

Міністерство освіти і науки України
Департамент освіти і науки Дніпропетровської облдержадміністрації
Дніпропетровське територіальне відділення МАН України

Відділення: технічні науки
Секція: електроніка та приладобудування

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ
ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОКОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ**

Роботу виконав:
Чучва Владислав Дмитрович,
учень 10-Б класу
Дніпропетровського ліцею
інформаційних технологій
при Дніпропетровському
національному університеті
імені Олеся Гончара

Науковий керівник:
Козлова Тетяна Іванівна,
вчитель фізики
Дніпропетровського ліцею
інформаційних технологій
при Дніпропетровському
національному університеті
імені Олеся Гончара,
вчитель-методист,
відмінник освіти України

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	6
РОЗДІЛ 1	
ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	6
1.1. Загальна характеристика коливального руху. Класифікація коливань та коливальних систем.....	6
1.2. Механічні колювання	6
1.2.1. Вільні механічні колювання	6
1.2.2. Вимушені механічні колювання.....	7
1.2.3. Механічні автоколювання.....	7
1.3. Електромагнітні колювання.....	9
1.3.1. Вільні електромагнітні колювання	9
1.3.2. Вимушені електромагнітні колювання.....	14
1.3.3. Електромагнітні автоколювання	16
1.4. Аналогія між вільними електромагнітними і механічними колюваннями	20
РОЗДІЛ 2	
ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	25
2.1. Портативна автоколювальна система. Опис пристрою	25
2.2. Досліди	26
2.2.1. Дослід 1: «Доведення виникнення електромагнітних автоколювань».....	26
2.2.2. Дослід 2: «Перетворення коливального руху на обертальний»	28
2.2.3. Дослід 3: «Теплові, світлові та механічні явища як прояв електромагнітних колювань у колі»	28
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	30

ТЕЗИ

до науково-дослідницької роботи
на тему «**Дослідження електромагнітних коливань
за допомогою автоколивальної системи**»

Чучви Владислава Дмитровича, учня 10-Б класу
Дніпропетровського ліцею інформаційних технологій
при Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара

Науковий керівник: Козлова Тетяна Іванівна, вчитель фізики
Дніпропетровського ліцею інформаційних технологій
при Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара, вчитель-
методист, Відмінник освіти України

Структура науково-дослідницької роботи. Робота складається з вступу, основної частини та висновків. Основна частина, в свою чергу, складається з двох розділів, які діляться на підрозділи. Перший розділ присвячений теорії про коливання; другий розділ присвячений опису створеного пристрою та проведенню дослідів за його допомогою.

Метою цієї роботи є систематизація теоретичних відомостей про коливальні процеси; створення електромеханічної коливальної системи та проведення дослідів за її допомогою.

Актуальність теми. Коливальний рух – найпоширеніша форма руху в навколишньому світі та техніці. У природі та техніці існує нескінченна кількість видів коливань. Коливання різної фізичної природи мають загальні закономірності й описуються однаковими фізичними законами. Зацікавившись коливаннями і порівнюючи механізми механічних та електромагнітних коливальних процесів, я вирішив зібрати та опрацювати теоретичні відомості про коливання.

Незатухаючі коливання створюються такими пристроями, які самі можуть підтримувати свої коливання за рахунок деякого постійного джерела енергії. Такі пристрої називаються автоколивальними системами. Саме таку систему я створив задля практичного дослідження електромагнітних автоколивань.

Дослідницькі завдання:

- опрацювати теоретичний матеріал про вільні, вимушені, автоматичні механічні та електромагнітні коливання;
- створити електромеханічну коливальну систему;
- провівши досліди за допомогою створеної системи, перевірити виникнення та дію електромагнітних автоколивань.

Висновки. У ході роботи було розглянуто різні види коливань, досліджувалися електромагнітні автоколивання, для чого було створено портативну дисипативну електромеханічну коливальну систему.

Цю науково-дослідницьку роботу можна використовувати для ознайомлення з коливальними процесами та їх вивчення на уроках фізики.

ВСТУП

Актуальність теми. Коливальний рух – найпоширеніша форма руху в навколишньому світі та техніці. У природі та техніці існує нескінченна кількість видів коливань. Коливання різної фізичної природи мають загальні закономірності й описуються однаковими фізичними законами. Зацікавившись коливаннями і порівнюючи механізми механічних та електромагнітних коливальних процесів, я вирішив зібрати та опрацювати теоретичні відомості про коливання. Особливу увагу привернули незатухаючі автоколивання, що створюються такими пристроями, які самі можуть підтримувати свої коливання за рахунок деякого постійного джерела енергії. Саме такий пристрій я створив задля практичного дослідження електромагнітних автоколивань.

У своїй першій роботі на тему «Дослідження явища електромагнітної індукції за допомогою модифікації приладу Петроєвського» я модифікував відомий прилад Петроєвського, що дало змогу подати більш широке уявлення про виникнення індукційного струму і напрямок ЕРС індукції на простих дослідів.

Метою другої роботи на тему «Дослідження явища електромагнітної індукції за допомогою електромагнітного генератора» була подальша систематизація теоретичних відомостей про явище електромагнітної індукції та пов'язані з ним правила і закономірності; створення навчальної моделі – електромагнітного генератора, досліди на якому дають не лише уявлення про виникнення індукційного струму і напрямок ЕРС індукції, але й дають змогу побачити дію та перетворення цього струму в різних електричних колах.

Метою цієї роботи є систематизація теоретичних відомостей про коливальні процеси; створення електромеханічної коливальної системи та проведення дослідів за її допомогою.

Дослідницькі завдання:

- опрацювати теоретичний матеріал про вільні, вимушені, автоматичні механічні та електромагнітні коливання;
- створити електромеханічну коливальну систему;
- провівши досліди за допомогою створеної системи, перевірити виникнення та дію електромагнітних автоколивань.

Об'єкт дослідження: теоретичні відомості про механічні та електромагнітні коливання, зокрема автоколивання.

Предмет дослідження: практичне застосування електромагнітних автоколивань.

Методи дослідження: у ході роботи використано такі методи дослідження: теоретичні, евристичні та емпіричні, аналіз, описові, спостереження, моделювання, узагальнення.

Наукова новизна: створення та використання портативної дисипативної електромеханічної коливальної системи для перевірки дії електромагнітних автоколивань.

Джерельна база роботи: опубліковані документальні та літературні матеріали.

Структура науково-дослідницької роботи. Робота складається з вступу, основної частини та висновків. Основна частина, в свою чергу, складається з двох розділів, які діляться на підрозділи:

- перший розділ присвячений теорії про коливання;
- другий розділ присвячений опису створеного пристрою та проведенню дослідів за його допомогою.

Сподіваюся, що ця робота буде цікавою усім бажаючим познайомитися з різними коливальними процесами та стане у пригоді на уроках фізики.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Загальна характеристика коливального руху. Класифікація коливань та коливальних систем

Коливання – це зміна будь-якої величини, при якій значення цієї величини періодично повторюється.

За фізичною природою коливання поділяють на: 1) механічні, 2) електромагнітні, 3) змішаного типу; а за характером взаємодії з оточуючим середовищем на: 1) вільні, 2) вимушені, 3) автоколивання.

Коливальна система – це система тіл, у якій можуть виникати коливання.

За збереженням повної енергії коливальні системи поділяють на: 1) консервативні, 2) дисипативні; а за типом коливальної системи на: 1) механічні, 2) електричні, 3) акустичні, 4) оптичні.

1.2. Механічні коливання

Механічні коливання – це рухи тіл, які періодично повторюються та при яких періодично змінюються координата тіла, швидкість і прискорення системи, що рухається.

1.2.1. Вільні механічні коливання

Вільні механічні коливання – це коливання, які виникають у результаті виведення системи з положення рівноваги під дією внутрішніх сил.

Щоб виникли вільні коливання, повинна існувати сила, яка періодично змінюється і повертає коливальну систему в положення рівноваги, та бути відсутнім або мізерно малим тертя навколишнього середовища. Під час віль-

них механічних коливань відбувається періодичне перетворення потенціальної енергії системи в кінетичну і навпаки без утрат у внутрішню енергію.

1.2.2. Вимушені механічні коливання

Вимушені коливання – це коливання, які виникають у системі у результаті впливу на неї зовнішньої сили, яка чинить періодичну дію. Тому вони відбуваються під впливом не тільки внутрішніх, а й зовнішніх сил.

Основні відмінності вільних і вимушених коливань полягають у тому, що у будь-якої коливальної системи, яка здійснює вільні коливання є власна частота і власний період.

Під час вимушених коливань зовнішня сила «нав'язує» коливальній системі свою частоту, свій період.

Вільні коливання реальної коливальної системи внаслідок дії сил тертя є згасаючими, тоді як амплітуда вимушених коливань не зменшується з часом, навіть якщо в системі є тертя. Вимушені коливання – незгасаючі.

1.2.3. Механічні автоколивання

Незгасаючі вимушені коливання можна отримати під час дії на тіло, яку можуть здійснювати вільні коливання періодичної зовнішньої сили. Проте можна зробити так, щоб коливальна система сама керувала зовнішнім впливом, забезпечуючи узгодженість дії сили зі своїм рухом. Така система називається автоколивальною, а здійснені нею незгасаючі коливання – автоколиваннями.

Автоколивання – це незгасаючі коливання, спричинені сталим зовнішнім впливом на систему, яка сама регулює їх частоту.

На відміну від вимушених коливань, частота й амплітуда автоколивань визначаються властивостями самої коливальної системи. Від вільних коливань автоколивання відрізняються тим, що вони з часом не згасають, а також

тим, що їх амплітуда не залежить від початкового короткочасного впливу, який збуджує коливання.

Будь-яка автоколивальна система складається з чотирьох основних елементів (рис. 1): 1 – джерело енергії, 2 – передавальний пристрій (клапан) зі зворотнім зв'язком 3, який регулює надходження енергії з джерела у коливальну систему 4.



Рис. 1. Схема механічної автоколивальної системи

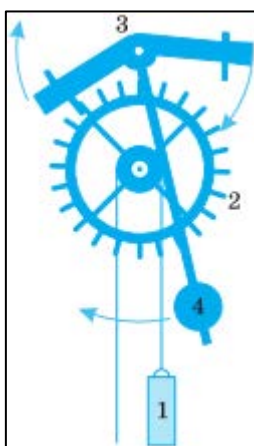


Рис. 2. Автоколивальна система – годинник з маятником

На практиці широко застосовується автоколивальна система – годинник. На рис. 2 зображений часовий механізм з анкерним ходом. Ходове колесо 2 з косими зубцями жорстко скріплено із зубчатим барабаном, через який перекинута ланцюг з гирею 1. На кінці маятника 4 закріплено анкер 3 (якірець) з двома палетами – пластинками з твердого матеріалу, зігнутими у вигляді дуги кола з центром на осі маятника. В наручному годиннику замість гирі використовують заводну пружину, а замість маятника – балансир, що являє собою маховичок, скріплений зі спіральною пружиною; балансир виконує крутильні оберти навколо своєї осі.

Тут коливальною системою є маятник (або балансир), джерелом енергії – піднята вгору гиря (або заведена пружина); клапаном – анкер, який дозволяє ходовому колесу прокрутитися на один зубець за один напівперіод; зворотній зв'язок відбувається при взаємодії анкера з ходовим колесом. За одну секунду маятник здійснює одне повне коливання.

У ті моменти, коли маятник проходить положення рівноваги та має максимальну швидкість, зубець ходового колеса короткочасно стикається з торцем палети. «Чиркаючи» по ньому, зубець підштовхує маятник, тобто імпульсом передає йому енергію. При цьому гиря опускається на одну ланку ланцюга. Так потенціальна енергія гирі (або заводної пружини) поступово передається маятнику та компенсує втрати на тертя.

1.3. Електромагнітні коливання

Електромагнітні коливання – це: 1) зміни електричних напруг і струмів в електричних колах та напруженостей електричних і магнітних полів у просторі навколо цих кіл, які періодично повторюються; 2) одночасні періодичні зміни зв'язаних між собою електричного і магнітного полів; 3) періодичні або майже періодичні зміни заряду, сили струму та напруги.

1.3.1. Вільні електромагнітні коливання

Вільні електромагнітні коливання – це коливання в колі після виведення системи з положення рівноваги шляхом повідомлення конденсатору електричного заряду.

Колівальний контур – це найпростіша система послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності, де можуть виникати вільні електромагнітні коливання.

Розглянемо механізм цих коливань. Для цього складемо електричне коло з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності (рис. 3).

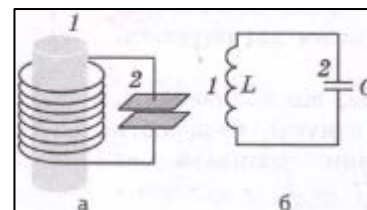


Рис. 3. Модель (а) та електрична схема (б) колівального контуру: 1 – котушка індуктивності; 2 – конденсатор

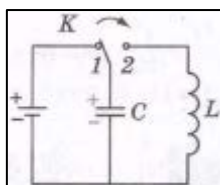


Рис. 4. Схема колівального контуру: 1, 2 – положення ключа

Коли ключ перебуває в положенні 1 (рис. 4), відбувається зарядка конденсатора від джерела струму.

Роль конденсатора в колі – накопи-

чення максимального електричного заряду q_{\max} . Таким чином, між обкладками виникає різниця потенціалів U_{\max} , тобто

в районі конденсатора створюється електричне поле

(рис. 5, а), енергія якого дорівнює енергії конденсатора:

$$W_{\text{ел max}} = \frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{CU_{\max}^2}{2}.$$

Коли ключ перебуває в положенні 2, відбувається розрядка конденсатора через котушку індуктивності, що призводить до виникнення електричного

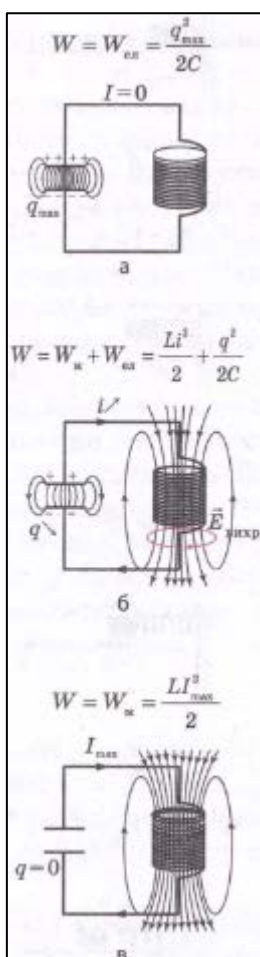


Рис. 5. Механізм вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі

струму I в колі контуру (рис. 5, б). Під дією електростатичних сил поля конденсатора електричний заряд приводиться до упорядкованого та прискореного руху, який буде таким, доки конденсатор повністю не розрядиться на котушку. В цей момент швидкість руху заряду буде максимальною, хоча поле вже не діятиме. Максимальним буде й електричний струм. Проте струм не одразу досягає максимального значення, що обумовлено явищем самоіндукції.

Завдяки появі струму в контурі виникає змінне магнітне поле. Оскільки сила струму збільшується, магнітна індукція створеного струмом магнітного поля теж збільшується. Це магнітне поле породжує вихрове електричне поле в районі котушки, яке, згідно правила Ленца, напрямлене протилежно струму, що й перешкоджає його миттєвому збільшенню.

Таким чином, протягом першої чверті періоду енергія конденсатора спадає, а енергія магнітного поля котушки, згідно закону збереження енергії, зростає на ту ж величину.

Отже, у той момент, коли конденсатор повністю розрядиться та сила струму досягне максимального значення I_{\max} (рис. 5, в), енергія електричного поля дорівнюватиме нулю ($W_{\text{ел}} = 0$). Тоді повна енергія коливального контуру дорівнюватиме:

$$W = W_{M_{\max}} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$$

В будь-який момент часу повна енергія електромагнітного поля в контурі дорівнюватиме:

$$W = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2},$$

де I – сила струму в котушці; q – заряд конденсатора в деякий момент часу.

При подальшому русі зарядів в колі починається перезарядка конденсатора (рис. 5, з). При цьому струм в котушці зменшується, а разом з тим зменшується і магнітна індукція B магнітного поля, що пронизує котушку, тому вихрове електричне поле, змінюючи свій напрямок, підтримує струм.

Отже, протягом другої чверті періоду енергія магнітного поля в районі котушки спадає, а енергія електричного поля в районі конденсатора починає знову зростати й в процесі повної перезарядки конденсатора досягає максимального значення. В цей момент енергія магнітного поля котушки дорівнюватиме нулю ($W_M = 0$). Таким чином, конденсатор перезаряджатиметься, доки сила струму не досягне нуля ($I = 0$), при цьому енергія магнітного поля котушки повністю перетвориться на енергію електричного поля конденсатора (рис. 5, д).

Наступну половину періоду характер зміни електричного заряду на обкладках конденсатора й характер зміни сили струму в контурі будуть такими самими, тільки у зворотному напрямку (рис. 5, е-з). Коли заряд на обкладках конденсатора досягне максимального значення (див. рис. 5, а), завершиться одне повне коливання.

При розрядці конденсатора через котушку індуктивності в коливальному контурі виникають вільні електромагнітні коливання, в процесі перебігу яких відбувається періодичне перетворення енергії електричного поля на енергію магнітного поля і навпаки, тобто закон збереження енергії для коливального контуру можна записати так:

$$W_{\text{елmax}} = W_{\text{ел}} + W_M = W_{M\text{max}} \text{ або } \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}.$$

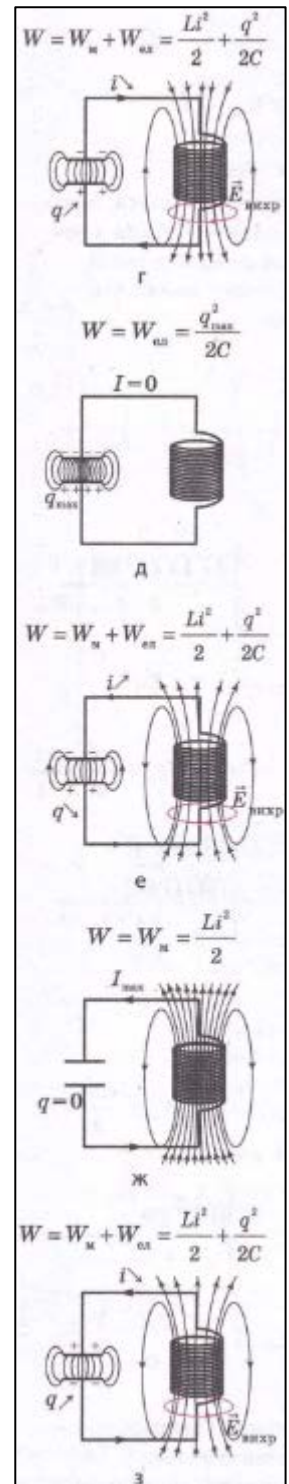


Рис. 5. [Закінчення]

У реальному коливальному контурі завжди є певні втрати енергії. Енергія витрачається на нагрівання провідників під час проходження струму. Чим вищою є частота електромагнітних коливань у контурі, тим сильніше нагріваються провідники. Діелектрик між обкладками конденсатора теж нагрівається, оскільки змінне електричне поле викликає коливання молекул діелектрика. До того ж діелектрики не є ідеальними ізоляторами, тому конденсатор частково розряджається не через котушку, а безпосередньо через діелектрик. Нагріваються феромагнітні осердя, що їх використовують для збільшення індуктивності котушок, оскільки в них виникають струми Фуко. Деяка частина енергії витрачається і на перемагнічування осердь. Також енергія витрачається на випромінювання електромагнітних хвиль.

Внаслідок втрат енергії, енергія магнітного та електричного полів поступово перетворюється на внутрішню енергію. Усі ці втрати умовно вважають втратами в деякому активному опорі R . Наявність активного опору приводить до того, що зміни сили струму в котушці та напруги на конденсаторі з часом зменшуються і через деякий час припиняються. Таким чином, вільні електромагнітні коливання в реальному коливальному контурі є затухаючими. Якщо опір R великий, то коливання навіть не почнуться.

$$\text{Отже, } \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}, \text{ коли } R = 0.$$

Розглянемо вільні електромагнітні коливання як коливання гармонічні.

Гармонічні електромагнітні коливання – це коливання, в яких періодичні зміни електричного заряду, сили струму, напруги та ЕРС відбуваються за законами косинусів або синусів.

Рівняння коливання електричного заряду на конденсаторі при q_{\max} виглядає так:

$$q = q_{\max} \cos \omega_0 t,$$

а на котушці при q_{\min} – так:

$$q = q_{\max} \sin \omega_0 t.$$

q_{\max} – амплітуда коливання електричного заряду.

$\omega_0 t$ – фаза коливання, яка визначає стан коливальної системи в будь-який момент часу, тобто значення заряду конденсатора в коливальному контурі в будь-який момент часу при заданій амплітуді. По значенню фази коливання можна визначити, чи відбувається в даний момент зарядка або розрядка конденсатора.

ω_0 – власна частота вільних електромагнітних коливань (без наявності R).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

$$[\omega_0] = \sqrt{\frac{1}{\Gamma_{\text{Н}} \cdot \Phi}} = \sqrt{\frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}}} = \sqrt{\frac{\text{А}}{\text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}} = \sqrt{\frac{1}{\text{с}^2}} = \text{с}^{-1}.$$

T – період коливання, тобто тривалість одного повного коливання.

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

$$[T] = \text{с}.$$

ω – циклічна (кругова) частота, тобто кількість коливань за 2π секунд.

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

$$[\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \text{с}^{-1}.$$

В коливальному контурі (без урахування R):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

T збільшується зі збільшенням L і C . Зі збільшенням L поступово збільшується магнітне поле (зі збільшенням струму) або воно повільно зменшується до нуля. Зі збільшенням C потребується більший час для зарядки конденсатора.

ν – частота коливань, тобто кількість коливань за одиницю часу.

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

$$[\nu] = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}.$$

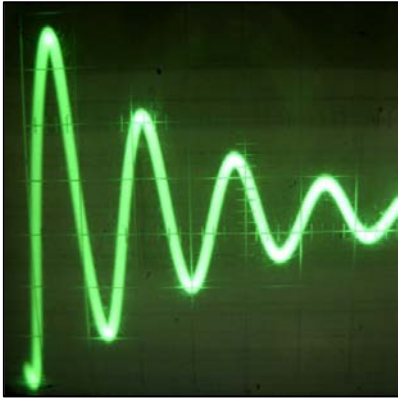


Рис. 6 Осцилограма затухаючих вільних коливань

Для дослідження вільних затухаючих електромагнітних коливань в коливальному контурі можна скористатися електронно-променевим осцилографом. З'єднаємо горизонтальні управляючі електроди електронно-променевої трубки з обкладками конденсатора коливального контуру. Увімкнемо генератор розгортки, який забезпечує рівномірний рух електронного променя по горизонталі з періодичним швидким поверненням до вихідної точки. Замкнувши ключ, з'єднуючий конденсатор з котушкою, ми побачимо на екрані осцилографа осцилограму, яка показує, що в електричному контурі дійсно виникають затухаючі електромагнітні коливання (рис. 6).

1.3.2. Вимушені електромагнітні коливання

Вимушені електромагнітні коливання – це коливання в колі під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється:

$$e_i = \varepsilon_{\max} \sin \omega t,$$

де e_i – значення ЕРС у даний момент часу (миттєве значення ЕРС); ε_{\max} – амплітудне значення ЕРС; ω – циклічна частота змінної ЕРС.

Складемо електричне коло з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності.

З'єднаємо систему з джерелом змінної напруги, наприклад генератором. ЕРС генератора створюватиме в контурі змінний електричний струм, частота якого збігатиметься з частотою зміни ЕРС, отже, в контурі виникнуть вимушені електромагнітні коливання. Якщо змінювати ємність конденсатора або індуктивність котушки, змінюючи тим самим власну частоту коливань системи, то можна помітити, що у разі наближення власної частоти коливальної системи до частоти зміни зовнішньої ЕРС амплітуда вимувених коливань сили струму у проводах, що ведуть до генератора, буде збільшуватись, якщо

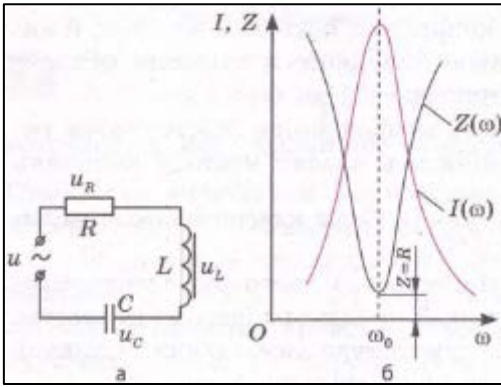


Рис. 7. Резонанс напруг: а – електрична схема кола; б – графіки залежності діючого значення сили струму I в підвідних проводах та повного опору кола Z від циклічної частоти ω зміни напруги на джерелі струму. ω_0 – власна частота коливань системи

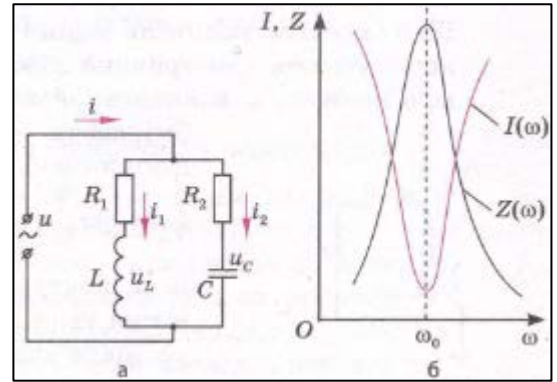


Рис. 8. Резонанс струмів: а – електрична схема кола; б – графіки залежності діючого значення сили струму I в підвідних проводах та повного опору кола Z від циклічної частоти ω зміни напруги на джерелі струму. ω_0 – власна частота коливань системи

генератор підключено до системи послідовно (рис. 7), і зменшуватись у випадку паралельного підключення генератора (рис. 8).

Чим більшим є активний опір R контуру, тим слабше виражений стрибок амплітуди коливань сили струму; якщо активний опір великий, то стрибок амплітуди практично не спостерігається (рис. 9).

Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань сили струму в електромагнітній коливальній системі з малим активним опором у випадку, коли частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою коливань системи, називається резонансом напруг.

Явище різкого зменшення амплітуди вимушених коливань сили струму у випадку, коли частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою коливань системи, називається резонансом струмів.

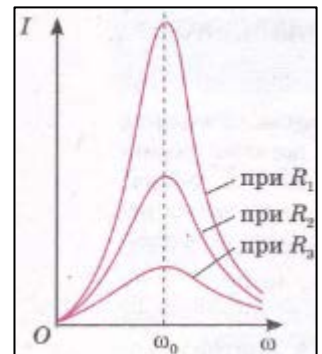


Рис. 9. Графіки залежностей діючого значення сили струму I в підвідних проводах від циклічної частоти ω зміни напруги на джерелі за різних активних опорів R кола: ($R_1 < R_2 < R_3$). ω_0 – власна частота коливань системи

1.3.3. Електромагнітні автоколивання

Оскільки вільні коливання завжди затухають внаслідок втрат енергії, й у техніці, й у фізичних дослідах вкрай потрібні незатухаючі коливання, періодичність яких зберігається весь час, поки система взагалі коливається. Як же отримують такі коливання? Вимушені коливання, при яких втрати енергії компенсуються роботою періодичної зовнішньої сили, є незатухаючими. Але звідки взяти зовнішню періодичну силу? Адже вона, в свою чергу, потребує джерела якихось незатухаючих коливань.

Незатухаючі коливання створюються такими пристроями, які самі можуть підтримувати свої коливання за рахунок деякого постійного джерела енергії. Такі пристрої називаються автоколивальними системами.

Автоколивальна система – це система, що складається з пристрою, в якому можуть відбуватися вільні коливання, джерела енергії та елемента, регулюючого надходження енергії від джерела до коливальної системи, а також пристрою, який забезпечує позитивний зворотній зв'язок коливальної системи з регулювальним елементом.

Автоколиваннями називаються коливання постійної амплітуди, що відбуваються за рахунок автоматичного поповнення енергії коливальної системи від зовнішнього джерела.

Змінний електричний струм, створюваний генераторами, є низькочастотним і тому не придатний для потреб радіотехніки. Високочастотні електромагнітні коливання виникають у коливальному контурі, але, в реальному контурі вони швидко затухають. Щоб коливання не затухали, потрібно поповнювати енергію контуру, наприклад заряджаючи конденсатор від джерела постійного струму.

Але якщо джерело буде весь час підключене до конденсатора, то конденсатор лише обмінюватиметься енергією з джерелом. Щоб цього не відбувалося, контур має бути підключеним до джерела тільки в ті інтервали часу,

коли обкладка конденсатора, яка приєднана до позитивного полюса джерела струму, заряджена позитивно. Під час коливань знак заряду на обкладках періодично змінюється, отже, ключ має замикати й розмикати коло з частотою, що дорівнює частоті електромагнітних коливань контуру, тобто кілька мільйонів разів за секунду. Замикати з такою частотою механічний ключ неможливо, тому в ролі ключа в радіотехніці використовують транзистор, провідні властивості якого можуть змінюватися практично миттєво.

Генератор незатухаючих електромагнітних коливань – це автоколивальна система, в якій енергія джерела постійного струму перетворюється на енергію електромагнітних коливань, частота яких дорівнює частоті коливань коливального контуру, що є частиною цієї системи.

Як і в будь-якій автоколивальній системі, у транзисторному генераторі

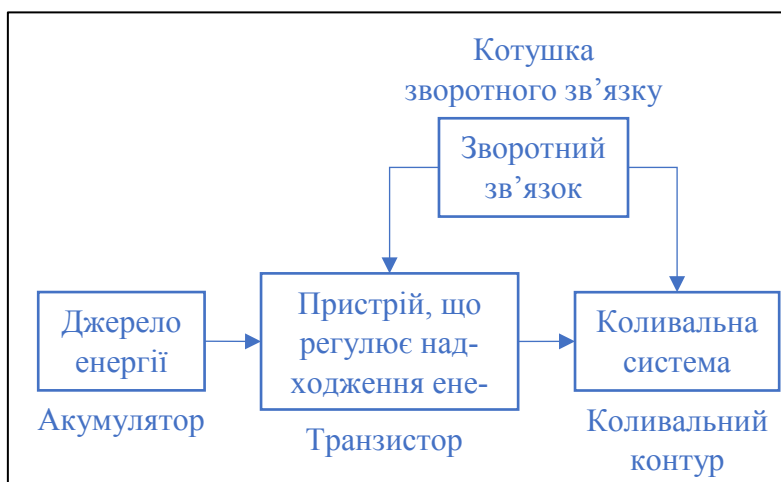


Рис. 10. Основні елементи електромагнітної автоколивальної системи

можна виділити чотири основні елементи (рис. 10):

- 1) джерело енергії – джерело постійного струму;
- 2) регулювальний елемент – транзистор;
- 3) пристрій зворотного зв'язку – котушка зв'язку $L_{зв}$, яка індуктивно пов'язана з котушкою L_k коливального контуру (рис. 11);
- 4) елемент, у якому можуть відбуватися вільні коливання, – коливальний контур.

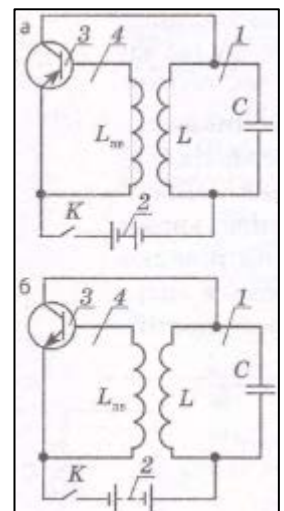


Рис. 11. Електричні схеми незатухаючих коливань на транзисторах р-п-р-типу (а) і п-р-п-типу (б): 1 – коливальний контур; 2 – джерело постійного струму; 3 – транзистор; 4 – котушка зв'язку

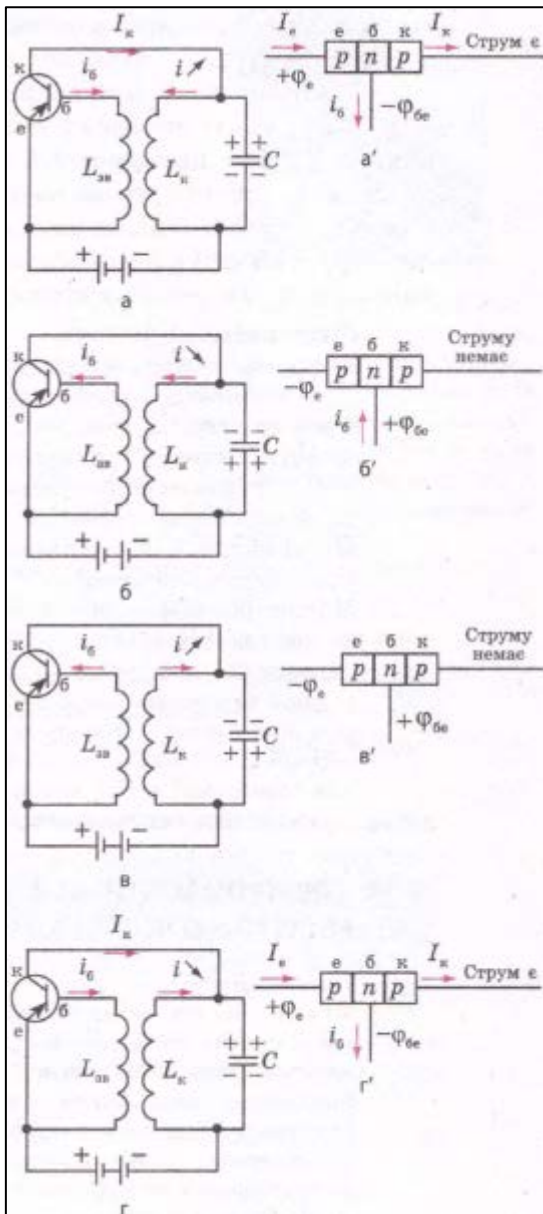


Рис. 12. Принцип дії генератора незатухаючих електромагнітних коливань

енергія від джерела надходить через транзистор у коливальний контур.

Протягом другої чверті періоду (рис. 12, б) конденсатор перезаряджається, з колектором з'єднана негативно заряджена обкладка конденсатора, а сила струму в котушці L_K зменшується. Вихрове електричне поле в цей інтервал часу напрямлене за напрямком струму, тому струм $i_б$ у котушці зв'язку $L_{зв}$ напрямлений від емітера до бази, і на базі виникає додатний потенціал відносно емітера (рис. 12, б'). Перехід «емітер – база» стає оберненим, дірки не потрапляють на базу та в коло колектора. Транзистор закритий, енергія не повертається до джерела.

Нехай в момент замикання кола заряд на обкладках конденсатора максимальний, а обкладка, що заряджена позитивно, з'єднана з колектором (рис. 12, а). Протягом першої чверті періоду конденсатор розряджається через котушку L_K , а сила струму в цій котушці збільшується ($i \uparrow$). Змінний електричний струм створює змінне магнітне поле, яке, у свою чергу, створює вихрове електричне поле, що в цьому випадку напрямлене проти струму. Під дією вихрового електричного поля в котушці зв'язку $L_{зв}$ виникає індукційний струм $i_б$, напрямком якого збігається з напрямком електричного поля. У результаті на базі підтримується від'ємний потенціал відносно емітера (на базу з емітера надходять електрони). Перехід «емітер – база» є прямим, тому дірки потрапляють на базу й далі в коло колектора (рис. 12, а'). Транзистор відкритий, енергія від джерела надходить через транзистор у коливальний контур.

Протягом третьої чверті періоду (рис. 12, в) з колектором знову з'єднана негативно заряджена обкладка конденсатора, але конденсатор розряджається, сила струму в котушці L_K збільшується, тому вихрове електричне поле напрямлене проти струму. Індукційний струм i_6 у котушці зв'язку $L_{зв}$ напрямлений від емітера до бази, тому на базі підтримується додатний потенціал відносно емітера (рис. 12, в'). Перехід «емітер – база» обернений, транзистор залишається закритим, і енергія не повертається до джерела.

Протягом четвертої чверті періоду (рис. 12, г) конденсатор перезаряджається, з колектором уже з'єднана позитивно заряджена обкладка конденсатора. Сила струму в котушці L_K зменшується, тому вихрове електричне поле підтримує струм. Індукційний струм i_6 напрямлений від бази до емітера, і на базі створюється від'ємний потенціал відносно емітера (рис. 12, г'). Перехід «емітер – база» стає прямим, транзистор – відкритим, і енергія надходить у коливальний контур.

Таким чином, коливальний контур підключений до джерела струму лише в ті інтервали часу, коли енергія надходить у коливальний контур. При цьому енергія електричного поля в конденсаторі збільшується, амплітуда коливань у коливальному контурі зростає. Однак збільшення амплітуди коливань у контурі не триває необмежено: як тільки втрати енергії в коливальному контурі компенсуються надходженням енергії від джерела струму, зростання амплітуди припиниться.

У техніці застосовуються електромеханічні автоколивальні системи, в яких коливання здійснює механічна система, а надходження енергії регулюється спеціальним електричним пристроєм. На рис. 13 зображено приклад пристрою такого роду. Тягарець висить на пружині, нижній кінець якої занурюється при коливаннях цього пружинного маятника в чашечку зі ртуттю. Один полюс батареї B приєднаний до пружини вгорі, а інший – до чашечки

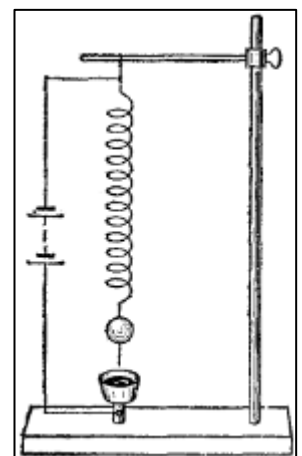


Рис. 13. Автоколивання тягарця на пружині

чки зі ртуттю. При опусканні тягарця електричне коло замикається і по пружині проходить струм. Витки пружини завдяки магнітному полю струму починають при цьому притягуватися один до одного, пружина стискається, і тягарець отримує поштовх догори. Тоді контакт розривається, витки перестають стягуватися, тягарець знов опускається вниз, і весь процес повторюється знову.

Таким чином, коливання пружинного маятника, яке само по собі затухало б, підтримується періодичними поштовхами, обумовленими самим коливанням маятника. При кожному поштовху батарея віддає порцію енергії, частина якої йде на підйом тягарця. Система сама керує діючою на неї силою і регулює надходження енергії з джерела – батареї. Коливання не затухають саме тому, що за кожен період від батареї відбирається стільки енергії, скільки йде за той самий час на тертя й інші втрати. Що ж стосується періоду цих незатухаючих коливань, то він практично співпадає з періодом власних коливань тягарця на пружині, тобто визначається жорсткістю пружини та масою тягарця.

Характерна риса автоколивань полягає в тому, що їх амплітуда визначається властивостями самої системи, а не початковим відхиленням чи поштовхом, як у вільних коливань.

1.4. Аналогія між вільними електромагнітними і механічними коливаннями

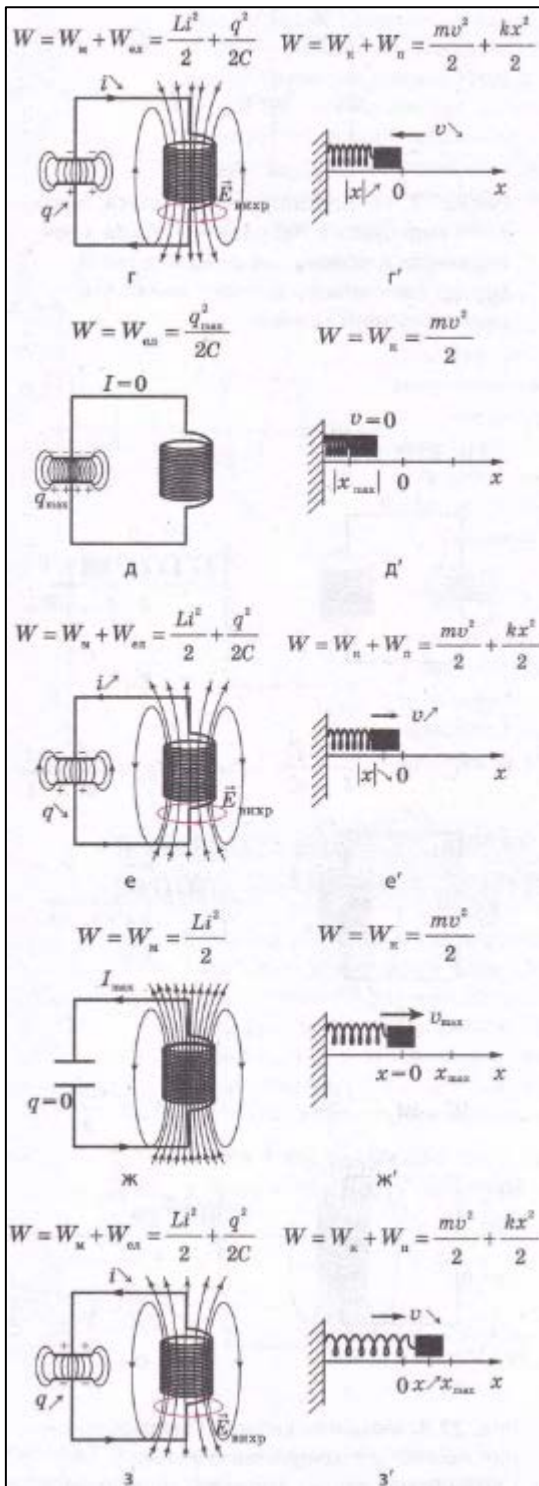


Рис. 14. [Закінчення]

рگی. Починає йти струм (тіло набуває швидкість), через чверть періоду струм і магнітна енергія найбільші, а конденсатор розряджений, заряд на ньому дорівнює нулю

Якщо порівняти механізми перебігу електромагнітних коливань в контурі та механічних коливань тіла на пружині, то можна встановити їх подібність на всіх стадіях процесу. В цьому неважко переконатися. Проведемо аналогію між цими коливальними процесами (на рис. 14 подано порівняння вільних електромагнітних та механічних коливань за чвертями їх періоду).

В початковий момент конденсатор заряджений (тіло відхилене), тобто системі передано запас електричної (потенціальної) енергії.

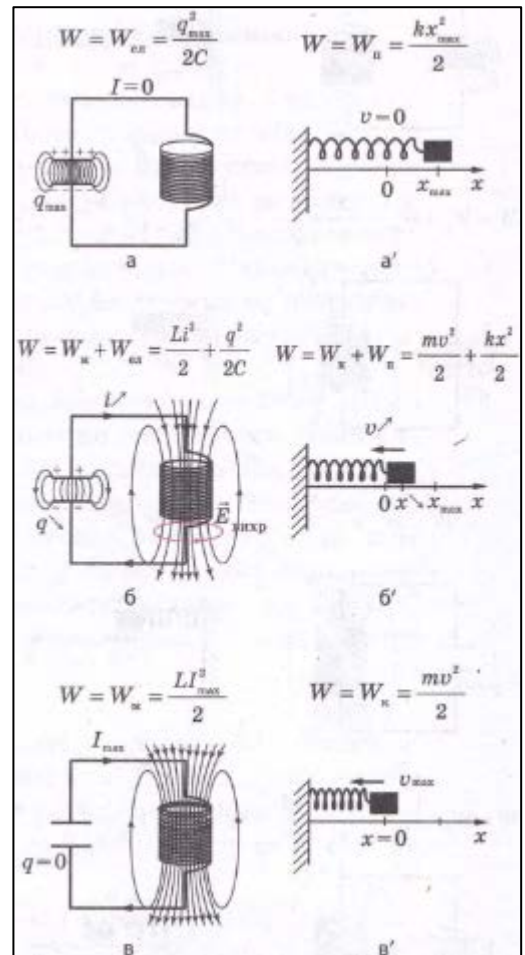


Рис. 14. Порівняння вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі (а – з) із вільними механічними коливаннями тягарця на пружині (а' – з') за чвертями їх періоду

(швидкість тіла та його кінетична енергія найбільші, при чому тіло проходить через положення рівноваги) і т.д.

Початковий заряд конденсатора і, отже, напруга на ньому створюється ЕРС батареї. З іншого боку, початкове відхилення тіла створюється ззовні прикладеною силою. Таким чином, сила, діюча на механічну коливальну систему, відіграє роль, аналогічну ЕРС, діючій на електричну коливальну систему.

Подібність закономірностей обох процесів іде й далі. Механічні коливання затухають внаслідок тертя: при кожному коливанні частина енергії перетворюється через тертя на теплоту, тому амплітуда стає все меншою. Точно так же, при кожній перезарядці конденсатора частина енергії струму переходить в теплоту, яка виділяється внаслідок опору в проводі котушки. Тому й електричні коливання в контурі також затухають. Опір відіграє для електричних коливань ту ж роль, що й тертя для механічних коливань.

Виходячи з таких спостережень можна скласти таблицю, яка наочно демонструє подібність у закономірностях перебігу вільних механічних та електромагнітних коливань (таб. 1).

Таблиця 1. Аналогія між вільними механічними і електромагнітними коливаннями

Найменування	Формула та одиниця вимірювання	
	Вільні механічні коливання	Вільні електромагнітні коливання
Власна частота	Математичний маятник: $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ Пружинний маятник: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ $[\omega_0] = \text{с}^{-1}$	$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ $[\omega_0] = \text{с}^{-1}$

Циклічна частота	$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ $[\omega] = \text{с}^{-1}$	$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ $[\omega] = \text{с}^{-1}$
Частота коливань	$\nu = \frac{1}{T}$ $[\nu] = \text{Гц}$	$\nu = \frac{1}{T}$ $[\nu] = \text{Гц}$
Період коливання	$T = \frac{2\pi}{\omega}$ <p>Математичний маятник:</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ <p>Пружинний маятник:</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ $[T] = \text{с}$	$T = \frac{2\pi}{\omega}$ <p>Коливальний контур (без урахування R):</p> $T = 2\pi\sqrt{LC}$ $[T] = \text{с}$
Закон збереження енергії	$E_{\text{пmax}} = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = E_{\text{кmax}}$ <p>Математичний маятник:</p> $mgh_{\text{max}} = mgh + \frac{mv^2}{2}$ $= \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ <p>Пружинний маятник:</p> $\frac{kx_{\text{max}}^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ $[E] = \text{Дж}$	$W_{\text{елmax}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}}$ $= W_{\text{мmax}}$ <p>Коливальний контур (без урахування R):</p> $\frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}$ $[W] = \text{Дж}$
Рівняння гармонічного коливання	$x = x_{\text{max}} \cos \omega_0 t$ $x = x_{\text{max}} \sin \omega_0 t$	<p>На конденсаторі:</p> $q = q_{\text{max}} \cos \omega_0 t$ <p>На котушці:</p> $q = q_{\text{max}} \sin \omega_0 t$

За програмою школи коливальні процеси, зазвичай, починають вивчати з механічних коливань. Неважко переконатися далі, що в основі звукових явищ, тобто явищ, які сприймаються вухом, лежать механічні коливання, які відрізняються від коливань маятника лише більш високими частотами. Ви-

вчення електромагнітних коливань тільки підкреслює глибоку подібність між закономірностями усіх коливальних процесів.

Усі ці явища об'єднує вчення про коливання, об'єднує не за ознакою їх однакової фізичної природи, а за загальними законами, яким підпорядковуються ці явища. Наприклад, закони, яким підпорядковуються вільні та вимушені коливання, резонансні явища, автоколивання, – такі ж самі й у механіці, й в електромагнетизмі.

Існування таких однакових законів, які управляють найрізноманітнішими явищами, взятими з різних розділів фізики, відіграє надзвичайно велику роль у вивченні природи. Воно відкриває можливість шляхом вивчення явищ в одній області фізики, наприклад в механіці, краще зрозуміти явища із зовсім іншої області, наприклад, з оптики. В одних випадках це полегшує дослідження, а в інших – наштовхує на відкриття нових явищ. Вчення про коливання широко використовується усіма перевагами, які дає такий метод дослідження там, де він являється застосовним.

Механічні й електромагнітні коливання фізично різні: те, що коливається, в обох випадках цілком різне. Подібними або однаковими є закономірності цих коливальних процесів, тобто те, як відбуваються коливання.

РОЗДІЛ 2

ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Портативна автоколивальна система. Опис пристрою

У пункті 1.3.2 (с. 19 – 20) було розглянуто електромеханічну автоколивальну систему – пристрій, що демонструє автоколивання тягарця на пружині. Саме модифікація такого пристрою створюється у практичній частині цієї роботи.

З метою безпечності створення пристрою замінимо ртуть на електроліт – розчин кухонної солі. До того ж, не будь-яка пружина підходить: справа в тому, що сила магнітного притягання витків невелика. При помірних струмах дуже жорстка пружина мало стискається й ланцюг не розмикається, при більших струмах спіраль під дією сили тяжіння та перегріву «розповзається». Спіраль має бути легкою, легко стискатися й витримувати великий струм. Задля зниження робочих струмів уведемо дугоподібний магніт (індукція близько 0,1 Тл). Практично встановлено, що пристрій стабільно працює від чотирьох послідовно з'єднаних батарейок напругами 4,5 В (3 шт.) і 9 В (1 шт.).

На *рис. 15* зображено основні елементи пристрою. Пружину робимо з алюмінієвого дроту діаметром 1,5 мм та довжиною 5 м: намотуємо витки впритул на циліндр діаметром 45 мм (30 витків, діаметр отриманої пружини близько 50 мм). Закріплюємо пружину у вертикальному положенні, примотавши її



Рис. 15. Основні елементи пристрою

верхній виток тонким неізолюваним дротом до кільця з товстого алюмінієвого дроту діаметром 6 мм з хвостовиком. Хвостовик закріплюємо в муфті штативу і під'єднуємо до нього провід від джерела струму.

На гачок, закріплений на штативі, чіпляємо дуговий магніт, який одним полюсом входить, не торкаючись, у звисаючу вниз пружину на дві третини її довжини.

Наливаємо в алюмінієву кружку насичений розчин кухонної солі та опускаємо в нього нижній кінець пружини на глибину 3–4 мм. Кружку з розчином ставимо на підставку. На ручці кружки просверджуємо отвір та закріплюємо клему. Кінець нижнього напіввитка пружини довжиною 5 см відгинаємо вниз.

2.2. Досліди

2.2.1. Дослід 1: «Доведення виникнення електромагнітних автоколівань»

Підключивши верхню частину пружини через кільце до «плюсу» бата-

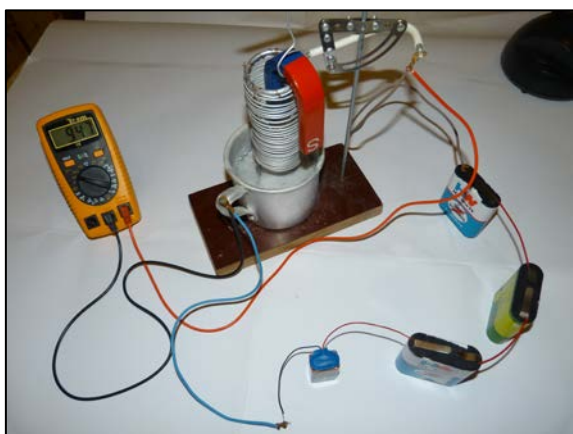


Рис. 20. Коливання напруги: $U_1 = 9,47$ В

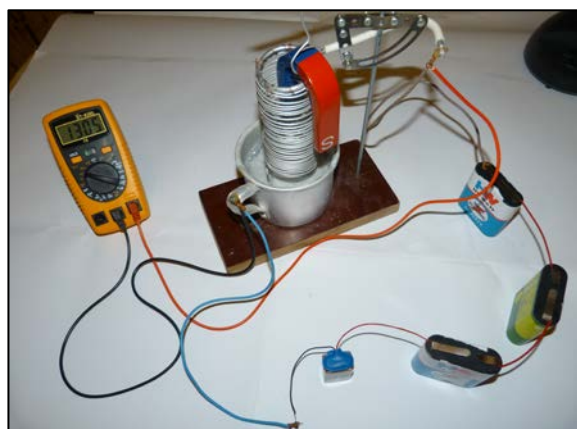


Рис. 19. Коливання напруги: $U_2 = 13,05$ В

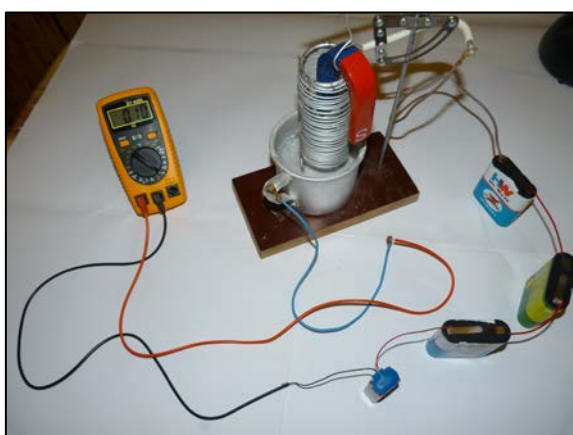


Рис. 189. Коливання струму: $I_1 = 0,1$ А

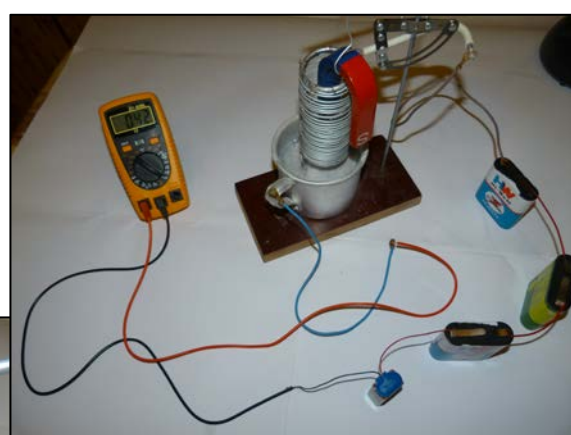


Рис. 2017. Коливання струму: $I_2 = 0,42$ А

рейки, а нижню (через електроліт і кружку – до «мінусу»), отримуємо замкнене коло (рис. 16), в якому через кілька секунд починаються незатухаючі коливання амплітудою близько 1–2 см. Включивши паралельно пружині вольтметр (рис. 17, 18), а послідовно з нею – вольтметр



Рис. 16. Утворене електричне коло

(рис. 19, 20), бачимо, що сила струму та напруга в колі коливаються.

Вмикаємо послідовно з пружиною лампочку для кишенькового ліхтаря – вона загоряється з частотою коливань пружини. *(Перебіг даного дослідю доцільно зображати за допомогою відео)*

2.2.2. Дослід 2: «Перетворення коливального руху на обертальний»

Підключаємо послідовно з пружиною дротяний моток на підставці. На пластмасовій підставці поміщуємо дві магнітні стрілки – одну біля мотка, а іншу посередині. Площину мотка розміщуємо у площині магнітного меридіану. Замикаємо електричне коло – стрілки починають коливатися, а при резонансі – й обертатися подібно до ротору електродвигуна. Якщо кутова швидкість стрілок недостатня для їх резонансового обертання, то частоту збільшуємо, занурюючи кінець пружини глибше в електроліт. *(Перебіг даного дослідю доцільно зображати за допомогою відео)*

2.2.3. Дослід 3: «Теплові, світлові та механічні явища як прояв електромагнітних коливань у колі»

Також можна скласти коло з «танцюючої» спіралі, дротяного мотка зі стрілками, які обертаються, та лампочки, яка періодично загоряється, що різнопланово доводить існування електромагнітних автоколивань у колі. *(Перебіг даного дослідю доцільно зображати за допомогою відео)*

Підводячи підсумки, можна сказати, що представлена портативна автоколивальна система є джерелом імпульсних струмів низької частоти. Вона дозволяє ілюструвати перетворення коливального руху в обертальний і ланцюг перетворення різних видів енергії.

ВИСНОВКИ

У ході роботи «Дослідження електромагнітних коливань за допомогою автоколивальної системи» було опрацьовано теоретичний матеріал про різні види коливань; створено портативну дисипативну електромеханічну коливальну систему, завдяки проведенню дослідів на якій продемонстровано:

- виникнення та доведення існування електромагнітних автоколивань;
- використання пружини з алюмінієвого дроту як коливального тіла;
- використання електроліту – водного розчину кухонної солі – у якості провідника;
- важливий частинний випадок паралельних струмів та його практичне використання;
- незатухаючі коливання пружинного маятника;
- самозбуджувану автоколивальну систему;
- резонансні явища та умови, при яких резонанс посилюється, ослаблюється, зникає;
- пристрій, в якому одночасно проявляються теплові, світлові, механічні, електричні та магнітні явища.

Ця робота має цінність у практичному застосуванні. Вона буде цікава всім, хто хоче познайомитися зі світом коливань. Також робота може бути використана на уроках фізики для детального вивчення електромагнітних автоколивань.

Створений пристрій підвищує ефективність засвоєння теоретичного матеріалу та розвиває інтерес до вивчення фізики. Він має нескладну будову, проте досить практичний, що й робить його зручним у використанні та більш ефективним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бар'яхтар В.Г. Фізика. 11 клас. Академічний рівень. Профільний рівень: Підручник для загальноосвіт. навч. закл. / В.Г. Бар'яхтар, Ф.Я. Божинова, М.М. Кірюхін, О.О. Кірюхіна. – Х.: Видавництво «Ранок», 2011. – С. 150 – 175, 181 – 184: іл.
2. Физика: Учеб. для 11 кл. шк. и кл. с углубл. изучением физики / О.Ф. Кабардин, А.Н. Малинин и др.; Под. ред. А.А. Пинского. – 7-е изд. – М.: Просвещение, 2002. – С. 3 – 15.
3. Фізика: підручник для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл. (профільн. рівень) / авт.: Т.М. Засєкіна, М.В. Головка. – К.: Педагогічна думка, 2010. – С. 211 – 233, іл.
4. Элементарный учебник физики под ред. акад. Г.С. Ландсберга. Том III. Колебания, волны. Оптика. Строение атома. Изд. девятое. Стереотипное. – М.: Издательство «Наука», 1975. – С. 69 – 94: ил.