

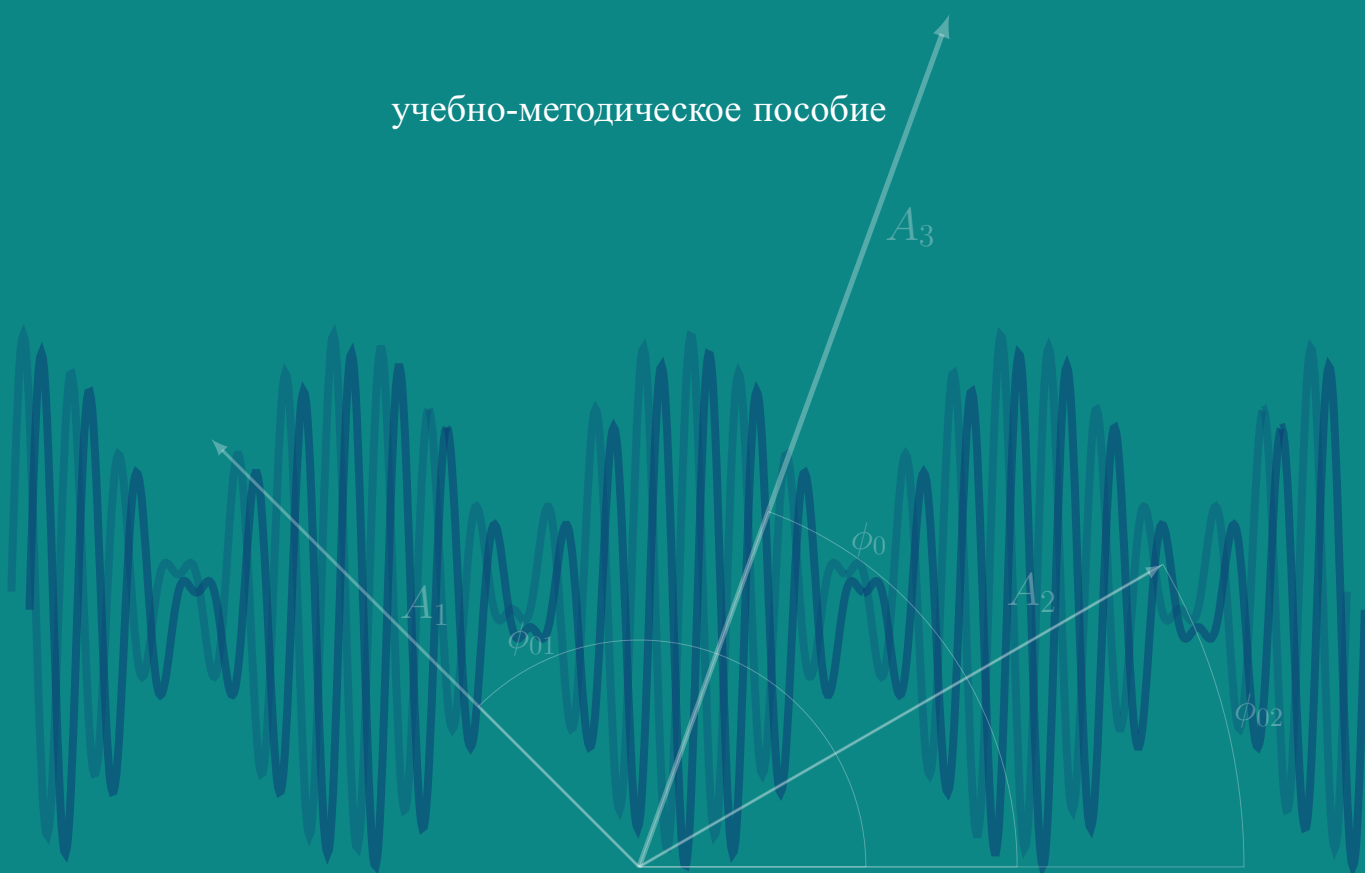
М. О. Первушина

И. А. Небаев

Колебания и волны

Руководство к лабораторным работам
по исследованию гармонических колебаний
с помощью осциллографа
в среде компьютерной программной установки

учебно-методическое пособие



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ

**Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

**М. О. Первушина
И. А. Небаев**

Колебания и волны
**Руководство к лабораторным работам
по исследованию гармонических колебаний
с помощью электронного осциллографа
в среде компьютерной программной установки**

С-Пб ГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017**

УДК 537.6, 53.072
ББК 00.00x00
X00

Рецензент
доктор технических наук, профессор _____ (_____)

*Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом С-Пб ГУТ*

Первушина, М. О.

Колебания и волны: руководство к лабораторным работам по исследованию гармонических колебаний с помощью электронного осциллографа в среде компьютерной программной установки: учебно-методическое пособие /М. О. Первушина, И. А. Небаев; С-Пб ГУТ. — С-Пб., 2017. — 35 с.

Учебно-методическое пособие представляет собой руководство к выполнению ряда лабораторных работ объединенных под общей темой «Исследование гармонических колебаний с помощью электронного осциллографа», выполняемой в рамках курса физики «Колебания и волны». Особенностью работ является выполнение измерений в среде компьютерной программной установки (разработанной авторами на кафедре физики С-Пб ГУТ), учитывающей технические и функциональные особенности аналогичных современных лабораторных стендов. Руководство содержит теоретические основы лабораторного опыта, описание интерфейса программной установки, порядок выполнения опытов и расширенный список индивидуальных заданий для самостоятельной работы.

Пособие входит в серию учебно-методических руководств по лабораторным работам раздела «Колебания и волны» в среде компьютерной программной установки.

**УДК 000.000(000)
ББК 00.00x00**

*Данный документ является электронным экземпляром издания
и может быть загружен с узла сети Internet по адресу:
<http://physics.sut.ru>*

© Первушина М. О., Небаев И. А., 2017
© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2017

Содержание

Введение	5
Описание лабораторной программной установки	6
1.1 Электронный осциллограф	7
1.2 Генераторы звуковой частоты	8
1.2.1 Генератор канала X	8
1.2.2 Генератор канала Y	9
Теоретическое обоснование и методика измерения	11
2.1 Сложение колебаний одного направления и одинаковой частоты	11
2.2 Сложение колебаний одного направления равной амплитуды и близких частот (биения)	12
2.3 Сложение взаимно перпендикулярных колебаний	12
2.4 Метод измерений	13
Порядок выполнения работ	17
3.1 Определение чувствительности отклоняющих пластин ЭО	17
3.2 Исследование процесса сложения колебаний одного направления и равных частот	17
3.3 Исследование процесса сложения колебаний одного направления и близких частот (биения)	22
3.4 Исследование процесса сложения взаимно перпендикулярных колебаний	23
Вопросы для допуска и защиты лабораторных работ	29
Рекомендуемая литература	31
Указатель таблиц	32
Указатель иллюстраций	33



Введение

Лабораторные работы преследуют цели закрепления теоретического материала по разделу «Колебания и волны», и призваны ознакомить обучающихся с методами исследования гармонических колебаний, основанных на использовании генераторов низкой частоты и средств электронного осциллографа. Важной особенностью работ является выполнение всех измерений в среде компьютерной программной установки (полностью аналогичной лабораторному опытному стенду), учитывающей технические особенности и функциональные возможности современного реального аналога. Описание лабораторных работ представляет собой компиляцию материала теоретического, методического и научного характера.

Методическое сопровождение лабораторных работ разработано с учетом специфики выполнения измерений в среде компьютерной программной установки, и применяет перспективный метод индивидуализации самостоятельной опытной работы, который основан на углублении вариационной части лабораторных измерений за счет введения индивидуального плана заданий из расширенного списка вариантов. Такой подход обеспечивается широкой базой вариантов исходных условий и конечных целей измерений, что в некоторой степени позволяет реализовать механизм нерепетитивности (т. е. не воспроизводимости и копирования) измерений в проводимых опытах.

Реализация лабораторных работ средствами компьютерной программной установки позволяет объединить цели и задачи преследуемые в области регулярных учебных лабораторных работ с предметной областью и задачами вычислительной физики и компьютерного сопровождения физического эксперимента. Это приводит к синтезированию и выработке у обучающихся новых методов натурального опытного моделирования и моделирования с помощью методов вычислительной физики и средств компьютерной обработки данных в целом. Т. о. материал данного руководства следует рассматривать с одной стороны, как учебно–методическое пособие для выполнения частной лабораторной работы, так и как демонстрацию перспективного метода проведения учебных лабораторных работ по физике в ВУЗе, представляющего определенный интерес всему кругу лиц задействованных в процессе обучения — преподавателям, методистам, инженерно-лабораторному составу и студентам.

Пособие продолжает серию учебно-методических руководств по лабораторным работам раздела «Колебания и волны» в среде компьютерной программной установки.

Описание лабораторной программной установки



Лабораторная установка представляет собой компьютерную программную имитационную модель высокого уровня, основанную на адекватной реализации функциональных возможностей и технических особенностей аппаратного аналога. В состав программной установки, аналогично аппаратному аналогу, входят имитационные модели генератора звуковой частоты (два прибора) и электронного осциллографа. Общий вид программной лабораторной установки представлен на рис. 1.1.

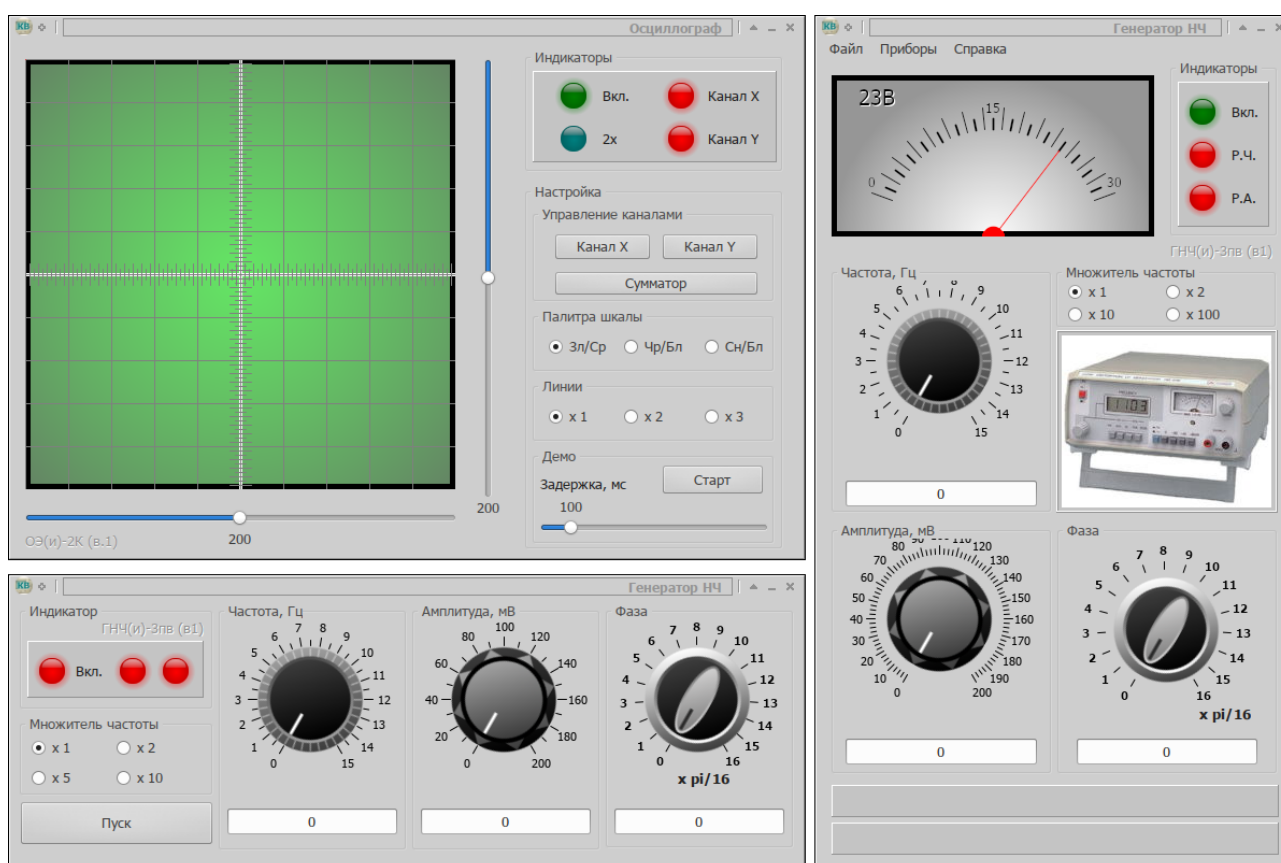


Рис. 1.1 — Интерфейс программной лабораторной установки

Вызов главной программы лабораторной установки сопровождается информационным диалоговым окном, вид которого изображен на рис. 1.2.

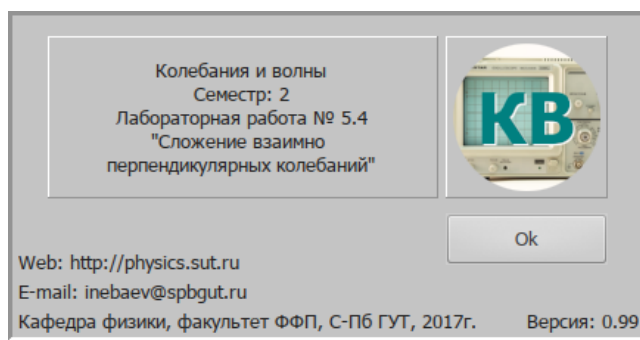


Рис. 1.2 — Диалоговое окно загрузки лабораторной установки

1.1 Электронный осциллограф

Электронный осциллограф (модель ОЭ(и)-2К) лабораторной установки состоит из двух основных элементов — экрана и приборной панели. В зависимости от режима работы осциллографа на экран выводится сигнал гармонического колебания напряжения с канала X , Y или их комбинации. Приборная панель электронного осциллографа содержит основные регулировочные элементы и позволяет управлять коммутацией сигналов отображаемых на экране осциллографа. Вид ЭО лабораторной установки продемонстрирован на рис. 1.3.

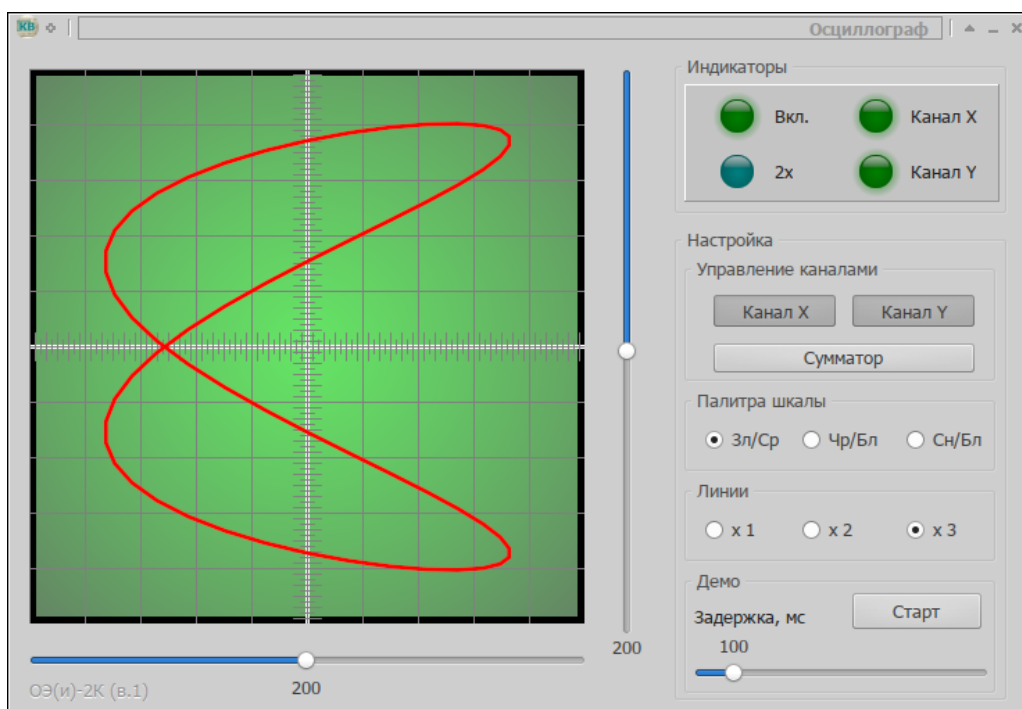


Рис. 1.3 — Приборная панель электронного осциллографа

На приборной панели размещены следующие элементы управления:

- 1) Блок светодиодных индикаторов — четыре индикатора состояния работы осциллографа и коммутируемых каналов. При изменении состояния режима отображения (переключение каналов и т. д.) соответствующие индикаторы изменяют цвет индикации: зеленый — канал включен, красный — канал выключен;
- 2) Блок кнопок с фиксируемым положением — фиксирующиеся («утапливаемые») кнопки включения и отключения канала X , Y и сумматора каналов:

- Для отображения сигнала напряжения соответствующего канала (*одноканальный режим*) необходимо «утопить» соответствующую кнопку блока. Отключение канала выполняется повторным нажатием на заданной кнопке;
 - Для включения *двухканального режима* работы ЭО необходимо зафиксировать кнопки каналов X и Y во включенном положении. В соответствии с принципами проведения измерений (см. далее) это переключит ЭО в режим, при котором сигналы напряжения от каждого из отдельных генераторов будут управлять соответствующими отклоняющими электродами — X или Y , в зависимости от канала включения соответствующего генератора;
 - Включение кнопки «Сумматор» блокирует кнопки каналов, и переводит ЭО в режим суммирования сигналов напряжения с обоих каналов. При этом результирующий сигнал (биение) отображается на экране ЭО.
- 3) Блок «Палитра шкалы» позволяет переключить палитру (цветовую схему) экрана ЭО для повышения эргономичности измерений;
 - 4) Блок «Линии» определяет толщину электронного луча на экране ЭО;
 - 5) Блок «Демо» включает демонстрационный режим работы ЭО, запуск режима осуществляется кнопкой «Старт». В зависимости от включенного режима отображения (каналов), в автоматическом режиме выполняет бесконечное циклическое изменение фазы сигнала напряжения (шаг изменения фазы $\pi/16$), позволяющее продемонстрировать динамическое изменение гармонического колебания. Ползунковый регулятор позволяет задать временной интервал (задержку в мс.) между очередным переключением значения фазы;
 - 6) Регуляторы центровки экрана — ползунковые регуляторы позволяют выполнить центровку и перемещение выводимого изображения на экране осциллографа по вертикальной и горизонтальной оси.

Управление элементами приборной панели осуществляется левой кнопкой манипулятора «мышь». Помимо этого, ползунковые регуляторы могут быть точно откалиброваны с помощью клавиш управления курсором («стрелки») клавиатуры ПК.

1.2 Генераторы звуковой частоты

1.2.1 Генератор канала X

Описываемый в данном разделе звуковой генератор по-умолчанию подключен к каналу X ЭО.

Генератор звуковой частоты (модель ГНЧ(и)-3пв) служит источником генерирующим гармонические колебания напряжения различной частоты, амплитуды и фазы. Отображение соответствующего сигнала выполняется посредством экрана ЭО (см. раздел 1.1).

Приборная панель генератора (рис. 1.4) содержит основные элементы управления и регулировки необходимые для генерации гармонических колебаний с заданной частотой, фазой и амплитудой. На приборной панели размещены соответственно:

- 1) Блок индикаторов — светодиодные индикаторы предназначены для индикации состояния генератора и процесса регулировки параметров генерации гармонических колебаний: регулировка частоты, амплитуды и т.д. Шкала встроенного вольтметра указывает

текущее входное (сетевое) напряжение генератора, которое не изменяется и не учитывается при выполнении измерений;

- 2) Ручка регулировки частоты предназначена для регулировки частоты гармонического колебания в диапазоне 0–15 Гц. Текущее положение ручки регулировки отмечено белой рисккой, а также дублируется в текстовом поле под ручкой. Управление ручкой осуществляется колесиком или левой кнопкой манипулятора «мышь».
- 3) Блок элементов «Множитель частоты» — блок радио-кнопок предназначен для умножения значения частоты гармонического колебания заданного соответствующей ручкой регулятора на множитель соответствующей кнопки. Следует обратить внимание, что блок позволяет выбрать одновременно только один множитель;
- 4) Ручка регулировки амплитуды позволяет выполнить регулировку величины амплитуды напряжения гармонического колебания в диапазоне 0–200 мВ. Текущее положение ручки регулировки отмечено белым указателем, а также дублируется в соответствующем текстовом поле. Управление осуществляется колесиком или левой кнопкой манипулятора «мышь»;
- 5) Ручка регулировки начальной фазы предназначена для установки значения начальной фазы гармонического колебания напряжения. Значения начальной фазы регулируется в диапазоне 0– π . Следует обратить особое внимание на маркировку обводящей шкалы ручки — для получения истинной величины фазы, каждое значение соответствующего деления на шкале ручки должно быть умножено на минимальный шаг шкалы $\pi/16$. Т.о. положение ручки «1» соответствует фазе $\pi/16$, положение «2» задает фазу $\pi/8$ и т. д. Текущее положение ручки регулировки дублируется в текстовом поле под данным элементом. Как и в предыдущих случаях, управление ручкой осуществляется колесиком или левой кнопкой манипулятора «мышь».

Кроме перечисленных элементов, приборная панель генератора содержит главное меню и статусную строку. Пункт меню «Файл» предназначен для завершения работы программы. Пункт «Приборы» содержит список приборов используемых в лабораторной установке и позволяет при необходимости повторно открыть окно указанного прибора (например, при случайном закрытии окна ЭО). Пункт главного меню «Справка» содержит справочную информацию о лабораторной установке, авторах и версии модели.

1.2.2 Генератор канала Y

Описываемый в данном разделе звуковой генератор по-умолчанию подключен к каналу Y ЭО.

Приборная панель генератора представлена на рис.1.5. Генератор звуковой частоты подключенный к каналу Y ЭО практически полностью аналогичен генератору, описанному в предыдущем разделе. Генератор располагает идентичным набором регулировок, размещенных на приборной панели — блок индикации, ручки регулировки частоты, амплитуды и фазы генерируемого гармонического колебания, а также блок множителя частоты. Отличительная особенность данного генератора заключается в наличии фиксируемой кнопки «Пуск», при нажатии на которую деблокируются ручки регулировки. Кнопка включения генератора может быть задействована в начале процесса измерений и далее оставаться во включенном («утопленном») положении до конца работы лабораторной установки (до закрытия программы). Управление регулировочными ручками генератора осуществляется колесиком или левой кнопкой «мышь».

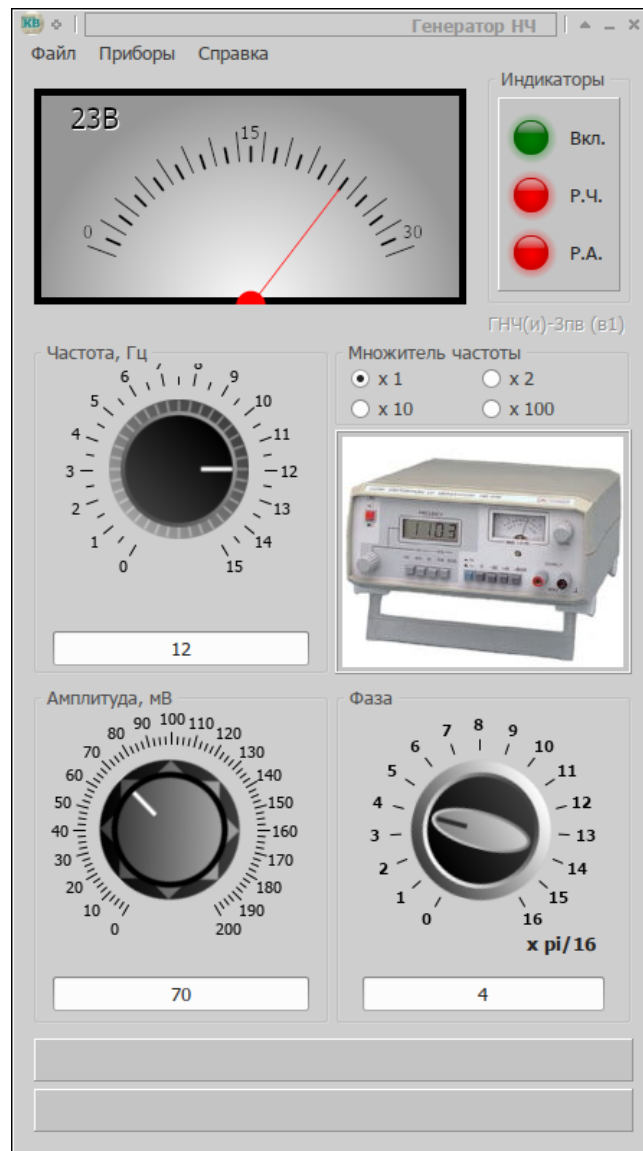


Рис. 1.4 – Приборная панель генератора звуковой частоты (канал X ЭО)

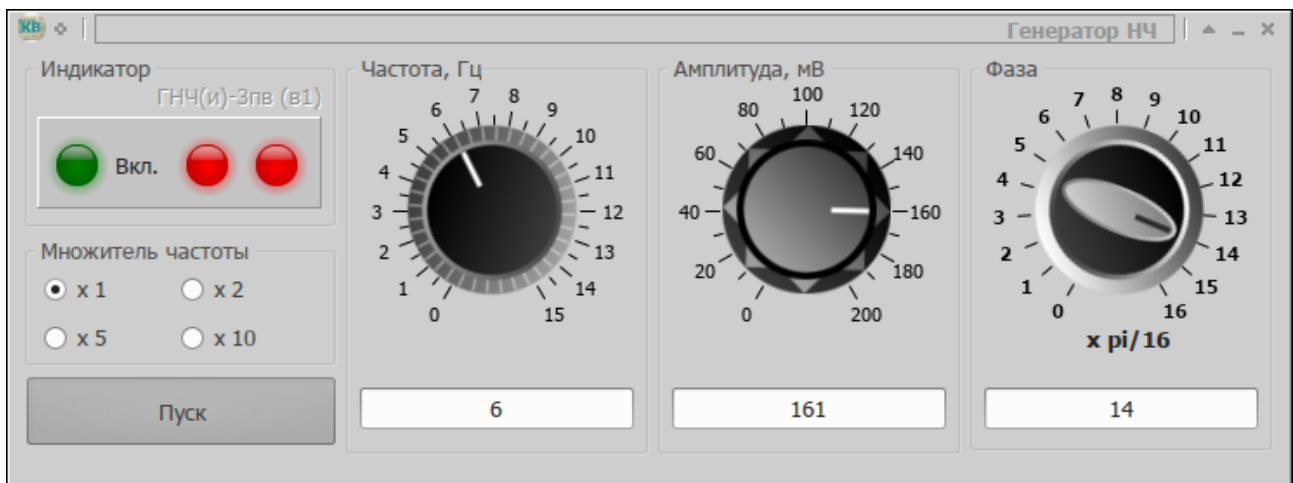
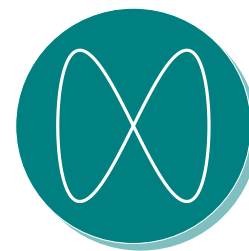


Рис. 1.5 – Приборная панель генератора звуковой частоты (канал Y ЭО)



Теоретическое обоснование и методика измерения

Гармонические колебания — процесс изменения величин по закону косинуса или синуса. Разнообразные периодические процессы можно представить в виде суммы гармонических колебаний.

2.1 Сложение колебаний одного направления и одинаковой частоты

Пусть точка участвует в двух колебаниях одного направления и одинаковой частоты. Тогда уравнения колебаний принимают следующую форму:

$$X_1 = A_1 \sin(\omega t + \phi_{01}), \quad (2.1)$$

$$X_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi_{02}). \quad (2.2)$$

Результирующее колебание представляет сумму двух его составляющих и в данном случае имеет вид:

$$X = A \sin(\omega t + \phi_0). \quad (2.3)$$

Амплитуду и фазу результирующего колебания можно определить с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 2.6.

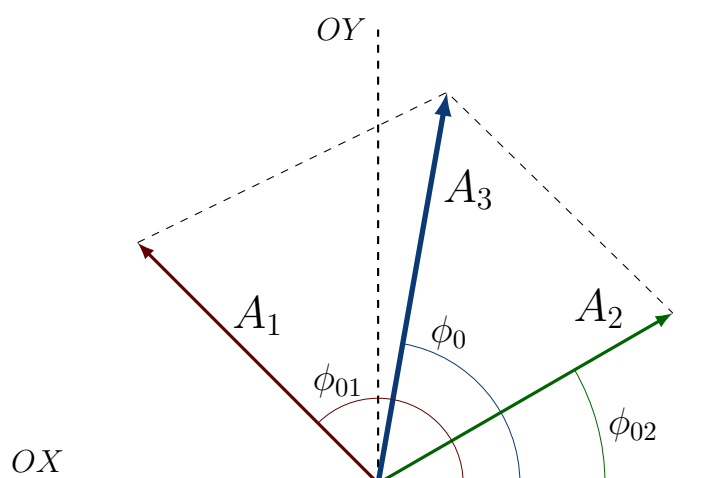


Рис. 2.6 — Векторная диаграмма сложения амплитуд колебаний

Согласно теореме косинусов, для амплитуды результирующего колебания получим:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_{01} - \phi_{02}). \quad (2.4)$$

Определяя проекции амплитуд первого и второго колебаний на вертикальное (ось OY) и горизонтальное направление (ось OX), соответственно, выражение для тангенса начальной фазы колебания примет вид:

$$\operatorname{tg} \phi_0 = \frac{A_1 \sin(\phi_{01}) + A_2 \sin(\phi_{02})}{A_1 \cos(\phi_{01}) + A_2 \cos(\phi_{02})}. \quad (2.5)$$

2.2 Сложение колебаний одного направления равной амплитуды и близких частот (биения)

Пусть точка участвует в двух колебаниях одного направления и близких частот:

$$X_1 = A \sin(\omega_1 t), \quad (2.6)$$

$$X_2 = A \sin(\omega_2 t), \quad (2.7)$$

Тогда результирующее колебание примет вид:

$$X = X_1 + X_2, \quad (2.8)$$

$$X = \left[2A \cos\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right) \right] \sin \omega t, \quad (2.9)$$

где выражение в квадратных скобках определяет амплитуду биений, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ и $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$. Результирующее колебание можно рассматривать как гармоническое с медленно меняющейся амплитудой. Период биений равен $T_b = 2\pi/\Delta\omega$, период колебаний — $T = 2\pi/\omega$. График такого колебания представлен на рис. 2.7.

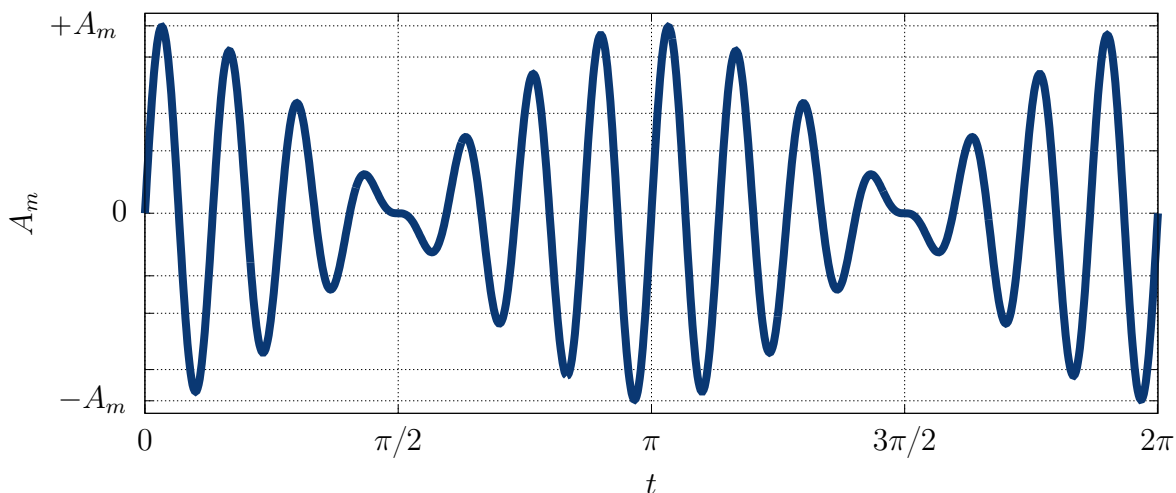


Рис. 2.7 — График биения

2.3 Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

Пусть точка участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты. Уравнения колебаний имеют форму:

$$X = A_1 \sin(\omega_x t), \quad (2.10)$$

$$Y = A_2 \sin(\omega_y t + \phi_0). \quad (2.11)$$

В результате тригонометрических преобразований, уравнение траектории точки примет вид:

$$\left(\frac{X}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{Y}{A_2}\right)^2 - 2\frac{XY}{A_1 A_2} \cos(\phi_0) = \sin^2 \phi_0. \quad (2.12)$$

Траектория точки представляет собой замкнутую кривую (эллипс), ориентация которого зависит от разности фаз складываемых колебаний.

Если частоты колебаний не равны, а кратны, то в этом случае траектория движения точки принимает вид сложной кривой, называемой фигурой Лиссажу. Пусть уравнения колебаний точки имеют вид:

$$X = \cos(\pi t), \quad (2.13)$$

$$Y = 2 \cos\left(\frac{\pi}{2} t\right). \quad (2.14)$$

Преобразуя выражения, получим уравнение траектории следующего вида:

$$Y = 4\sqrt{\frac{1+X}{2}}. \quad (2.15)$$

График траектории точки $Y(X)$ продемонстрирован на рис. 2.8.

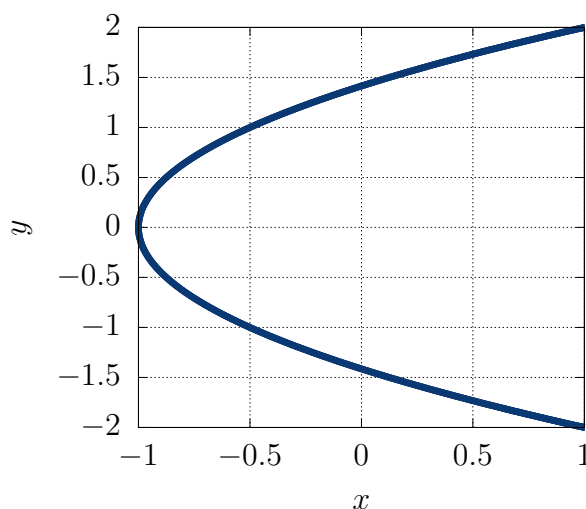


Рис. 2.8 — График траектории точки (фигура Лиссажу)

2.4 Метод измерений

Результат сложения гармонических колебаний можно наблюдать с помощью электронного осциллографа (ЭО). При этом источниками колебаний могут выступать генераторы низкой (звуковой) частоты (ГЗ), которые создают гармонические колебания напряжения разной

частоты и амплитуды. Отображение колебаний осуществляется на экране осциллографа при помощи электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) или жидкокристаллического экрана (ЖК).¹

ЭЛТ включает в себя несколько основных компонентов — электронную пушку, фокусирующую катушку, отклоняющие электроды и флуорисцирующий экран.

Электронная пушка (рис. 2.9 (а)) состоит из катода, управляющего электрода (модулятора пушки), ускоряющего электрода и одного или нескольких анодов, применение которых обусловлено различными требованиями. Работа катода в качестве источника электронов основывается на принципе термоэлектронной эмиссии. Нагрев катода приводит к увеличению энергии электронов, которой становится достаточной для преодоления потенциального барьера (максимальная потенциальная энергия валентных электронов в металле) и выхода из металла. Задача модулятора электронной пушки заключается в формировании требуемой толщины электронного пучка, т. е. ограничении количества электронов в формируемом пучке, что оказывает прямое влияние на яркость и контрастность свечения экрана ЭЛТ. Ускоряющий электрод, в соответствии со своим названием, служит для сообщения выпускаемым электронам начальной скорости в пределах электронной пушки, а также выполняет роль электростатической линзы уменьшающей угол расхождения пучка электронов перед входом на главную линзу анода. Анод, представляющий собой цилиндр, имеет небольшое отверстие на оси электронной пушки, называемое выходной диафрагмой. Диафрагма анода позволяет выпускать из пушки только те электроны, траектория которых не имеет или имеет очень малое отклонение от центральной оси пушки, позволяя т. о. регулировать резкость луча на экране ЭЛТ.

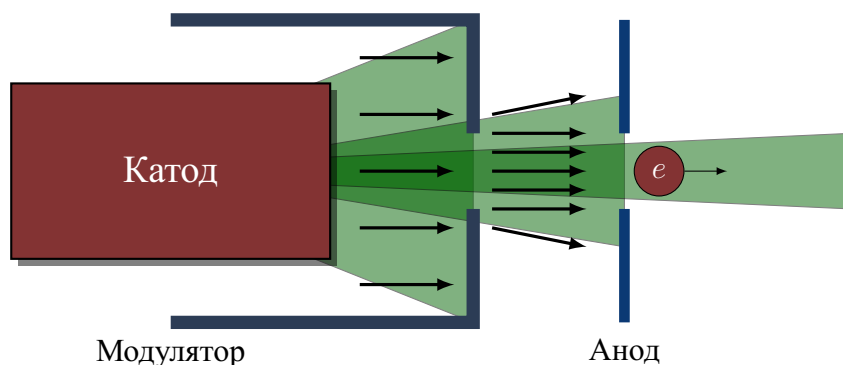
Фокусирующая катушка ЭЛТ (рис. 2.9 (с)) имеет тороидальную форму и предназначена для дополнительной фокусировки пучка электронов после вылета из выходной диафрагмы анода. Необходимость использования фокусирующей катушки обусловлено техническими характеристиками пушки, классом и назначением прибора и т. д.

Отклоняющие электроды представляют собой набор горизонтально и вертикально расположенных пластин. Их задача заключается в пространственном смещении (оклонении по вертикальной и горизонтальной оси) электронного луча пушки. В зависимости от приложенного к пластинам напряжения, т. е. ориентации электрического поля, пучек электронов подвергается смещению относительно центральной оси экрана осциллографа. Т. о., если на отклоняющие пластины подавать переменное напряжение, то на экране ЭО можно наблюдать синусоидальную осциллограмму изменения сигнала.

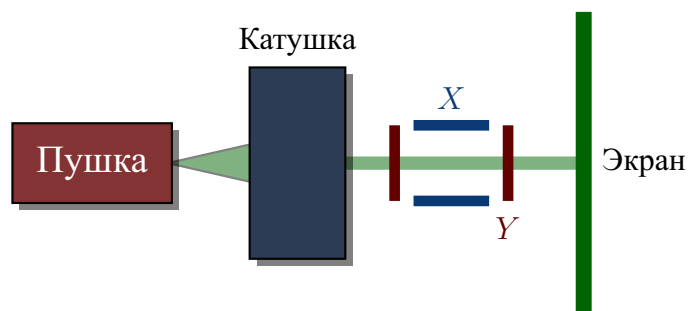
Внутренняя поверхность экран ЭЛТ покрыта специальным флуорисцирующим веществом (например, фосфор), при попадании электронов на которую (т. н. электронная бомбардировка) возникает эффект кратковременного свечения точки на экране. Благодаря инерционности зрения и постоянному повторению (развертке) линий траектории электронного пучка на экране осциллографа в соответствии с подаваемым сигналом, реализуется возможность наблюдения различных видов колебаний с помощью ЭО.

Использование цифрового осциллографа (с ЖК-дисплеем) подразумевает выполнение цепочки аналого-цифрового преобразования входных сигналов. Входной сигнал от ГЗ подвергается полосовой фильтрации для уменьшения полосы частот сигнала. Затем, с помощью цифрового сигнального процессора, аналоговый сигнал дискретизируется с определенной частотой и квантуется по заданным цифровым уровням для представления каждого отсчета (значения амплитуды) аналогового сигнала в форме цифрового (двоичного) представления. Для достижения более высокого качества АЦП преобразования в различных приборах используется большее количество уровней квантования (2^n -уровней квантования, где n — количество бит для представления каждого отсчета сигнала). После представления аналоговых данных в двоичном виде, цифровой процессор выполняет отображение сигнала на

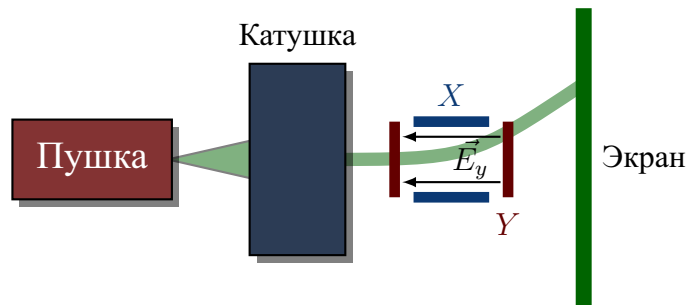
¹Осциллографы с ЖК-экранами принято называть цифровыми, а приборы с ЭЛТ в качестве экрана, соответственно, аналоговыми.



(а) Формирование пучка в электронной пушке



(b) Электронно-лучевая трубка, отклонение луча отсутствует из-за отсутствия отклоняющих электрических полей \vec{E}_x и \vec{E}_y



(c) Отклонение пучка электронов в зависимости от направления электрического поля \vec{E}_y вертикальных пластин

Рис. 2.9 — Формирование изображения ЭО с помощью ЭЛТ

ЖК-экране в виде заданного графика. Следует отметить, что цифровые осциллографы имеют достаточно специфическую область применения по ряду технических причин, в том числе и за счет внесения искажений (шума квантования) при выполнении процедуры АЦП.¹

Исследование процесса сложения колебаний одного направления, одинаковой частоты и биений выполняются в одноканальном режиме подключения ЭО. Т.о. оба генератора подключаются к одному из входных каналов осциллографа. Блок-схема такого подключения продемонстрирована на рис. 2.10 (а).

Для исследования процесса сложения взаимно перпендикулярных колебаний генераторы ГЗ необходимо подключать по индивидуальным каналам ЭО, т.е. в двухканальном режиме (рис. 2.10 (b)).

¹В связи с этим для средств высокоточных научных и инженерных исследований наибольшее распространением обладают электронные аналоговые осциллографы.

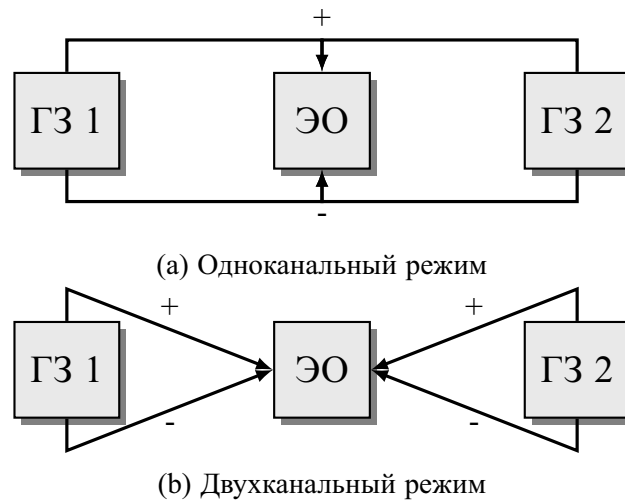


Рис. 2.10 — Блок-схема подключения приборов лабораторной установки



Порядок выполнения работ

3.1 Определение чувствительности отклоняющих пластин ЭО

- 1) Включить генератор звуковой частоты, нажав кнопку «Пуск» на приборной панели генератора, «утопить» фиксируемые кнопки каналов X и Y . При этом загорятся соответствующие индикаторы, размещенные в верхней части панели приборов осциллографа;
- 2) Используя регуляторы включенного генератора, установить значения частоты и напряжения, указанные в табл. 3.1 в соответствии с полученным заданием. Измерить длину вертикального отрезка, изображенного на экране осциллографа, учитывая масштаб координатной сетки экрана — 1 клетка соответствует размеру $10 \times 10 \text{ мм}^2$.

Для повышения эргономичности измерений, отрезок на экране ЭО можно перемещать с помощью ползунков горизонтальной и вертикальной центровки.

- 3) Вычислить чувствительность вертикально отклоняющих пластин осциллографа, используя выражение $j_Y = Y/2U_m$;
- 4) Установить нулевые значения на регуляторах частоты и амплитуды используемого генератора, тем самым вернув его настройки в исходное состояние;
- 5) Выполнить аналогичные действия для измерения чувствительности горизонтально отклоняющих пластин ЭО с помощью второго генератора;
- 6) Вычислить чувствительность пластин ЭО $j_X = X/2U_m$ и внести данные вычислений в соответствующие поля табл. 3.1;
- 7) Рассчитать среднее значение чувствительности вертикально и горизонтально отклоняющих пластин ЭО.

3.2 Исследование процесса сложения колебаний одного направления и равных частот

- 1) Включить генератор звуковой частоты, нажав кнопку «Пуск» на приборной панели генератора, «утопить» фиксируемую кнопку канала X . При этом загорятся

Таблица 3.1 — Определение чувствительности отклоняющих пластин ЭО

№	Пластины X				Пластины Y			
	$\nu, \text{с}^{-1}$	$U_m, \text{мВ}$	$X, \text{мм}$	$j_X, \text{мм/мВ}$	$\nu, \text{с}^{-1}$	$U_m, \text{мВ}$	$Y, \text{мм}$	$j_Y, \text{мм/мВ}$
1	5	20			5	20		
2		40				40		
3		60				60		
4		80				80		
5		100				100		

соответствующие индикаторы, размещенные в верхней части панели приборов осциллографа;

- 2) Используя регуляторы включенного генератора, установить значения частоты и напряжения, указанные в табл.3.2 в соответствии с полученным заданием. Зафиксировать осциллограмму колебания напряжения;
- 3) Центрировать осциллограмму относительно экрана ЭО (определить положение горизонтальной оси). Для полученной осциллограммы записать уравнение колебаний напряжения $U_1(t)$ в соответствующий столбец табл. 3.3;
- 4) На приборной панели ЭО включить фиксируемую кнопку канала Y. При этом загорятся соответствующие индикаторы, размещенные в верхней части панели приборов осциллографа;
- 5) Аналогично предыдущему заданию установить исходные данные из табл.3.2. Зафиксировать осциллограмму, записать уравнение колебаний напряжения $U_2(t)$;
- 6) Отключить каналы X и Y, сохранив на генераторах параметры колебаний. Включить фиксируемую кнопку «Сумматор» размещенную на приборной панели ЭО. Зафиксировать осциллограмму результирующего колебания напряжения;
- 7) Используя среднее значение чувствительности, определить амплитуду U_m результирующего колебания по формуле $U_m = Y_m/2j_Y$;
- 8) Центрировать осциллограмму и определить начальную фазу колебаний. Для этого, после центровки осциллограммы, переместить осциллограмму таким образом, чтобы начало колебаний соответствовало нулю по горизонтальной оси. Затем измерить величину вертикального отрезка, и вычислить начальную фазу по формуле $\sin \phi_0 = 2Y/Y_m$ (пример рис. 3.11);
- 9) Записать уравнение колебаний $U(t)$ в соответствующий столбец табл. 3.3;
- 10) Построить векторную диаграмму сложения колебаний, определить амплитуду результирующего колебания и начальную фазу. Результаты расчета внести в табл. 3.3;
- 11) Используя любую доступную систему математического программного обеспечения¹, построить графики колебаний $U_1(t), U_2(t), U(t)$ (на одной координатной плоскости).

¹Для построения графика зависимости рекомендуется воспользоваться средствами одной из перечисленных систем — Maxima, gnuplot, QtiPlot, Wolfram Mathematica, MathCAD и т. д.

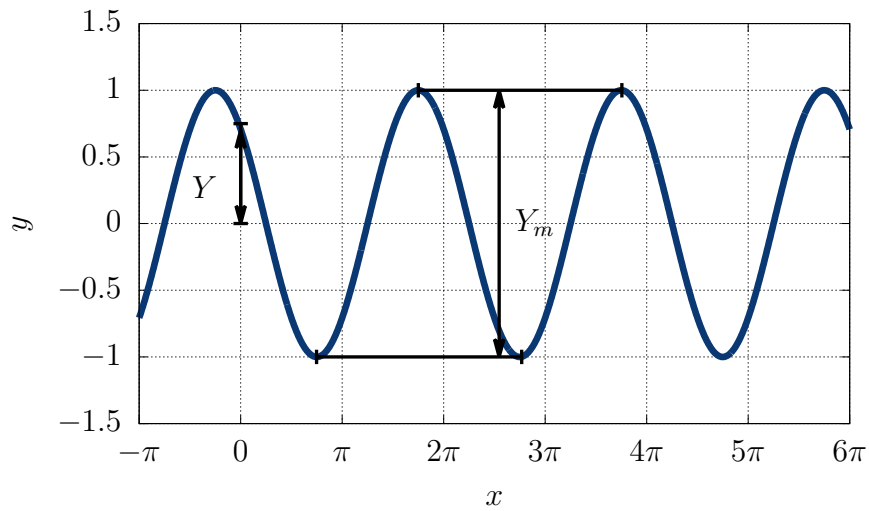


Рис. 3.11 — Определение амплитуды и начальной фазы результирующего колебания

ВНИМАНИЕ! Не допускается построение графиков вручную, а также с помощью ПО процессоров электронных таблиц (MS Excel, LibreOffice Calc, Gnumeric и пр.)!

Таблица 3.2 – Исследование сложения колебаний одного направления и одинаковых частот

№	Исходные условия				
	U_{m1} , мВ	U_{m2} , мВ	ν , с ⁻¹	ϕ_{01} , рад	ϕ_{02} , рад
1	100	60	5	0	0
2	80	140	4	π	0
3	60	80	3	0	0
4	120	60	4	0	π
5	80	80	4	0	0
6	140	100	3	π	0
7	80	60	4	0	0
8	140	80	5	0	π
9	100	100	5	0	0
10	60	100	3	π	0
11	100	60	5	$3\pi/4$	0
12	80	140	4	$\pi/2$	0
13	60	80	3	0	$3\pi/4$
14	120	60	4	0	$\pi/2$
15	80	80	4	$3\pi/4$	0
16	140	100	3	$\pi/2$	0
17	80	60	4	$3\pi/4$	0
18	140	80	5	0	$\pi/2$
19	100	100	5	$\pi/2$	0
20	60	100	3	$3\pi/4$	0

Таблица 3.3 — Результаты измерений и расчеты

T, c	$U_1(t)$, вид графика	$U_2(t)$, вид графика	$U(t)$	U_m (по ЭО), мВ	ϕ_0 (по ЭО), рад	U_m (по векторной диаграмме), мВ	ϕ_0 (по векторной диаграмме), рад

3.3 Исследование процесса сложения колебаний одного направления и близких частот (биения)

- 1) Включить генератор звуковой частоты, нажав кнопку «Пуск» на приборной панели генератора, «утопить» фиксируемую кнопку канала Y . При этом загорятся соответствующие индикаторы, размещенные в верхней части панели приборов осциллографа;
- 2) Используя регуляторы включенного генератора, установить значения частоты и напряжения, указанные в табл. 3.4 в соответствии с полученным заданием. Зафиксировать осциллограмму колебания напряжения;
- 3) На приборной панели ЭО включить фиксируемую кнопку канала X , установить значения частоты и напряжения указанные в табл. 3.4. Зафиксировать осциллограмму колебания напряжения;
- 4) Отключить каналы X и Y , сохранив параметры колебаний на приборных панелях генераторов. Включить фиксируемую кнопку «Сумматор» приборной панели ЭО. Зафиксировать осциллограмму биения;
- 5) Центрировать осциллограмму (определить положение горизонтальной оси). Определить период биения $T_b = 2\pi/\Delta\omega$ и период колебаний $T = 2\pi/\omega$, учитывая масштаб координатной сетки — 1 клетка по оси OX соответствует временному интервалу 110 мс;
- 6) Используя среднее значение чувствительности, определить максимальную амплитуду колебания $U_m = Y_m/2j_Y$ (пример рис. 3.12)

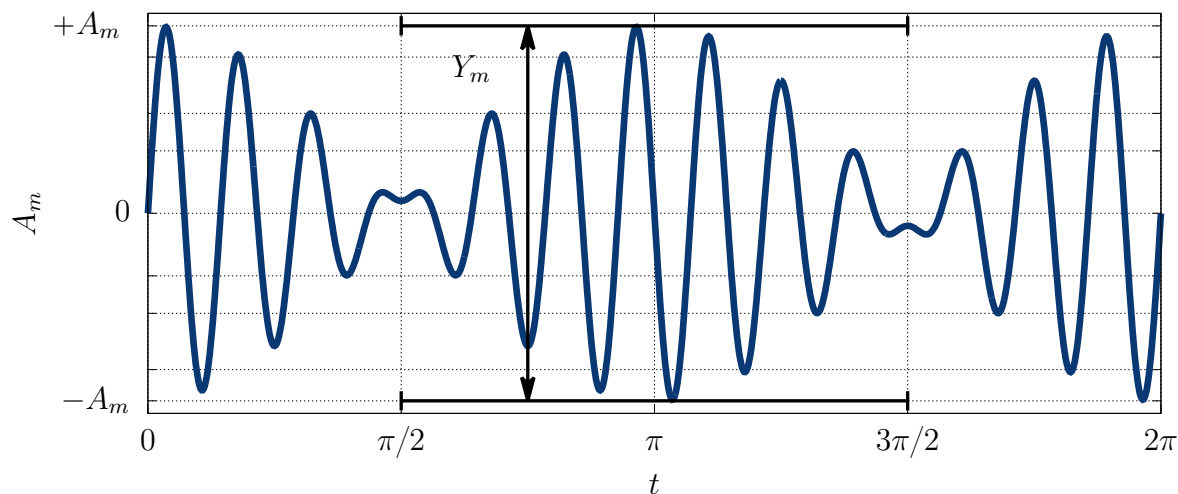


Рис. 3.12 — Определение максимальной амплитуды биения

- 7) Записать уравнение колебаний амплитуды $U_m(t)$ и уравнение результирующего колебания $U(t)$ в соответствующий столбец табл. 3.5;
- 8) Используя любую доступную систему математического программного обеспечения, построить графики амплитуды $U_m(t)$ и $U(t)$. При построении графика амплитуды учесть, что амплитуда — положительная величина.

ВНИМАНИЕ! Не допускается построение графиков вручную, а также с помощью ПО процессоров электронных таблиц (*MS Excel, LibreOffice Calc, Gnumeric* и пр.)! Для построения графика зависимости рекомендуется воспользоваться средствами одной из перечисленных систем – *Maxima, gnuplot, QtiPlot, Wolfram Mathematica, MathCAD* и т. д.

Таблица 3.4 – Исследование сложения колебаний одного направления и близких частот (биения)

№	Исходные условия			
	$U_{m1}, \text{ мВ}$	$U_{m2}, \text{ мВ}$	$\nu_1, \text{ с}^{-1}$	$\nu_2, \text{ с}^{-1}$
1	60	60	13	15
2	40	40	12	10
3	30	30	11	13
4	60	60	12	14
5	30	30	16	14
6	40	40	18	16
7	50	50	10	12
8	70	70	13	11
9	30	30	12	10
10	60	60	16	18
11	70	70	12	14
12	60	60	10	12
13	30	30	14	16
14	80	80	10	8
15	30	30	15	13
16	40	40	10	12
17	50	50	13	11
18	70	70	13	15
19	80	80	12	14
20	50	50	16	14

Таблица 3.5 – Результаты измерений и расчеты

$T_b, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$U_m, \text{ мВ}$	$U_m(t)$	$U(t)$

3.4 Исследование процесса сложения взаимно перпендикулярных колебаний

- 1) Включить генератор звуковой частоты нажав кнопку «Пуск» на приборной панели генератора, включить фиксируемую кнопку канала X. При этом загорятся

- соответствующие индикаторы, размещенные в верхней части панели приборов осциллографа;
- 2) Используя регуляторы генератора, установить параметры колебаний указанные в табл. 3.6 в соответствии с полученным заданием. Зафиксировать осциллограмму колебания напряжения;
 - 3) Записать уравнение колебаний напряжения $U_x(t)$ в соответствующий столбец табл. 3.7. Отключить канал X ЭО;
 - 4) На приборной панели ЭО включить фиксируемую кнопку канала Y . Аналогично предыдущим пунктам, установить исходные параметры колебаний, зафиксировать осциллограмму, и записать уравнение колебаний напряжения $U_y(t)$;
 - 5) Не отключая канал Y , включить фиксируемую кнопку ЭО канала X . Зафиксировать на экране ЭО полученную фигуру Лиссажу. Центрировать положение фигуры относительно координатных осей экрана ЭО;
 - 6) Измерить амплитуду колебаний и определить начальную фазу. Для расчета амплитуды воспользоваться схемой рис. 3.13 (а) и рис. 3.13 (b), использовать выражения:

$$A_X = \frac{X_m}{2};$$

$$A_Y = \frac{Y_m}{2}.$$

Для определения начальной фазы колебаний воспользоваться схемой рис. 3.13 (с) и выражением:

$$\sin \phi_0 = \frac{Y}{Y_m}.$$

- 7) Результаты измерений и расчетов внести в табл. 3.7. Используя одну из рекомендованных систем математического программного обеспечения, построить график траектории точки (на экране ЭО) $Y(X)$.

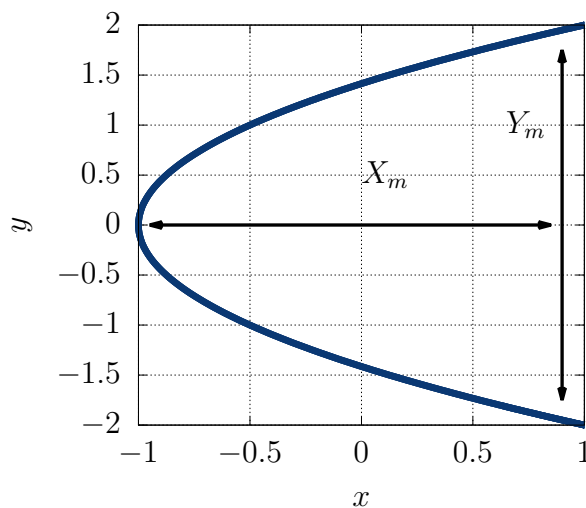
Для построения графика зависимости рекомендуется воспользоваться средствами одной из перечисленных систем — Maxima, gnuplot, QtiPlot, Wolfram Mathematica, MathCAD и т.д. Не допускается построение графиков вручную, а также с помощью ПО процессоров электронных таблиц (MS Excel, LibreOffice Calc, Gnumeric и пр.)!

Таблица 3.6 – Исследование сложения взаимно перпендикулярных колебаний

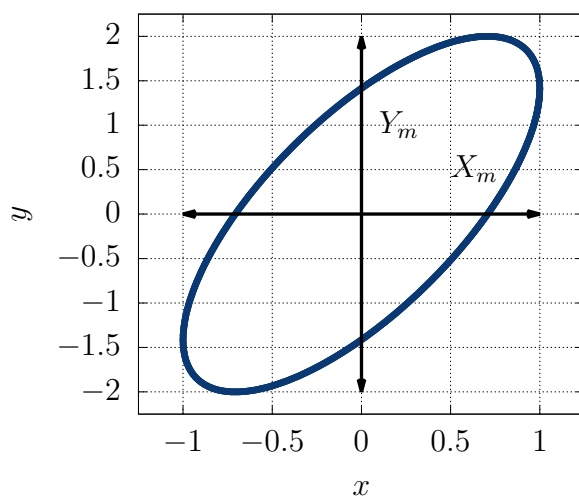
№	Исходные условия				Вид фигуры (рис.)
	U_{mX} , мВ	U_{mY} , мВ	ν_X , с ⁻¹	ν_Y , с ⁻¹	
1	80	120	10	5	3
2	100	80	7	14	2
3	100	100	10	10	8
4	80	80	6	12	2
5	120	160	10	10	9
6	140	80	5	10	4
7	80	120	8	8	7
8	160	160	6	12	4
9	150	150	14	14	8
10	160	100	10	10	6
11	80	140	5	5	7
12	80	120	16	8	1
13	140	100	10	10	6
14	150	130	10	5	3
15	100	100	12	12	5
16	100	80	6	12	4
17	80	120	7	14	2
18	100	120	10	10	9
19	120	120	5	5	5
20	120	140	10	10	8

Таблица 3.7 – Результаты измерений и расчеты

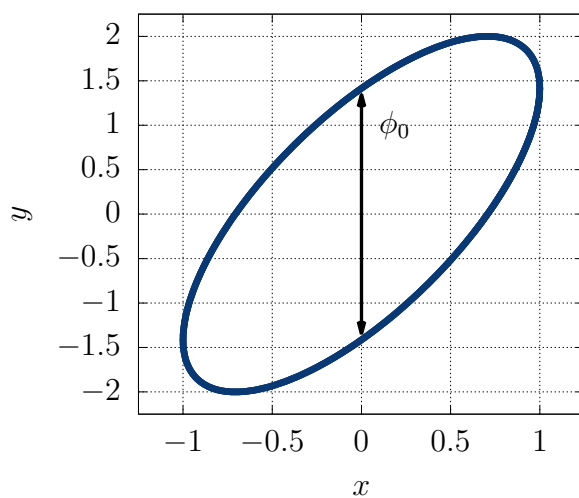
$U_X(t)$	$U_Y(t)$	$X(t)$	$Y(t)$	$Y(X)$



(a) Определение амплитуды

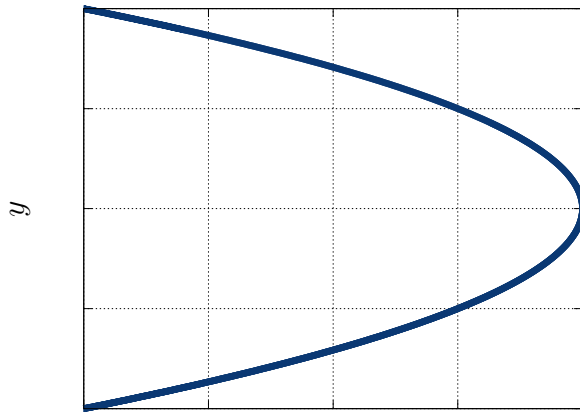


(b) Определение амплитуды

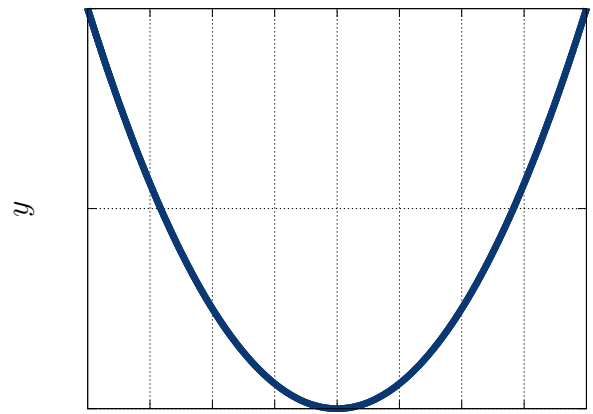


(c) Определение начальной фазы

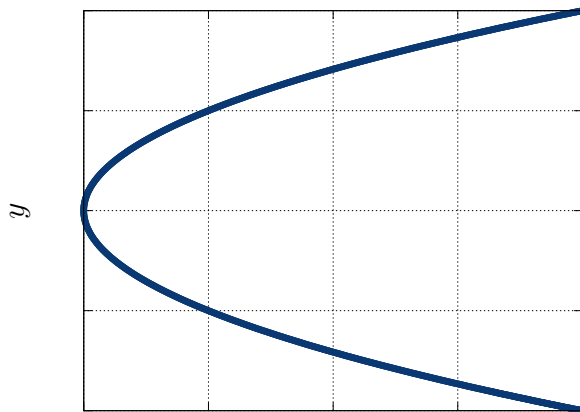
Рис. 3.13 — Определение амплитуды и начальной фазы колебаний



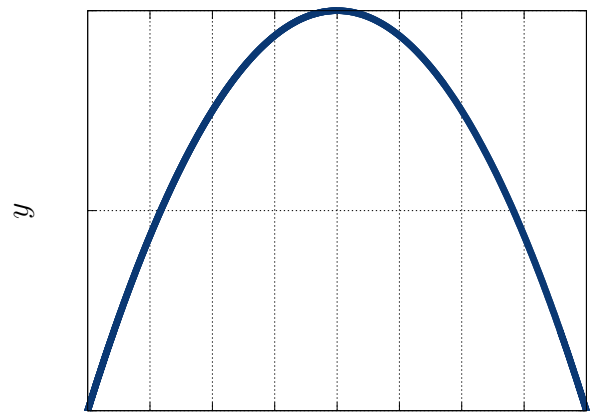
№ 1



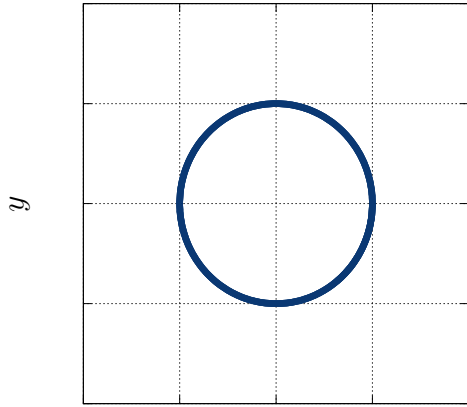
№ 2



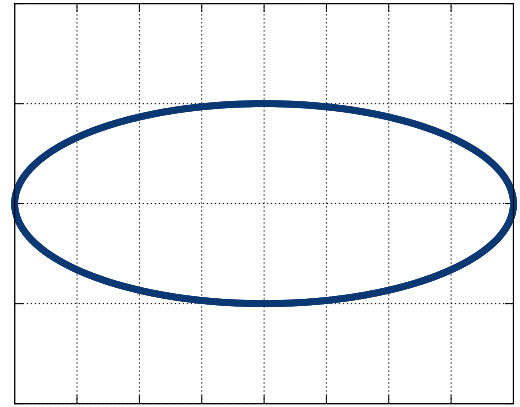
№ 3



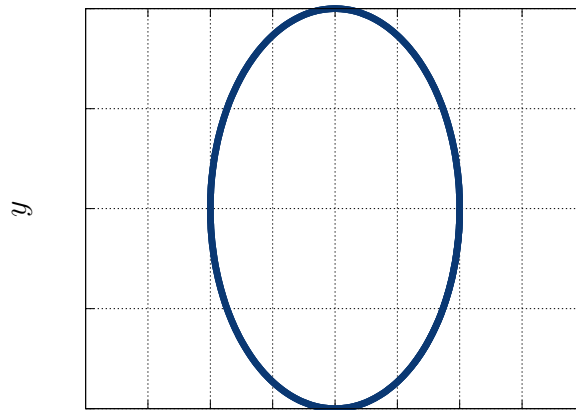
№ 4



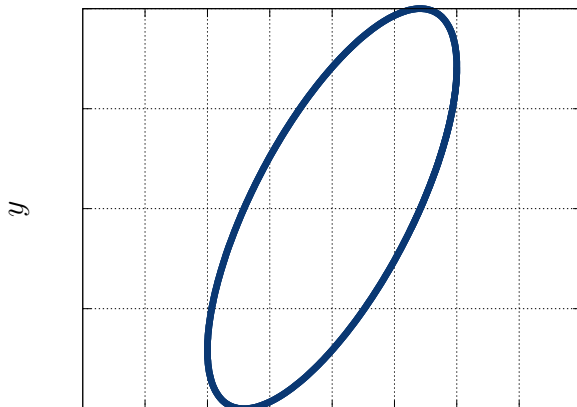
x
№5



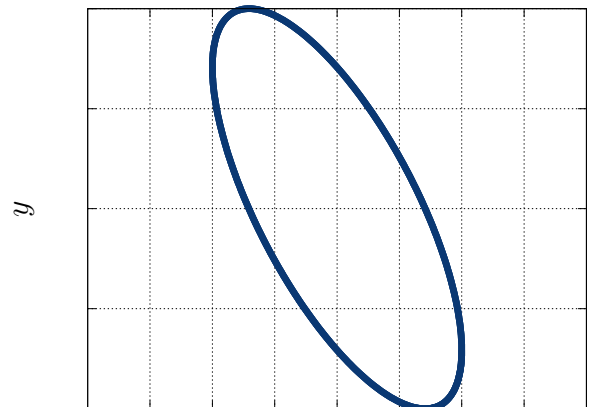
x
№6



x
№7



x
№8



x
№9



Вопросы для допуска и защиты лабораторных работ

Вопросы на допуск

- 1) Перечислите элементы из состава компьютерной программной лабораторной установки (КПЛУ) и процесс их взаимодействия;
- 2) Опишите методику и порядок измерений на основе КПЛУ;
- 3) Объясните принцип отображения колебаний на экране ЭО;
- 4) Перечислите виды колебаний исследуемых в лабораторной работе.

Вопросы на защиту

Сложение колебаний одного направления, равных и близких частот (биения)

- 1) Прокомментируйте график результирующего колебания $U(t)$ при сложении колебаний одного направления и одинаковой частоты, основываясь на перечисленных параметрах колебаний:
 - амплитуда;
 - частота;
 - начальная фаза.
- 2) Опишите векторную диаграмму для определения амплитуды и начальной фазы результирующего колебания;
- 3) Объясните график зависимости амплитуды от времени для биений;
- 4) Объясните, почему на графике биений отклонения, соответствующие соседним максимумам амплитуды, имеют противоположенные знаки;

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

- 1) Определите по уравнениям $X(t)$, $Y(t)$ координаты точек в момент времени $t = 0, T/4, T/2, 3T/4, T$ (или в произвольные моменты времени по заданию преподавателя);

- 2) Укажите направление движения точки на экране ЭО;
- 3) Рассчитайте расстояние от центра координат до графика траектории точки для моментов времени $t = 0, T/4, T/2, 3T/4, T$ (или в произвольные моменты времени по заданию преподавателя).

Рекомендуемая литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие для вузов: в 5 кн. — М. : Астрель, 2003. — Т. 4: Волны. Оптика. — 256 с. — ISBN: 5-271-01306-5.
2. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы. — 7-е, стер. изд. — М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2015. — 264 с. — ISBN: 978-5-9963-1879-1. — (Сер. Технический университет. Общая физика).
3. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. — 11-е, стер. изд. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 560 с. — ISBN: 5-7695-2629-7.
4. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. Том 1. Физические основы механики, молекулярная физика, колебания и волны. — 11-е, стер. изд. — М. : ФИЗМАТГИЗ, 1962. — Т. 1. — 467 с.
5. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. — 8-е, перераб. и испр. изд. — М. : ОНИКС, 2006. — 1056 с.

Указатель таблиц

3.1	Определение чувствительности отклоняющих пластин ЭО	18
3.2	Исследование сложения колебаний одного направления и одинаковых частот	20
3.3	Результаты измерений и расчеты	21
3.4	Исследование сложения колебаний одного направления и близких частот (биения)	23
3.5	Результаты измерений и расчеты	23
3.6	Исследование сложения взаимно перпендикулярных колебаний	25
3.7	Результаты измерений и расчеты	25

Указатель иллюстраций

1.1	Интерфейс программной лабораторной установки	6
1.2	Диалоговое окно загрузки лабораторной установки	7
1.3	Приборная панель электронного осциллографа	7
1.4	Приборная панель генератора звуковой частоты (канал X ЭО)	10
1.5	Приборная панель генератора звуковой частоты (канал Y ЭО)	10
2.6	Векторная диаграмма сложения амплитуд колебаний	11
2.7	График биения	12
2.8	График траектории точки (фигура Лиссажу)	13
2.9	Формирование изображения ЭО с помощью ЭЛТ	15
2.10	Блок-схема подключения приборов лабораторной установки	16
3.11	Определение амплитуды и начальной фазы результирующего колебания	19
3.12	Определение максимальной амплитуды биения	22
3.13	Определение амплитуды и начальной фазы колебаний	26

**Первушина Марина Олеговна
Небаев Игорь Алексеевич**

Колебания и волны
Руководство к лабораторным работам
по исследованию гармонических колебаний
с помощью электронного осциллографа
в среде компьютерной программной установки

Учебно-методическое пособие

Редактор _____

Верстка _____

План _____ г., п. _____

Подписано к печати _____

Объем _____ усл.-печ. л. Тираж _____ экз. Заказ _____
РИЦ С-Пб ГУТ. 191186 С-Пб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в С-Пб ГУТ

