

ГЛАВА 4

БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ

4.1. Введение

В главах 1—3 были рассмотрены *замкнутые системы*, т. е. системы, заключенные в определенные границы, причем энергия системы локализована в этих границах. Было показано, что свободные колебания замкнутой системы могут быть представлены суперпозицией стоячих волн или мод и что установившиеся вынужденные колебания могут быть описаны суперпозицией стоячих волн, которые представляют собой вклады от каждой моды. Характер входящих в суперпозицию мод определяется граничными условиями.

Открытые системы. В этой главе мы будем рассматривать вынужденные колебания *открытых систем*, т. е. систем, *не имеющих внешних границ*. Например, если кто-то играет на трубе, находясь на воздушном шаре высоко над землей, то воздух можно считать открытой системой, если пренебречь эхом, т. е. отражением от земли к трубе. Если труба звучит в комнате с полом из твердой древесины, стенами и потолком, явление будет протекать совершенно по-другому. В этом случае воздух в комнате представляет собой замкнутую систему, и при соответствующих условиях возбуждения он будет резонировать на частотах его мод. Покроем стены комнаты звукопоглощающим материалом. В этом случае звуковые волны от стен не отражаются и комната ведет себя как открытая система, т. е. система без внешних границ. Из этого примера видно, что бесконечная протяженность среды не является необходимым условием для того, чтобы систему можно было считать открытой.

Волны, образованные внешним воздействием, приложенным к открытой среде, называются *бегущими волнами*: они «бегут» от создающего их источника. Важное свойство бегущих волн заключается в том, что они переносят энергию и импульс. Так, например, капля, упавшая на спокойную поверхность водоема, вызывает распространение круговых волн, которые могут сообщить кинетическую энергию

плавающему в отдалении насекомому или увеличить потенциальную энергию прутика, одна половина которого находится в воде, а другая — на песчаном берегу.

Если внешняя сила (приложенная к открытой среде) совершает гармоническое колебание, то вызванные ею волны называются *гармоническими бегущими волнами*. В установившемся состоянии все движущиеся элементы системы совершают гармоническое движение с частотой внешнего воздействия.

Амплитудные соотношения. Если волна распространяется в двухмерной или трехмерной среде, то амплитуда движения будет тем меньше, чем дальше от источника находится движущийся элемент (предполагается, что источник мал). С другой стороны, если среда одномерная (например, натянутая струна, к одному концу которой приложена внешняя сила, а другой конец простирается до бесконечности или подсоединен к устройству, которое поглощает волну), то амплитуда движущихся элементов, совершающих гармоническое колебание, не будет уменьшаться с увеличением расстояния от источника (предполагается, что среда однородна). Это может быть справедливо не только для одномерных волн, но и в случае двухмерных «прямых волн» (зыбь на поверхности океана от далекого шторма) и трехмерных «плоских волн» (радиоволны от далеких звезд).

Фазовые соотношения. Относительная фаза двух различных движущихся элементов открытой среды, по которой распространяются гармонические бегущие волны, не совпадает с относительной фазой для стоячих волн в замкнутой системе. В случае стоячей волны, которая может быть либо нормальной модой свободных колебаний замкнутой системы, либо ее вынужденным колебанием, все движущиеся элементы колеблются в фазе друг с другом (с точностью до возможного изменения знака смещения). Иначе обстоит дело для бегущей волны. Если движущийся элемент бесконечной струны b находится дальше от внешней силы, чем движущийся элемент a , то он будет совершать то же движение, что и a , но в более поздний момент времени.

Это запаздывание равно времени, необходимому, чтобы волна пробежала расстояние от a до b . Таким образом, фаза элемента b отлична от фазы элемента a на величину, равную произведению частоты на время запаздывания.

4.2. Гармонические бегущие волны в одномерном пространстве и фазовая скорость

Предположим, что наша одномерная система является непрерывной однородной струной, простирающейся от $z=0$ до бесконечности. В точке $z=0$ струна присоединена к выходным зажимам устройства («передатчика»), которое может ее «трясти» и таким образом вызывать распространение бегущих волн вдоль струны. Предположим, что смещение на выходе передатчика является гармонической