

путем и только впоследствии в процессе развития машиностроения получило качественное и количественное истолкование.

Чтобы понять, каким образом возникают резонансные колебания вращающихся валов, представим себе ротор (вращающуюся часть) турбины в виде оси с насаженным на нее диском. Как бы точно ни был изготовлен диск, как бы хорошо ни был он центрирован на оси, неизбежные погрешности в обработке могут привести к тому, что ось вращения не будет проходить через центр тяжести диска.

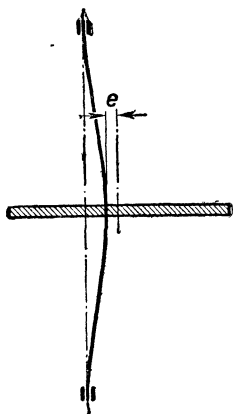


Рис. 143. «Весовой» эксцентриситет плохо центрированного диска.

Таким образом, в огромном большинстве случаев насаженный на вал диск будет обладать некоторым «весовым» эксцентриситетом<sup>1)</sup>, который может быть определен как расстояние  $e$  между центром тяжести диска и осью вращения. Очевидно, что при вращении диска этот эксцентриситет вызовет появление центробежной силы, которая будет стремиться изогнуть вал. Таким образом, диск будет вращаться, как это схематически показано на рис. 143, вокруг изогнутой оси.

Во время вращения вала центробежная сила периодически меняет свое направление относительно оси вала и таким образом, действует как колебательная нагрузка. При некотором определенном числе оборотов, которое называют критическим, частота изменения направления силы совпадает с собственной частотой колебаний вала, и резонансное возрастание амплитуды может повлечь за собой разрушение машины.

Однако современные паровые турбины работают при таком числе оборотов вала в минуту, которое в несколько раз превышает критическую скорость вращения<sup>2)</sup>. Уже после того как подобная турбина была построена, выяснилось, что быстрый переход за пределы критической скорости, — настолько быстрый, чтобы вал не успел раскачаться, — гарантирует при дальнейшем возрастании скорости от опасности аварии. Это объясняется тем, что за пределами критической скорости уже больше не имеет места явление резонанса. Центр тяжести эксцентрично насаженного на вал колеса сам отыскивает геометрическую ось вращения и устойчиво удерживается на этой оси; вал вращается в несколько изогнутом виде.

## § 62. Связанные колебания

Между колебательными системами может быть установлена «связь», приводящая колебания систем к некоторому согласованию друг с другом. В этом случае колебания называют *связанными*. Примером могут служить колебания двух маятников, изображенных на рис. 144; каждый из показанных здесь маятников представляет собой гирию, подвешенную на нити; нити обоих маятников скреплены с концами третьей нити, посередине которой подвешен не-

<sup>1)</sup> От латинского *ex* — вне и *centrum* — средоточие, центр.

<sup>2)</sup> Экономический к. п. д. турбины достигает максимума тогда, когда окружная скорость вращения колеса турбины составляет  $\frac{1}{2}$  скорости струи пара или воды (§ 50). Скорость падающей воды даже при значительном напоре сравнительно невелика, но скорость выхода пара под давлением в 15—20 ат составляет примерно 1 км/сек, т. е. превышает скорость полета пули. Желая сконструировать турбину с удельно-высоким к. п. д., Лаваль ввел в технику скорость вращения до 20 000 оборотов вала в 1 мин.

большой грузик. Если один из двух указанных маятников мы выведем из положения равновесия и дадим ему возможность колебаться, то и другой маятник вскоре начнет колебаться.

Замечательным и общим свойством связанных систем является то, что *вследствие связи частоты колебаний связанных систем становятся несколько отличными от тех частот, которые каждая из систем имела бы, если бы связь между ними отсутствовала*, причем колебание к а ж д о й из двух связанных систем представляет собой результат сложения двух колебаний с разными частотами, вследствие чего *колебание каждой из двух связанных систем имеет характер биений*. Эти биения имеют при прочих равных условиях тем меньший период, чем «сильнее» связь.

Если, не будучи связаны, системы имеют собственные частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , то после установления связи первая система будет испытывать колебательное движение, представляющее собой результат сложения двух колебаний с частотами  $\nu'_1$  и  $\nu'_2$ , и аналогичное движение, представляющее собой результат сложения двух колебаний с теми же частотами  $\nu'_1$  и  $\nu'_2$ , будет испытывать и вторая система. Эти общие для обеих связанных систем частоты колебаний  $\nu'_1$  и  $\nu'_2$  называют *нормальными частотами* связанных колебаний. Меньшая из частот связанных колебаний всегда меньше обеих собственных частот; большая из частот связанных колебаний всегда больше обеих собственных частот. Таким образом,

$$|\nu'_1 - \nu'_2| > |\nu_1 - \nu_2|$$

(прямые скобки здесь означают, что берутся арифметические, а не алгебраические значения разности частот).

Все сказанное справедливо и для того случая, когда *собственные частоты систем одинаковы*. Будучи связана, каждая из таких систем испытывает колебание, представляющее собой результат сложения двух колебаний с частотами, из которых одна меньше, другая больше собственной частоты. Колебание каждой из этих систем будет иметь характер биения, причем вследствие резонансного взаимодействия биения первой системы будут опережать биения второй системы на четверть периода биений (рис. 145). Вследствие этого энергия колебаний будет как бы «перекачиваться» из первой системы во вторую и обратно с частотой биений.

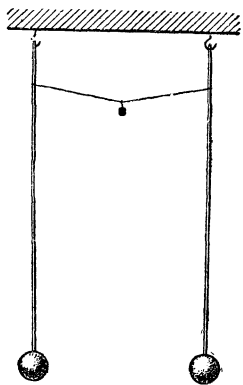


Рис. 144. Связанные маятники.

Так, например, в случае маятников, изображенных на рис. 144, если гири и длины нитей этих маятников взять одинаковыми (чтобы их собственные частоты были равны), можно наблюдать, как качания первого маятника, возбуждив качания второго маятника, начинают замирать, причем первый маятник останавливается, когда амплитуда второго достигает максимума; после этого второй маятник начинает раскачивать первый и т. д. Если для этого опыта взять гири массой по 1 кг и подвесить их на нитях длиной по 2 м на расстоянии 0,5 м друг от

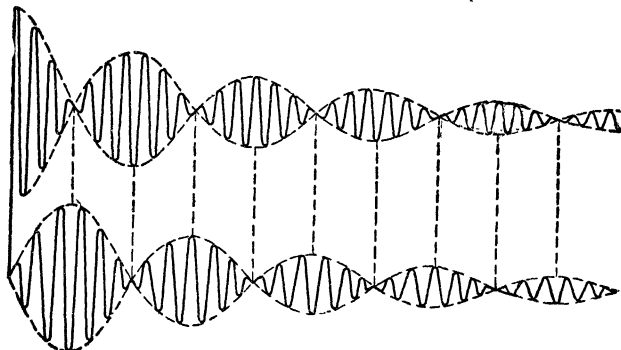


Рис. 145. График колебаний двух связанных систем с одинаковыми собственными частотами.

друга и связать их нитью в 0,7 м с грузиком в 50 г посередине, то первый маятник отдаст всю энергию второму маятнику и сам остановится приблизительно через 10 качаний, после чего через новых 10 качаний второй маятник передаст всю энергию первому маятнику и т. д. Если заменить грузик, связывающий маятники, гирькой в два раза большей массы (100 г), то полная передача энергии будет осуществляться через каждые пять качаний.