

§ 43. ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

71

1750 р. біля міста Анжера (Франція) через ланцюговий міст завдовжки 102 м йшов у ногу загін солдатів. У результаті розмах коливань мосту збільшився настільки, що його ланцюги обірвались і міст упав у річку; загинуло 226 людей. У 1906 р. з аналогічної причини зруйнувався так званий Єгипетський міст у Петербурзі — по ньому проходив кавалерійський ескадрон. Ці події — класичні приклади виявлення резонансу в коливальних системах. Про те, що таке резонанс, коли його прояви корисні, а коли шкідливі, йтиметься в цьому параграфі.

1

Чому для підтримування коливань системі потрібно постачати енергію

Якщо коливальну систему вивести з положення рівноваги, то в ній виникнуть вільні коливання, частота яких не залежить від амплітуди. *Частота вільних коливань називається власною частотою коливань системи.* Через втрати енергії вільні коливання завжди будуть затухаючими. Щоб коливання не затухали, необхідно, щоб у коливальну систему періодично надходила енергія ззовні.

Наведемо приклад. Кожен із вас гойдався на гойдалці. Коли ви були маленькими, вас розгойдували дорослі, пізніше ви навчилися розгойдуватися самі. Що означає «розгойдуватися» або «розгойдувати»? Розгойдуючись на гойдалці (а гойдалка — це фізичний маятник), ви за рахунок роботи м'язів періодично передаєте коливальній системі «гойдалка» енергію.

Якщо енергії, яка надходить до системи, недостатньо, щоб відновити втрати на тертя, то амплітуда коливань гойдалки зменшуватиметься доти, *доки коливання усталяться. Під час усталених коливань втрати енергії системи дорівнюють енергії, яка надходить у систему* (у даному випадку — в результаті роботи ваших м'язів).

Якщо ж енергії надходить більше, ніж витрачається на тертя, то амплітуда коливань буде збільшуватись. Однак зі збільшенням амплітуди будуть збільшуватись і втрати енергії, тому через деякий час коливання знов усталяться — гойдалка знову буде коливатися зі сталою амплітудою, тільки більшою, ніж за слабкого розгойдування.

Ви можете розгойдувати гойдалку й так: стати на землю, узятися за гойдалку руками й рухати її вперед-назад із частотою, що не дорівнює власній частоті коливань гойдалки. Гойдалка буде

коливатися, здійснюючи *вимушені коливання*, частота яких дорівнює частоті зміни змушуючої сили (сили пружності з боку ваших рук), проте навряд чи вам вистачить зусиль, щоб домогтися досить великої амплітуди коливань.

2 У чому причина виникнення резонансу

Розгойдувати гойдалку, рухаючи її вперед-назад із довільною частотою ви будете, скоріш за все, хіба що заради фізичного експерименту, адже ваш життєвий досвід підказує: потрібно діяти *в такт* із власними коливаннями гойдалки. Амплітуда коливань швидко збільшиться, якщо частота зовнішньої змінної сили співпадає з частотою вільних коливань гойдалки.

Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань, якщо частота зовнішньої сили, що періодично змінюється, збігається із власною частотою коливань системи, називають **резонансом**.

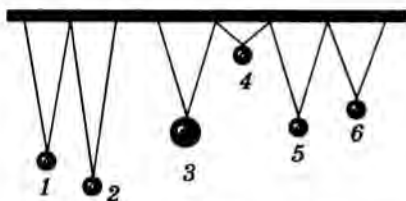


Рис. 43.1. Дослід із вивчення явища резонансу

Для спостереження явища резонансу проведемо дослід. Підвісимо на тонку рейку п'ять легких кульок і одну важку (рис. 43.1). Зверніть увагу, що кулька 3 (найважча) і кулька 5 підвішені на нитках однакової довжини, а решта кульок — на нитках різної довжини. Виведемо важку кульку з положення рівноваги — вона почне коливатися. Коливання маятника передадуться рейці, і вона почне здійснювати вимушені коливання, частота яких дорівнюватиме частоті вільних коливань важкого маятника.

У результаті рейка діятиме на інші маятники з деякою силою, що періодично змінюється, і ці маятники також розпочнуть коливальний рух. При цьому амплітуда коливань маятників буде різною. Найсильніше розгойдається маятник 5, довжина якого (а отже, і власна частота коливань) дорівнює довжині важкого маятника.

З'ясуємо причини такої поведінки маятників.

Річ у тім, що коли частота змінення зовнішньої сили не збігається з власною частотою коливань системи ($\nu \neq \nu_0$), зовнішня сила то «підштовхує» кульку (виконує додатну роботу), то заважає рухові кульки (виконує від'ємну роботу). У результаті робота зовнішньої сили є незначною, тому мала й амплітуда усталених коливань.

Якщо частота зміни зовнішньої сили збігається з власною частотою коливань системи ($\nu = \nu_0$), то протягом усього часу коливань напрямок зовнішньої сили збігається з напрямком руху кульки, тому робота, яку виконує зовнішня сила, весь час додатна. Енергія системи швидко збільшується — різко зростає й амплітуда коливань.

Явище резонансу зручно описувати за допомогою графіків.

Графік залежності амплітуди вимушених коливань від частоти зміни зовнішньої сили називають **резонансною кривою**.

На рис. 43.2 подано резонансні криві за різних сил тертя. Аналізуючи графіки, можна зробити висновки: 1) найбільша амплітуда коливань під дією зовнішньої сили досягається тоді, коли частота зовнішньої змінної сили збігається з власною частотою коливань системи ($\nu = \nu_0$); 2) чим більша в системі сила тертя, тим меншим є пік резонансної кривої, тобто тим слабше виражений резонанс.

Як боротися з проявами резонансу і де застосовують резонанс

Практично всі фізичні об'єкти здатні здійснювати вільні коливання. Зовнішні періодичні впливи на такі об'єкти можуть спричинити явище резонансу й призвести до руйнувань. На початку параграфу вже йшлося про випадки з руйнуванням мостів. Також відомі випадки руйнування літаків, коли амплітуда коливань крил літака різко збільшувалась під дією турбулентних потоків повітря. Під час руху потяга частота ударів коліс на стиках рейок іноді збігається з частотою вільних коливань вагона на ресорах, тоді вагон починає сильно розгойдуватися і виникає небезпека аварії.

Як боротися зі шкідливими проявами резонансу? Аналізуючи графіки на рис. 43.2, можна запропонувати збільшити силу тертя, однак це призведе до небажаних втрат енергії. Тому частіше застосовують інші способи: змінюють власну частоту коливань системи або частоту зовнішньої змінної сили. Наприклад, щоб вирішити описану проблему з літаками, просто зробили важчими їх крила — частота власних коливань крила змінилась і припинила співпадати із частотою коливань зовнішньої сили. Для потягів розраховують небажану швидкість руху, по мосту забороняється ходити стройовим кроком, під час спорудження будинків ураховують частоту коливань земної кори в разі землетрусу і т. д.

Явище резонансу може приносити й користь: наприклад, завдяки резонансу легко розгойдати гойдалку або виштовхнути застряглий автомобіль. Резонанс використовують у роботі вібротришків у гірничовидобувній промисловості, застосовують в акустиці, медицині, для приймання та передавання радіосигналів і т. д. Вивчаючи фізику, ви ще не раз зустрінетесь із застосуванням резонансу.

Підбиваємо підсумки

Коливання тіла, які відбуваються під дією зовнішньої сили, що періодично змінюється, називають вимушеними. Частота вимушених коливань збігається з частотою зовнішньої змінної сили; амплітуда вимушених коливань визначається значенням зовнішньої сили.

Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань, якщо частота зовнішньої сили, що періодично змінюється, збігається із власною частотою коливань системи, називають резонансом.

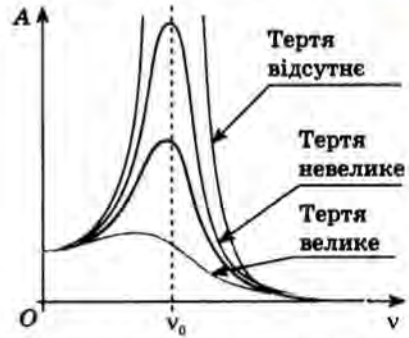


Рис. 43.2. Графіки залежності амплітуди A коливань від частоти ν зовнішньої сили, яка періодично змінюється, за різних сил тертя; ν_0 — власна частота коливань системи. Зверніть увагу: якщо тертя в системі велике, то резонанс настає за меншої частоти, ніж власна частота коливань системи

Графік залежності амплітуди вимушених коливань від частоти зовнішньої змінної сили називають резонансною кривою. Чим більша в системі сила тертя, тим меншим є пік резонансної кривої, тобто тим слабше виражений резонанс.



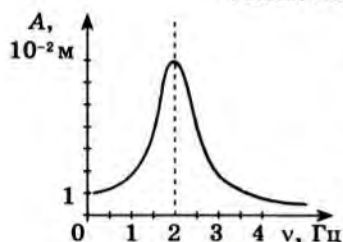
Контрольні запитання

1. Які коливання називають вимушеними? 2. Чим визначається частота вимушених коливань? 3. Від чого залежить амплітуда вимушених коливань? 4. Дайте визначення резонансу. Наведіть приклади його прояву. 5. Що таке резонансна крива? Які висновки можна зробити внаслідок її аналізу? 6. Як боротися з небажаними проявами резонансу? Де застосовують резонанс?



Вправа № 38

- Чому, коли повз будинок проходить транспорт, шибки іноді дзеленчать?
- Якщо нести відра з водою, то на деякій швидкості руху вода починає вихлюпуватися. Що потрібно зробити, щоб припинити це?
- До кінця пружини маятника, тягар якого має масу 0,5 кг, прикладено змінну силу, що змінюється з частотою 10 Гц. Чи виникне резонанс, якщо жорсткість пружини дорівнює 200 Н/м?
- На якій мінімальній швидкості руху потяга виникне резонанс, якщо довжина залізничної рейки дорівнює 25 м, а період власних коливань потяга — 1,25 с?



5. На рисунку подано резонансну криву пружинного маятника. Визначте жорсткість пружини, якщо маса тягаря маятника — 1 кг.

6*. У вагоні потяга на нитці завдовжки 40 см підвішено невеликий тягар. Якою є швидкість руху потяга в той момент, коли тягар починає розгойдуватись особливо інтенсивно? Довжина залізничної рейки дорівнює 25 м.



В. Т. Трощенко

ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України (Київ)

Інститут створений у 1966 р., його засновником і першим директором був академік Г. С. Писаренко. Зараз Інститут очолює академік Валерій Трохимович Трошенко (див. фото) — заслужений діяч науки й техніки України, лауреат Державних премій СРСР і України (1982, 1969, 1997).

Основні напрямки наукової діяльності Інституту — механіка руйнування й живучість конструкцій, коливання неконсервативних механічних систем — принесли установі світове визнання. Щоб дати уявлення про ці напрямки, нагадаємо одну із задач будівельної механіки: якими мають бути завтовшки стіни різних будівель, щоб витримати навантаження не тільки в нормальних умовах, але й у разі 6-бального (за шкалою Ріхтера) землетрусу (в Україні це актуально для спорудження будівель у Криму).

Учені Інституту здійснили вагомий внесок у розвиток теоретичних і експериментальних досліджень із встановлення критеріїв міцності та методів підвищення несної здатності матеріалів і елементів технічних конструкцій.

В Інституті розроблено методи й алгоритми чисельного моделювання зміни з часом механічних напруг, що виникають в елементах обладнання АЕС; уперше в Україні розроблено галузевий нормативний документ із методики оцінки міцності та ресурсу корпусів реакторів у процесі експлуатації.