на уроках фізики. *Впровадження електронного навчання в освітній процес : концепції, проблеми, рішення* : матеріали міжнар. інтернет-конф., м. Тернопіль, 21-22 жовт. 2010 р. URL: <http://conf.fizmat.tnpu.edu.ua/?p=158>
8. Дима Я. Ю., Сасенко О. В. Методичні аспекти використання програм-емуляторів вимірювальних приладів у демонстраційному експерименті на уроках фізики. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Педагогіка*. Тернопіль, 2011. № 1. С. 135–140.

9. Дима Я. Ю., Лапека І. В., Сасенко О. В. Застосування програм-емуляторів вимірювальних приладів для навчання студентів біофізики. *Актуальные вопросы биологической физики и химии. БФФХ-2012* : матеріали VII міжнарод. наук.-техн. конф., г. Севастополь, 23-27 апр. 2012 г. / М-во образования и науки, молодежи и спорта Украины, Севастоп. нац. тех ун-т; науч. ред. С. Ф. Барановский. Севастополь : СевНТУ, 2012. С. 311–313.
10. Донець В. В. Застосування програм-емуляторів при демонстрації процесів в електричних коливальних контурах. *Збірник наукових праць студентів і молодих науковців*. Кіровоград : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. Вип. 9. С. 242–246.
11. Донець В. В., Лапека І. В. Використання інформаційно-комунікаційних технологій під час вивчення розділу „Коливання і хвилі” в 11 класі. *Сучасні проблеми фізико-математичних наук та методики їх викладання* : матеріали VII Всеукр. студ. конф. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2012. С. 43–46.
12. Донець В. В., Чорногор Ю. М. Використання програм-емуляторів в експерименті при вивченні розділу „Коливання і хвилі” в 11 класі. *Збірник наукових праць викладачів, аспірантів, магістрантів і студентів фізико-математичного факультету*. Полтава : АСМІ, 2011. С. 223–224.
13. Захарчук Н., Щербань М. Використання програм-емуляторів у лабораторному та демонстраційному експерименті з фізики. *Збірник наукових праць викладачів, аспірантів, магістрантів і студентів фізико-математичного факультету*. / ПНПУ ім. В. Г. Короленка; редкол.: Ю. Д. Москаленко (голов. ред.) та ін. Полтава : АСМІ, 2013. С. 228–229.
14. Лапека І. В. Використання комп'ютера та програм-емуляторів вимірювальних приладів для постановки лабораторних робіт. *Збірник наукових праць викладачів, аспірантів, магістрантів і студентів фізико-математичного факультету (до 100-річчя від дня народження Миколи Федоровича Гур'єва)*. Полтава : АСМІ, 2010. С. 190–191.
15. Лапека І. В. Використання програм-емуляторів вимірювальних приладів для дослідження транзистора. *Збірник наукових праць студентів і молодих науковців*. Кіровоград : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. Вип. 9. С. 252–256.
16. Лапека І. В., Касяненко М. М. Побудова вольт-амперної характеристики діода за допомогою програм-емуляторів вимірювальних приладів. *Збірник наукових праць викладачів, аспірантів, магістрантів і студентів фізико-математичного факультету*. Полтава : АСМІ, 2011. С. 188–189.
17. Сасенко О. В., Лапека І. В., Дима Я. Ю. Використання можливостей ІКТ для вдосконалення навчального експерименту з фізики. *Сучасні проблеми та перспективи навчання дисциплін природничо-математичного циклу*: матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Суми, 21-22 берез. 2012 р.). Суми : Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2012. С. 95–97.
18. Сасенко О. В., Дима Я. Ю., Красницький М. П. Використання програм-емуляторів для ілюстрації графіків гармонічних коливань. *Методологія викладання математичних дисциплін для нематематичних спеціальностей у сучасних умовах*: тези доп. Всеукр. наук.-метод. конф., м. Суми, 16-18 груд. 2009 р. / редкол.: К. М. Левківський, В. О. Ячменьов. Суми : Вид-во СумДУ, 2009. С. 163–164.

19. Спосіб організації експерименту з фізики: пат. 48113 Україна: МПК (2006) G09F 27/00, G10H 1/00. № 200908875; заявл. 25.08.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.
20. Спосіб проведення дистанційного експерименту з фізики: пат. 101981 Україна: МПК (2006) G09B 5/00, G09B 23/06. № 201101716; заявл. 14.02.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.

## ЗМІСТ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Передмова</b> .....                                                                           | 3  |
| <b>Розділ I</b>                                                                                  |    |
| <b>КОМП'ЮТЕР У ЯКОСТІ</b>                                                                        |    |
| <b>ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ</b> .....                                                            | 6  |
| Дещо про звукові карти персональних комп'ютерів .....                                            | 6  |
| Про особливості підключення лабораторного устаткування до звукової карти .....                   | 8  |
| Емулятори- генератори і осцилографи.....                                                         | 12 |
| Налаштування операційної системи .....                                                           | 16 |
| <b>Розділ II</b>                                                                                 |    |
| <b>ДЕМОНСТРАЦІЙНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ</b>                                                               |    |
| <b>З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИЛАДІВ-ЕМУЛЯТОРІВ</b> .....                                                 | 19 |
| Демонстрація механічних коливань і звукових хвиль .....                                          | 19 |
| Демонстраційні експерименти з коливальними контурами.....                                        | 24 |
| <b>Розділ III</b>                                                                                |    |
| <b>ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З ВИКОРИСТАННЯМ</b>                                                        |    |
| <b>ПРИЛАДІВ-ЕМУЛЯТОРІВ</b> .....                                                                 | 27 |
| Лабораторна робота № 1.                                                                          |    |
| Дослідження власних коливань струни методом резонансу .....                                      | 27 |
| Лабораторна робота № 2.                                                                          |    |
| Визначення довжини звукової хвилі та швидкості поширення звуку в повітрі методом резонансу ..... | 32 |
| Лабораторна робота № 3.                                                                          |    |
| Визначення довжини звукової хвилі та швидкості поширення звуку в повітрі фазовим методом .....   | 38 |
| Лабораторна робота № 4.                                                                          |    |
| Визначення швидкості звуку, модуля Юнга й внутрішнього тертя резонансним методом .....           | 49 |
| Лабораторна робота № 5.                                                                          |    |
| Вивчення явища електромагнітної індукції .....                                                   | 60 |
| Лабораторна робота №6.                                                                           |    |
| Калібрування програми-емюлятора вольтметра .....                                                 | 72 |
| Лабораторна робота №7.                                                                           |    |
| Перевірка закону Малюса .....                                                                    | 76 |
| <b>Література</b> .....                                                                          | 81 |
| <b>Зміст</b> .....                                                                               | 84 |
| <b>Додатки</b> .....                                                                             | 85 |

## ДОДАТКИ

### Додаток А



Принципова схема

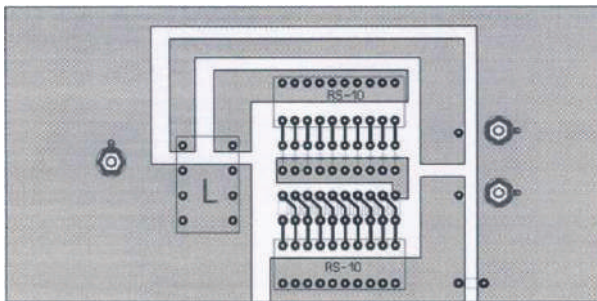


Схема друкованої плати та розміщення монтажу

### Паралельний коливальний контур

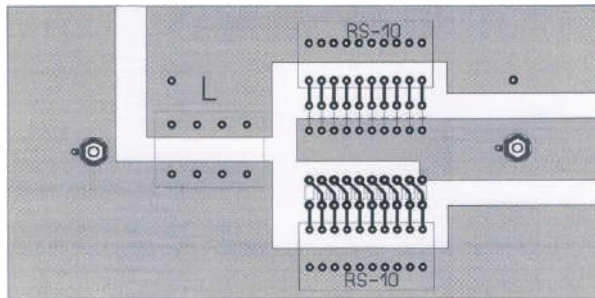


Схема друкованої плати та розміщення монтажу

## Додаток В

### Радіокомпоненти та матеріали

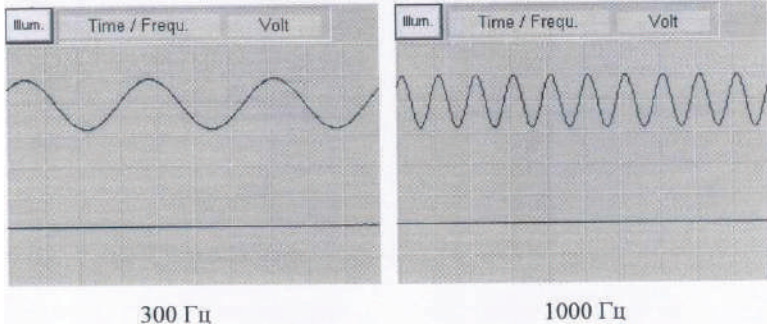
| Назва                                                         | Позначення на схемі | Номинал/Кількість | Примітка                   |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|
| <b>Послідовний контур</b>                                     |                     |                   |                            |
| Котушка індуктивності                                         | L                   | 1,1 мГн           | 400 витків ПЭЛ 0,17 на 6Ш6 |
| Конденсатори                                                  | C1..C10             | 5 x 0,33 мкФ      | -                          |
|                                                               |                     | 5x1 мкФ           | -                          |
| Резистори                                                     | R1..R10             | 5 x 100 Ом        | -                          |
|                                                               |                     | 5x1 кОм           | -                          |
|                                                               | R*                  | 1 x 80..110 Ом    | підстроювальний            |
| Перемикачі                                                    | S1,S2               | 2                 | RS-10                      |
| Конектори                                                     |                     | 3                 | Гніздо типу RCA            |
| Плата текстолітова фольгована                                 | -                   | 1                 | 120 X 60 мм                |
| Стійки під плату                                              | -                   | 4                 | -                          |
| <b>Паралельний контур</b>                                     |                     |                   |                            |
| Котушка індуктивності                                         | L                   | 1,5 мГн           | 500 витків ПЭЛ 0,17 на 6Ш6 |
| Конденсатори                                                  | C1..C10             | 5 x 0,33 мкФ      | -                          |
|                                                               |                     | 5x1 мкФ           | -                          |
| Резистори                                                     | R1..R10             | 5 x 100 Ом        | -                          |
|                                                               |                     | 5x1 кОм           | -                          |
| Перемикачі                                                    | S1,S2               | 2                 | RS-10                      |
| Конектори                                                     | -                   | 2                 | Гніздо типу RCA            |
| Плата текстолітова фольгована                                 | -                   | 1                 | 120 X 60 мм                |
| Стійки під плату                                              | -                   | 4                 | *                          |
| <b>Вихідний з'єднувальний кабель (Звукова карта - контур)</b> |                     |                   |                            |
| НЧ кабель                                                     | -                   | 1,6 м             | моно                       |
| Штекер mini Jack 3.5 mm                                       | -                   | 1                 | -                          |
| Штекер RCA                                                    | -                   | 1                 | -                          |
| <b>Вхідний з'єднувальний кабель (Контур - звукова карта)</b>  |                     |                   |                            |
| НЧ кабель                                                     | -                   | 1,6 м             | стерео                     |
| Штекер miniJack 3.5 mm                                        | -                   | 1                 | -                          |
| Штекер RCA                                                    | -                   | 2                 | -                          |

## Додаток Д

### Досліди з послідовним контуром

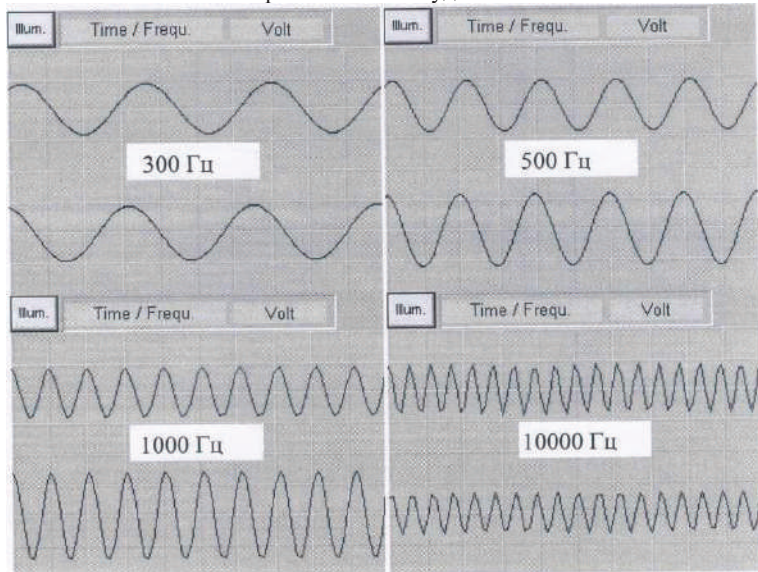
#### Дослід 1

Спостереження коливань за допомогою програми-емулятора осцилографа



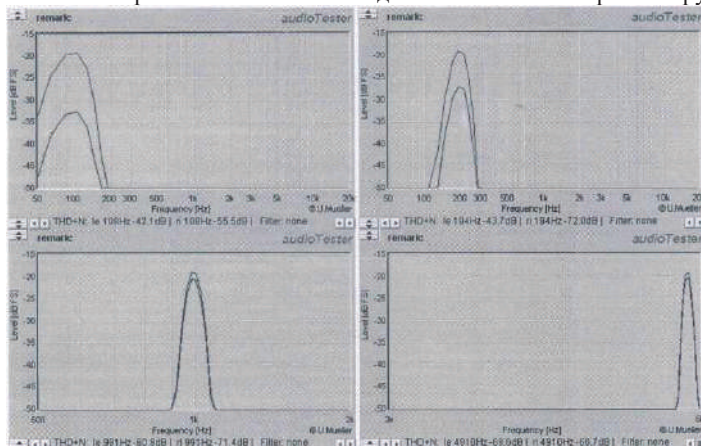
#### Дослід 2

Порівняння амплітуди коливань



### Дослід 3

Визначення резонансної частоти за допомогою аналізатора спектру



Залежність резонансної частоти від ємності контура

|           |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| c         | мкФ | 6,65 | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | 0,33 |
| $f_{рез}$ | Гц  | 1800 | 2000 | 2100 | 2400 | 2800 | 3400 | 4800 | 8400 |

### Дослід 4

Визначення індуктивності котушки

|           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| C         | мкФ  | 6,65 | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | 0,33 |
| $f_{рез}$ | Гц   | 1800 | 2000 | 2100 | 2400 | 2800 | 3400 | 4800 | 8400 |
| $L$       | мкГн | 1075 | 1055 | 1149 | 1099 | 1076 | 1095 | 1099 | 1087 |

### Дослід 5

Визначення добротності та смуги пропускання

|           |     |        |       |       |       |        |        |        |        |
|-----------|-----|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $f_{?}$   | Ом  | 1      | 200   | 300   | 500   | 1000   | 1500   | 2500   | 3500   |
| C         | мкФ | 6,65   | 6     | 5     | 4     | 3      | 2      | 1      | 0,33   |
| $f_{рез}$ | Гц  | 1800   | 2000  | 2100  | 2400  | 2800   | 3400   | 4800   | 8400   |
|           | -   | 14,085 | 0,074 | 0,051 | 0,033 | 0,019  | 0,016  | 0,013  | 0,016  |
|           | Гц  | 121    | 24417 | 41542 | 72346 | 147706 | 217790 | 361728 | 511800 |

Додаток Е

**Досліди з паралельним контуром**

Дослід 1

Визначення індуктивності котушки

|     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| с   | мкФ  | 6,65 | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | 0,33 |
| рез | Гц   | 1700 | 1800 | 1900 | 2100 | 2500 | 3000 | 4300 | 7500 |
| I   | мкГн | 1318 | 1302 | 1403 | 1435 | 1350 | 1407 | 1369 | 1365 |

Дослід 2

Визначення добротності та смуги пропускання

|     |     |        |       |       |       |        |        |        |        |
|-----|-----|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 7?  | Ом  | 1      | 200   | 300   | 500   | 1000   | 1500   | 2500   | 3500   |
| С   | мкФ | 6,65   | 6     | 5     | 4     | 3      | 2      | 1      | 0,33   |
| рез | Гц  | 1700   | 1800  | 1900  | 2100  | 2500   | 3000   | 4300   | 7500   |
| (2  | -   | 14,085 | 0,074 | 0,056 | 0,038 | 0,021  | 0,018  | 0,015  | 0,018  |
| №   | Гц  | 121    | 24417 | 34006 | 55390 | 117750 | 169560 | 290293 | 408004 |



**Наукове видання**

**ГРИНЬОВ** Роман Станіславович

**САЄНКО** Олег Васильович

# **КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З ФІЗИКИ**

Коректура авторська

Підписано до друку 28.04.2023 р.  
Формат паперу 60 x 84/16.  
Папір офсетний. Друк офсетний.  
Ум. друк. арк. 5,35. Наклад 300 прим.  
Зам. № 19616.

Видавець і виготовлювач ТОВ «АСМІ»,  
36011, м. Полтава, вул. В. Міщенко, 2.  
Тел./факс (0532) 60-76-50.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4420 від 16.10.2012 року.