

І. О. Анісімов

Коливання

КОЛИВАННЯ – зміна в часі деякої фізичної величини навколо значення, що відповідає рівноважному стану системи. Найчастіше спостерігаються періодичні та квазіперіодичні К., бувають також аперіодичні та стохастичні. К., які з часом поширюються в просторі, називають хвилями. За своєю природою К. фіз. систем бувають мех. або електромагнітними. Можливі також К. у хім. (реакції Белоусова–Жаботинського, що супроводжуються періодич. зміною концентрації реагентів), екол. (К. кількості особин при взаємодії популяцій хижак–здобич), біол. (робота серця) системах. Коливні системи різної природи в багатьох випадках мають подібні властивості й описуються однак диференціал. рівняннями. Найпростіший приклад колив. системи – модель ліній. консерватив. осцилятора, яка описує широкий клас реал. систем при невеликих відхиленнях від положення рівноваги: фіз. маятник (вантаж на підвісі), пружин. маятник (вантаж на пружині), колив. контур у радіотехніці, акустич. резонатор, резонатор електромагніт. К. тощо. У ліній. осцилятора сила, що повертає систему в положення рівноваги, лінійно залежить від відхилення від цього положення. Вільні К. такої системи (тобто К., зумовлені тим, що в початк. момент часу систему вивели зі стану рівноваги, а потім відпустили) є гармонічними: зміна відхилення системи від положення рівноваги з часом відбувається за законом синуса (або косинуса): $x(t) = A \sin \varphi(t)$, де $\varphi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$.

Гармонічні К. характеризуються амплітудою A (макс. відхилення від положення рівноваги), фазою $\varphi(t)$ (характеризує стадію К. у даний момент часу; φ_0 – початк. фаза), періодом T_0 (найменший проміжок між двома моментами часу, коли система перебуває в однак. стані; визначається лише властивостями осцилятора). Період визначає циклічну частоту $\nu_0 = 1/T_0$ (кількість К. за одиницю часу) та кругову частоту $\omega_0 = 2\pi\nu_0$. Двічі за період К. у системі відбувається перетворення кінет. енергії в потенціальну (в мех. системах) або енергії електрич. поля в енергію магніт. поля (в електромагніт. системах). Для ліній. консерватив. осцилятора справджується закон збереження енергії: сума потенціал. (електрич.) та кінет. (магніт.) енергії з часом зберігається. К. ліній. осцилятора є ізохронними (період К. T_0 не залежить від їхньої амплітуди A). Врахування втрат (дисипації) енергії (тертя в мех. осциляторах, актив. опір у радіотех. контурі та ін.) призводить до того, що з часом амплітуда вільних К. згасає (модель ліній. дисипатив. осцилятора). Таке згасання

притаманне майже всім реал. макроскопіч. осциляторам. За наявності дуже сильної дисипативної сили відхилення від стану рівноваги з часом зменшується експоненціально (аперіодичні К.). При великих відхиленнях систем від положення рівноваги К. стають нелінійними: повертає сила починає нелінійно залежати від відхилення від положення рівноваги (модель неліній. осцилятора). У цьому випадку форма К. перестає бути гармонічною (в спектрі з'являються вищі гармоніки), а період К. починає залежати від її амплітуди (неізохронність). К., спричинені дією на осцилятор зовн. сили, називають вимушеними. Якщо зовн. сила є гармонічною, а її частота ω збігається з частотою влас. К. ω_0 , у ліній. консерватив. осциляторі спостерігається резонанс – лінійне в часі зростання амплітуди К. до нескінченності. У реал. системах резонансна амплітуда К. обмежується ефектами згасання (дисипатив. осцилятор) або неізохронності, коли зі зростанням амплітуди частота влас. К. змінюється та з'являється розстроювання між нею і частотою зовн. сили (неліній. осцилятор). Дія періодич. сили на неліній. осцилятор може призвести до появи стохастич. (випадк.) К. У такому режимі поведінка колив. системи виявляється непередбачуваною, оскільки вона залежить від початк. умов, які в реал. системах визначаються в результаті вимірювань і тому ніколи не відомі абсолютно точно. Коливна система (неліній. осцилятор) може містити неліній. елемент, величина якого здатна змінюватися під дією зовн. сили (прикладом такого елемента може бути варикап, електрична ємність якого залежить від прикладеної напруги). Якщо зовн. напруга, прикладена до варикапа, значно більша за напругу, спричинену влас. К. колив. контуру з варикапом, можна вважати, що ємність варикапа змінюється лише під дією прикладеної ззовні напруги, незалежно від руху самої системи. Коливні системи, в яких який-небудь параметр змінюється з часом під дією зовн. сили незалежно від руху самої системи, називають параметричними. У таких системах можливий параметрич. резонанс – експоненціал. зростання амплітуди влас. К. Якщо зовн. сила змінюється гармонічно, умовою параметрич. резонансу є певне співвідношення між частотами зовн. сили (частота накачування) ω_p і влас. К. ω_0 ; у найпростішому випадку $\omega_p = 2\omega_0$. Якщо система дисипативна, параметрич. резонанс можливий лише тоді, коли зміна параметра перевищує деяке граничне значення – поріг параметрич. резонансу. В цьому випадку потужність, що відбирається від джерела зовн. сили (джерела накачування), перевищує втрати (які й визначають поріг) і частково витрачається на зростання влас. К. Зростання амплітуди К. у цьому режимі принципово обмежується зворот. впливом збуджених влас. К. на неліній. елемент.

Класич. прикладом параметрич. резонансу є маятник зі змін. довжиною підвісу (звичайна гойдалка): зміна довжини підвісу двічі за період К. (людина на гойдалці присідає й випростується) призводить до зростання амплітуди К. (розгойдування гойдалки). Якщо потужність, що надходить від джерела накачування, лише частково компенсує втрати, то вимушені К. в такій системі встановлюються на вищому рівні, ніж за відсутності

накачування. Цей принцип лежить в основі роботи параметрич. підсилювачів, які характеризуються надзвичайно низьким рівнем влас. шумів. Автоколив. системами, або автогенераторами називають системи, в яких за відсутності зовн. періодич. сили можуть виникати та встановлюватися періодичні К. (автоколивання), властивості яких визначаються властивостями самої системи та слабо залежать від початк. умов. Прикладами автогенераторів різної природи можуть бути мех. та електрон. годинники, LC-, RC- та різноманітні імпульсні автогенератори в радіотехніці, реакція Білоусова–Жаботинського (в хімії), серце (в біології). Енергія на збудження автоколивань береться або від зовн. джерела (електрон. годинник, увімкнений в електромережу), або за рахунок енергії, накопиченої в самій системі (потенціал. енергія підтягнутої вгору гирі в мех. годиннику). Встановлення амплітуди в автогенераторах відбувається за рахунок їхньої нелінійності, тому будь-який автогенератор – це нелінійна система. За формою вихід. сигналу серед автогенераторів виділяють генератори квазігармоніч. сигналів (форма сигналу майже гармонічна) та генератори релаксацій. сигналів (форма сигналу суттєво відрізняється від гармоніч. і може бути, напр., періодич. послідовністю прямокут. або трикут. імпульсів). Якщо на автогенератор квазігармоніч. сигналів діє зовн. гармонічна сила, можливе явище вимушеної синхронізації, або нав'язування частоти. Воно полягає в тому, що під дією зовн. сили (її амплітуда може бути й малою) автоколивання придушуються, і на виході спостерігаються лише К. з частотою та фазою зовн. сили. Це явище використовують для стабілізації частоти автогенераторів великої потужності. Деяке ускладнення схеми автогенератора призводить до того, що він може стати джерелом стохастич. (непередбачуваного) сигналу. Подібні пристрої відомі як генератори шуму, які нині застосовують в багатьох задачах науки і техніки. Коливні системи з багатьма ступенями вільності (в найпростішому випадку кількість ступенів вільності – це мін. кількість координат і швидкостей, необхідних для опису системи) можна уявити як набір зв'язаних осциляторів. Прикладами можуть служити маятники, зв'язані пружиною, коливні контури з індуктив. або ємніс. зв'язком та ін. Такі системи характеризуються не однією, а кількома (за кількістю ступенів вільності) частотами влас. К. У ліній. консерватив. системах із багатьма ступенями вільності можливий ефект обміну енергією між окремими (парціал.) осциляторами (обмін енергією між ступенями вільності). Його результатом є відмінність влас. частот від парціал. частот (тобто влас. частот окремих осциляторів за відсутності зв'язку між ними).

Кожній влас. частоті відповідає своя мода – тип К., що характеризується певним співвідношенням між амплітудами та фазами К. окремих осциляторів. Якщо на лінійну коливну систему з багатьма ступенями вільності діє зовн. гармонічна сила, резонанс можливий на кожній із влас. частот системи. Якщо сила діє на один із зв'язаних осциляторів, у ньому на деякій частоті К. можуть зникнути за рахунок компенсації зовн. сили дією ін. осциляторів системи (явище динаміч. демпфірування). В ін. осциляторах К.

теж можуть зникати (явище компенсації різних типів зв'язку). Якщо зв'язок існує між автогенераторами (або колив. контурами в багаточастот. автогенераторі), він спричиняє ефект конкуренції мод. Співіснування мод можливе лише за слабкого зв'язку. В усіх ін. випадках у результаті конкуренції виживає лише одна мода, яка і встановлюється в системі. Результат конкуренції може бути визначений наперед характером зв'язку (коли один з автогенераторів може ефективно придушувати К. інших, не зазнаючи поміт. впливу з їхнього боку – випадок сильного невзаєм. зв'язку), а може залежати від початк. умов (коли за наявності сильного зв'язку всі автогенератори є відносно рівноправними – випадок сильного взаєм. зв'язку). В остан. випадку в системі встановлюється та мода, яка переважала в початк. момент часу. В системі зв'язаних автогенераторів можливі також режими стохастич. автоколивань. Існують і розподілені коливні системи (формально вони мають нескінченну кількість ступенів вільності). Найпростіший одновимір. приклад такої системи – це натягнута пружна струна, кінці якої жорстко закріплені. К. такої струни можна формально представити як суму двох гармоніч. хвиль однак. амплітуди, що біжать назустріч одна одній (стояча хвиля). На довжині струни повинна вкладатися ціла кількість півхвиль стоячої хвилі, чим і визначається нескінчен. набір влас. частот такої системи. Двовимір. аналогом даної системи є жорстко закріплена периметром мембрана (напр., прямокут. форми), тривимірним – резонатор для електромагніт. К. з провід. стінками (напр., у формі паралелепіпеда або циліндра).

Рекомендована література

1. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. Москва, 1981;
2. Мигулин В. В., Медведев В. И., Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Основы теории колебаний. Москва, 1988;
3. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. Москва, 2000;
4. Василенко М. В., Алексейчук О. М. Теорія коливань і стійкості руху. К., 2004;
5. Азаренков М. О., Гірка В. О., Лапшин В. І., Муратов В. І. Теорія коливань та хвиль. Х., 2005;
6. Анісімов І. О. Коливання та хвилі. К., 2009.

Бібліографічний опис:

Коливання / І. О. Анісімов // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2014. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-5653>

