

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ ІНСТИТУТ

«Затверджую»
Директор АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»
М.М. Чальцев
22.06.2011р.

Кафедра «Загальнонаукові дисципліни»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З РОЗДІЛУ КУРСУ ФІЗИКИ «КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ»
ГАЛУЗІ ЗНАНЬ 0701 «ТРАНСПОРТ І ТРАНСПОРТНА
ІНФРАСТРУКТУРА» ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ –
6.070106 «АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ»,
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0601 – «БУДІВНИЦТВО І АРХІТЕКТУРА»,
НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.060101 – «БУДІВНИЦТВО»
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0401 – «ПРИРОДНИЧІ НАУКИ»
НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.040106 – «ЕКОЛОГІЯ, ОХОРОНА
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ»**

15/30 – 2011 - 04

ЗАТВЕРДЖЕНО:
навчально – методична
комісія факультету
«Автомобільні дороги»
Протокол № 8 від 19.04.11

ЗАТВЕРДЖЕНО:
кафедра
«Загальнонаукові дисципліни»
Протокол № 7 від 29.03.11

ЗАТВЕРДЖЕНО:
навчально – методична
комісія факультету
«Автомобільний транспорт»
Протокол № 8 від 20.04.11

Горлівка – 2011

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з розділу курсу фізики «Коливання і хвилі» галузі знань 0701 «Транспорт і транспортна інфраструктура» для студентів напряму підготовки – 6.070106 «Автомобільний транспорт», галузь знань 0601 – «Будівництво і архітектура», напрям підготовки 6.060101 – «Будівництво», галузь знань 0401 – «Природничі науки» напрям підготовки 6.040106 – «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» [Електронний ресурс] / укладачі: А. М. Галіахметов, М. П. Єфремова, О.І. Уколов, Д.Б. Вазанков. – Електрон. дані – Горлівка: ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ, 2012. – 1 електрон. опт. диск (CD-R); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 RAM; WINDOWS 98/2000/NT/XP; MS Word 2000. – Назва з титул. екрану.

Містить 9 лабораторних робіт, методику їхнього виконання, питання і задачі для їх захисту. Наведено рекомендації для обробки експериментальних даних за допомогою ЕОМ та таблиця коефіцієнтів Стюдента.

Укладачі: Галіахметов А.М., к.ф. – м. н., доц. Єфремова М.П.

Уколов О.І.
Вазанков Д.Б.

Відповідальний за випуск: Галіахметов А.М., к.ф. – м. н., доц. каф. «Загальнонаукові дисципліни»

Рецензент: Сирота В.М., к.т.н., доц. каф. «Технічна експлуатація автомобілів»

ЗМІСТ

Загальні вказівки	4
Лабораторна робота № 1. Дослідження загасальних коливань.	5
Лабораторна робота № 2. Визначення прискорення сили ваги оборотним маятником.	11
Лабораторна робота № 3. Вивчення релаксаційних коливань у схемі з газорозрядною лампою	17
Лабораторна робота № 4. Дослідження коливань в простому коливальному контурі	23
Лабораторна робота № 5. Дослідження коливань звукової частоти за допомогою електронного осцилографа.	30
Лабораторна робота № 6. Визначення довжини електромагнітної хвилі в повітрі методом двопровідної лінії.	34
Лабораторна робота №7. Визначення швидкості звука в повітрі методом акустичного резонансу.....	40
Лабораторна робота №8. Вивчення вільних коливань фізичного маятника.....	43
Лабораторна робота №9. Дослідження коливальної система з двома ступенями свободи.....	47
Список рекомендованої літератури.....	56
Додаток А	57
Додаток Б	58

Загальні вказівки

«Коливання і хвилі» – один з важливих розділів фізики, знання якого необхідні спеціалістам багатьох галузей науки і техніки.

Практичне значення. Коливальний і автоколивальний характер часто зустрічаються в техніці: це рух поршнів у циліндрах двигунів, загасальні коливання корпусу машини і її частин під час роботи демпфіруючих пристроїв, робота віброуцільнювачів у будівництві. Для теоретичного описування і розрахунків цих пристроїв необхідні знання теорії коливань.

Вивчення розділу «Коливання і хвилі» передбачає використання взаємозв'язаних форм занять: лекцій, практичних та лабораторних робіт і самостійної роботи студентів. Теоретичні знання, одержані студентами, закріплюються і поглиблюються під час виконання лабораторного практикуму при розв'язанні задач.

Під час виконання роботи необхідно дотримуватися правил техніки безпеки, уміти визначити ціну поділки шкали вимірювальних приладів, орієнтовно оцінювати правильність одержаних експериментальних даних, розраховувати похибки вимірювань.

До виконання лабораторної роботи необхідно готуватися заздалегідь: вивчити теоретичний матеріал даної теми за вказаною літературою і конспектом лекцій; підготуватися до виконання експериментів – уважно вивчити методичні вказівки до лабораторної роботи, продумати її виконання і підготувати заготівку для оформлення звіту.

У заготівці для оформлення звіту вказують тему роботи, її мету, прилади та матеріали, теоретичні відомості і готують таблицю для записування результатів експерименту, враховуючи вказану кількість вимірювань. Заповнюється таблиця під час проведення дослідів.

Підготовку студента до лабораторної роботи перевіряє викладач і допускає до виконання лабораторної роботи. Непідготовлений студент не допускається до виконання лабораторної роботи, а замість цього він у лабораторії вивчає матеріал теми за підручником. Пропущена, таким чином, робота виконується в позаурочний час, що небажано.

Після виконання експериментальної частини необхідно упорядкувати своє робоче місце, оформити заготівку (заповнити таблицю, нижче таблиці записати похибки вимірювальних приладів, коефіцієнт Стюдента тощо) і заготівку підписати у викладача. Решта часу лабораторного заняття використовується студентом для захисту роботи.

Робота вважається захищеною після подання викладачу звіту по експериментальній частині та з теорії.

Статистичну обробку результатів експерименту студент виконує згідно з існуючими правилами.

Лабораторна робота № 1

Тема. Дослідження загасальних коливань.

Мета. 1) Визначити величини, що характеризують загасальні коливання: амплітуду в різні моменти часу, коефіцієнт загасання, період, декремент загасання, логарифмічний декремент загасання, час релаксації, побудувати графік залежності амплітуди загасальних коливань від часу.

2) Вивчити основні кінематичні та енергетичні характеристики коливального руху, їх диференціальні рівняння та їх розв'язок.

Устаткування. Маятник похилий ФПМ – 07.

Практичне значення. Коливання широко поширені у природі та техніці. Знання теорії коливальних процесів допомагає оптимально використовувати їх у багатьох сферах.

Теоретичні відомості

Коливальні рухи належать до процесів, що повторюються в часі. Якщо вони підпорядковуються законам косинуса або синуса, то такі коливання ми будемо називати гармонійними.

Наприклад: $x = A \cos(\omega t + \alpha)$. Тут A – максимальне значення змінної x називається амплітудою коливань, $\omega = 2\pi/T$ – частота коливань (T – період – час, за який відбувається одне повне коливання), $(\omega t + \alpha)$ – фаза коливань (α – початкова фаза).

Такий рух може робити, наприклад, матеріальна точка масою m на пружині Π (рис. 1.1). Силами тертя нехтуємо.

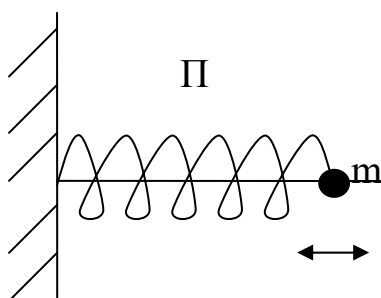


Рисунок 1.1 – Загальний вид установки для коливання точки масою m на пружині Π

Дійсно, відповідно до другого закону Ньютона

$$F = ma = m\ddot{x},$$

де $\ddot{x} = d^2x / dt^2$, x – величина зміщення m щодо положення рівнова-

ги. Однак за законом Гука для пружних деформацій

$$F = -kx, \text{ отже } m\ddot{x} = -kx \text{ або } \ddot{x} = -(k/m)x = -\omega_0^2 x, \quad (1.1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \quad (1.2)$$

де ω_0 – частота вільних коливань пружного маятника.

Рівняння (1.1) має рішення

$$x = A \cos(\omega t + \alpha), \quad (1.3)$$

у чому можна легко переконатися, підставивши (1.3) у (1.1) і одержавши тотожність (*перевірте*).

У випадку математичного маятника (матеріальна точка масою m , що підвішена на нерозтяжній, невагомій нитці довжиною ℓ (рис. 1.2) будемо мати, згідно з другим законом Ньютона для обертального руху.

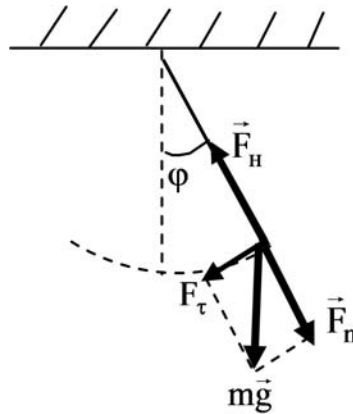


Рисунок 1.2 – Загальний вид математичного маятника

$$M = I\epsilon = I\ddot{\phi}, \quad \text{але} \quad M = F\ell = mg\ell \sin \phi.$$

У випадку малих кутів відхилення ϕ будемо мати $\sin \phi \sim \phi$ і тоді

$$I\ddot{\phi} = -mg\ell \phi,$$

але для матеріальної точки момент інерції $I = m\ell^2$, отже

$$m\ell^2 \ddot{\phi} = -mg\ell \phi.$$

Остаточно

$$\ddot{\phi} = -(g/\ell)\phi = -\omega_0^2 \phi, \quad (1.4)$$

$$\omega_0 = \sqrt{g / \ell} , \quad (1.5)$$

де ω_0 – частота вільних коливань математичного маятника.

Для випадку фізичного маятника замість ℓ уводять радіус обертання r – відстань від центра мас маятника до точки підвісу (осі обертання), тоді

$$I\ddot{\phi} = -\phi mgr , \quad (1.6)$$

$$\ddot{\phi} = -\omega_0^2 \phi , \quad \omega_0 = \sqrt{mgr / I} , \quad (1.7)$$

де ω_0 – частота вільних коливань фізичного маятника;

I – його момент інерції.

Таким чином, у всіх прикладах ми приходимо до диференційного рівняння другого порядку відносно незалежної змінної x (або ϕ), рішенням якого є гармонійна функція.

Якщо врахувати сили, що у ряді випадків пропорційні швидкості $\dot{x}$ (або $\dot{\phi}$), наприклад $F_{\text{тр}} = -r\dot{x}$, де r – коефіцієнт тертя, то ми прийдемо до лінійного диференціального рівняння:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 , \quad (1.8)$$

де β – коефіцієнт загасання, $\beta = r / 2m$.

Якщо припустити $x = A_0 e^{\lambda t}$, то з (1.8) одержимо характеристичне рівняння відносно λ вигляду:

$$\lambda^2 + 2\beta\lambda + \omega_0^2 = 0 , \quad (1.9)$$

звідси

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} = -\beta \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} ,$$

де $i = \sqrt{-1}$.

Остаточно маємо $x = A_0 e^{-\beta t + i\omega t}$, де $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота загасальних коливань. Якщо скористатися формулою Муавра ($e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$), то

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos \omega t . \quad (1.10)$$

Графіки залежності A від t (рис 1.3а) та x від t (рис 1.3б) для загасальних коливань мають вигляд :

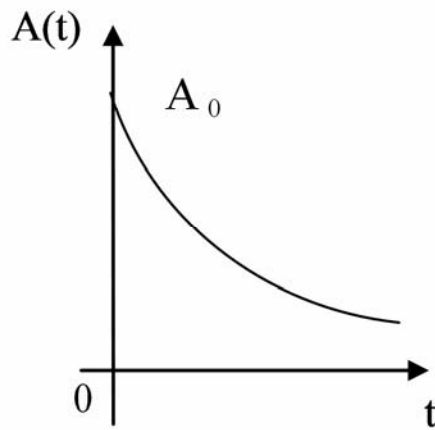


Рисунок 1.3а – Графік залежності A від t

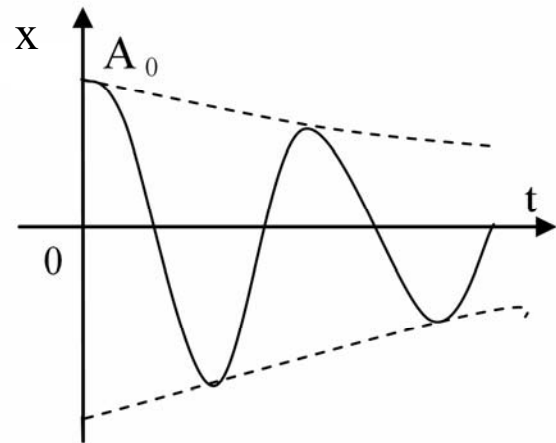


Рисунок 1.3б – Графік залежності x від t

Амплітуда коливань залежить від часу згідно з законом

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \quad (1.11)$$

виходить коливання будуть загасальними (рис 1.3).

Логарифмічний декремент загасання

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{A(t)}{A(t+\Delta t)} T \quad (1.12)$$

характеризує швидкість загасання: якщо λ велике ($\lambda = \beta T$), то амплітуда $A(t)$ швидко зменшується. Відзначимо, що при $\omega_0^2 = \beta^2$ гармонійна складова (1.10) відсутня, що відповідає аперіодичному процесові – і маятник, виведений з положення рівноваги, скільки завгодно до нього прямує (рис. 1.4).

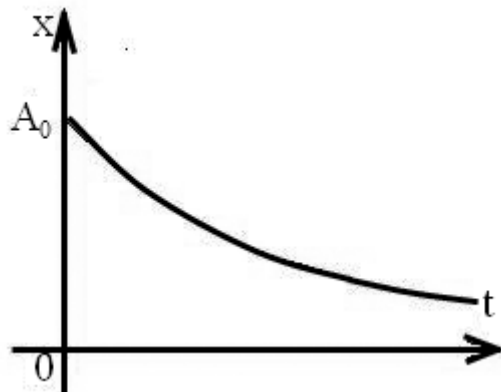


Рисунок 1.4 – Графіки залежності x від t для аперіодичних процесів

Далі, за час $\tau = 1/\beta$ амплітуда коливань зменшується в e раз, цей час τ називається часом релаксації коливань.

У даній роботі використовується модель математичного маятника (див. рис. 1.2), в якому є горизонтальна лінійка для виміру амплітуди коливань через деякий час t .

Порядок виконання роботи

1. Вивести маятник з положення рівноваги на $A_1 = 0,11\text{м}$, $A_2 = 0,7\text{м}$, $A_3 = 0,3\text{м}$ і виміряти час $N = 10$ коливань. Результати дослідів занести в табл. 1.1.

2. Знайти період коливань.

3. Зробити висновок, чи залежить період T від амплітуди A .

4. Вивести маятник з положення рівноваги (відхилити) на величину $A > 0,11\text{ м}$ і відпустити його. Коли амплітуда коливань стане рівною $A = 0,11\text{ м}$, увімкнути секундомір.

5. Відрахувати моменти часу $t_1, t_2 \dots$, що відповідають амплітудам коливань: $A_1 = 0,11\text{м}$, $A_2 = 0,7\text{м}$, $A_3 = 0,5\text{м}$. Для кожної амплітуди час вимірювати тричі.

Таблиця 1.1

A	0,11 м	0.07 м	0,03 м
$t_1, (\text{с})$			
$t_2, (\text{с})$			
$t_{\text{ср}}, (\text{с})$			
$T, (\text{с})$			

6. Результати виміру занести в таблицю 1.2. Значення коефіцієнта загасання β визначається за формулою

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{A(t)}{A(t + \Delta t)}\right)}{\Delta t}.$$

7. Виміряти час t 50 повних коливань і обчислити період коливань $T = t/50$.

8. Визначити логарифмічний декремент загасання за формулою

$$\lambda = \beta T$$

і час релаксації $\tau = 1/\beta$.

Таблиця 1.2

A	$A_1 = 0,11\text{м}$	$A_2 = 0,7\text{м}$	$A_3 = 0,5\text{м}$	$A_4 = 0,03\text{м}$	$A_5 = 0,01\text{м}$
$t_1, (\text{с})$					
$t_2, (\text{с})$					
$t_3, (\text{с})$					

Нижче таблиці 1.2 запишіть:
систематична помилка часу в (с) –
систематична помилка амплітуди в (м) –
кількість дослідів для β –
кількість дослідів для часу t –
коефіцієнт Стюдента для $n = 5$ –
коефіцієнт Стюдента для $n = 3$ –

Обробка результатів експерименту

1. Провести статистичну обробку результатів експерименту згідно з існуючими правилами.
2. Побудувати графік залежності A від t .

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке гармонійні коливання ?
2. Що таке період, частота і фаза коливань?
3. Запишіть (з виведенням) диференціальні рівняння незагасальних коливань математичного маятника, пружного маятника, фізичного маятника.
4. Які значення частот коливань ω для цих випадків?
5. Складіть диференціальне рівняння загасальних коливань.
6. Як визначаються логарифмічний декремент загасання і час релаксації?
7. Що таке аперіодичні коливання?
8. Логарифмічний декремент загасання $\delta = 4$ для гармонійного коливання $x = 3e^{-2t} \cos \omega t$. Чому дорівнюють період коливань T , частота ω , час релаксації τ ?
9. Які процеси в техніці мають коливальний характер, зокрема, в роботі автотранспорту і будівельно-дорожніх машин? Наведіть приклади.

Лабораторна робота № 2

Тема. Визначення прискорення сили ваги оборотним маятником.

Мета. Вивчити основні закони руху фізичного маятника, ознайомитися з методами визначення прискорення сили ваги і визначити прискорення сили ваги, провести статистичну обробку результатів вимірювань.

Устаткування. Універсальний маятник FPM – 04.

Практичне значення. Фізичний маятник є моделлю багатьох механічних коливань. Його властивості використовуються в різних приладах: в годинниках, в приладах для визначення прискорення сили тяжіння, прискорень тіл, що рухаються, коливань земної кори, в гіроскопічних пристроях, в приладах для експериментального визначення моменту інерції тіл, для демонстрації, яка підтверджує факт добового обертання Землі навколо осі (маятник Фуко) і інше.

Теоретичні відомості

Фізичним маятником називається тверде тіло, що може коливатися навколо нерухомої горизонтальної осі (рис. 2.1). Точка перетинання з вертикальною площиною, що проходить через центр мас маятника С, називається точкою підвісу маятника.

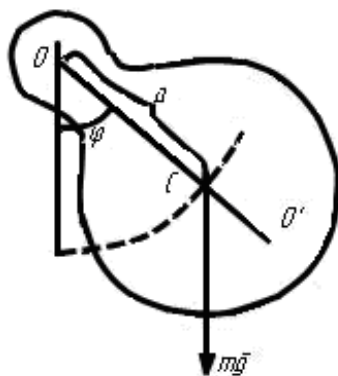


Рисунок 2.1 – Загальний вид фізичного маятника

Рівняння руху маятника має вигляд:

$$I\ddot{\phi} = M \quad \text{або} \quad I\ddot{\phi} = -mga \sin \phi,$$

де ϕ – кут відхилення від положення рівноваги;

I – момент інерції відносно горизонтальної осі O ;

m – маса маятника;

a – відстань між точкою підвісу O і центром маятника.

У випадку малих коливань $\ddot{\phi} + \omega_0^2 \phi = 0$.

Це рівняння описує гармонійний коливальний рух з частотою $\omega_0 = \sqrt{mga/I}$ і відповідним періодом $T = 2\pi\sqrt{I/mga}$. Величина $I/ma = \ell_{\text{пр}}$ називається приведеною довжиною фізичного маятника. Використовуючи цей вираз, можна записати формулу для періоду коливань фізичного маятника у вигляді

$$T = 2\pi\sqrt{\ell_{\text{пр}} / g}.$$

Відкладемо від точки підвісу О уздовж прямої ОС відрізок OO' , довжина якого дорівнює приведеній довжині фізичного маятника. Точка O' називається центром коливання. Центр коливання можна визначити як матеріальну точку, у якій необхідно зосередити всю масу фізичного маятника.

Точка підвісу і центр коливання є спряженими точками, що впливає з теореми Штейнера.

Маятник, що має дві осі, навколо яких він по черзі може коливатися, називається оборотним.

Маятник являє собою сталевий стрижень довжиною більше 1 м. На ньому закріплено опорні призми R_1 і R_2 . Сталева сочка D_1 знаходиться між опорами. Друга сочка D_2 розташована за призмою ближче до кінця стрижня (рис. 2.2, 2.3). Переміщуючи цю сочку і по черзі підвішуючи маятник на призми R_1 і R_2 , можна добитися збігу періодів маятника, що необхідно виконати у другій частині завдання.

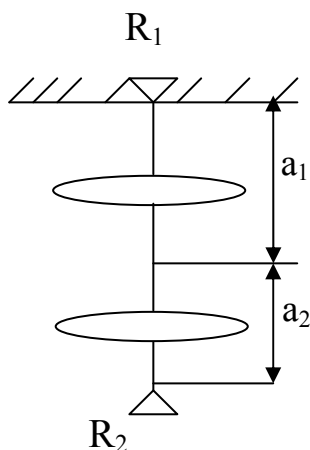


Рисунок 2.2 – Загальний вид оборотного маятника

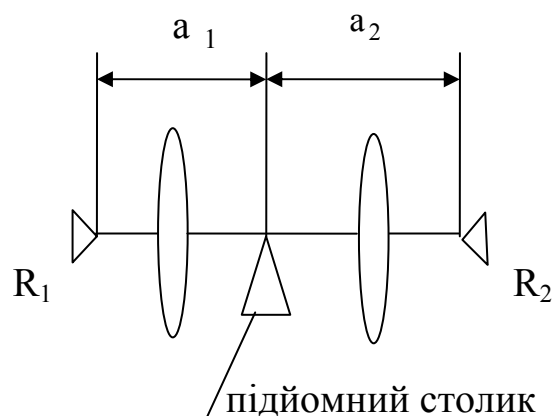


Рисунок 2.3 – Схема визначення центра ваги оборотного маятника

У першій частині завдання визначається прискорення вільного падіння за формулою

$$g = 4\pi^2 \ell (a_1 - a_2) / (a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2),$$

яка застосовується у такий спосіб для фізичного маятника.

Момент інерції щодо осі коливання може бути виражений за теоремою Штейнера так:

$$I = I_0 + ma^2,$$

де I_0 – момент інерції маятника щодо осі, що проходить через центр ваги паралельно осі коливання.

Тоді

$$T = 2\pi \sqrt{(I_0 + ma^2) / mga}.$$

Період коливань маятника щодо опорних призм може бути виражений відповідно:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{(I_0 + ma_1^2) / mga_1}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{(I_0 + ma_2^2) / mga_2}.$$

Виконуємо математичні перетворення:

$$mga_1 T_1^2 = 4\pi^2 (I_0 + ma_1^2), \quad mga_2 T_2^2 = 4\pi^2 (I_0 + ma_2^2).$$

Віднімемо з першої рівності другу:

$$mg(a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2) = 4\pi^2 m(a_1^2 - a_2^2).$$

З останнього виразу можна визначити прискорення сили ваги:

$$g = 4\pi^2 (a_1 - a_2)(a_1 + a_2) / (a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2),$$

де $a_1 + a_2 = \ell$ – відстань між опорними призмами.

Тоді

$$g = 4\pi^2 \ell (a_1 - a_2) / (a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2). \quad (2.1)$$

Порядок виконання роботи

У першій частині завдання необхідно визначити g за формулою (2.1).

Для цього необхідно:

1. Підвісити маятник на призму R_1 , визначити за допомогою секундоміра час t_1 N повних коливань (Задає викладач (зробити 3 рази)). При цьому відхилення нижнього кінця від положення рівноваги не повинне перевищувати 2-3 см.

2. Зняти маятник, підвісити на призму R_2 і визначити час t_2 N повних коливань (3 рази).

3. Визначити центр ваги на підйомному столику (рис.2.3).

Таблиця 2.1

№	t_1, c	T_1, c	t_2, c	T_2, c	a_1, m	a_2, m
1						
2						
3						
середнє						
1						
2						
3						
середнє						

4. Змістити одну з сочок маятника на 2-3 см. Проробити ті ж виміри (періодів і центра ваги) при новому розташуванні сочок.

Результати вимірів занести в табл. 2.1.

Розрахувати абсолютну і відносну помилки і результат записати у вигляді

$$g = (g_{cp} \pm \Delta g_{cp}) \text{ м / с}^2,$$

тобто розрахувати до довірчого інтервалу.

Слід зазначити, що перша частина завдання більш проста і доступна кожному студенту у виконанні. Друга частина містить більше елементів досліджень, вимагає гарної теоретичної підготовки перед виконанням і може бути запропонована викладачем для творчої роботи зі студентом. При цьому особливу увагу варто звернути на якість виконання графіків $T(\ell)$.

II частина завдання

Використовуючи експериментальні дані, розрахувати період коливань T . Для цього необхідно:

1. Визначити періоди коливань маятника при різних положеннях сочки D_2 , що задається відрізком ℓ (рис 2.4). При цьому призми R_1 і R_2 і сочка D_1 повинні бути закріплені нерухомо на відстанях $a_1=5$ см, $a_2=25$ см,

$a_3=25\text{см}$. Переміщаючи сочку D_2 на відстані ($\ell = 10; 12; 14; 16; 18; 20 \text{ см.}$), виміряти час t_1 і t_2 десяти повних коливань ($N=10$) на призмах R_1 і R_2 по черзі. Результати вимірів записати в табл. 2.2. Рекомендується паралельно будувати графік залежності періодів коливань для двох положень маятника T_1 і T_2 від відстані ℓ .

Таблиця 2.2

$\ell, \text{м}$	Номер виміру	1-е положення		2-е положення	
			$T_1 = \frac{\langle t_1 \rangle}{N}, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$T_2 = \frac{\langle t_2 \rangle}{n}, \text{с}$
	1				
	2				
	3				

2. Визначити центр ваги на підйомному столику (див. рис. 2.3).

3. Після побудови графіка знайти точки перетинання кривих $T_1(\ell)$ і $T_2(\ell)$, що відповідають рівності періодів T_1 і T_2 . Фіксувати відповідне положення сочки D_2 , що характеризується відстанню ℓ_0 .

4. Обережно переміщаючи сочку D_2 поблизу ℓ_0 , провести виміри часу десяти повних коливань t_1 і t_2 на призмах R_1 і R_2 . Добитися збігу часу t_1 і t_2 у межах помилки секундоміра.

Результати вимірів записати у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

$\ell, \text{м}$	$t_1, \text{с}$ 1-е положення	$t_2, \text{с}$ 2-е положення

5. Знайшовши більш точне положення сочки D_2 , вимірити час N повних коливань (задає викладач) на опорах R_1 і R_2 по 3-рази, записуючи результати вимірів у табл. 2.4

Таблиця 2.4

Номер вимірів	R_1	R_2	$\langle t \rangle$	$\langle T \rangle$
	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	с	с

6. Вимірити відстань між призми з точністю до 0,2 мм. Воно і буде приведеною довжиною $\ell_{\text{пр}}$.

7. Обчислити прискорення сили ваги, використовуючи результати табл. 2.4 і формулу $T = 2\pi\sqrt{\ell_{\text{пр}}/g}$, тобто $g = 4\pi^2\ell_{\text{пр}}/T^2$.

8. Визначити помилки вимірів. Доцільно спочатку розрахувати відносну помилку за формулою

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta \ell}{\ell} + 2 \frac{\Delta T}{T},$$

де $\Delta T = \Delta t/N$.

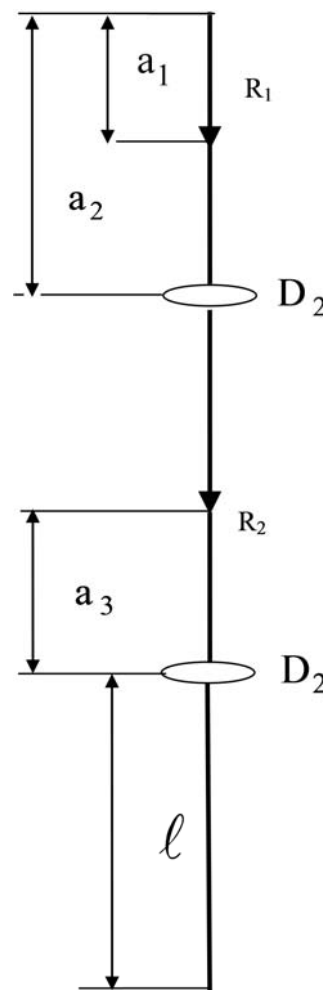


Рисунок 2.4 – Схема визначення параметрів оборотного маятника

Якщо випадкові помилки, оцінені за даним методом, виявляться менше приладових, то за $\Delta \ell_{\text{пр}}$ береться помилка штангенциркуля, а за Δt – помилка секундоміра.

Запишіть відомості про помилки.

Систематична помилка часу (с) –

Систематична помилка періоду (с) –
 Систематична помилка довжини (м) –
 Кількість дослідів –
 Коефіцієнт Стюдента –

Обробка результатів експерименту

Провести статистичну обробку результатів згідно з існуючими правилами.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається фізичним маятником?
2. Дати визначення періоду, частоти амплітуди і фази механічних коливань.
3. Що таке центр мас (ваги) і центр коливання фізичного маятника?
4. Що таке оборотний маятник?
5. Записати основне рівняння динаміки вільних гармонійних коливань.
6. Що називають силою ваги, від чого вона залежить?
7. Чи можна силу ваги і силу тяжіння вважати однієї і тією ж силою при суворому міркуванні? Чому?
8. Від яких величин залежить і від яких не залежить період коливань маятника?
9. Теорема Штейнера. Яке її практичне значення?
10. Як зміниться період коливань маятника, якщо маятник підняти на висоту h над поверхнею Землі?
11. У чому полягає метод оборотного маятника для визначення прискорення сили ваги?
12. Відстань між опорами в ході експерименту не змінюють. Чи означає це, що наведена довжина фізичного маятника при зміні положення сочки залишається постійною?
13. Розв'яжіть задачі № 3.45, 3.48 [5].

Лабораторна робота № 3

Тема. Вивчення релаксаційних коливань у схемі з газорозрядною лампою.

Мета. Вивчення принципу дії релаксаційного генератора, визначення періоду релаксаційних коливань.

Устаткування. Установка для вивчення релаксаційних коливань, осцилограф, ВУП.

Практичне значення. Досліджувані процеси дозволяють зрозуміти

ДВНЗ «ДонНТУ» Автомобільно-дорожній інститут

принципи дії коливальних систем з одним накопичувачем енергії, що є невід'ємною частиною багатьох електронних схем: одновібраторів, мультівібраторів, генераторів розгортання осцилографів тощо.

Блок інформації і опис устаткування

Коливальні системи, що зустрічалися в описаних раніше лабораторних роботах, мали два накопичувача, між якими проходило перекачування енергії. У контурі, що містить ємність і самоіндукцію, енергія електричного поля переходила в енергію магнітного поля, і навпаки при коливаннях маятника потенціальна енергія поля сили тяжіння переходила в кінетичну енергію маси, що рухається, і т.д.

Зустрічаються, однак, коливальні системи, що містять усього один накопичувач енергії. Розглянемо як приклад електричне коло, що містить конденсатор і опір без самоіндукції. Розряд конденсатора через опір являє собою аперіодичний процес. Розряду, однак, можна надати періодичний характер, відновляючи заряд конденсатора через постійні проміжки часу. Коливання в цьому випадку є сукупністю двох аперіодичних процесів – процесу зарядки конденсатора і процесу його розрядки. Такі коливання називаються релаксаційними.

У нашій установці роль "ключа", що забезпечує поперемінну зарядку і розрядку конденсатора, виконує газорозрядний діод. Залежність струму від напруги для газорозрядної лампи не підпорядковується закону Ома і характеризується рядом особливостей (рис. 3.1).

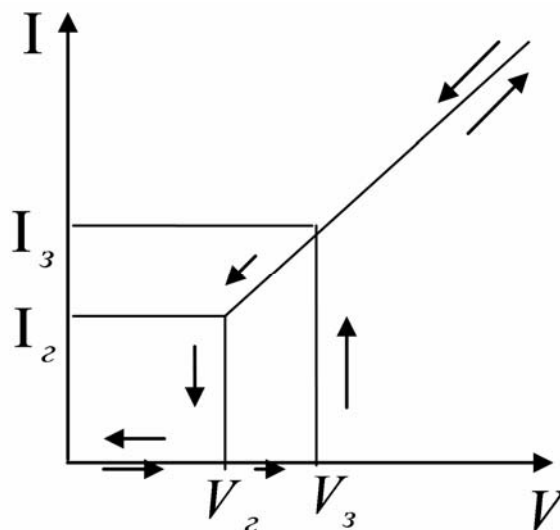


Рисунок 3.1 – Ідеалізована характеристика I від V для газорозрядної лампи

При малих напругах лампа не пропускає струм (не горить) зовсім. Струм у лампі виникає тільки у тому випадку, якщо різниця потенціалів на її електродах досягає напруги "запалювання" V_3 . При цьому стрибком

установлюється кінцева сила. При подальшому збільшенні напруги сила струму зростає за законом, близьким до лінійного. Якщо тепер зменшувати напругу на лампі, що горить, то при напрузі рівній V_3 лампа ще не гасне і сила струму продовжує зменшуватися. Лампа перестає пропускати струм лише при напрузі "гасіння" V_r , яка звичайно істотно менше V_3 . Сила струму при цьому стрибком падає від значення I_r ($I_r < I_3$) до нуля.

Характеристика, зображена на рис. 3.1, є трохи ідеалізованою. У реальної лампи залежність $I = I(V)$ є не цілком лінійною. При $V > V_3$ залежності струму від напруги, зняті під час зростання і зменшення напруги, звичайно не збігаються. Ці відмінності носять, утім, другорядний характер і для наших цілей виявляються несуттєвими. Розглянемо схему установки (рис.3.2). Нехай напруга батареї ε більше напруги запалювання V_3 . У позначеннях, прийнятих за схемою, справедливе рівняння

$$I_c + I(V) = (\varepsilon - V) / R$$

або

$$C(dV / dt) + I(V) = (\varepsilon - V) / R. \quad (3.1)$$

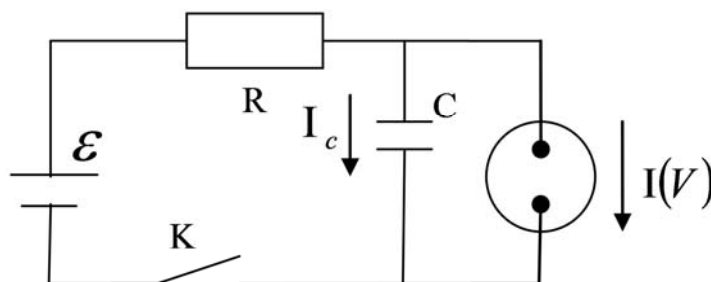


Рисунок 3.2 – Схема релаксаційного генератора

Розглянемо насамперед стаціонарний режим роботи, тобто випадок, коли напруга на конденсаторі V стала. Прирівнюючи до нуля dV/dt , знайдемо для струму I при стаціонарному режимі

$$I_{CT} = (\varepsilon - V) / R. \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) може бути представлено графічно (рис 3.3). При різних R графіки мають вигляд прямих, що перетинаються у точці $V = \varepsilon$, $I = 0$.

Стаціонарний режим схеми визначається шляхом спільного розв'язання рівняння (3.2) і рівняння $I = I(V)$, що визначає вольт-амперну ха-

ктеристику лампи. На рис. 3.3 розв'язання визначається точкою перетинання вольт-амперної характеристики лампи і навантажувальної прямої (3.2). З рис.3.3 випливає, що така точка є тільки при малих R .

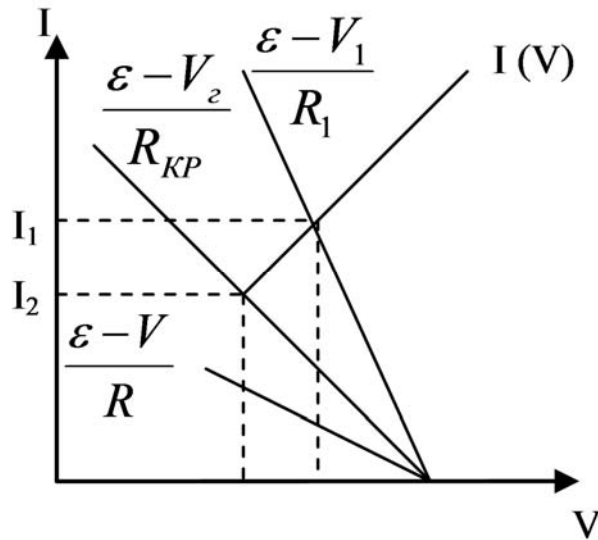


Рисунок 3.3 – Визначення стаціонарного режиму релаксаційного генератора

Коли випадок є критичним, то при подальшому збільшенні графіки не перетинаються, і стаціонарний режим стає неможливим. У цьому випадку в системі встановлюються коливання

$$R = R_{KP} = (\varepsilon - V_r) / I_r, \quad (3.3)$$

Розглянемо, як відбувається коливальний процес. Нехай на початку досліду ключ K розімкнутий і $V = 0$. Замкнемо ключ K . Конденсатор C починає заряджатися через опір R , напруга V збільшується. Як тільки вона досягає напруги запалювання V_z , лампа починає проводити струм, причому проходження струму через лампу супроводжується розрядкою конденсатора. Справді, навантажувальна робота не перетинається з характеристикою лампи, а виходить, що батарея ε , будучи включена через опір R , не може підтримувати необхідну для горіння лампи величину струму.

Під час горіння лампи конденсатор розряджається, і напруга на ньому падає. Коли вона досягає "напруги гасіння", лампа припиняє проводити струм і конденсатор знову починає заряджатися. Криву напруги на конденсаторі зображено на рис. 3.4.

Амплітуда коливань дорівнює $V_z - V_r$. Обчислимо період релаксаційних коливань. Період коливання T складається із суми часу зарядки τ_z і часу розрядки τ_r . Звичайно опір обирають великий, істотно перевищуючий опір запаленої лампи.

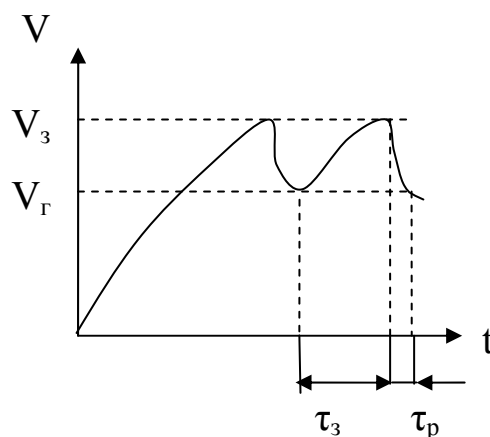


Рисунок 3.4 – Осцилограма релаксаційних коливань

У цьому випадку (яким ми й обмежуємося) $T \approx \tau_3$. Під час зарядки конденсатора лампа не горить $I(V) = 0$ і рівняння (3.1) набуває вигляду:

$$RC \frac{dV}{dt} = \varepsilon - V. \quad (3.4)$$

Будемо відраховувати час з моменту затухання лампи, так що при $t=0$ (див. рис. 3.4)

$$V = \varepsilon - (\varepsilon - V_r) e^{-t/RC}, \quad (3.5)$$

$$t = \tau_3$$

У момент запалювання $V = V_3$.

Тому маємо

$$V_3 = \varepsilon - (\varepsilon - V_r) e^{-\tau_3/RC}. \quad (3.6)$$

З (3.5) і (3.6) неважко знайти

$$T \approx \tau_3 = RC \ln \frac{\varepsilon - V_r}{\varepsilon - V_3}. \quad (3.7)$$

Розвинута вище теорія є наближеною. Ряд прийнятих при розрахунках припущень, що спрощують, обговорено у тексті. Варто мати на увазі, що ми цілком зневажили паразитними ємностями і паразитними самоіндукціями схеми. Не розглядалися також процеси розвитку розряду і деіонізації під час загасання. Теорія справедлива лише в тих випадках, коли в схемі встановлено досить велику ємність C і коли період коливання істотно більше часу розвитку розряду і деіонізації (практично 10^{-5} с).

Порядок виконання роботи

1. Зберіть схему, зображену на рис. 3.5, і зніміть вольт - амперну характеристику неонові лампи (для цього ключ K_2 розімкніть). Знімаючи вольт - амперну характеристику, потрібно більш точно визначити потенціал гасіння V_r . Побудуйте графік $I = f(V)$.

2. Визначення періоду коливань. Виконання цього пункту вимагає знання рукояток осцилографа. Тому до роботи потрібно приступати тільки після ознайомлення з призначенням рукояток осцилографа. Уключити вилок осцилографа в мережу змінного струму. Після появи світлої плями на екрані відповідними рукоятками (вісь "Х" або вісь "Y") установити його в центрі екрана. З установкою з'єднані клеми осцилографа "вхід" і "земля". Замкнути ключ K_2 . Підібрати потрібне розслаблення рукояткою "ослаблення". Рукояткою " посилення по вертикалі" установити таку амплітуду коливань, щоб вона займала приблизно третину екрана. Установити приблизний діапазон частот. Потім рукоятками "частота плавно" і "амплітуда синхронізації" добитися, щоб зображення на екрані не переміщалося. Запишіть значення ε .

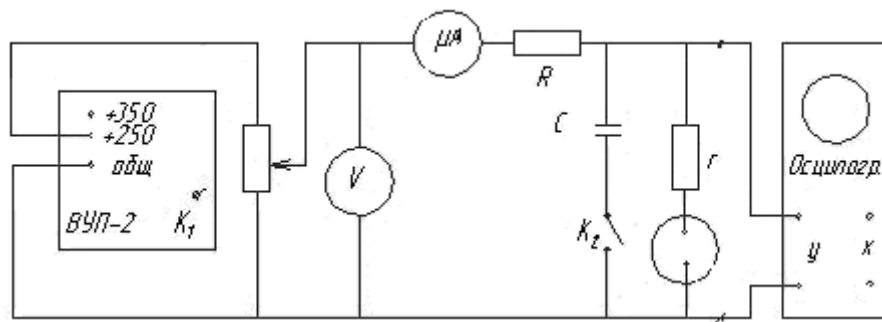


Рисунок 3.5 – Монтажна схема установки для вивчення релаксаційних коливань

Визначити число поділок по горизонталі (x_p) та вертикалі (y_p), у межах якого укладається одне релаксаційне коливання. Потім відключити контур генератора релаксаційних коливань і з'єднати провідником "вхід" з "контрольним сигналом". При цьому на екрані буде синусоїдальна крива (до вертикальних пластин осцилографа у цьому випадку подається напруга 6,3 В).

"Посилення" і "ослаблення" під час підключення синусоїдальної напруги до вертикальних пластин осцилографа повинні залишатися такими ж, як під час дослідження релаксаційних коливань. Визначити кількість поділок по горизонталі (x_c) та вертикалі (y_c), у межах якої укладається одна синусоїда, причому y_c повинно відповідати амплітуді синусоїди.

3. Обробка результатів вимірів.

1) Розрахуйте напругу "запалювання" V_3

$$V_3 = V_r + \frac{U_p}{U_c} 6,3\sqrt{2}.$$

2) За результатами спостережень над релаксаційними коливаннями визначити експериментальне значення періоду релаксаційного коливання за формулою:

$$T_{\text{експ}} = \frac{x_p}{x_c} 0,02 \text{ (с)}.$$

3) Користуючись значенням ємкості $C(\Phi)$ та опору R (Ом), обчисліть за формулою (3.7) теоретичний період $T_{\text{теор}}$ релаксаційного коливання.

4) Оцініть час розрядки τ_p конденсатору.

5) Порівняйте експериментальне значення періоду релаксаційних коливань з величиною, розрахованою за формулою (3.7). Оцініть похибку, яка виникає через нехтування часом розряду.

Контрольні запитання і завдання

1. Устрій і принцип дії релаксаційного генератора.
2. Які коливання називаються релаксаційними? Їх графік.
3. Що таке вольт-амперна характеристика?
4. Як визначаються потенціали гасіння і запалювання?
5. Що таке стаціонарний режим релаксаційного генератора?
6. Чи при будь-яких опорах R зовнішньої ділянки кола у системі встановлюються релаксаційні коливання?
7. Характеристики коливального процесу.
8. Приведіть приклади коливальних процесів із двома і одним накопичувачем енергії.
9. Чи є наближеною теорія, приведена в описі роботи?

Лабораторна робота № 4

Тема. Дослідження коливань в простому коливальному контурі.

Мета. Ознайомитись з устроєм і принципом роботи коливального контура. Дослідити фазові криві за допомогою осцилографа.

Устаткування. Магазили опору, індуктивностей і ємкостей, джерело постійної напруги, реле, електронний осцилограф.

Практичне значення. Процеси, що відбуваються в коливальному контурі, лежать в основі роботи більшості електронних пристроїв і приладів, що використовуються в народному господарстві, зокрема на транспорті, будівництві тощо.

Опис установки

Дослідження вільних загасальних коливань проводиться за схемою, показаній на рис. 4.1. Конденсатор C за допомогою реле автоматично підключається до джерела постійної напруги B (зарядка конденсатора), до індуктивності L і опору R (розряд конденсатора в контурі). Таке перемикання відбувається з частотою 50 Гц і досягається тим, що при зміні напрямку змінного струму через електромагнітне реле його якорь - перемикач (магнітом'яке залізо) притягується то до одного, то до іншого полюса, замикаючи клему O по черзі з 1 і 2.

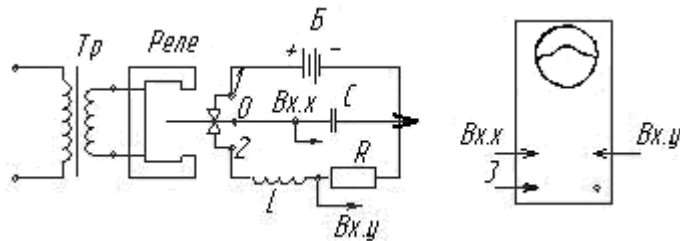


Рисунок 4.1 – Схема дослідження загасальних коливань в простому коливальному контурі

Спостереження проводиться на екрані осцилографа, клеми якого X , Y , 3 сполучені провідниками з відповідними точками контура, позначеними тими ж буквами. Якщо включити генератор тимчасової розгортки осцилографа і синхронізувати його частоту з частотою перемикального реле, то на екрані спостерігатиметься картина, зображена на рис. 4.2. Тут S відповідає $0,02$, тобто періоду коливань струму в зовнішній мережі, а S_0 – періоду коливань T в контурі.

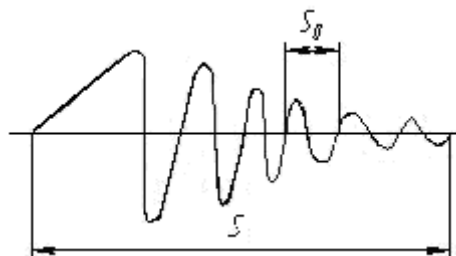


Рисунок 4.2 – Осцилограма загасальних коливань

Для отримання фазової кривої $U(I)$, тобто залежності напруги на конденсаторі від струму в контурі, достатньо вимкнути генератор розгор-

тки осцилографа. При цьому на вертикальний вхід осцилографа так само подаватиметься напруга з конденсатора, а на горизонтальний - напруга з активного опору R . Оскільки в активному опорі напруга знаходиться у фазі із струмом, то тим самим ми одержуємо залежність напруги на конденсаторі від струму в контурі для періодичного процесу (рис. 4.3) та аперіодичного процесу (рис. 4.4).

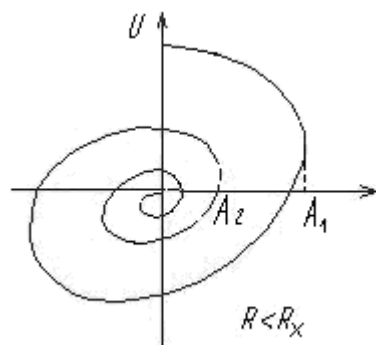


Рисунок 4.3 – Графік фазової кривої для періодичного процесу

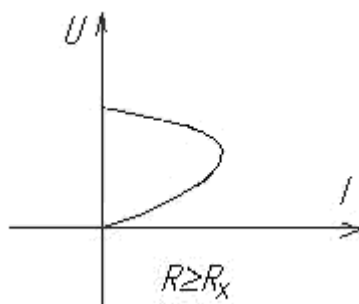


Рисунок 4.4 – Графік фазової кривої для аперіодичного процесу

Короткі теоретичні відомості

Простий коливальний контур складається з ємності C , індуктивності L і активного опору R (рис. 4.5). Якщо заздалегідь заряджений конденсатор замкнути на індуктивність, то в контурі виникнуть електромагнітні коливання.

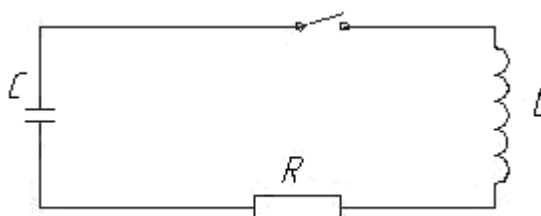


Рисунок 4.5 – Схема простого коливального контура

Дійсно, під час замикання ключа конденсатор C почне розряджатися

в контурі з'явиться струм і пропорційне йому магнітне поле. Зміна магнітного поля приводить до виникнення в контурі ЕДС самоіндукції, яка спочатку уповільнює швидкість розряду конденсатора, але після того, як конденсатор повністю розрядився, починає підтримувати струм в колишньому напрямку. В результаті відбувається перезарядження конденсатора. Потім процес розряду почнеться знову, але у зворотному напрямку тощо.

Під час розряду конденсатора його електростатична енергія перетворюється на енергію магнітного поля струму в контурі і навпаки.

Проміжок часу, протягом якого конденсатор розряджається і заряджається знову, повертаючись в початковий стан, називається періодом вільних коливань.

Максимальні значення напруги на конденсаторі U_m і струму в контурі I_m носять назву амплітуд коливань напруги і струму. Оскільки контур завжди володіє деяким активним опором R , то частина енергії електромагнітних коливань перетворюється на тепло, унаслідок чого амплітуда коливань в контурі поступово зменшується. Зменшення енергії електромагнітних коливань через втрати на випромінювання для контура, що використовується в даній роботі, нескінченно мале і тому не береться до уваги. Із збільшенням R загасання коливань відбувається швидше, і, нарешті, при достатньо великому R коливання взагалі не виникають – спостерігається аперіодичний розряд конденсатора.

Знайдемо рівняння, що описує вільні коливання в даному контурі. Заряд і напруга U на конденсаторі зв'язані співвідношенням, звідки струм в контурі

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (4.1)$$

Зміна струму в часі викликає ЕДС самоіндукції.

Однак, слід зазначити, що

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} = -LC \frac{d^2U}{dt^2}. \quad (4.2)$$

Згідно з законом Ома для повного ланцюга

$$IR + U = \varepsilon_s. \quad (4.3)$$

Підставляючи в рівняння (4.3) співвідношення (4.1) і (4.2), одержуємо

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0, \quad (4.4)$$

де

$$\beta = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (4.5)$$

З теорії коливань відомо, що рівняння такого виду при умові $\beta < \omega_0$ має наступне розв'язання:

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (4.6)$$

де

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

Отже, в даному контурі виникають вільні загасальні коливання з частотою ω . Період коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (4.7)$$

Із збільшенням коефіцієнта загасання β період коливань T росте, прагнучи до нескінченності при $\beta \rightarrow \omega_0$. Це означає, що коливальний ряд переходить в аперіодичний. Для контура з певними значеннями L і C аперіодичний процес, як видно з останньої формули, здійснюється при

$$R \geq R_k, \quad \text{де} \quad R_k = 2\sqrt{L/C}. \quad (4.8)$$

Для характеристики загасання коливань часто користуються логарифмічним декрементом загасання :

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2} = \beta T, \quad (4.9)$$

де A_1 і A_2 – амплітуди коливання (напруги або струму), які відповідають моментам часу, відмінним від періоду.

У ряді випадків коливальний процес доцільно досліджувати, вивчивши безпосередньо залежність U від I . Крива, що зображає цю залежність, називається фазовою кривою. За відсутності загасання в контурі фа-

зова крива має форму еліпса (еліпс виходить, як відомо, в результаті складання двох взаємно перпендикулярних гармонійних коливань однакової частоти).

За наявності загасання в контурі амплітуда коливань зменшується з часом, що приводить до складнішої форми фазової кривої – спіралі, що скручується. Її можна безпосередньо спостерігати на екрані осцилографа (див. рис. 4.3) при певному підключенні його до контура.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему, згідно з рис. 4.1, під'єднавши схеми X, Y, Z осцилографи до відповідних точок контура, які позначені тими ж буквами.

2. Включити генератор розгортки осцилографа і реле (останнє повинне видавати характерне дзижчання). Змінюючи частоту генератора розгортки, добитися отримання на екрані стійкої осцилограми (рис. 4.2).

3. Міняючи LC і R, простежити за характером зміни загасальних коливань. Зокрема, провести спостереження за переходом коливального процесу в аперіодичний.

4. Визначити залежність періоду коливань T від LC при виведеному магазині опорів. Розрахувати не менше п'яти точок в діапазоні L C від 10 до 50 мГн мкФ.

Розрахунок T проводити за формулою

$$T_{\text{експ}} = 0,02(S_0 / S),$$

де S_0 і S – інтервали на осцилограмі, показані на рис. 4.2. Для більшої точності слід зміряти інтервал ΔS , який містить n інтервалів S_0 , тоді

$$S_0 = \Delta S / n.$$

Результати вимірювань і розрахунків занести в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

LC (мГн мкФ)	S (мм)	ΔS (мм)	n	S_0 (мм)	$T_{\text{експ}}$ (с)	$T_{\text{теор}}$ (с)

Побудувати графік $T_{\text{теор}}(LC)$ за формулою (4.7). На цей же графік нанести дослідні значення $T_{\text{експ}}$. З'ясувати причину можливих розбіжностей.

тей.

5. Дослідити фазові криві. Для цього вимкнути генератор розвертки осцилографа, міняти LC і R.

6. Встановивши $L = 100$ мГн і $C = 0,1$ мкФ, визначити за допомогою фазової кривої величину критичного опору R_k , при якому настає аперіодичний процес (рис. 4.3). Для більшої точності спостереження вести при максимальному вертикальному і горизонтальному посиленні осцилографа, а також при достатньо малій яскравості і ретельному фокусуванні. Одержані результати порівняти з теоретичними.

7. Визначити за фазовими кривими при цих же значеннях L і C залежність логарифмічного декременту загасання λ від R в діапазоні R від 100 до 600 Ом (п'ять-шість точок). Розрахунок проводити за формулою (4.9). Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 4.2.

Таблиця 4. 2

R (Ом)	A1 (мм)	A2 (мм)	λ

Побудувати графік $\lambda = f(R)$.

8. Одержані результати порівняти з теоретичними.

Примітка. Під час порівняння експериментальних даних з теоретичними необхідно мати на увазі, що окрім опору магазину R в контурі, є ще активний опір в магазині індуктивностей R_L , які при розрахунках повинні враховуватися. Значення R_L вказані на установці.

Контрольні запитання

1. Що називається коливальним контуром? Намалювати його принципову схему.

2. Застосувавши до контура друге рівняння Кирхгофа, вивести рівняння для зміни заряду Q на обкладинках конденсатора.

3. Вивести формулу Томсона.

4. Що таке добротність контура?

5. Що називається логарифмічним декрементом загасання? Написати вираз, що зв'язує логарифмічний декремент загасання λ і коефіцієнт загасання β .

6. Як змінюється амплітуда загасальних коливань з часом? Поясніть графіком.

7. Що зображує картина, яка спостерігається на екрані осцилографа:

а) при включеному генераторі розгортки,

б) при вимкненому генераторі розгортки?

8. Що таке фазова крива? Як одержати фазову криву на екрані осцилографа?

Лабораторна робота № 5

Тема. Дослідження коливань звукової частоти за допомогою електронного осцилографа.

Мета. Ознайомитися з практичними методами складання коливань за допомогою осцилографа і звукових генераторів.

Устаткування. Осцилограф, два звукові генератори, сполучні провідники.

Практичне значення. Ознайомлення з результатом складання коливань - важливий момент для розуміння процесів, які відбуваються в акустиці і радіозв'язку. Використовування осцилографа необхідне для дослідження, порівняння і визначення всіх швидкозмінних процесів у техніці.

Короткі теоретичні відомості.

Під час складання двох взаємно перпендикулярних коливань траєкторія висхідного руху має вигляд досить складної кривої – фігура Ліссажу. У простому випадку для співвідношення частот 1:1 і різниці фаз $\Delta\phi = \pi/2$ маємо еліпс $y = b \cos(\omega t + \phi)$, $x = a \cos \omega t$ (рис. 5.1).

Для відношення частот 1 : 2 і $\Delta\phi = \pi/2$ фігура Ліссажу має вигляд (рис. 5.2). Якщо у фігурах Ліссажу підрахувати число екстремумів (максимумів і мінімумів) уздовж осі $x - n_x$ і уздовж осі $y - n_y$, то частоти складових коливань будуть зв'язані співвідношенням, з якого можна визначити одне з ν , знаючи інші величини.

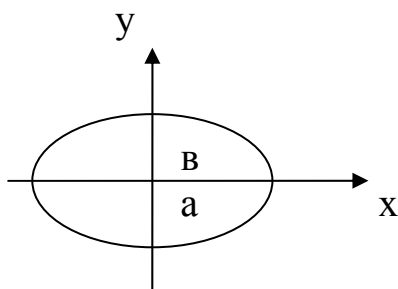


Рисунок. 5.1 – Фігури Ліссажу для співвідношення частот 1:1

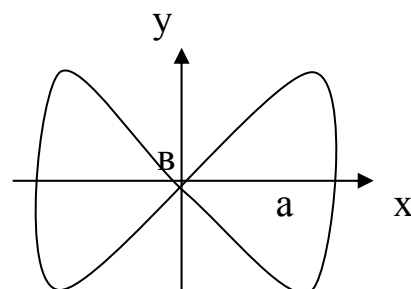


Рисунок. 5.2 – Фігури Ліссажу для співвідношення частот 1:2

$$\frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{n_x}{n_y}. \quad (5.1)$$

Якщо скласти коливання одного напрямку з однаковими амплітудами і близькими частотами вигляду $x_1 = A \cos \omega_1 t$ і $x_2 = A \cos \omega_2 t$, то висхідне коливання описується рівнянням

$$\begin{aligned}
 x = x_1 + x_2 &= 2A \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t = \\
 &= 2A \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cos \frac{\Delta\omega}{2} t
 \end{aligned}
 \quad (5.2)$$

Звідси витікає, що вислідна амплітуда $2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t$ буде повільно мінятися, якщо $\Delta\omega$ мала. Такі коливання називаються биттям і мають вигляд рис. 5.3.

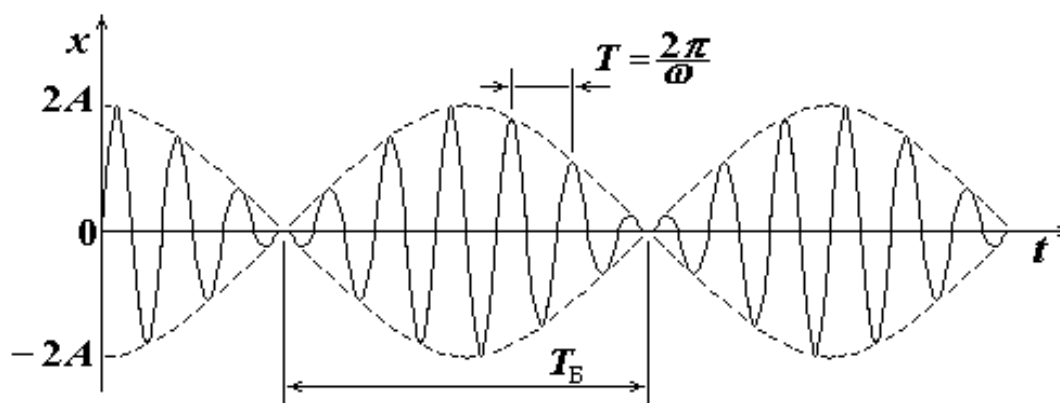


Рисунок 5.3 – Осцилограма биття

Період висхідних коливань T і період биття T_B визначаються за формулами:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad T_A = \frac{2\pi}{\Delta\omega}, \quad (5.3)$$

де $\omega = (\omega_1 + \omega_2) / 2$, $\Delta\omega = |\omega_1 - \omega_2|$.

Частота пульсації амплітуди $\Delta\omega / 2$ (частота биття) може бути дуже малою і, виділивши цю складову спеціальним фільтром, можна одержати інфранизькі частоти коливань, які широко використовуються в техніці. Вираз (5.2) не зміниться при зміні знаку $\Delta\omega$ на знак $-\Delta\omega$, тому можна визначити частоту невідомого джерела коливань.

Наприклад, маємо джерело коливань ω_x . Складемо це коливання з відомим коливанням частотою ω_1 і одержимо биття з частотою $\Delta\omega / 2$. Далі, спостерігаючи биття з такою частотою $\Delta\omega / 2$ під час складання іншої відомої частоти ω_2 (від іншого відомого джерела), можна розрахувати ω_x за формулою

$$\omega_x = (\omega_1 + \omega_2) / 2. \quad (5.4)$$

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідження фігур Ліссажу

1. Зібрати схему (рис.5.4).

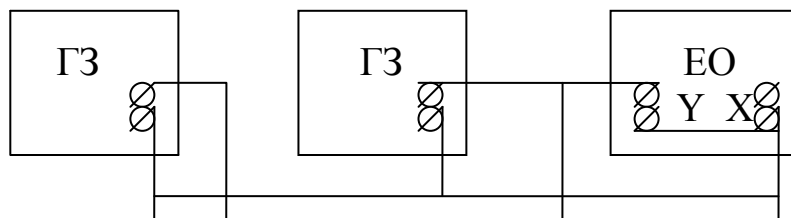


Рисунок 5.4 – Схема дослідження фігур Ліссажу

2. Перед включенням ЕО встановити ручки регуляторів: «Яскравість» – крайнє праве положення; «Фокус» – середнє; «Посилення Y» – нульове положення; «Посилення X» – середнє положення; «Діапазон частот» – в положення 30-130. Вилку шнура живлення включити в мережу і встановити тумблер «Мережа» у верхнє положення, на панелі повинна зажеври́ти контрольна лампочка. Прилад прогріти протягом 2-3 хвилин. Після включення тумблера «Промінь» на екрані повинна з'явитися лінія. Зменшити яскравість і сфокусувати промінь.

3. З'єднати провідником клему «Контр. сигнал» (частота сигналу 50 Гц) з клемою «Y-вход», перемикач «Ослаблення» встановити в положення 1:1. Обертанням ручок «Частота плавно» і «Амплітуда синхронізації» одержати стійку осцилограму. Регуляторами посилення встановити бажані розміри зображення.

4. Змінюючи частоту розгортки (регулятори «Діапазон частот», «Частота плавно», «Амплітуда синхронізації»), одержати на екрані 1, 2 і 3 повні колювання. Замалювати одержані зображення.

5. Включити ГЗ в мережу. До роботи приступити після прогрівання приладу протягом 10 хвилин. Вихід ГЗ підключити на X-вхід ЕО, а контрольний сигнал – на Y-вхід (амплітуда напруги на виході ГЗ регулюється «Рег. виходу», а необхідна частота встановлюється ручкою «Множник» і поворотом лімба). Вимкнути генератор розгортки (ручку "Діапазон частот" поставити в положення "Вимкнено"). Міняючи частоту ГЗ, одержати на екрані фігуру Ліссажу для відношення частот колювань, що складаються, – 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 2 : 3, 3 : 4. Осцилограми замалювати.

У табл. 5.1 занести частоти ГЗ ν_x , при яких виникали відповідні фігури Ліссажу.

Таблиця 5.1

n_x / n_y	1 : 1	1 : 2	1 : 3	2 : 3	3 : 4
v_x					
v_y					

Завдання 2. Дослідження биття

1. Зібрати схему (рис. 5.5). Ручкою «Рег. виходу» звести напругу сигналу ГЗ до нуля. Регулюючи посилення ЕО по осі У, встановити подвійну амплітуду коливань генератора невідомої частоти Γ величиною близько 4 см.

2. Відключити генератор Γ , поставити на генераторі ГЗ частоту порядку 19 кГц, загасання 30 дБ і вихідний опір 600 Ом. Не змінюючи посилення ЕО по осі У, ручкою «Рег. виходу» на ГЗ підібрати амплітуду коливання, рівну амплітуді генератора Γ . Підключити генератор Γ .

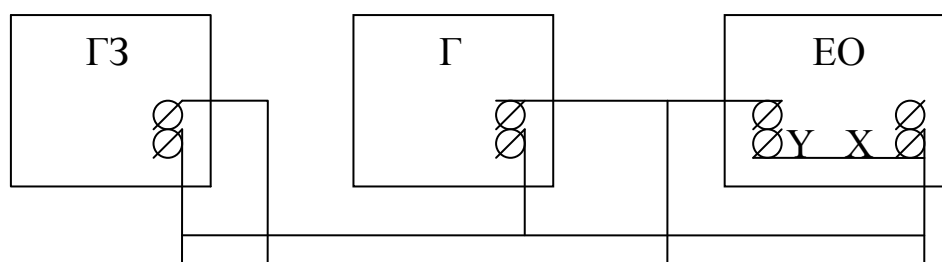


Рисунок 5.5 – Схема дослідження биття

3. Включити генератор розгортки ЕО, встановивши ручку «Діапазон частот» в положення, відповідне 500 Гц. Плавно міняючи частоту ГЗ в межах 8-12 кГц, спостерігати на екрані биття.

4. Обертаючи лімб генератора ГЗ, одержати на екрані стійку осцилограму, відповідну одному періоду биття, при двох різних частотах ГЗ v_1 і v_2 . Результат занести в табл. 5.2. Провести також вимірювання для двох і трьох періодів биття. Обчислити частоту невідомого джерела Γ за формулою (5.3).

5. Перемкнути ГЗ на Х-вхід ЕО і вимкнути ручку «Діапазон частот».

6. Встановити на ГЗ частоту, близьку до частоти v , визначуваної в табл. 2 і, плавно обертаючи лімб близько до цієї частоти, переконаватися, що на екрані ЕО виникає еліпс.

Таблиця 5.2

Кількість періодів	ν_1	ν_2	ν

Контрольні запитання

1. Що таке частота коливань, фаза і період?
2. Який вигляд має рівняння гармонійних коливань?
3. Які фізичні умови їх виникнення?
4. Які методи складання коливань ви знаєте? Охарактеризуйте їх.
5. Що отримаємо в результаті складання коливань $2\sin 102t + 2\sin 100t$?
6. Складіть коливання: $y = 2\sin 2t$, $x = 2\cos 3t$.
7. Точка коливається згідно із законом $x = 2\cos 3t$. Які швидкість і прискорення цієї точки в четверту секунду?
8. Охарактеризуйте основні блоки (вузли) ЕО. Які функції вони виконують?
9. Як визначити відношення частот взаємно перпендикулярних коливань по фігурах Лассажа?
10. Що таке биття і як їх одержати?

Лабораторна робота № 6

Тема. Визначення довжини електромагнітної хвилі в повітрі методом двопровідної лінії.

Мета. Ознайомитися з устроєм двопровідної лінії і методом визначення довжини електромагнітної хвилі.

Устаткування. Генератор високої частоти, кенотронний випрямляч, двопровідна лінія, пересувний місток з лампочкою розжарювання.

Практичне значення. Електромагнітна хвиля (ЕМХ) є одним з основних носіїв інформації в різних пристроях зв'язку і управління різними машинами і устаткуванням в цілому. Це радарні, телеметричні установки радіодіапазону, системи управління (зокрема автотранспортом) на інфрачервоному (ІЧ) проміні, лазери, рентгенівські і γ -дефектоскопи тощо.

Для пояснення принципу роботи цих пристроїв необхідно знати наступні поняття: довжина ЕМХ, діелектрична проникність середовища, джерела (генератори) ЕМХ, які вивчаються в даній роботі.

Короткі теоретичні відомості

Використовуючи рівняння Максвела в диференціальній формі

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{і} \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

можна одержати в скалярній формі рівняння плоскої електромагнітної хвилі

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon\mu\partial^2 E_y}{c^2\partial t^2} \quad \text{і} \quad \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon\mu\partial^2 H_z}{c^2\partial t^2}, \quad (6.1)$$

де $c^2 = (\mu_0\varepsilon_0)^{-1}$. Розв'язанням цих двох рівнянь є функції

$$E_y = E_{\max} \cos(\omega t - kx), \quad H_z = H_{\max} \cos(\omega t - kx), \quad (6.2)$$

де $\omega = 2\pi / T$, а $k = 2\pi / \lambda$ (T – період коливань, λ – довжина хвилі).

Таким чином, напруженості електричного E і магнітного H_z полів є гармонійними функціями часу і координати x в ЕМХ. Сама ЕМХ – це розповсюдження в просторі взаємно індукуючих один одного змінних, вихрових електричних і магнітних полів, причому швидкість їх розповсюдження в даному середовищі задається формулою:

$$V = c / \sqrt{\varepsilon\mu},$$

де $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ – швидкість світла у вакуумі.

Оскільки швидкість ЕО в середовищі пов'язана з довжиною хвилі формулою $\lambda_c = VT$, а для вакууму $\lambda = cT$, то маємо

$$\frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{c}{V} = \sqrt{\varepsilon\mu}. \quad (6.3)$$

Звідси, знаючи λ , μ і λ_c , можна визначити

$$\varepsilon = (\lambda / \lambda_c)^2. \quad (6.4)$$

Формула (6.4) застосована для даної роботи, тому що для рідини (дистильованої води) $\mu = 1$. Як генератор ЕМХ у нашій роботі використовується генератор, зібраний за двотактною схемою включення тріодів (рис. 6.1).

Період коливань ЕМХ дорівнює періоду електромагнітних коливань, які відбуваються в коливальному контурі генератора, і визначається за формулою Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC_\mu}$,

де L – індуктивність,

C_μ – ємність контура.

У генераторі, що використовується, роль індуктивності L виконує половина витка трубки, а електроємністю контура є електроємність монтажу. Зворотний зв'язок коливального контура з керувальними сітками тріодів здійснюється через міжелектродні ємності: анод - сітка тріодів.

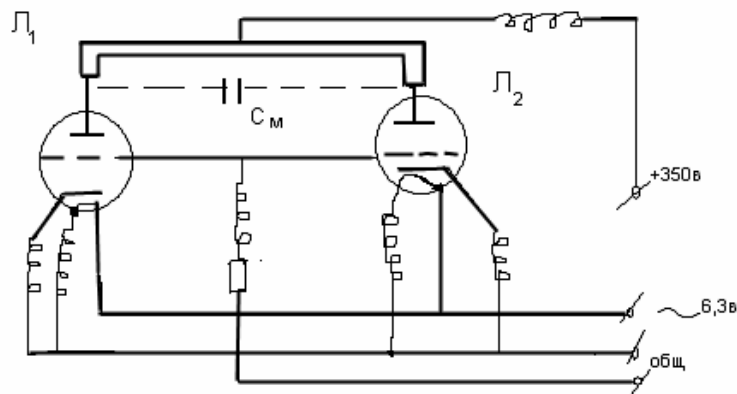


Рисунок 6.1 – Схема генератора ЕМХ

Двопровідна лінія складається з двох паралельно натягнутих проводів, які кріпляться до опор і ізолюються від них (рис. 6.2). По цих проводах переміщається короткозамкнутий місток M з лампочкою розжарювання, причому один кінець лінії замкнутий проволочною петлею Π , пов'язаною з генератором Γ . Вздовж двопровідної лінії у напрямку осі X почне розповсюджуватися пряма електромагнітна хвиля (її рівняння має вид (6.1)). Дійшовши до кінця лінії, хвиля відбивається, а рівняння відбитої хвилі має вид:

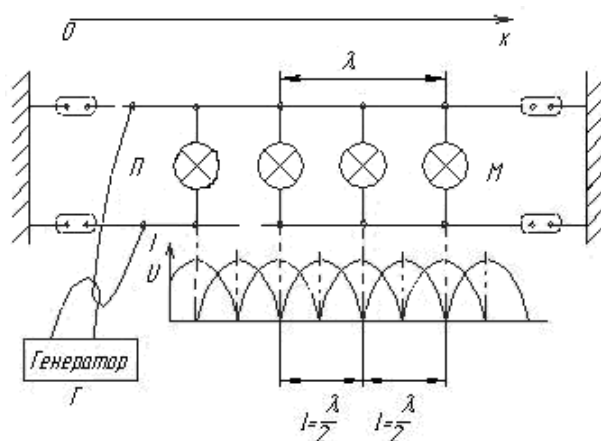


Рисунок 6.2 – Схема двопровідної лінії

$$E_y^{\text{відб}} = E_{\text{max}} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right). \quad (6.5)$$

В результаті накладення прямої і відбитої хвиль виникає стояча хвиля, напруженість електричного поля якої

$$\begin{aligned} E_y^p &= E_y + E_y^{\text{відб}} = E_{\text{max}} \left[\cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right] = \\ &= 2E_{\text{max}} \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \cos 2\pi \frac{t}{T}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Звідси витікає, що коливання E в стоячій хвилі відбувається з тим же періодом T , що і в E_y , і в $E_y^{\text{відб}}$.

Амплітуда коливань E_y^p залежить від x і дорівнює $|2E_0 \cos 2\pi x / \lambda|$.

При цьому незалежно від t в стоячій хвилі утворюються пучності точки, в яких амплітуда коливань максимальна і вузли, в яких амплітуда коливань рівна нулю.

$$\text{Для пучностей маємо: } \cos \frac{2\pi x}{\lambda} = 1, \quad \Rightarrow \quad 2\pi \frac{x}{\lambda} = n\pi,$$

де $n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$,

$$\text{а для вузлів } \cos \frac{2\pi x}{\lambda} = 0, \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi x}{\lambda} = (n+1) \frac{\pi}{2},$$

де $n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$

Координати пучностей мають значення:

$$x = \frac{n\lambda}{2}, \quad \text{де } n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots \quad (6.7)$$

Відповідно для вузлів:

$$x = (n+1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{де } n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots \quad (6.8)$$

Звідси витікає, що відстань між сусідніми вузлами або пучностями в стоячій хвилі дорівнює $\lambda/2$, при цьому електричне поле стоячої електромагнітної хвилі зосереджене між провідниками двопровідної лінії, а магнітне поле охоплює кожен з проводів.

У розімкненій лінії пучності електричної складової стоячої хвилі (пучності напруги U) співпадають з вузлами магнітної складової (вузли струму I). Причому пучності і вузли зміщені на чверть довжини хвилі $\lambda/4$. Характерну картину розподілу струму I і напруги U вздовж ліній

показано на рис. 6.2 (штрихової лінії – U, суцільні лінії – I). Для фіксації пучностей струму звичайно використовують лампочки з малим опором нитки розжарення, яка включається в розрив коротко замикального містка M, переміщуваного уздовж двопровідної лінії.

Таким чином, пучність струму визначається за максимальною яскравістю свічення лампочки. Замірявши відстань між сусідніми пучностями, визначають довжину хвилі за формулою

$$\lambda = 2\ell. \quad (6.9)$$

Підставивши λ (6.9) в (6.3), знайдемо формулу діелектричної проникності води:

$$\varepsilon = \left(\frac{\bar{\lambda}_{\text{повітря}}}{\bar{\lambda}_{\text{води}}} \right)^2 = \left(\frac{\bar{\ell}_{\text{повітря}}}{\bar{\ell}_{\text{води}}} \right)^2, \quad (6.10)$$

де $\ell_{\text{повітря}}$ – відстань між сусідніми пучностями струму в повітрі;
 $\ell_{\text{води}}$ – відстань між сусідніми пучностями струму у воді.

Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність підключення генератора високої частоти до кенотронного випрямляча. Генератор повинен бути укріплений поблизу двопровідної лінії так, щоб виток коливального контура був розташований під петлею зв'язку двопровідної лінії.

2. Включити вилку шнура живлення генератора в мережу змінного струму I, почекати 20-30 с до нагріву електронних ламп.

3. Перевірити наявність генерації ЕМХ шляхом переміщення короткозамикального містка з лампочкою розжарювання уздовж двопровідної лінії, при цьому в певних точках лінії лампочка повинна світитися.

4. Визначити координати точок запалення лампи і точок гасіння уздовж всієї двопровідної лінії. Занести дані в таблицю 6.1.

5. Визначити координати запалення і гасіння

$$x_i = \frac{x_{z(i+1)} + x_{гi}}{2}.$$

6. Знайти для сусідніх точок

$$\lambda_i = 2(x_{i+1} - x_i).$$

7. Визначити

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i}{N-1},$$

де N – число координат.

8. Записати значення коефіцієнта Стюдента $t_{\alpha,n}$ для $(N-1)$ - вимірювань і приладову погрішність.

9. Записати результат у вигляді

$$\lambda_{\text{експ}} = \bar{\lambda} \pm \sqrt{(\Delta\lambda)_{\text{пр}}^2 + (\Delta\lambda)_{\text{вип}}^2}.$$

10. За панеллю приладу визначити частоту генератора (Гц) і розрахувати паспортне значення довжини ЕМХ за формулою

$$\lambda_{\text{пасп}} = cv^{-1}.$$

11. Порівняти $\lambda_{\text{експ}}$ з λ за паспортом.

Таблиця 6.1

№	X_{zi}	X_{Gi}	X_i
1			
2			
3			

Контрольні запитання

1. Запишіть основні рівняння Максвелла в інтегральній і диференціальній формах. Як їх інтерпретувати?
2. Як виводиться рівняння ЕМХ? Виконайте це виведення.
3. Що таке стояча ЕМХ? Наведіть виведення рівняння цієї хвилі.
4. Чому дорівнює відстань між сусідніми пучностями (вузлами) стоячої хвилі?
5. Як одержати робочу формулу для визначення діелектричної проникності середовища? Що таке ε ?
6. Як виконується вимірювання довжини ЕМХ методом двопровідної лінії?

Лабораторна робота №7

Тема. Визначення швидкості звука в повітрі методом акустичного резонансу.

Мета. Визначити швидкість звуку в повітрі методом акустичного резонансу.

Устаткування. Труба на підставці з міліметровою шкалою і поршнем, динамік, генератор електричних коливань звукових частот (ГЗ), датчик електричних коливань (ДК), електронний осцилограф (ЕО), джерело струму.

Практичне значення. Значення метода акустичного резонансу дозволяє детальніше досліджувати різноманітні процеси у природі та техніці (під час спорудження мостів, веж, для настроювання музичних інструментів тощо).

Теоретичні відомості

Пружними або механічними хвилями називають механічні збурження (деформації), що розповсюджуються в пружному середовищі.

Звуковими або акустичними хвилями називають пружні хвилі, здібні викликати звукові відчуття, які діють на органи слуху людини і мають частоти відповідних їм коливань у межі від 16 до $2 \cdot 10^4$ Гц (чутні звуки). Пружні хвилі з частотами $\nu < 16$ Гц називаються **інфразвуком**, а з частотами $\nu > 2 \cdot 10^4$ Гц – **ультразвуком**.

Розповсюдження пружних хвиль у середовищі в загальному випадку не зв'язано з перенесенням речовини – воно складається із залучення у вимушені коливання все більше і більше віддалених від джерела коливання частинок середовища.

Практично частинки середовища виконують вимушені коливання, їх можна вважати точечними, бо навіть у газі міжмолекулярні відстані надмірно малі ($\sim 10^{-8}$ м за нормальних умов).

Відстань λ , на яку розповсюджується хвиля, що рухається зі швидкістю v , за час який дорівнює періоду T коливань частинок середовища, називається **довжиною хвилі**. З визначення довжини хвилі виходить, що

$$v = \lambda / T \quad \text{або} \quad v = \lambda \nu, \quad (7.1)$$

де ν – частота коливань.

Дуже важливий випадок спостерігається під час складання двох зустрічних хвиль. Виникаючий внаслідок цього коливальний процес називається **стоячою хвилею**. Практично стоячі хвилі виникають при відбиванні від перешкод внаслідок складання падаючої хвилі з відбитою. Рівняння

стоячої хвилі має вигляд:

$$\xi(x, t) = A \cos 2\pi x \cos \omega t,$$

де ξ – зміщення частинок середовища від положення рівноваги у момент часу t , коли їх координата дорівнює x .

Звукова хвиля в газі являє собою розповсюдження у просторі послідовних областей стиснення і розрядження газу.

У даній роботі вимірюється швидкість звуку в повітрі методом стоячих хвиль, що утворюються в стовпі газу, замкненого в трубі. Один кінець труби закритий поршнем, а на другому розташована мембрана динаміка. При коливаннях мембрани по трубі розповсюджується звукова хвиля, яка складається з хвилею, відбитою від поршня. Якщо на довжину повітряного стовпчика укладається ціле число півхвиль і чверть довжини хвилі (рис. 7.1), то утворюються стоячі звукові хвилі, спостерігається явище резонансу.

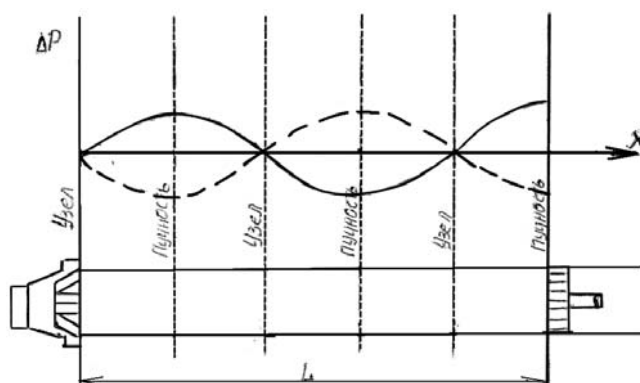


Рисунок 7.1 – Стоячі звукові хвилі у трубі

Опис обладнання

Схему обладнання відображено на рис. 7.2. Труба Т змонтована на підставці з прилаштованою міліметровою шкалою, по якій відлічується відстань між мембраною М і поршнем П. Поршень може пересуватися уздовж труби. Коливання повітря у трубі збуджується під дією мембрани, живиться від генератора електричних коливань звукових частот (ГЗ). Поблизу динаміка змонтований датчик електричних коливань ДК, який перетворює механічні коливання динаміка в електричні. З датчика коливань електрична напруга подається на вхід електронного осцилографа (ЕО). Амплітуда зміщення променя на екрані пропорційна амплітуді тиску в стоячій звуковій хвилі. Якщо частота коливань мембрани співпадає з однією з частот власних коливань повітряного стовпа (коли у стовпі стоячі звукові хвилі), амплітуда зміщення променя на екрані досягає найбільшого значення.

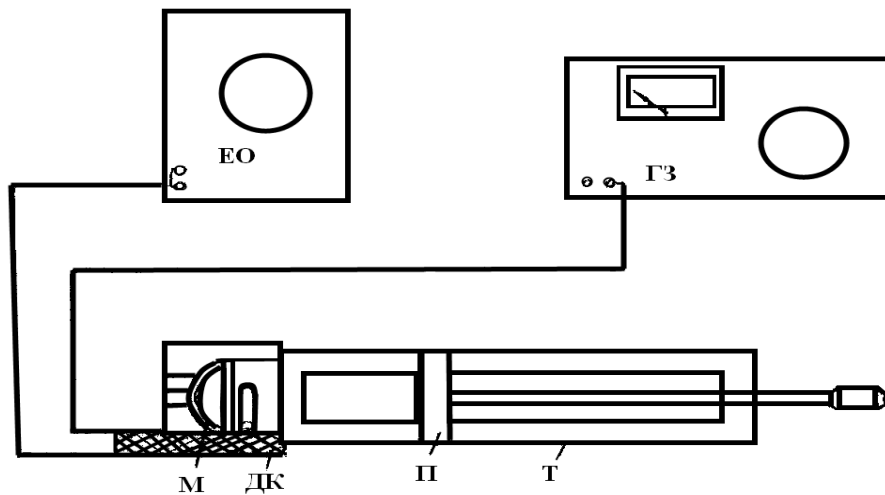


Рисунок 7.2 – Блок-схема обладнання для визначення швидкості звуку в повітрі методом резонансу

Порядок виконання роботи

1. Включити генератор звукових частот і електронний осцилограф.
2. Установити частоту коливань ГЗ, рівну 1000 Гц. При цьому на екрані повинен спостерігатися сигнал з амплітудою ~ 1 см. Пересуваючи поршень уздовж труби, провести відлік положень, при яких виникає резонанс (ці положення визначаються за різким збільшенням амплітуди сигналу на екрані ЕО). **Увага!** Частоту звукових коливань задає викладач або лаборант.

Оскільки при резонансі на довжині між мембраною і поршнем повинно укладатися ціле число півхвиль і чверть довжини хвилі, тоді різниця відліків двох сусідніх резонансних положень поршня дає значення половини довжини звукової хвилі

$$\frac{\lambda}{2} = L_{i+1} - L_i. \quad (7.2)$$

Аналогічно вимірювання провести для частот 1200, 1600 і 1800 Гц. Використовуючи співвідношення (7.2), знайти значення λ для кожної частоти. Дані записати в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1

$\nu_1 =$	$\Delta \nu_1 =$	L, м					
$\nu_2 =$	$\Delta \nu_2 =$	L, м					
$\nu_3 =$	$\Delta \nu_3 =$	L, м					

Коливання і хвилі

За формулою (7.1) підрахувати швидкість звуку в повітрі для кожного значення частоти, визначити $\langle v \rangle$, визначити Δv і знайдений результат порівняти з табличним значенням для швидкості звуку в повітрі при кімнатній температурі.

Контрольні запитання

1. Яка принципова схема обладнання для визначення швидкості звуку в повітрі?
2. Яким чином можна визначити довжину звукової хвилі?
3. Для чого необхідний датчик електричних коливань?
4. Що таке звукова хвиля?
5. Для чого необхідно переміщувати поршень?
6. Від чого залежить швидкість звуку?
7. Що є джерелом звуку (навести приклади).

Лабораторна робота №8

Тема. Вивчення вільних коливань фізичного маятника.

Мета. 1. Вивчити принцип дії установки «Фізичний маятник».

2. Дослідити залежність періоду коливань тонкого однорідного стрижня від відстані від осі підвісу до центра мас.

3. Оцінити вплив загасання на період коливання.

Устаткування. Експериментальна установка «Фізичний маятник», підйомний столик, лінійка, мікрокалькулятор.

Практичне значення. Вільні коливання належать до широкого класу коливань, які зустрічаються у природі та техніці. Знання особливостей цих коливань допомагає використовувати їх у різних галузях діяльності для багатьох спеціальностей (див. л. р. №2).

Теоретичні відомості

Період малих коливань фізичного маятника дорівнює

$$T = 2\pi\sqrt{I_0 / (mga)}, \quad (8.1)$$

де I_0 – момент інерції маятника щодо осі коливань O ;

m – маса маятника;

a – відстань від осі O до центра мас маятника;

g – прискорення вільного падіння.

У даній роботі проводиться експериментальна перевірка співвідношення (8.1) для фізичного маятника, що має форму стрижня. По стрижню

може переміщатися легка опорна призма. Стрижень коливається щодо горизонтальної осі, спираючись нижнім ребром призми на закріплену на штативі опору. Фіксує призму в різних точках стрижня, можна змінювати відстань від осі коливань маятника до його центра мас.

Момент інерції I_0 стрижня довжиною ℓ і масою m щодо осі O (рис. 8.1) може бути знайдений за допомогою теореми Гюйгенса – Штейнера:

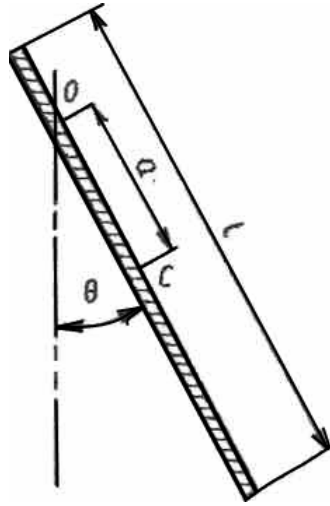


Рисунок 8.1 – Загальний вигляд фізичного маятника, що має форму стрижня

$$I_0 = I_c + ma^2 = (1/12)m\ell^2 + ma^2. \quad (8.2)$$

Тут $I_c = (1/12)m\ell^2$ – момент інерції однорідного тонкого стрижня щодо осі, що проходить через його центр мас C . Тому період коливань стрижня

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(1/12)m\ell^2 + ma^2}{mga}} = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}\left(\frac{\ell}{12a} + \frac{a}{\ell}\right)} \quad (8.3)$$

або

$$T = T_0\sqrt{\varepsilon + (1/12\varepsilon)}. \quad (8.4)$$

Ми ввели позначення

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\ell/g}, \quad (8.5)$$

$$\varepsilon = a/\ell. \quad (8.6)$$

Величина T_0 має розмірність часу. Вона збігається з періодом коливань математичного маятника довжиною ℓ . Безрозмірна величина $\varepsilon = a/\ell$ хара-

ктеризує положення осі підвісу стрижня щодо його центра мас.

У цій роботі необхідно вивчити залежність періоду коливань T тонкого однорідного стрижня від відстані a від осі підвісу до центра мас.

Виміри

Формули (8.1) і (8.4) справедливі для ідеалізованої моделі фізичного маятника. Зокрема, під час виведення формули (8.1) були прийняті наступні припущення:

1) маятник робить коливання малої амплітуди, і тому їхній період від амплітуди не залежить (ізохронність коливань);

2) загасанням можна знехтувати.

Необхідно з'ясувати, чи забезпечується виконання цих припущень в умовах експерименту.

Легко переконатись, що періоди коливань стрижня при малих ($< 30^\circ$) і великих ($> 30^\circ$) амплітудах відрізняються один від одного. Тому що співвідношення (8.1) справедливе тільки для малих амплітуд, то необхідно з'ясувати, у межах яких значень амплітуди період коливань залишається постійним із заданим ступенем точності (наприклад, з точністю до 0,5%). Це легко зробити, вимірюючи період коливань маятника для різних амплітуд, поступово збільшуючи їх від $2 - 3^\circ$ до $10 - 15^\circ$.

З'ясуємо тепер, як оцінити вплив загасання на період коливань маятника. Спостерігаючи коливання маятника, легко переконатися, що їхня амплітуда поступово зменшується. Виходить, модель незагасальних коливань, прийнята під час виведення формул (8.1) і (8.4), суворо кажучи, невірна. Неважко зрозуміти якісно, як впливає загасання коливань на їхній період: під дією тертя рух маятника сповільнюється і період його коливань збільшується. Питання полягають у тім, чи є це збільшення періоду істотним або ним можна знехтувати.

Щоб одержати кількісно зміну періоду коливань ΔT у результаті тертя, необхідно з'ясувати, які сили тертя діють у даній лабораторній установці. Тертя може бути сухим, в'язким або більш складним.

З'ясування характеру тертя вимагає спеціальної постановки експерименту і є складною задачею.

Можна, однак, показати, що при будь-якому типі сил тертя (в'язкому і сухому) їхній вплив на період коливань є малим, якщо тільки мале саме загасання. Наприклад, зв'язана з в'язким тертям помилка $\Delta T / T$ незагасальних коливань маятника дорівнює:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{8\pi^2 N^2} \sim \frac{1}{100 N^2},$$

де N – кількість коливань, за яку їхня амплітуда зменшиться в $e = 2,718$ рази (тобто приблизно в три рази). Практично при $N \sim 10$ як у ви-

падку в'язкого, так і у випадку сухого тертя впливом загасання на період коливань можна знехтувати.

Порядок виконання роботи

Робоче завдання I. Перевірити ізохронність коливань маятника.

1. Виміряти період коливань для 5 значень амплітуди в межах від 2° - 3° до 10° - 15° .
2. Результати занести в таблицю 8.1

Таблиця 8.1

θ					
T_1					
T_2					
$T_{\text{ср}}$					

3. З'ясуйте, у якому діапазоні амплітуд коливання є ізохронними з точністю до 0,5%; до 1%.

Робоче завдання II. Оцінити вплив загасання на період коливань.

Визначити кількість коливань, за яку амплітуда коливань зменшується приблизно в три рази. Виміри проведіть за трьома різними положеннями опорної призми від $a \approx \ell / 10$ до $a = \ell / 2$. Якщо $N > 10$, то впливом загасання на період коливань можна знехтувати.

Робоче завдання III. Вивчити залежність періоду коливань маятника від відстані a від осі підвісу до центра мас.

1. Проведіть виміри періоду коливання T для обраних значень $\varepsilon = a / \ell$ (брати не менше десяти різних значень ε в інтервалі $0 < \varepsilon \leq 1/2$).
2. Результати вимірів занести в таблицю 8.2.

Таблиця 8.2

№ п/п													
A													
$\varepsilon = a / \ell$													
T_1													
T_2													
$T_{\text{ср}}$													

3. Побудуйте в площині T, ε за одержаними експериментальними точками графік $T = f(\varepsilon)$.

4. У цій же площині побудуйте графік теоретично очікуваної залеж-

ності періоду коливань стрижня від параметра ε в межах значень $0 < \varepsilon \leq 1/2$.

5. Для середніх точок інтервалу ε оцінити помилку вимірів.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення фізичного маятника.
2. Сформулюйте теорему Гюйгенса - Штейнера.
3. Запишіть диференціальне рівняння загасальних коливань маятника і його розв'язання.
4. Дайте визначення амплітуди, фази, періоду коливань, логарифмічного декременту загасань, часу релаксації й одиниці виміру усіх величин.
5. При яких припущеннях, що спрощують, розвинута теорія експерименту.
6. На підставі ваших дослідних даних визначте час релаксації і добротність маятника.

Лабораторна робота №9

Тема. Дослідження коливальної система з двома ступенями свободи.

Мета. Дослідити особливості коливань двох однакових маятників, зв'язаних пружною пружиною.

Устаткування. Установка для вивчення коливань зв'язаних систем FNP-13, набір вантажів, секундомір, штангенциркуль.

Практичне значення. Ознайомившись з коливаннями системи з двома ступенями свободи, можна описати багато явищ в природі і техніці, такі як коливання атомів, що входять до складу кристалічних ґрат, складні електричні схеми з індуктивним зв'язком, механічні коливальні системи, зв'язані через масу, і ланцюжки осциляторів.

Короткі теоретичні відомості

Розглянемо коливальну систему, що має два ступені свободи, між якими може відбуватися перерозподіл енергії. Проста модель такої системи може бути реалізована у вигляді двох однакових маятників, зв'язаних пружним зв'язком (рис. 9.1а). Кути відхилення обох маятників від положення рівноваги вважатимемо позитивними при відхиленні маятників від вертикального положення проти руху годинникової стрілки. Кожен маятник бере участь у періодичному обертальному русі і може бути описаний рівнянням руху тіла, що обертається. Моменти сил, що діють на маятник, мають вигляд

$$\begin{aligned} M_1 &= -D\phi_1 - D'(\phi_1 - \phi_2), \\ M_2 &= -D\phi_2 + D'(\phi_1 - \phi_2), \end{aligned} \quad (9.1)$$

де D визначається масою і геометрією кожного маятника, а $D' = kd^2$,

де k – коефіцієнт жорсткості пружини,

d – відстань від точки підвісу маятника до місця прикріплення пружини. Рівняння руху маятників:

$$\begin{aligned} J \frac{d^2 \phi_1}{dt^2} &= -D\phi_1 - D'(\phi_1 - \phi_2), \\ J \frac{d^2 \phi_2}{dt^2} &= -D\phi_2 + D'(\phi_1 - \phi_2), \end{aligned} \quad (9.2)$$

де J – момент інерції кожного маятника. Складаючи і віднімаючи рівняння (9.2), одержуємо

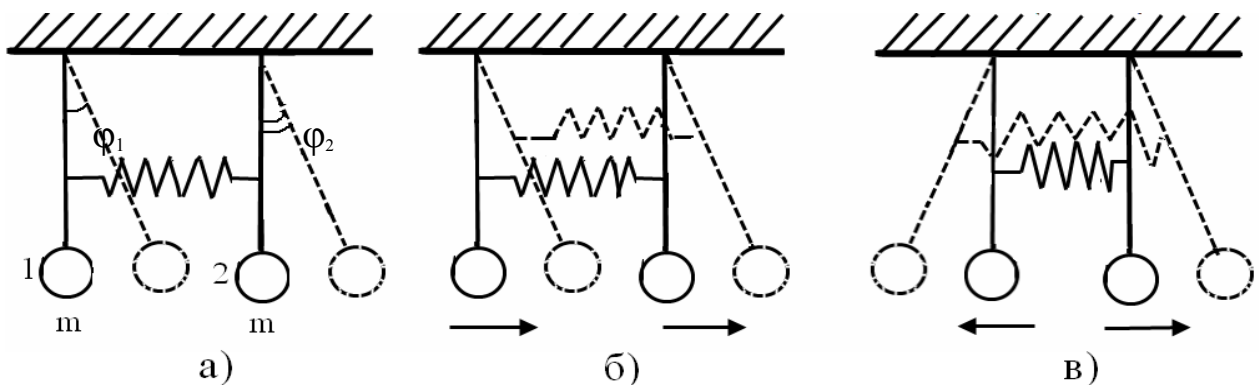


Рисунок 9.1 – Схеми коливальних систем з двома ступенями свободи

$$\begin{aligned} J \frac{d^2}{dt^2} (\phi_1 + \phi_2) &= -D(\phi_1 + \phi_2), \\ J \frac{d^2}{dt^2} (\phi_1 - \phi_2) &= -(D + 2D')(\phi_1 - \phi_2). \end{aligned} \quad (9.3)$$

Кожне з рівнянь (9.3) описує гармонійні коливання з частотами ω_1 і ω_2 або відповідно з періодами T_1 і T_2

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{D'}{J}} = \frac{2\pi}{T_1}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{D + 2D'}{J}} = \frac{2\pi}{T_2}. \quad (9.4)$$

Розв'язання рівнянь (9.3) мають вигляд

$$\begin{aligned}\phi_1 + \phi_2 &= A_1 \cos \omega_1 t + B_1 \sin \omega_1 t, \\ \phi_1 - \phi_2 &= A_2 \cos \omega_2 t + B_2 \sin \omega_2 t.\end{aligned}\quad (9.5)$$

Меншу з частот (9.4) називають основною частотою системи, а коливання, що має цю частоту, – основним. З частотою ω_1 коливається кожний з маятників, якщо розірвати зв'язок між ними. Коефіцієнти A_1 , A_2 , B_1 , B_2 визначають з початкових умов коливань системи. Розглянемо ряд окремих випадків.

Синфазні коливання. Задамо початкову умову у такому вигляді (у момент часу $t = 0$):

$$\phi_1(0) = \phi_2(0) = \phi_0 \quad \text{і} \quad \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{d\phi_2}{dt}. \quad (9.6)$$

Підставляючи (9.6) в (9.5), одержуємо

$$\begin{aligned}A_1 &= 2\phi_0, & A_2 &= B_1 = B_2 = 0; \\ \phi_1 &= \phi_0 \cos \omega_1 t; & \phi_2 &= \phi_0 \cos \omega_1 t.\end{aligned}\quad (9.7)$$

Роль зв'язку при такому коливанні зникає і маятники коливаються синфазно з основною частотою ω_1 (рис.9.1б).

Зустрічні коливання. Хай тепер $\phi_2 = -\phi_1 = \phi_0$ при $t=0$ і $d\phi_1/dt = d\phi_2/dt = 0$. З (9.5) маємо

$$\phi_1 = -\phi_0 \cos \omega_2 t, \quad \phi_2 = \phi_0 \cos \omega_2 t. \quad (9.8)$$

Маятники створюють дзеркально-симетричні коливання однакової частоти ω_2 (рис. 9.1в). Наявність зв'язку між маятниками тут вже виявляється істотною.

Биття. Розглянемо початкову умову: $\phi_1 = \phi_0, \phi_2 = 0$ при $t = 0$ і $d\phi_1/dt = d\phi_2/dt = 0$. Коефіцієнти в (9.5) мають значення, $A_1 = A_2 = \phi_0$, $B_1 = B_2 = 0$ і

$$\phi_1 = \frac{\phi_0}{2} \cos \omega_1 t + \frac{\phi_0}{2} \cos \omega_2 t = \phi_0 \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t; \quad (9.9)$$

$$\phi_2 = \frac{\phi_0}{2} \cos \omega_2 t - \frac{\phi_0}{2} \cos \omega_1 t = \phi_0 \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t. \quad (9.10)$$

Рівняння руху маятників (9.9) і (9.10) можна інтерпретувати таким

чином: при слабкому зв'язку (мале D') $0 < (\omega_2 - \omega_1) \ll (\omega_1 + \omega_2)$ і рівняння руху можна переписати у вигляді:

$$\phi_1(t) = a_1(t) \cos \Omega t; \quad \phi_2(t) = -a_2(t) \sin \Omega t, \quad (9.11)$$

де

$$\Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \frac{2\pi}{T}; \quad \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}. \quad (9.12)$$

Функції $a_1(t)$ і $a_2(t)$ можна розглядати як амплітуди першого і другого коливань, які повільно міняються в часі в порівнянні з $\cos \Omega t$ і $\sin \Omega t$ відповідно. Такий вид коливань називають биттям, а час $T_6 = 2\pi / (\omega_2 - \omega_1)$ - періодом биття. На рис. 9.2 зображено графіки функцій $\phi_1(t)$ і $\phi_2(t)$. Фази коливань маятників відрізняються на $\pi/2$. При зменшенні амплітуди одного з маятників амплітуда другого збільшується. Загальна енергія системи (без урахування втрат) залишається постійною, але вона весь час «перекачується» від одного маятника до іншого. Між величинами T_1 , T_2 і T_6 існує просте співвідношення

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_6} + \frac{1}{T_1}. \quad (9.13)$$

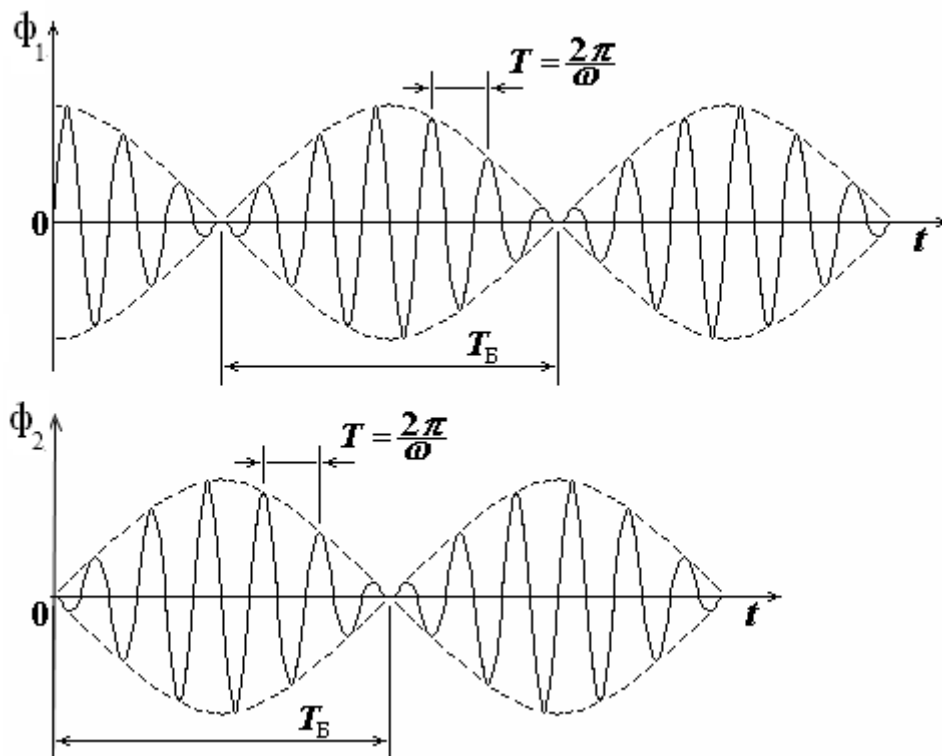


Рисунок 9.2 – Графіки функцій $\phi_1(t)$ і $\phi_2(t)$

Уведемо коефіцієнт зв'язку між маятниками

$$Z = \frac{D'}{D' + D} = \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_1^2 + T_2^2}. \quad (9.14)$$

Тоді $Z=0$ за відсутності зв'язку і $Z=1$ при жорсткому зв'язку. У загальному випадку коефіцієнт зв'язку міняється між нулем і одиницею залежно від жорсткості пружини.

Опис установки

Механічна конструкція приладу

Загальний вигляд приладу FRM-13 збоку представлено на рис. 9.3. Підстава /1/ оснащена регульованими ніжками, що забезпечують вирівнювання приладу. У підставі закріплена колонка /2/. На колонці закріплена втулка /3/ і кронштейн /4/. На стрижні /5/ втулки знаходяться 3 підвіски /6/, на яких за допомогою кулькових підшипників звішені два маятники і стрижень /7/, збуджуючий коливання. Маятник складається із стрижня /8/ і переміщуваного вантажу /9/.

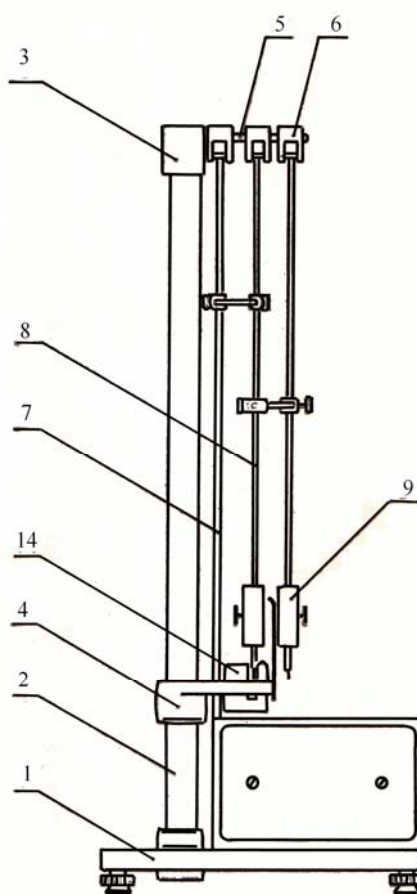


Рисунок 9.3 – Прилад для дослідження коливань невільних систем FRM-13. Загальний вигляд збоку

Маятники зв'язані один з одним за допомогою двох пружин /10/ (рис. 9.4), закріплених в спеціальній С - образній обоймі /1/, яку можна переміщати уздовж стрижнів маятників. Збудження коливань здійснюється за допомогою приводного диска, закріпленого на валу електродвигуна, який рухаючи стрижень /7/, зв'язаний за допомогою двох пружин /10/ із стрижнем маятника, порушує його коливання. Електродвигун знаходиться в блоці керування і вимірювань /12/. До нижнього кронштейна прикріплена кутова шкала /13/, за допомогою якої визначається амплітуда коливань маятників.

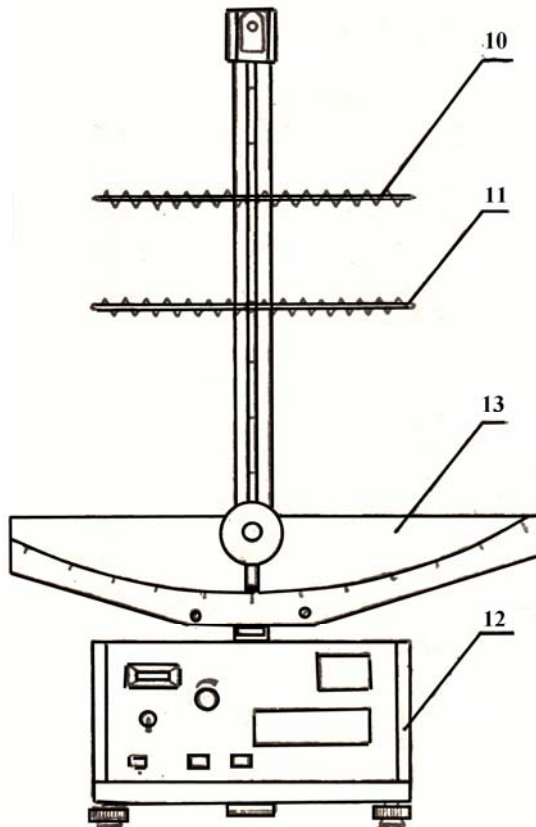


Рисунок 9.4 – Прилад для дослідження коливань невільних систем FRM-13. Загальний вигляд спереду

До нього також прикріплений фотоелектричний датчик /14/, світловий потік якого перетинає стрижень одного з створюючих коливання зв'язаних маятників.

Описання електронних схем приладу

Електронна схема приладу FPM-13 складається з схеми мілісекундоміра FPM - 14, фотоелектричного датчика FD-1 і схеми керування обертаннями електродвигуна. Печатна плата з електронною схемою вмонтована в корпус фотоелектричного датчика, а схема мілісекундоміра F3E -14 вмонтована на двох друкарських платах, сполучених одна з одною, за до-

помогою спеціального з'єднувача.

Схему управління оборотами електродвигуна зібрано на друкарській платі разом з потенціометром керування швидкістю оборотів двигуна.

Елементи для поточного обслуговування приладу поміщено на лицьовій панелі блоку керування і вимірювань, а гніздо для підключення фотоелектричного датчика на його задній стінці.

Види лицьової панелі і задньої стінки блоку керування і вимірювань FRM-13 представлено на рис. 9.4 і рис. 9.5.

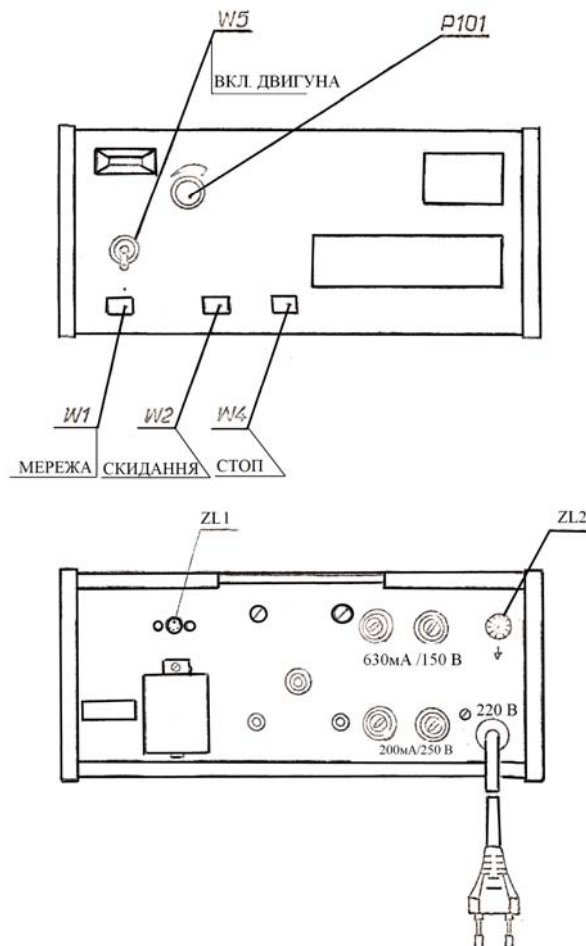


Рисунок 9.5 – Блок керування і вимірів FRM-13.
Лицьова панель і задня стінка

Порядок виконання роботи

1. Підготовка до вимірювань: підключити прилад до блоку живлення, перевірити вирівнювання приладу, перевірити, чи знаходяться стрижні маятників в однаковій вертикальній площині, тобто чи однакові закладені пружини. Натиснувши кнопку «Мережа» перевірити, чи всі індикатори показують нуль.

2. Заміряти період синфазних коливань $T_{1(\text{екс.})}$ (5 разів по 10 коливань). Результати занести в таблицю 9.1.

3. Розрахувати теоретичне значення періодів $T_{1(\text{теор})}$ за формулою (9.15), одержаною з (9.4) з урахуванням того, що $D=mgL$, $I=mL^2$,

де L – довжина маятника, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

$$T_{1(\text{теор})} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (9.15)$$

4. Заміряти період зустрічних коливань (5 разів по 10 коливань).
 Результати занести в таблицю 9.2.

5. Розрахувати теоретичне значення періоду зустрічних коливань за формулою (9.16), одержаною з (9.4) з урахуванням того, що $D=mgL$; $D' = kd^2$; $I=mL^2$,

де m – маса вантажу, кг;

k – коефіцієнт жорсткості пружини, Н/м;

d – відстань від точки підвісу маятника до місця прикріплення пружини, м.

$$T_{2(\text{теор})} = \frac{2\pi L}{\sqrt{gL + (2kd^2 / m)}}. \quad (9.16)$$

6. Заміряти період биття $T_{(\text{екс.})}$ п'ять разів. У початковий момент один з маятників знаходиться у спокої, а другий відхиляється на 5-6°. Дані занести в таблицю 9.3.

7. Розрахувати період биття T_3 за формулою

$$T_6 = \frac{T_{1(\text{теор})} \cdot T_{2(\text{теор})}}{T_{1(\text{теор})} - T_{2(\text{теор})}}. \quad (9.17)$$

8. Провести оцінку похибок одержаних результатів і знайдених значень періодів згідно з правилами розрахунку похибок.

Таблиця 9.1

№ п/п	t_1	$T_{1(\text{екс})}$	$\bar{T}_2$	N

Таблиця 9.2

№ п/п	t_2	$T_{2(\text{екс})}$	$\bar{T}_2$	N

Таблиця 9.3

№ п/п	$T_{6(\text{екс})}$	$\bar{T}$

Кількість дослідів :=...

Коефіцієнт Стюдента =...

Довірча ймовірність =...

Системат. помилка виміру часу: $\Delta t = \dots$

Системат. помилка виміру відстані: $\Delta \ell, \Delta d = \dots$

Маса вантажу: $m = \dots$

Довжина маятника: $L = \dots$ м

Коеф. жорсткості: $k = \dots$ Н/м

Відстань: $d = \dots$ м

Коливання і хвилі

Системат. помилка виміру маси: $\Delta m = \dots$

Контрольні запитання.

1. Характеристики коливального процесу: зміщення, амплітуда, період, фаза, початкова фаза, частота.
2. Визначення синфазних коливань. Рівняння синфазних коливань.
3. Виведення формули періоду синфазних коливань.
4. Визначення зустрічних коливань і їх рівняння.
5. Виведення формули періоду зустрічних коливань.
6. Визначення биття. Отримання биття. Період биття. Графік і рівняння биття.
7. Способи візуального визначення періоду і амплітуди биття.
8. Оцінити чинники, які максимально впливають на похибок експерименту.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук І. М. Загальна фізика: Електрика і магнетизм: підручник. – 2-е вид., перероб. і допов. / І. М.Кучерук, І. Т.Горбачук. – К.: Вища шк., 1995. – 392с.: іл. ISBN 5-11-004500-3
2. Савельев И. В. Курс общей физики: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. / И. В. Савельев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – Т.2. – 496 с.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: учебник для студентов вузов. / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 432с., ил.
4. Яворский Б.М. Справочник по физике. / Б.М.Яворский, А.А.Детлаф – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
5. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 351с.
6. Физический энциклопедический словарь / [гл. ред. А. М. Прохоров]. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с., ил., 2 л. цв. ил.
7. Загальна фізика: Лабораторний практикум: навч. посібник / В.М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін.; за заг. ред. І. Т. Горбачука. – К.: Вища шк., 1992. – 509с.: іл. ISBN 5-11-002569-X
8. Лабораторный практикум по физике: учеб. пособие для студентов вузов / Б. Ф. Алексеев, К.А. Барсуков, И.А. Войцеховская и др.; под ред. К.А. Борсукова, Ю.И. Уханова. – М.: Высш. шк., 1988. – 351 с.: ил.

Додаток А

Обробка експериментальних даних за допомогою ЕОМ

Обробка експериментальних даних за допомогою ЕОМ

1. Увімкнути ЕОМ та принтер. Уставити папір.
2. Увійти в каталог КОЛИВАННЯ.
3. Запустити потрібний файл.
4. Увести: прізвище, ім'я та по батькові, назву групи, дату виконання розрахунків.
5. Результати комп'ютерної обробки лабораторної роботи показати викладачу, а потім підклеїти їх у зошит.

Номер лабораторної роботи	Назва exe - файла	Назва Excel –файла
КОЛИВАННЯ		
1k	531_2 exe	1k
2k	532 exe	2k
3k		3k
4k	534 exe	4k
5k		
6k		6k
7k	7k_3 exe	7k
8k		8k
9k		

6. Увести: прізвище, ім'я та по батькові, назву групи, дату виконання розрахунків.
7. Результати комп'ютерної обробки лабораторної роботи показати викладачу, а потім підклеїти їх у зошит.

Додаток Б

Коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha,n}$

Таблиця Б.1

n	α	
	0,9	0,95
2	6,31	12,7
3	2,92	4,3
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,90	2,37
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
11	1,81	2,23
12	1,80	2,20
13	1,78	2,18
14	1,77	2,16
15	1,76	2,15
16	1,75	2,13
17	1,75	2,12
18	1,74	2,11
19	1,73	2,10
20	1,73	2,09
21	1,73	2,09
22	1,72	2,08
23	1,72	2,07
24	1,71	2,07
25	1,71	2,06
26	1,71	2,06
27	1,71	2,06
28	1,70	2,05
29	1,70	2,05
30	1,70	2,05
31	1,70	2,04

ЕЛЕКТРОННЕ НАВЧАЛЬНО – МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

Галіахметов Алмаз Мансурович
Єфремова Марія Полікарпівна
Уколов Олексій Іванович
Вазанков Денис Борисович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З РОЗДІЛУ КУРСУ ФІЗИКИ «КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ»
ГАЛУЗІ ЗНАНЬ 0701 «ТРАНСПОРТ І ТРАНСПОРТНА
ІНФРАСТРУКТУРА» ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ –
6.070106 «АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ»,
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0601 – «БУДІВНИЦТВО І АРХІТЕКТУРА»,
НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.060101 – «БУДІВНИЦТВО»
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0401 – «ПРИРОДНИЧІ НАУКИ»
НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.040106 – «ЕКОЛОГІЯ, ОХОРОНА
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ»**

Підписано до друку 22.06. 2011 р. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 3,63 Зам. № 178.

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
Автомобільно-дорожній інститут
84646, м. Горлівка, вул. Кірова, 51

Редакційно-видавничий відділ

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2982 від 21.09.2007р.