

Александр Александрович Эйхенвальд

Акустика и оптика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 82-3
ББК 84-4
Э1

Э1 **Эйхенвальд А.**
Акустика и оптика / Александр Александрович Эйхенвальд – М.: Книга по Требованию,
2024. – 116 с.

ISBN 978-5-521-39097-7

ISBN 978-5-521-39097-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг — не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель — вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания — решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Скорость x' движенія точки x будетъ равна проекціи скорости точки A на діаметръ XX . Принимая во вниманіе, что движеніе и скорость точки x направлены въ сторону уменьшенія x , получимъ

$$x' = -v \sin \alpha = -A \left(\frac{2\pi}{T} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{T} \right) t = -Aa \sin at$$

Ускореніе x'' точки x , точно такъ же какъ и скорость, равно проекціи ускоренія точки A на линію XX ; слѣдовательно

$$x'' = -v' \cos \alpha = -A \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cos \left(\frac{2\pi}{T} \right) t = -Aa^2 \cos at = -a^2 x$$

Разсмотрѣнное нами колебательное движеніе точки x по линіи XX называется *гармоническимъ колебаніемъ* и представляетъ собою основной типъ колебаній всякаго рода.

Предлагаемъ читателю самому убѣдиться въ томъ, что если бы мы брали проекцію точки A не на горизонтальную, а на вертикальную линію $УУ$, то получили бы гармоническое колебаніе точки въ такихъ выраженіяхъ

$$y = A \sin at$$

скорость

$$y' = Aa \cos at$$

и ускореніе

$$y'' = -Aa^2 \sin at = -a^2 y$$

2. Свойство гармоническаго колебанія. Сопоставляя обѣ формулы гармоническаго движенія точки

$$\begin{aligned} x &= A \cos at & y &= A \sin at \\ x'' &= -a^2 x & y'' &= -a^2 y \end{aligned}$$

мы видимъ, что и въ томъ и въ другомъ случаѣ, т.-е. какъ въ случаѣ колебаній по закону косинуса, такъ и въ случаѣ колебаній по закону синуса, ускореніе колеблющейся точки пропорціонально ея отклоненію; приэтомъ коэффициентъ пропорціональности равенъ

$$-a^2 = -\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$$

Это—основное свойство гармоническаго движенія.

3. Термины. Наибольшее отклоненіе точки x отъ центра, т.-е. величина A , называется амплитудою колебанія ¹⁾).

Время T , въ которое точка A описываетъ полный кругъ, а точка x

¹⁾ То, что обыкновенно называется размахомъ колебанія есть его двойная амплитуда.

проходитъ діаметръ два раза (туда и обратно), называется *періодомъ* колебанія ¹⁾).

Если каждое колебаніе продолжается T секундъ, то число колебаній въ одну секунду будетъ

$$n = \frac{1}{T}$$

Когда мы будемъ говорить *число колебаній* безъ указанія времени, то всегда будемъ подразумѣвать число колебаній *въ секунду*.

Уголъ $\alpha = \frac{2\pi}{T} t$ называется *фазой* колебанія.

Если мы имѣемъ два гармоническихъ колебанія, то они могутъ отличаться другъ отъ друга амплитудою, періодомъ и фазой.

Въ звукѣ и свѣтѣ амплитуда обуславливаетъ собою силу звука или свѣта, тогда какъ періодъ обуславливаетъ высоту звука и цвѣтъ свѣта.

Чѣмъ больше ежесекундное число колебаній даннаго звука, тѣмъ онъ, по музыкальной терминологіи, выше.

Въ видимомъ свѣтѣ наиболѣе частыя колебанія мы имѣемъ въ фіолетовомъ цвѣтѣ, наиболѣе рѣдкія—въ красномъ цвѣтѣ.

4. Разность фазъ. Положимъ, что намъ даны колебанія двухъ точекъ x_1 и x_2 (рис. 3.) съ одинаковымъ періодомъ, но точка x_2 начала свои колебанія на нѣкоторое время t_1 позже точки x_1 . За это время точка x_1 уже успѣла пройти фазу

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t_1$$

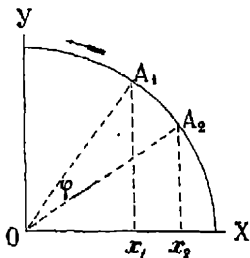


Рис. 3. Разность фазъ.

Такъ какъ періоды T обѣихъ точекъ одинаковы, то радіусы OA_1 и OA_2 будутъ двигаться съ одинаковою скоростью и уголъ φ между ними останется неизмѣннымъ. Вслѣдствіе этого всѣ фазы точки x_1 будутъ больше фазъ точки x_2 на величину φ ,

и наши колебанія можно изобразить такъ

$$x_1 = A \cos at$$

$$x_2 = A \cos (at - \varphi)$$

Уголъ φ называется разностью фазъ данныхъ двухъ колебаній.

Мы можемъ сказать, что величина x_2 запаздываетъ въ фазѣ относительно величины x_1 или, наоборотъ, можно сказать, что x_1 опережаетъ величину x_2 въ фазѣ на уголъ φ .

¹⁾ Секундный маятникъ совершаетъ каждый размахъ въ одну секунду, слѣдовательно, періодъ колебанія секунднаго маятника равенъ двумъ секундамъ.

Легко видѣть, что когда $\varphi = 90^\circ$, то изъ $\cos at$ дѣлается

$$\cos \left(at - \frac{\pi}{2} \right) = \sin at,$$

точно такъ же изъ $\sin at$ дѣлается

$$\sin \left(at - \frac{\pi}{2} \right) = -\cos at.$$

Когда $\varphi = 180^\circ$, то величина x_1 и x_2 (безразлично $\sin at$ или $\cos at$) дѣлятся противоположными по знаку.

5. Графическое изображеніе. Величины, измѣняющіяся по закону $\sin at$ или $\cos at$, изображаютъ для наглядности чертежомъ, при чемъ по горизонтальному направленію откладываютъ время t , а по вертикальному направленію соответствующія значенія $x = A \cos at$ или $y = A \sin at$.

На прилагаемомъ рисункѣ 4 величина $x = A \cos at$ изображается кривою, которая называется косинусоидою, тогда какъ на рис. 5 величина $x = A \sin at$ изображена кривою — синусоидою. Обѣ эти кривыя по формѣ своей совершенно одинаковы; только 2-ая кривая сдвинута относительно первой по оси t на величину $\frac{T}{4}$, т.-е. на четверть періода, что соответствуетъ разности фазъ $\varphi = 90^\circ$ или $\frac{\pi}{2}$.

На рис. 6 показана кривая $A \sin(at - \varphi)$, которая сдвинута относительно кривой $A \sin at$ на фазу φ .

Наибольшія высоты всѣхъ этихъ кривыхъ, считаемыя отъ оси ot , будутъ ихъ амплитуды A .

6. Сложеніе колебаній одного направленія и одинаковаго періода. Положимъ, что данная точка совершаетъ движеніе, составленное изъ двухъ гармоническихъ колебаній по одной и той же прямой. Если

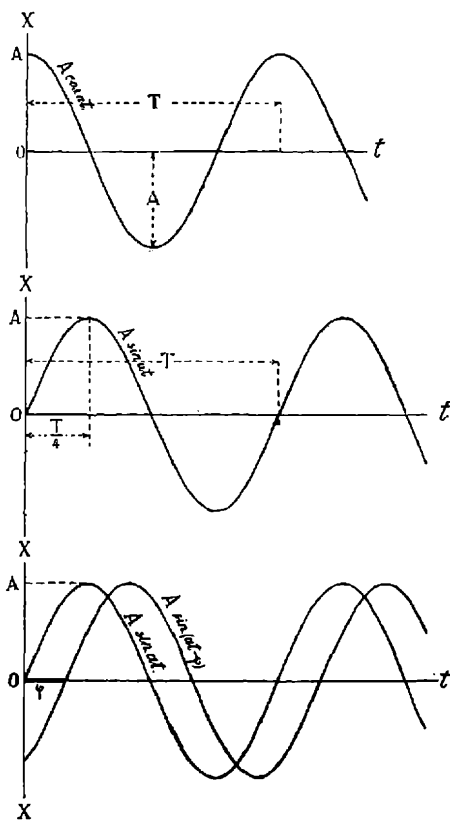


Рис. 4, 5, 6. Графическое изображеніе гармоническихъ колебаній.

періоди однаковим, то колибання можуть розпнитися тільки амплитудою и фазою; наприклад:

$$x_1 = A_1 \cos \frac{2\pi}{T} t \quad x_2 = A_2 \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \varphi \right)$$

Для того, чтобы опредѣлить каково будетъ результирующее движеніе этой точки, построимъ двѣ окружности радіусами OA и OB (рис. 7); и представимъ себѣ, что точки A и B дѣлають полный оборотъ во время T ; при такомъ движеніи, очевидно, уголъ φ (разность фазъ) будетъ все время оставаться постояннымъ. Пусть въ какой-нибудь моментъ времени t точки

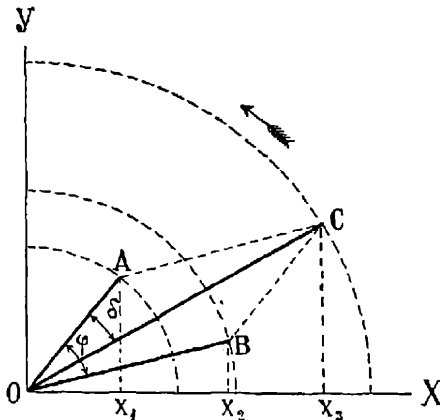


Рис. 7. Сложение колебаний одинаковаго періода.

A и B занимають положеніе, показанное на рис. 7; тогда, проведя линію BC , равную и параллельную OA , и опустивъ перпендикуляръ Cx_3 , получимъ $Ox_1 + Ox_2 = Ox_3$.

Ту же точку x_3 мы получимъ, построивъ на линіяхъ OA и OB параллелограммъ $OACB$ и опустивъ изъ конца діагонали этого параллелограмма перпендикуляръ на ось XX . Съ другой стороны во время движенія радіусовъ OA и OB какъ уголъ φ , такъ и весь параллелограммъ $OACBO$ будутъ оставаться неизмѣнными, и діагональ OC будетъ двигаться рав-

номѣрно, дѣлая полный оборотъ вокругъ центра O въ то же время T . Отсюда слѣдуетъ, что точка x_3 тоже будетъ совершать гармоническія колебанія съ тѣмъ же періодомъ T . Амплитуда этого колебанія будетъ OC и оно будетъ отставать по фазѣ отъ колебанія x_1 на уголъ δ .

Все эти величины можно получить, построивши параллелограммъ $OACBO$, или треугольникъ OBC по даннымъ амплитудамъ OA и OB колебаній и по данной разности фазъ φ между ними. Замѣтимъ, что линія OC называется *геометрической суммой* линій OB и $OA = BC$, а все построеніе носитъ названіе *векторной діаграммы*, потому что здѣсь амплитуды двухъ колебаній складываются подобно скоростямъ, или силамъ, вообще подобно *векторамъ*¹⁾.

1) Всякая величина, для полного опредѣленія которой необходимо указать ся направленіе въ пространствѣ, называется *векторомъ*; напр., скорость, сила—суть векторы.—Величина, не требующая указанія своего направленія, называется *скаларомъ*; напр., время, температура, масса—суть скалары.

Векторы складываются геометрически (по правилу параллелограмма), скалары же складываются алгебраически.

Итакъ два гармоническихъ колебанія одинаковаго періода и одного направленія даютъ опять гармоническое колебаніе того же періода, но, вообще говоря, другой амплитуды и фазы; эти послѣднія можно получить графически при помощи геометрическаго сложенія амплитудъ, т.-е. при помощи векторной діаграммы ¹⁾.

Если фазы слагаемыхъ колебаній одинаковы ($\varphi = 0$), то амплитуда результирующаго колебанія равна *суммѣ* амплитудъ составляющихъ колебаній, если фазы противоположны ($\varphi = 180^\circ$),—мы получимъ *разность* амплитудъ.

При равныхъ амплитудахъ получимъ въ первомъ случаѣ результирующее колебаніе съ двойной амплитудой, а во-второмъ—взаимное уничтоженіе колебаній.

7. Біенія. Если два слагаемыхъ колебанія не одинаковаго періода, то, примѣняя къ нимъ предыдущее построеніе, мы уже не получимъ неизмѣннаго параллелограмма. Напротивъ того, радіусы OA и OB , вращаясь съ разными скоростями, будутъ образовывать переменный уголъ φ , отчего и амплитуда OC тоже будетъ постоянно мѣняться. Пусть числа колебаній точекъ x_1 и x_2 будутъ соответственно n_1 и n_2 и положимъ, что n_1 больше n_2 ; тогда, очевидно, радіусъ OA будетъ обгонять радіусъ OB и притомъ $(n_1 - n_2)$ число разъ въ каждую секунду. Такимъ образомъ, $(n_1 - n_2)$ разъ въ секунду направленія обоихъ радіусовъ совпадутъ ($\varphi = 0$) и столько же разъ они будутъ противоположны ($\varphi = 180^\circ$). Въ первомъ случаѣ мы получимъ въ результатъ сумму, а во второмъ разность амплитудъ слагаемыхъ колебаній. Если эти колебанія звуковыя, то, складывая ихъ, мы получимъ періодическое усиленіе и ослабленіе звука; такое явленіе называется *біеніемъ*. Очевидно, біенія будутъ происходить $(n_1 - n_2)$ разъ въ секунду.

Біенія можно наблюдать, напримѣръ, при одновременномъ звучаніи двухъ струнъ на роялѣ, если звуки этихъ струнъ достаточно близки другъ къ другу по высотѣ, т.-е. если біенія не слишкомъ часты. Необходимо замѣтить, что наше ухо способно различать ясно только такіа біенія, которыя происходятъ не чаще 30—40 разъ въ секунду. Слушая біенія и измѣняя высоту одного изъ звуковъ, напримѣръ, натягивая или ослабляя одну изъ струнъ рояля, можно постепенно уменьшать число біеній въ секунду и даже совсѣмъ ихъ уничтожить; такимъ образомъ можно настроить оба звука въ унисонъ. Этимъ способомъ очень часто и пользуются.

¹⁾ Изъ той же векторной діаграммы т.-е. изъ треугольника OAC легко вывести и аналитическое выраженіе для амплитуды C и фазы φ результирующаго колебанія. Предоставимъ читателю доказать, что

$$C^2 = A^2 + B^2 + 2AB \cos \varphi$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{B \sin \varphi}{A + B \cos \varphi}$$

8. Сложение колебаний одного направления, но разных периодовъ.

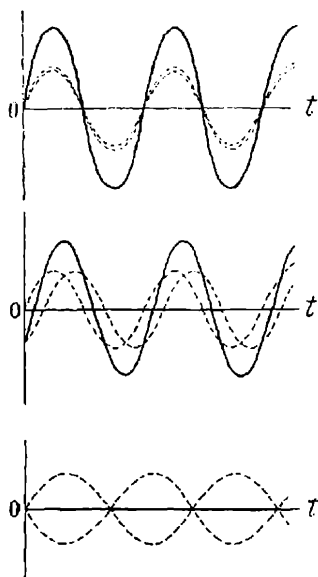


Рис. 8, 9, 10. Сложение колебаний одинакового периода съ фазами: одинаковыми, разными и противоположными.

Для сложения нѣсколькихъ колебаний можно воспользоваться также графическимъ изображеніемъ, (стр. 5) а именно, начертивъ одну изъ синусоидъ, къ каждой изъ ея ординатъ прибавить соотвѣтствующую данному времени t ординату другой синусоиды, и полученныя точки обвести сплошной кривой. Предлагаемъ читателю самому приложить этотъ способъ къ сложению колебаний одинаковаго періода и убѣдиться въ томъ, что въ результатѣ получается опять гармоническое колебаніе, и притомъ того же періода согласно съ выводами параграфа 6.

На рис. 8 сложены два колебанія одного періода и равныхъ амплитудъ и фазъ, а на рис. 9 фазы ихъ разные; на рис. 10 фазы разнятся на 180° . Въ послѣднемъ случаѣ колебанія взаимно уничтожились.

На рис. 11 показано сложение двухъ колебаний, немного разнящихся періодомъ, но одинаковой амплитуды; они даютъ въ результатѣ *биснія*.

На рис. 12 отношеніе періодовъ 1:2. Два такихъ звука давали бы *октаву*. Рис. 13 представляетъ ту же октаву, но при другихъ начальныхъ фазахъ.

Изъ послѣднихъ двухъ примѣровъ мы уже видимъ, что форма результирующей кривой зависитъ не только отъ амплитудъ и періодовъ составляющихъ колебаний, но и отъ ихъ начальныхъ фазъ.

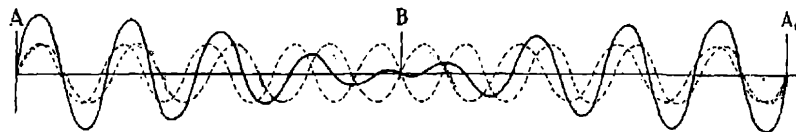


Рис. 11. Биснія.

На рис. 14 сложены два колебанія съ отношеніемъ періодовъ 3:1. Два такихъ звука давали бы *дуодециму*, т.-е. квинту сверхъ октавы.

Рис. 15 показываетъ результатъ сложения трехъ колебаний различныхъ амплитудъ и періодовъ.

9. Теорема Фурье. Складывая такимъ образомъ все большее и большее число разныхъ колебаний, мы можемъ получить весьма сложные

кривыя. Наоборотъ, если бы намъ были даны эти самыя кривыя, то мы могли бы разложить ихъ на составляющія ихъ простыя гармоническія колебанія.

Фурье доказалъ теоретически, что всякое періодическое движеніе, какое бы сложное по формѣ оно ни было, можно разложить на цѣлый

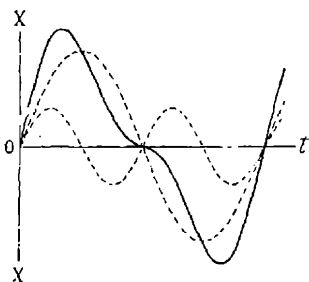


Рис. 12. Кривая для октавы.

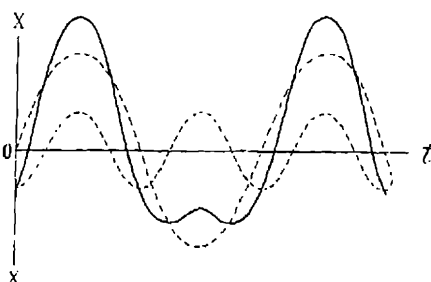


Рис. 13. Кривая для октавы съ другими фазами.

рядъ простыхъ гармоническихъ колебаній. Вотъ почему изученіе гармоническаго колебанія, какъ основнаго типа всѣхъ вообще колебательныхъ движеній, въ особенности важно. Амплитуды и фазы гармоническихъ колебаній, дающихъ въ суммѣ данное періодическое движеніе можно по-

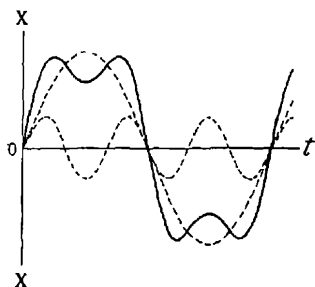


Рис. 14. Кривая для дуодецимы.

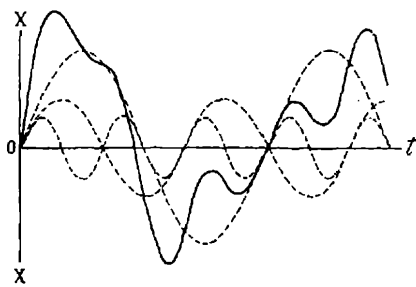


Рис. 15. Сложеніе трехъ колебаній.

лучить различными способами: вычисленіемъ, графическимъ методомъ и механически при помощи особыхъ приборовъ; впрочемъ здѣсь мы на этомъ остановиться не можемъ.

10. Сложеніе взаимно перпендикулярныхъ колебаній. Если точкѣ сообщено два отклоненія одновременно, по OA и по OB (рис. 16) то, какъ извѣстно, отклоненіе ея происходитъ по діагонали OC параллелограмма, построеннаго на OA и OB , ибо отклоненія, скорости, ускоренія, силы и т. п. величины, имѣющія определенное направленіе въ пространствѣ (векторы) складываются по правилу параллелограмма или геометрически. Если точкѣ сообщены два колебанія по линіямъ OA и

OB , то для того, чтобы построить движение точки, необходимо сложить ее отклонения для каждого момента времени, и концы полученных диагоналей соединить сплошной линией. Эта линия

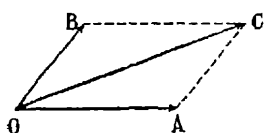


Рис. 16. Геометрическое сложение.

и будет линией движения точки или ее *траектория*¹⁾. Очевидно, что из двух колебаний, коих направления OA и OB не совпадают и которые кроме того могут быть разных амплитуд, периодов и фаз, могут получиться весьма разнообразные и сложные траектории. Но мы ограничимся здесь рассмотрением только наиболее важных случаев, а именно, когда два слагаемых гармонических колебания перпендикулярны друг к другу и имеют одинаковые периоды и равны амплитуды; фазы же их могут быть и разные.

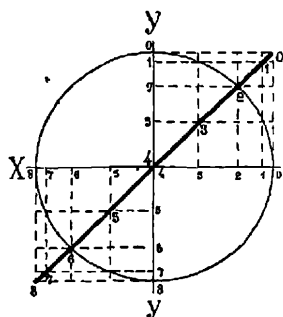


Рис. 17. Разность фаз $\delta = 0^\circ$.

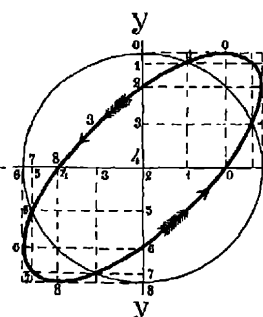


Рис. 18. Разность фаз $\delta = 45^\circ$.

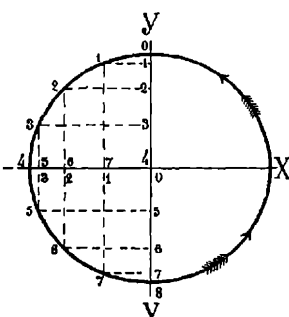


Рис. 19. Разность фаз $\delta = 90^\circ$.

Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний одного периода.

Для того, чтобы построить траекторию результирующего движения, поступим следующим образом.

Проведем окружность радиусом A (рис. 17) и разделим ее на несколько, например, 16 равных частей; из этих точек деления опустим перпендикуляры на два взаимно перпендикулярных диаметра XX и YY . Основания этих перпендикуляров дадут нам различные

¹⁾ Не нужно смешивать построение траектории движения точки с построением векторной диаграммы (стр. 6), хотя в обоих случаях мы применяем способ параллелограмма т.-е. геометрическое сложение. Дело в том, что векторная диаграмма применяется для сложения гармонических колебаний одинакового периода и одинаковых направлений; такие колебания складываются алгебраически, но для получения амплитуды и фазы результирующего гармонического колебания можно применить к амплитудам геометрическое сложение (векторную диаграмму) так, как будто это были настоящие векторы и как будто φ (разность фаз) представлял собою угол между их направлениями. Мы видели, что этот способ определения амплитуды и фазы для колебаний разных периодов уже не применим. Но если если кроме того и направления слагаемых колебаний равны, то приходится строить положения точки для каждого момента времени отдельно, т.-е. ее траекторию.

положенія двохъ колеблющихся точекъ; легко видѣть, что каждая изъ колеблющихся точекъ для перехода отъ одного изъ этихъ положеній къ сосѣднему употребляетъ $\frac{T}{16}$ секундъ.

Приготовивъ такимъ образомъ чертежъ, перейдемъ къ разсмотрѣнію результирующаго колебанія для различныхъ значеній разности фазъ данныхъ двухъ колебаній по XX и YY , при чемъ одновременныя положенія колеблющихся точекъ будемъ обозначать соответственными номерами.

а) *Фазы одинаковы* (рис. 17).

Пусть обѣ точки начинаютъ свое движеніе одновременно съ концовъ діаметровъ XX и YY , гдѣ у насъ поставлены номера 0; затѣмъ послѣдовательно точки проходятъ номера 1, 2, 3 и т. д. Изъ построения чертежа 17 видно, что результирующее колебаніе будетъ происходить тоже по прямой линіи, наклоненной къ оси X подъ угломъ -45° . Амплитуда результирующаго колебанія очевидно равна $A\sqrt{2}$.

в) *Разность фазъ 45°* (рис. 18).

Пусть точка y запаздываетъ относительно точки x на фазу въ 45° и начинаетъ свое движеніе отъ конца діаметра y въ то время, какъ точка x уже успѣла пройти $\frac{1}{8}$ своего періода: значитъ на чертежѣ 18-мъ нужно поставить для точки x номеръ 0 тамъ, гдѣ на чертежѣ 17 стоялъ номеръ 2. Въ этомъ случаѣ построеніе результирующихъ отклоненій точки даетъ кривую линію, которая называется эллипсомъ. Движеніе по эллипсису здѣсь происходитъ въ томъ же направленіи, въ которомъ у насъ (рис. 1, стр. 1) считаютъ углы α (противъ движенія стрѣлки часовъ). Будемъ называть это *положительнымъ* направленіемъ.

с) *Разность фазъ 90°* (рис. 19).

Теперь точка y начнетъ свое движеніе, когда точка x уже пройдетъ по діаметру. Результирующее колебаніе получается въ видѣ равномернаго движенія по кругу діаметра A . Направленіе движенія опять положительное.

Дальнѣйшіе случаи показаны на рис. 20.

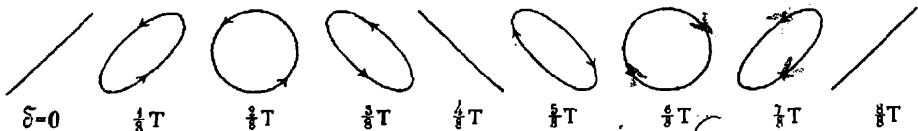


Рис. 20. Вліяніє разности фазъ на результируюцю траекторію движенія.

При разности фазъ въ половину періода T (фазы противоположны) мы снова получаемъ прямую линію, но наклоненную подъ угломъ -45° къ оси x , а при дальнѣйшемъ увеличеніи разности фазъ опять получаютъ эллипсъ и кругъ съ тою однако разницею, что результирующее дви-

женіе по этимъ кривымъ совершается при этомъ въ *отрицательномъ* направленіи (вдоль по стрѣлкѣ часовъ).

Мы предполагали, что амплитуды обоихъ колебаній одинаковы; если онѣ разные, то на нашихъ чертежахъ придется взять разные величины отклоненій по вертикальному и горизонтальному діаметрамъ. Отъ этого наши кривыя немного сожмутся или растянутся по осямъ XX и YY , но общій характеръ явленія останется такимъ же. Такъ, напримѣръ, для амплитудъ OA и OB (рис. 21) и при разности фазъ $\delta = 0$, мы получимъ результирующее колебаніе по прямой OC , наклонъ которой къ

оси x уже не будетъ 45° , а опредѣлится изъ уравненія $tg \varphi = \frac{B}{A}$.

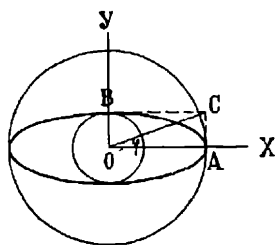


Рис. 21. Вліяніе амплитудъ составляющихъ колебаній.

При разности фазъ въ 90° не получится кругъ, а эллипсъ (рис. 21) съ полуосями равными амплитудамъ A и B ¹⁾.

Если періоды обоихъ колебаній не совсѣмъ одинаковы, то δ не будетъ постоянною и траекторія результирующаго колебанія будетъ постоянно мѣняться постепенно переходя изъ прямой линіи въ эллипсъ изъ эллипса въ кругъ и т. д. въ порядкѣ, указанномъ на рис. 20.

Наконецъ, если оба періода значительно разнятся другъ отъ друга и притомъ соизмѣримы, то можно снова получить не мѣняющіяся со временемъ замкнутыя траекторіи результирующаго движенія.

На рис. 24 показано сложеніе двухъ взаимно перпендикулярныхъ колебаній съ отношеніемъ періодовъ 1:2 (октава).

Подобныя кривыя можно начертить и для другихъ соотношеній между періодами колебаній; эти кривыя носятъ названіе фигуръ Лиссажу.

11. Демонстрація колебаній. Кромѣ непосредственнаго графическаго метода сложенія гармоническихъ колебаній имѣются нѣсколько механическихъ способовъ.

Мы опишемъ здѣсь способъ Лиссажу, который часто примѣняется при демонстраціяхъ. Въ S (рис. 22) помѣщены: источникъ свѣта, не-

1) Всѣ эти выводы можно получить и аналитическимъ путемъ. Изъ уравненія колебаній

$$x = a \cos \frac{2\pi}{T} t \quad y = b \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \delta \right)$$

исключаемъ время t , и получаемъ

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2 \frac{xy}{ab} \cos \delta = \sin^2 \delta$$

уравненіе, которое, вообще говоря, представляетъ собою эллипсъ. При $\delta = 0$ оно обращается въ прямую линію, а при $a = b$ и $\delta = \frac{\pi}{2}$ — обращается въ кругъ.