

стемы. В первом случае говорят о вынужденных колебаниях, во втором — о параметрич. возбуждении колебаний, а в третьем — об автоколебаниях.

Особое значение при возбуждении К. имеет явление *резонанса*, состоящее в резком увеличении отклика системы (амплитуды К.) при приближении частоты внеш. воздействия к нек-рой резонансной частоте, характеризующей систему. Если последняя линейна и параметры её не зависят от времени, то резонансные частоты совпадают с частотами её собственных К. и соответствующий отклик тем сильнее, чем выше добротность колебат. системы. Раскачка происходит до тех пор, пока энергия, вносимая извне (напр., при каждом отклонении маятника), превышает потери за период осцилляций. Для линейных К. энергия, получаемая от источника, пропорциональна первой степени амплитуды, а потери растут пропорционально её квадрату, поэтому баланс энергий всегда достигим.

При больших амплитудах К. становятся нелинейными, происходит смещение собств. частот системы и обогащение их спектра гармониками и субгармониками. Ограничение амплитуды К. может быть обусловлено как нелинейной диссипацией энергии, так и уходом системы из резонанса. При возбуждении К. в *системах с распределёнными параметрами* макс. амплитуды достигаются в случае пространственно-временного резонанса, когда не только частота внеш. воздействия, но его распределение по координатам хорошо «подогнаны» к структуре нормальной моды или, на языке бегущих волн, когда наступает не только совмещение их частот (резонанс), но и волновых векторов (синхронизм).

Существует нек-рый выделенный класс вынужденных К., при к-ром внеш. воздействие, не являясь чисто колебательным, имеет, однако, настолько богатый частотный спектр, что в нём всегда содержатся резонансные частоты. Напр., зарядя частица, пролетающая между двумя плоскостями, возбуждает почти весь набор нормальных волн и К., свойственный этой системе. Сюда же следует отнести черенковское излучение (см. Черенкова—Вагилова излучение) или тормозное излучение частицы в однородных средах, когда и спектр внеш. воздействия и спектр собств. К. — оба сплошные, т. е. в них представлены все возможные частоты. Наконец, есть и совсем аномальный случай вынужденных К. в системах с непрерывным спектром собств. частот типа ротатора (маховик, колесо, электрон в магн. поле и др.), где вращат. движение (а следовательно, и два ортогональных колебат. движения) может возбуждаться силами, неизменными во времени.

Параметрич. возбуждение К. происходит в результате развития т. н. параметрич. неустойчивости, возникающей при периодич. воздействии на те параметры системы, к-рые определяют величину запасённой колебат. энергии; в электрич. контуре — это самондукция или ёмкость (но не сопротивление), у маятника — это длина нити или масса груза (но не коэф. трения). Если в такой системе случайно (напр., из-за тепловых флуктуаций) «зародились» К. с ничтожно малой амплитудой на собственной частоте ω_0 , то, как и любые свободные К., они сопровождаются пульсацией энергии с удвоенной частотой $2\omega_0$. Если при этом какими-то внеш. (не зависящими от движения в системе) средствами периодически изменять подходящий параметр системы (напр., ёмкость конденсатора или длину подвеса маятника), то начнёт изменяться и запасённая энергия: увеличиваться или уменьшаться в зависимости от знака работы, совершаемой внеш. силой над параметром, т. е. от того, в какой фазе по отношению к силе происходит К. энергии в системе. «Выживет» и будет расти только такое К., фаза к-рого благоприятствует накачке энергии в систему. Возникшие в иных фазах К. либо сохраняют свою амплитуду, либо будут затухать (в последнем случае говорят о параметрич. успокоении К.).

Параметрич. возбуждение К. происходит с наиб. эффективностью при равенстве частоты изменения параметра удвоенной собственной частоте ω_0 . Сама же система остаётся линейной: движения в ней хотя и не синусоидальны, но подчинены принципу суперпозиции. Параметрич. раскачка К. (т. н. параметрич. резонанс) возможна и на частотах, дробно-кратных собств. частоте ω_0 одиночного колебат. контура, а также на комбинац. частотах в системах с неск. степенями свободы ($\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 0$), в т. ч. и в системах с распредел. параметрами при выполнении условий синхронизма возбуждаемых волн с волной накачки. См. также *Параметрические колебательные системы, Параметрический резонанс*.

Любую нелинейную колебат. систему можно рассматривать как самосогласованную параметрич. систему, в к-рую введён «элемент» обратной связи, как бы осуществляющий «самоуправление» параметром. При определ. условиях в такой системе могут возникнуть непрекращающиеся самоподдерживающиеся К., или автоколебания, при к-рых внеш. источнику отводится лишь ф-ция восполнения потерь энергии на диссипацию. Процесс формирования автоколебаний обычно состоит в последовательном самосогласовании движений. Пусть нач. состояние системы неустойчиво — либо по отношению к ничтожно малым флуктуациям (мягкий режим возбуждения), либо по отношению к определ. конечным возмущениям (жёсткий режим возбуждения). В любом случае спонтанно (случайно) возникшее К. начнёт увеличиваться по амплитуде (процесс усиления К.). Эти усиленные К. через элемент положит. обратной связи, обеспечивающий самосогласованность фаз, снова «подаются» в место своего возникновения и снова усиливаются и т. д. Получается очень быстрый (чаще всего экспоненциальный) рост К. Ограничение наступает из-за конечности энергетич. ресурсов, а иногда и раньше — из-за рассогласованности фаз (подробнее см. *Автоколебания*). Методически удобное «расчленение» автоколебат. системы на элементы, осуществляющие усиление, обратную связь и ограничение К., в общем случае не может быть однозначно сопоставлено с определёнными функционально автономными узлами. Так, в одном из самых старинных автоколебат. устройств — в маятниковых часах — ф-ция обратной связи, усилителя и ограничителя выполняет единый узел-балансир с анкером.

Автоколебат. системы обладают большим разнообразием поведения (периодические, многопериодические, стохастические) и широко представлены как в природе, так и в технике: радиотехн., акустич., оптич., квантовые (лазеры) генераторы, генераторы с сосредоточ. и распредел. параметрами, механич. автоколебат. системы — часы, ветровые волны на воде, турбулентные процессы в аэро- и гидродинамике, флаттер крыльев самолётов и др. Часто встречаются более сложные автоколебат. системы, где происходит взаимная *синхронизация колебаний* или стохастизация К.: стимуляция (пейсмейкер, от англ. pacemaker) сердца, синхронизация мод в лазерах, индуцированные излучатели эл.-магн. волн, переход к турбулентности в гидродинамич. течениях вязкой жидкости, рождение шума в системах связанных генераторов и т. д.

К. могут быть самого широкого диапазона частот ν и периодов T . Так, приведём, напр., значения T или ν для нек-рых важнейших К. и вращений: обращение Солнца вокруг центра Галактики ($T \sim 10^{16}$ с); ледниковые периоды на Земле ($T \sim 10^{11} - 10^{12}$ с); наибольший цикл солнечной активности ($T \sim 7 \cdot 10^8$ с); обращение Земли вокруг Солнца — год ($T \sim 3,6 \cdot 10^7$ с); обращение Луны вокруг Земли — лунный месяц ($T \sim 2,4 \cdot 10^6$ с); вращение Земли вокруг своей оси — сутки ($T \sim 9 \cdot 10^4$ с); оборот часовой стрелки ($T = 4,3 \cdot 10^4$ с); оборот минутной стрелки ($T = 36 \cdot 10^3$ с); ветровые волны на море ($T \sim 1$ с или $\nu \sim 1$ Гц); опасные для человека инфразвуки