

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

531.311(076.5)

ПРОСТАЯ ДЕМОСТРАЦИЯ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА

Существует большое число различных демонстраций законов Ньютона, используемых на лекциях при чтении соответствующих разделов курса общей физики. Тем не менее, поскольку речь идет о наиболее фундаментальных положениях всей физики, разработка новых эффективных демонстраций продолжает оставаться актуальной, тем более, что практически во всех известных опытах (см., например, ¹) не очень четко видна количественная сторона этих законов. Так, например, одна из наиболее распространенных демонстраций закона Ньютона заключается в следующем: на скамье помещаются две тележки Гримзеля ², которые могут двигаться с малым трением (в современных вариантах этого опыт используется принцип воздушной подушки) и расталкиваются сжатой пружиной. Если тележки поместить в центр скамьи, то при расталкивании пружиной они начинают двигаться в разные стороны и одновременно достигают концов скамьи при одинаковых массах тележек и одновременно при разных массах, причем тележка с большей массой движется медленнее. Если опыт с одинаковыми тележками может быть интерпретирован как результат действия на тележки одинаковых по величине и противоположно направленных сил, то в опыте с разными тележками этот момент не очевиден, так как в эксперименте видно лишь движение тележек с разными скоростями. Таким образом, количественные соотношения масс и скоростей от внимания зрителей ускользают.

В данном сообщении описывается легко осуществимый и простой эксперимент, который, полностью сохраняя все элементы обычного, включая оборудование, вместе с тем дает возможность продемонстрировать количественные соотношения законов Ньютона. Фотография установки приведена на рисунке. Установка состоит из скамьи 1, на которой располагаются тележки Гримзеля 2. Скамья правым концом опирается на подставку 3 (опора призматическая). Левый конец 4 скамьи подвешен мягкой пружиной 5 на штативе 6 и может легко двигаться в вертикальном направлении. Перемещением тележек перед началом опыта скамья уравнивается в горизонтальном положении, которое отмечается указателем 7 на шкале 8. Скамья со штативом помещается на тележку 9, которая электромотором 10 может приводиться в равномерное движение со скоростью приблизительно 0,1 м/сек по рельсам 11. Общие размеры установки 1,5 м, длина рельсов 3 м.

Условием равновесия скамьи согласно хорошо известному уже из школьного курса и легко проверяемому (при необходимости — на том же приборе) правилу рычагов является соотношение

$$gm_1x_1 + gm_2x_2 + gMX = Fl; \quad (1)$$

здесь m_1 , m_2 и M — массы тележек и скамьи, l — длина скамьи, F — сила натяжения пружины, пропорциональная ее удлинению, x_1 , x_2 и X — координаты центров масс тележек и скамьи, отсчитываемые от правого края скамьи. Если тележкам предоставить двигаться под действием любых внутренних сил (сжатой пружинки, расталкивания одноименных полюсов магнитов, закрепленных на тележках и др.), то результатом эксперимента будет сохранение равновесия всей системы (горизонтального положения скамьи) до тех пор, пока по крайней мере одна из тележек не дойдет до упора скамьи. Это, очевидно, возможно только в том случае, когда соотношение ¹ сохраняется во все время движения, т. е. имеет место равенство

$$gm_1x_1 + gm_2x_2 = \text{const.} \quad (2)$$

Дифференцируя (2), получаем

$$m_1\dot{x}_1 + m_2\dot{x}_2 = 0$$

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1978.

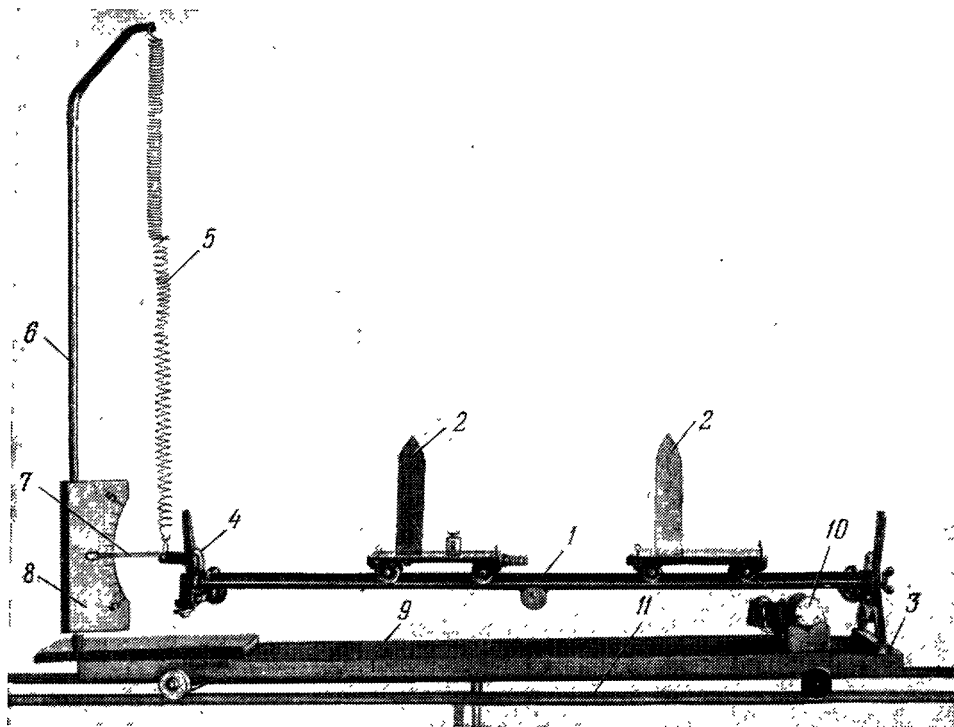
проверка закона сохранения импульса), и далее, откуда

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = 0,$$

$$f_1 = m_1 \ddot{x}_1, f_2 = m_2 \ddot{x}_2$$

(проверка второго закона Ньютона).

При этом совершенно несущественно, двигались ли тележки равномерно (после прекращения действия пружины) или по более сложному закону при магнитном взаимодействии. Чувствительность эксперимента зависит лишь от чувствительности этих своеобразных рычажных весов.



Важно отметить еще, что на этом же приборе легко продемонстрировать и то обстоятельство, что при наличии внешних сил закон сохранения импульса уже не выполняется. Для этого можно либо приложить к одной из тележек дополнительную внешнюю силу (проще всего это можно осуществить, связывая одну из тележек эластичной резиновой нитью с центром скамьи), либо использовать пару тележек с различным трением качения (что, правда, менее наглядно).

Соединяя тележки длинной резиновой нитью и разводя их к концам скамьи, а затем давая им двигаться навстречу, на этой же установке можно показать сохранение импульса системы при упругом ударе.

Заметим, что, поскольку в этом эксперименте связываются элементы статики (равновесие рычага) и динамики, то одновременно демонстрируется и эквивалентность инертных и гравитационных масс.

Как указывалось выше, уравновешенная скамья помещается на тележке, которая может приводиться в равномерное движение по рельсам. Тогда весь эксперимент может быть проделан во время движения установки. Тем самым иллюстрируется выполнение законов Ньютона в системе координат, равномерно движущейся относительно лабораторной. Насколько нам известно, в такой наглядной форме это обстоятельство ранее не показывалось. Несколько сложнее осуществить опыт при равноускоренном движении установки, однако в принципе и это возможно.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лекционные демонстрации по физике, под ред. В. И. Ивероновой, изд. 2-е, М., «Наука», 1972.
2. Э. Г р и м з е л ь, Курс физики, ч. 1, М.—Л., ГИЗ, 1928, с. 107.

535.4(076.5)

НЕСКОЛЬКО ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОНСТРАЦИЙ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

В курсе общей физики разделы, посвященные статистическим явлениям в оптике, влиянию когерентных свойств световых полей на интерференцию волн и т. д., являются, пожалуй, одними из наиболее сложных и наименее отработанных в методическом отношении. В частности, формированию у студентов наглядных представлений о структуре хаотически модулированных волн, о принципиальной роли инерционных свойств регистрирующего прибора при наблюдении интерференционной картины в определенной степени мешает отсутствие подходящих лекционных демонстраций. Дело в том, что известные оптические интерференционные опыты¹ непосредственно не позволяют, например, варьировать в процессе демонстрации масштаб временной когерентности, а в силу специфики оптического диапазона все наблюдения по необходимости являются инерционными, и нет возможности продемонстрировать «цуговой» характер осциллирующей световой поля.

В связи с этим представляются целесообразными демонстрационные опыты, моделирующие соответствующий круг явлений в радиодиапазоне.

Основные идеи подобных опытов были изложены еще в монографии Г. С. Горелика «Колебания и волны»². Ниже кратко описывается усовершенствованная установка, разработанная в демонстрационном физическом кабинете Горьковского университета, обладающая большими возможностями. Авторы данной заметки надеются, что подобная демонстрационная установка будет интересна и для работников физических кабинетов других вузов.

Для того чтобы иметь возможность моделировать интерференционные явления для широкого диапазона — от белого до квазимонохроматического света, хаотически модулированные колебания удобно получить путем пропускания шумового сигнала через фильтр с перестраиваемой полосой.

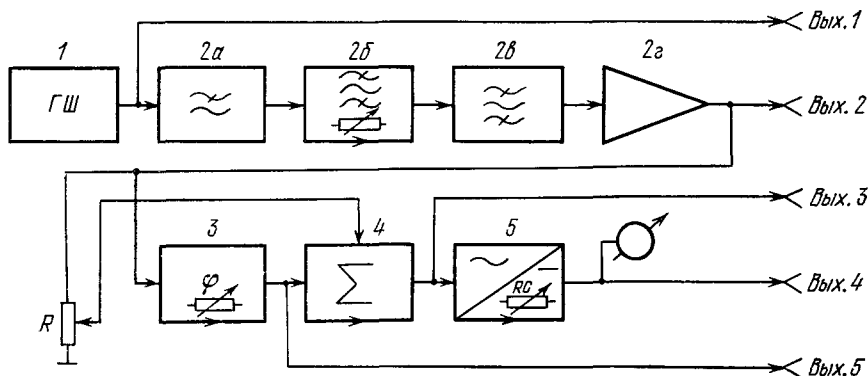


Рис. 1.

Структурная схема установки приведена на рис. 1 (здесь 1 — шумовой генератор, 2 — синхронный фильтр с перестраиваемой полосой пропускания, 3 — фазовращатель, 4 — сумматор, 5 — линейный детектор с регулируемой постоянной времени).

В качестве источника шумового сигнала мы использовали стандартные низкочастотные шумовые генераторы типа Г2-1 или Г2-12. При отсутствии последних нетрудно самостоятельно изготовить простые шумовые генераторы, усилив дробовой шум в резисторе, в тиратроне или лавинный шум электронно-дырочного перехода шумового диода³.

Наиболее ответственным узлом установки является фильтр 2. Для того чтобы опыты можно было демонстрировать на общедоступных низкочастотных осциллографах со сравнительно большим экраном, а также для возможности звукового восприятия характера шумового и отфильтрованного сигналов, резонансную частоту фильтра f_0

желательно взять достаточно низкой. В нашей установке было $f_0 = 1$ кГц. На таких частотах простыми резонансными контурами или RC -фильтрами обеспечить хорошую добротность (и тем самым, хорошую монохроматичность отфильтрованного сигнала) затруднительно, поэтому мы использовали синхронный фильтр. Не останавливаясь подробно на описании такого фильтра, принцип работы которого изложен в⁴, отметим, что он представляет собой гребенчатый фильтр, вырезающий из сигнала ряд дискретных частот с помощью специального коммутатора с определенным периодом. Коммутатор собран на микросхемах серии К115, в качестве ключей использовались транзисторы КТ316В. Фильтр содержит четыре звена, переменный резистор и конденсаторы которого подбирались с таким расчетом, чтобы добротность Q менялась от 5 до 10^3 . Для отсеки вышних гармоник ставятся дополнительные LC -фильтры 2а и 2в с $Q = 3 \div 5$ и настроенные на ту же частоту $f_0 = 1$ кГц, далее сигнал поступает на усилитель 2г с коэффициентом усиления $K = 100$. После усилителя 2г с выхода 2 отфильтрованное колебание $u_1(t)$ подается как на осциллограф, на экране которого наблюдаем

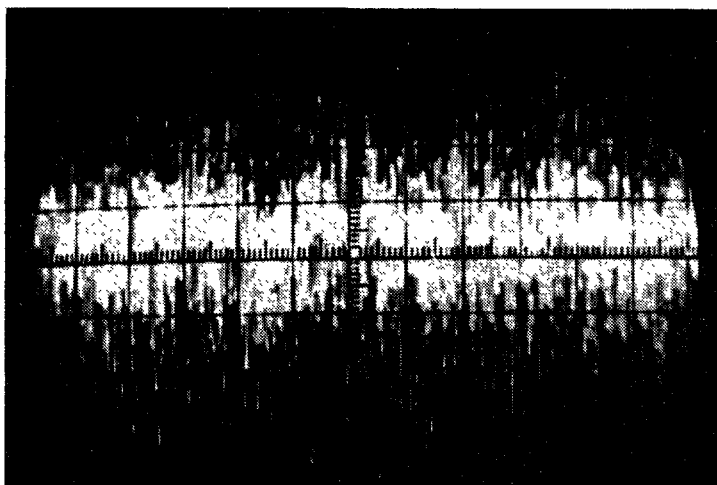


Рис. 2.

квазимонохроматическое хаотически модулированное колебание, так и на громкоговоритель. Кроме того, параллельно сигнал поступает на вход фазовращателя 3, при помощи которого можно варьировать величину задержки от 0 до π . Сумматор 4 позволяет складывать колебание с выхода фильтра $u_1(t)$ с тем же колебанием $u_2(t)$, задержанным в фазовращателе, и тем самым показать суперпозицию двух когерентных хаотически модулированных колебаний. Результат такой суперпозиции можно наблюдать непосредственно на экране, подавая на вход последнего сигнал с выхода 3, либо после детектора 5, подавая сигнал на второй вход двухлучевого осциллографа. Постоянную времени детектора $\tau_0 = RC$ можно было варьировать в пределах от 0,1 до 20 сек.

Демонстрационные возможности установки вполне ясны из вышеизложенного. Заметим, что для большей наглядности и оперативности желательно одновременно использовать не менее трех осциллографов, причем один из них — двухлучевой, типа С1-16 или С1-18, а два других однолучевые типа С1-1. Мы не приводим подробной схемы подключения и коммутации приборов, поскольку здесь возможны различные варианты. Подчеркнем только, что соединительные провода необходимо экранировать.

Прежде всего с выхода 1 на экран одного из осциллографов можно подать непосредственно шумовой сигнал (рис. 2), моделирующий белый свет. Одновременно можно прослушать этот шум, подавая его на усилитель с громкоговорителем на выходе (удобно использовать адантерный вход кинопроектора типа «Украина»). С выхода 2 можно подать и наблюдать отфильтрованное хаотически модулированное колебание $u_1(t)$. На рис. 3 приведены осциллограммы для различных значений добротности. Как видно, при $Q \sim 10^3 - 10^4$ хорошо просматривается цуговая структура осцилляций: подобная зависимость длины когерентности (т. е. длины цуга) τ от полосы пропускания фильтра в какой-то степени иллюстрирует уширение линии излучения газов в зависимости от температуры и давления. Весьма характерно также изменение тембра звукового сопровождения при изменении полосы — при малых Q звук имеет шумовой характер, с увеличением Q он становится более чистым.

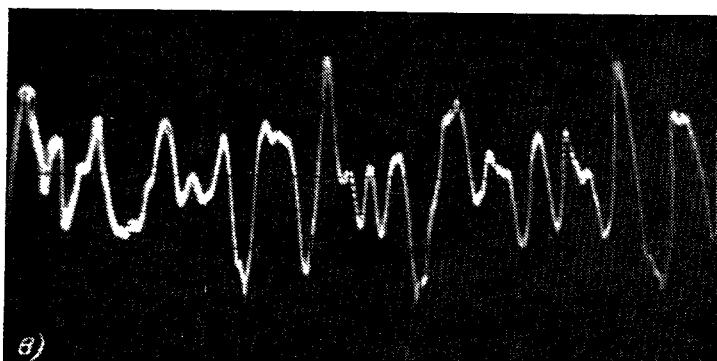
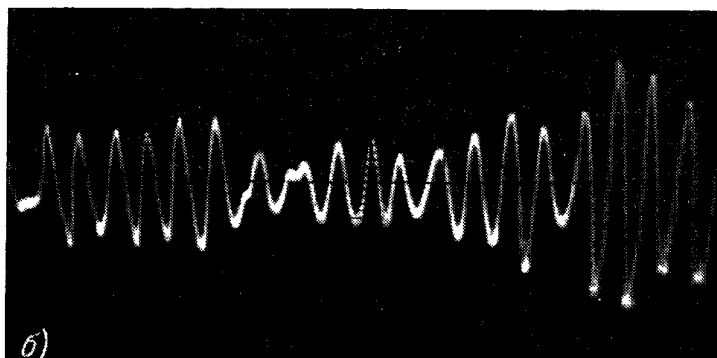
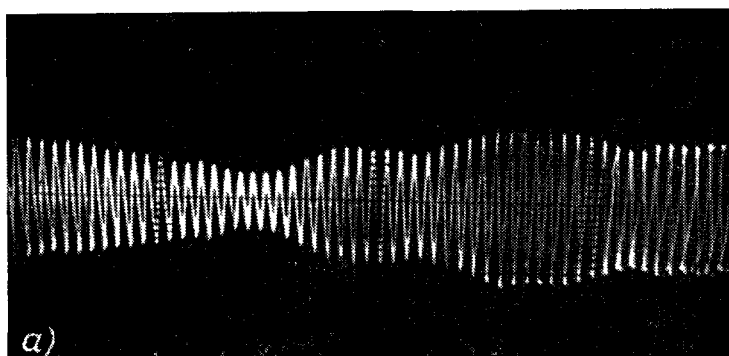


Рис. 3.

Таким образом, установка позволяет реализовать различные соотношения между периодами колебаний $T = 1/f_0$, длиной цуга τ и постоянной времени регистрирующего прибора τ_0 . Так, непосредственное получение осциллограммы мгновенного значения напряжения $u_1(t)$ на экране осциллографа соответствует безинерционному наблюдению ($\tau_0 \ll T \ll \tau$), невозможному в оптике. Если на осциллограф подавать напряжение

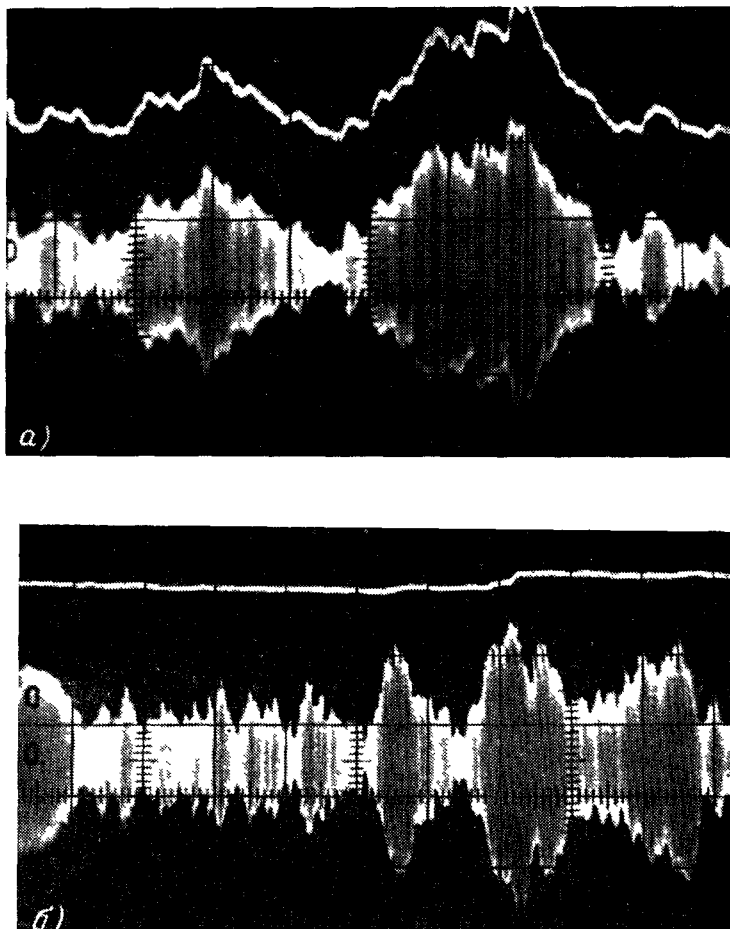


Рис. 4.

с выхода линейного детектора, то при постоянной времени детектора $\tau_0 = 0,1 - 0,2$ сек и $Q \gg 30$ имеем $\tau \gg \tau_0 \gg T$, т. е. такой способ наблюдения является малоинерционным: здесь уже показание прибора не успевает следить за мгновенным значением $u_1(t)$, но реагирует на изменение амплитуды поля. На рис. 4, а приведен пример подобных осциллограмм напряжения $u_1(t)$ и его огибающей $A_1(t)$, снятых с экрана двухлучевого осциллографа. Для больших добротностей условие $\tau_0 \gg \tau$ можно обеспечить и при слуховом восприятии колебаний: время разрешения уха $\tau_0 \ll 0,1$ сек и при $\tau \approx 0,3$ сек уже хорошо прослушиваются биения в такт колебаниям интенсивности звука ($\sim A^2(t)$). (Отметим, что в оптике для естественных источников света типично $\tau \ll 10^{-9}$ сек и малоинерционное наблюдение возможно лишь при использовании достаточно совершенных фотоэлектронных преобразователей.) Если же подобрать постоянную времени детектора так, что $\tau_0 \gg \tau$, то напряжение на выходе последнего уже не успевает следить и за изменением огибающей (рис. 4, б); это — случай сильноинерционного наблюдения, типичный для оптического диапазона (при наблюдении глазом, фотографировании и т. д.). Инерционным также является обычно наблюдение выходного напряжения при помощи стрелочного прибора.

На установке можно осуществить скалярное и векторное сложения как когерентных, так и некогерентных хаотически модулированных колебаний. Конкретно, результат скалярного сложения когерентных колебаний снимается с выхода сумматора и подается либо непосредственно на осциллограф, либо с выхода детектора на осциллограф и стрелочный прибор. Меняя фазовращателем сдвиг фаз между колебаниями $u_1(t)$ и $u_2(t)$, можно показать, что амплитуда результирующего колебания принимает



Рис. 5

значения от суммы амплитуд $[A_1(t) + A_2(t)]$ до их разности $[A_1(t) - A_2(t)]$; подбором амплитуды $A_1(t)$ с помощью потенциометра R в последнем случае можно обеспечить практически полное гашение колебаний.

Для получения векторного сложения отфильтрованное и задержанное колебания подаются соответственно на вертикальный и горизонтальный входы осциллографа. В результате получается фигура (рис. 5), моделирующая в общем случае эллиптически поляризованную волну.

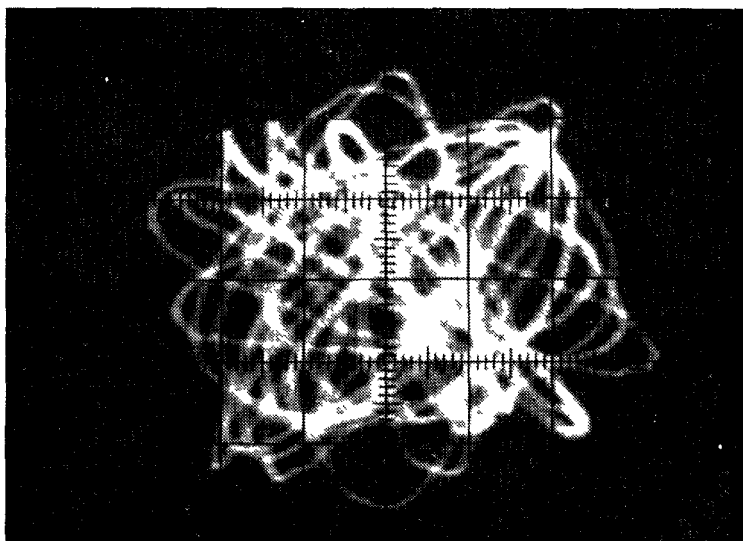


Рис. 6.

Два некогерентных колебания можно получить, взяв напряжение со второго фильтра, идентичного первому. Аналогично с предыдущим, здесь можно получить скалярное и векторное сложение этих колебаний. При демонстрации этих опытов прежде всего представляется уместным обратить внимание студентов на то обстоятельство, что результирующее колебание имеет ту же статистическую структуру, что и исходные (слагаемые) колебания, в частности, ту же характерную длительность

дугов. Далее, именно этот опыт позволяет наглядно продемонстрировать принципиальное значение постоянной времени регистрирующего прибора при наблюдении интерференции двух независимых (некогерентных) волн. При малоинерционном наблюдении ($\tau_0 \ll \tau$) амплитуда результирующего колебания за время порядка длины пуга τ также хаотически меняется в пределах $|A_1(t) \pm A_2(t)|$, т. е. интерференция имеет место, причем быстрая перестройка фазы одного из колебаний при помощи фазовращателя влияет на мгновенную амплитуду суммарного колебания. Лишь при инерционном способе наблюдения ($\tau_0 \gg \tau$) интерференция исчезает. Здесь уже происходит

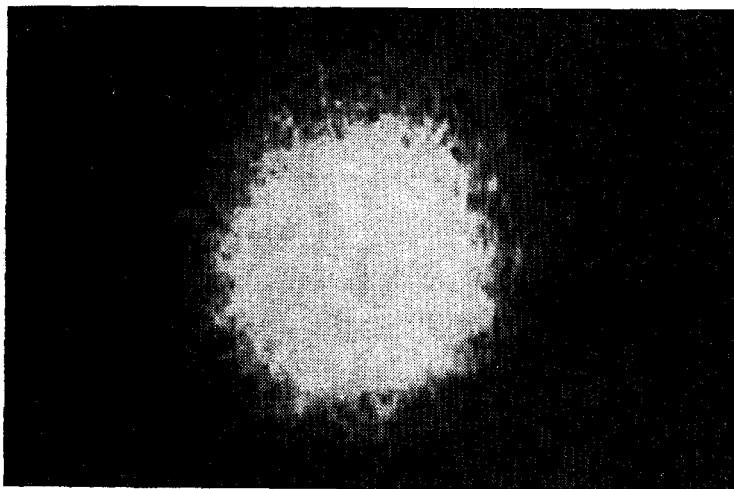


Рис. 7.

усреднение, в результате складываются интенсивности колебаний $\overline{A^2(t)} = \overline{A_1^2(t)} + \overline{A_2^2(t)}$, что удобно количественно продемонстрировать при помощи вольтметра, подключенного к выходу детектора. Положение ручки фазовращателя на величину сигнала уже не влияет. При векторном сложении здесь также можно заметить эллиптическую структуру результирующего колебания, если $\tau_0 \ll \tau$, в обратном же случае уже при равных средних интенсивностях слагаемых колебаний получается картина, указанная на рис. 6, моделирующая естественный (неполяризованный) свет.

При осуществлении векторного сложения некогерентных нефильтрованных колебаний (шумов) на экране наблюдаем пятно с осевой симметрией без явных признаков наличия совокупности быстро меняющихся эллипсов (рис. 7). Результат скалярного сложения представляет собой шумовое напряжение, практически не отличающееся от слагаемых.

В заключение укажем на некоторые возможности дальнейшего усовершенствования установки. На ней можно также наблюдать случаи интерференции частично-когерентных колебаний. Для этого вместо фазовращателя (или последовательно с ним) следует включить дополнительный блок задержки, позволяющий получить время задержки, сравнимое с временем когерентности. Проще всего подобный блок можно реализовать, используя электроакустическое преобразование с помощью динамика и разнесенного с ним на некоторое регулируемое расстояние микрофона.

Г. С. Егоров, В. А. Мяхишев, Н. С. Степанов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Грабовский, А. Б. Млодзиевский, Р. В. Телеснин, М. С. Шаскольская, И. А. Яковлев, Лекционные демонстрации по физике, М., «Наука», 1972.
2. Г. С. Горелик, Колебания и волны, М., Гостехиздат, 1950.
3. М. Н. Бобнев, Генерирование случайных сигналов, М., «Энергия», 1971.
4. В. Н. Морозов, Радио, № 11, 53 (1972); № 5, 37 (1973).