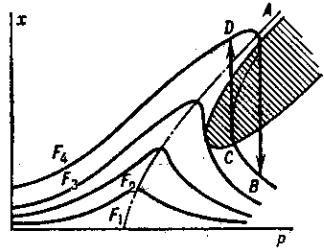


силы и по мере её увеличения становится всё более асимметричной. Поскольку частота собств. колебаний нелинейного осциллятора зависит от их амплитуды, то и максимумы на резонансных кривых сдвигаются в сторону более высоких или более низких частот. Начиная с нек-рого значения амплитуды силы, резонансные кривые приобретают неоднозначную кривообразную форму. В определённом интервале частот стационарная амплитуда вынужденных колебаний оказывается зависящей от предистории установления колебаний (явление колебл. гистерезиса). При этом части резонансных кривых, соответствующих неустойчивым

Рис. 7. Семейство амплитудно-частотных кривых в случае нелинейного резонанса при различных амплитудах сторонней силы ($F_1 < F_2 < F_3 < F_4$). Пунктир — неустойчивый участок резонансной кривой. Заштрихована область неустойчивых состояний. Стрелками отмечены точки скачкообразного изменения амплитуды колебаний при перестройке частоты вверх (AB) и вниз (CD).



состояниям, образуют на плоскости (x, p) область физически нереализуемых режимов (на рис. 7 заштрихована).

На явление нелинейного Р. в распространённых колебл. системах могут оказать существ. влияние эффекты самофокусирования и образования ударных волн, особенно в тех случаях, когда на длине резонатора укладывается большое число волн.

Явления, родственные резонансу. В нелинейных колебл. системах внеш. периодич. воздействие вызывает не только возбуждение вынужденных колебаний, но и модуляцию энергоёмких и диссипативных параметров. Явление возбуждения колебаний при периодич. модуляции энергоёмких параметров наз. параметрич. резонансом.

Если глубина модуляции энергоёмкого параметра недостаточна для возбуждения параметрич. Р., в колебл. системе происходит частичное восполнение потерь. Резонансный отклик на действие слабого сигнала с частотой $p \approx \omega_0$ при этом такой же, как у линейного осциллятора с более высокой добротностью. Кроме того, образуются колебания комбинац. частот $mp \pm n\omega_m$, где ω_m — частота модуляции параметра, $m, n = \pm 1, \pm 2, \dots$. При совпадении частоты p и $(\omega_m - p)$ вынужденные колебания в параметрически регенерированной системе зависят от соотношений между фазами параметрич. воздействия и слабой силы (сигнала). При этом может происходить как увеличение, так и уменьшение амплитуды вынужденных колебаний по сравнению с отсутствием параметрич. регенерации (явления «сильного», и «слабого» Р.).

Эффект регенерации потерь и повышения эквивалентной добротности имеет место в резонансных системах с нелинейными потерями, к-рые содержат элемент с отрицательным дифференциальным сопротивлением или цепи положительной обратной связи. Такие системы наз. потенциально автоколебательными. Если на потенциально автоколебл. систему воздействует периодич. сила значит. амплитуды с частотой p , она может влиять на затухание колебаний в системе так, что в течение определённой доли периода действия силы затухания оно становится отрицательным. В результате в потенциально автоколебл. системе возбуждаются колебания на частоте ω , близкой к собственной, если дополнительно выполнено условие $\omega = p/n$. Случай $n = 1$ отвечает синхронизации частоты автоколебаний внеш. силой. При $n \geq 2$ данное явление носит назв. автопараметрич. возбуждения, по аналогии с параметрическим резонансом, в отличие от к-рого при автопараметрич. возбуждении происходит модуляция не энергоёмких, а диссипативных параметров системы.

Термин «Р.» употребляется и по отношению к процессам в квантовых системах, когда частота внеш. воздействия (излучения) равна частоте квантового перехода, так что выполняется условие

$$\hbar p = \epsilon_n - \epsilon_m, \quad (3)$$

где ϵ_n, ϵ_m — энергия соответственно n -го, m -го уровней квантовой системы. При выполнении (3) резко возрастают вероятности квантовых переходов, что проявляется как увеличение интенсивности обмена энергией — поглощения и излучения (см. *Квантовая электроника. Лазер*).

Р. может быть причиной неустойчивости и разрушений механич. инженерных конструкций и электр. сетей. В вибропреобразователях Р. позволяет достигать значит. амплитуд упругих колебаний благодаря периодич. действию сравнительно слабой силы. В радиофизике и радиотехнике явление Р. лежит в основе мн. способов фильтрации сигналов разных частот, обнаружения и приёма слабых сигналов.

Лит.: Горелюк Г. С., Колебания и волны, 2 изд., М., 1959; Стрелков С. П., Введение в теорию колебаний, 2 изд., М., 1964; Харкевич А. А., Избр. труды, т. 2, М., 1973; Основы теории колебаний, под ред. В. В. Мигулина, 2 изд., М., 1988. Г. В. Белокопытов.

РЕЗОНАНСНАЯ КОНВЕРСИЯ НЕЙТРИНО — гипотетич. процесс перехода одного типа нейтрино в другой при распространении в среде с монотонно изменяющейся плотностью. Переход осуществляется непрерывно, в соответствии с вариациями плотности и в осн. при пересечении слоя с т. н. резонансной плотностью. Необходимым условием Р. к. н. является смешивание нейтрино, участвующих в конверсии. Возможность Р. к. н. была показана С. П. Михеевым и А. Ю. Смирновым в 1985 [1], при этом использовались результаты Л. Вольфенштайна [2] 1978—80 по осцилляциям нейтрино в веществе с пост. плотностью (в литературе Р. к. н. часто называют МСВ-эффектом, по именам Михеева, Смирнова, Вольфенштайна).

Условия резонансной конверсии нейтрино. Необходимым условием конверсии нейтрино, напр. $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$, является смешивание этих нейтрино, т. е. наличие взаимодействия, переводящего ν_e в ν_μ . В случае вакуумного смешивания это недиагональные массовые члены, так что ν_e и ν_μ оказываются когерентными смесями двух состояний ν_1 и ν_2 с определёнными массами m_1 и m_2 :

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle, \\ |\nu_\mu\rangle &= \cos\theta |\nu_2\rangle - \sin\theta |\nu_1\rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

где θ — вакуумный угол смешивания (см. *Осцилляции элементарных частиц*).

Конверсия в веществе обусловлена рефракцией — упругим рассеянием нейтрино в среде на нулевой угол, к-рое приводит к появлению у волн нейтрино показател. преломления n_e, n_μ , $(n - 1) \sim G_F N/k$ (G_F — константа Ферми, N — концентрация частиц среды, $k = |k|$, k — импульс нейтрино). Среда влиет на эволюцию смешанных нейтрино, если n_e и n_μ различны. Это влияние определяется длиной рефракции l_0 — расстоянием, на к-ром дополнит. разность фаз между волнами ν_e и ν_μ , возникающая вследствие рассеяния, становится равной 2π [2]:

$$l_0 = 2\pi/k(n_e - n_\mu).$$

Для $\nu_e - \nu_\mu$ -системы в обычной среде различие n_e и n_μ возникает из-за рассеяния ν_e на электронах за счёт заряженных токов:

$$l_0 = 2\pi/k(n_e - n_\mu) = 2\pi/\sqrt{2} G_F N_e$$

(N_e — концентрация электронов).

Среда изменяет смешивание ν_e и ν_μ , к-рое определяется [аналогично (1)] относительно $|\nu_{1m}\rangle$ — собств. состояний гамильтониана для данной среды (с учётом взаимодействий). Состояния $|\nu_{1m}\rangle$ являются аналогами $|\nu_i\rangle$ в среде. Угол смешивания в среде θ_m , связываю-