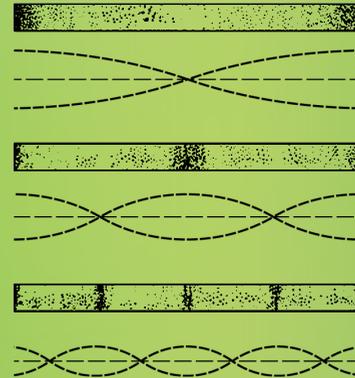
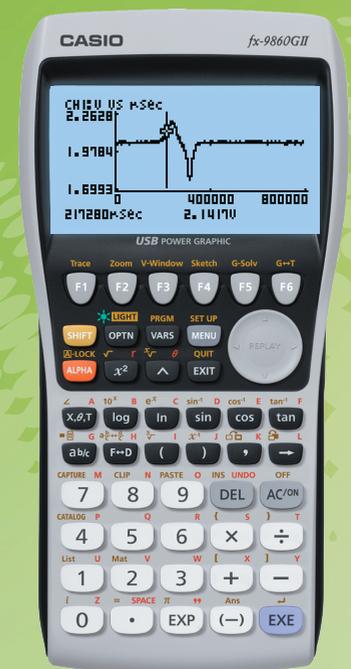
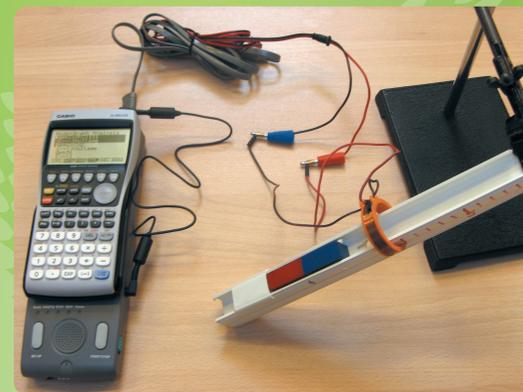


ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА EA-200 – fx-9860GII



Выпуск 2

Осциллографические исследования и акустика



И. Е. Вострокнутов, Г. Г. Никифоров, Н. С. Никитина,
Н. В. Андреева, Л. С. Орлова

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
*EA-200 – fx-9860GII***

Выпуск 2

**ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
И АКУСТИКА**

Под ред. И. Е. Вострокнутова, Г. Г. Никифорова

Москва
2011

УДК 53.(076.5)

ББК 22.3я721

Вострокнутов И. Е., Никифоров Г. Г., Никитина Н. С., Андреева Н. В., Орлова Л. С.

Л12 Лабораторный практикум по физике на основе цифрового измерительного комплекса *EA-200 – fx-9860GII*. Выпуск 2. Осциллографические исследования и акустика / И. Е. Вострокнутов, Г. Г. Никифоров, Н. С. Никитина, Н. В. Андреева, Л. С. Орлова. Под ред. И. Е. Вострокнутова, Г. Г. Никифорова. – Троицк: Тривант, 2011. – 56 с.

ISBN 978-5-89513-246-3

Во втором выпуске представлены подробные руководства по выполнению лабораторных работ практикума по физике, поставленных на базе цифрового измерительного комплекса *EA-200 – fx-9860GII*.

Методические материалы одновременно выполняют две функции: являются методическим пособием для учителя и руководством для ученика по выполнению лабораторных работ. Выполнение работ полезно для подготовки учащихся к ЕГЭ. В состав лабораторного набора входит цифровой измерительный комплекс с полным комплектом датчиков, а также все необходимое для проведения работ практикума дополнительное оборудование.

Методическое пособие может быть использовано для работы с графическими калькуляторами CASIO серий *fx-CG20*, *fx-9860G*, *fx-9750GII*, *fx-7400GII*, ALGEBRA FX-2.0 PLUS в составе цифрового измерительного комплекса.

УДК 53.(076.5)

ББК 22.3я721

ISBN 978-5-89513-246-3

© CASIO, 2011

Введение

В данном выпуске рассмотрено использование цифрового измерительного комплекса *EA-200 – fx-9860GII* для проведения лабораторных работ из разделов «Переменный ток» и «Акустика», а также работ, направленных на развитие инженерно-технических и конструкторских способностей учащихся при организации практикума по физике в 10–11 классах.

Приведенные материалы показывают, что измерительный комплекс *EA-200 – fx-9860GII* не только на равных конкурирует с измерительными комплексами на базе компьютера, но и имеет целый ряд преимуществ: не требует программирования, работает без сценариев, позволяет построить любую функцию по результатам измерений, снимает проблему организации вычислений, содержит встроенный режим статистической обработки экспериментальных данных.

Второй выпуск состоит из двух частей. В первой из них рассмотрено применение измерительного комплекса для исследования быстрых процессов, особенно таких, на базе которых конструируются задания ЕГЭ. В этой части впервые представлена работа по исследованию явления электромагнитной индукции при прохождении магнита сквозь катушку. Во второй части впервые в РФ рассмотрена постановка работ по акустике на основе спектрального анализа звуковых колебаний.

Поставляемое оборудование содержит не только цифровой измерительный комплекс *EA-200 – fx-9860GII* с полным набором датчиков, но и все необходимое оборудование для проведения работ, представленных в первом и втором выпусках методических материалов.

И. Е. Вострокнутов, д.п.н., профессор, научный руководитель образовательных программ CASIO в РФ и странах СНГ

Часть 1. ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС *EA-200 – fx-9860GII* – ОСЦИЛЛОГРАФ

Работа 1.

Исследование выходных напряжений выпрямителя ВУ-4М

I. Оборудование и цель исследования



Рис. 1.1

Оборудование (рис. 1.1): цифровой анализатор данных *EA-200*; графический калькулятор *fx-9860GII*; кабель для обмена данными между *EA-200* и *fx-9860GII*; датчик (зонд) напряжения; ВУ-4М; вольтметр постоянного тока 6 В; лампа автомобильная 12 В; проводники; выключатель.

Цель исследования. При выполнении этого исследования вы научитесь анализировать переменные напряжения и токи. Выполняя работу, вы убедитесь в том, что вольтметр магнитоэлектрической системы

для этих целей использовать нельзя. Его стрелка соединена с рамкой, находящейся в магнитном поле постоянного магнита. При протекании по рамке постоянного тока она поворачивается до тех пор, пока момент силы Ампера не уравновесит момент силы упругости пружины, соединенной с рамкой. В цепи переменного тока сила Ампера изменяется в соответствии с приложенным напряжением и совершает вынужденные колебания. Их амплитуда при большой частоте стремится к нулю. Цифровой измерительный комплекс *EA-200 – fx-9860GII* – это электронная система, не имеющая движущихся частей, она может проводить измерения при любых частотах.

II. Явления, процессы, физические величины

Колебательные процессы в природе и технике.

Колебательные и волновые процессы часто встречаются в природе и технике. Движение периодически работающих машин, акустические явления, переменный ток, применяющийся в быту и в разнообразных технических устройствах, радиотехника, электроника, волновая оптика, волновые свойства частиц – вот далеко не полный перечень явлений и технических приложений, описываемых на языке колебательных и волновых процессов.

Из курса физики 10 класса вы узнали, что из всех видов разнообразных периодических процессов особое место занимают гармонические колебания, происходящие по законам:

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_{01}), \quad (1.1)$$

$$x = x_m \sin(\omega t + \varphi_{02}), \quad (1.2)$$

где x – координата частицы в момент времени t ;
 x_m – амплитуда колебаний.

Выражение $(\omega t + \varphi_0)$ называется фазой колебаний, φ_0 – начальной фазой, ω – циклической частотой.

Если груз на нити отвести на некоторый угол и отпустить, то колебательное движение груза удобно описать выражением:

$$x = x_m \cos \omega t$$

(начальная фаза равна нулю).

Если возбудить колебания, сообщив грузу некоторую начальную скорость, то удобнее пользоваться выражением:

$$x = x_m \sin \omega t$$

(начальная фаза равна $\frac{\pi}{2}$).

Колебания, описываемые формулами (1.1) и (1.2), отличаются только фазами. Разность фаз (сдвиг фаз) колебаний $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$. Изменение фазы на 2π происходит через промежуток времени $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

T – это период колебаний. Физическая величина, обратная периоду, называется частотой колебаний ν ($\nu = \frac{1}{T}$) и измеряется в герцах (Гц).

$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. Между частотой колебаний ν и циклической частотой ω существует соотношение: $\omega = 2\pi\nu$. Следовательно, циклическая частота равна числу колебаний, происходящих за 2π секунд.

Особое внимание, уделяемое в физике и технике гармоническому движению, объясняется, прежде всего, тем, что большое количество физических систем совершает с очень большой степенью точности гармонические движения. Более того, любой периодический негармонический процесс может быть представлен как сумма гармонических составляющих с различными частотами амплитудами.

В общем случае гармонического колебательного движения материальной точки вдоль оси OX можно записать соответствующие уравнения для изменения во времени проекций скорости и ускорения.

Скорость – это производная по времени от координаты, ускорение – производная по времени от скорости. Как вам известно из курса алгебры и начал анализа, производная некоторой функции $f(t)$ определяется как $f'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta t}$. Обозначим производную от времени: $f'(t) = f'$.

f' сама является некоторой функцией, поэтому от нее также можно взять производную $(f')'$. Для функции $f(t)$ это вторая производная: f'' .

В курсе анализа первая производная записывается как $f' = \frac{df}{dt}$ (читается: «дэ f по дэ t »). Вторая производная обозначается: $f'' = \frac{d^2 f}{dt^2}$ (читается: «дэ два f по дэ t дважды»). Таким образом, если

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1.3)$$

то

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = x' = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0), \\ a_x &= \frac{d^2 x}{dt^2} = x'' = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (1.4)$$

Оказывается, и скорость, и ускорение также изменяются по гармоническому закону. Этот факт объясняет широкое применение гармонических колебаний в технике.

Из выражений (1.3) и (1.4) следует важнейшее соотношение между ускорением и смещением при гармонических колебаниях:

$$x'' = -\omega^2 x.$$

Это уравнение гармонических колебаний, связывающее величину x с ее второй производной, справедливо не только для механических явлений. Величиной x может быть электрический заряд q . В этом случае и сила тока (первая производная от заряда по времени), и ЭДС самоиндукции $e_{\text{си}} = -Li' = -Lq''$ изменяются по гармоническому закону.

Графическое представление гармонических колебаний.

Гармонические колебания можно представить графически. Рассмотрим три способа: плоские, спектральные и векторные диаграммы.

В *плоских диаграммах* по оси абсцисс откладывают время, по оси ординат – исследуемую величину x . Это может быть: смещение, скорость, ускорение, электрический заряд, сила тока, напряжение и т.д. Такие диаграммы (рис. 1.2) легко получаются на экране осциллографа.

Спектральные диаграммы представляют интерес, если в условиях конкретной задачи фазовые соотношения не существенны. По оси абсцисс откладывается частота, по вертикали – амплитуда или энергия колебаний. Для гармонического колебания спектр состоит из одной вертикальной линии (рис. 1.3).

Однако ни один реальный периодический процесс не происходит в точности по гармоническому закону. Прежде всего, любой такой процесс имеет начало и конец во времени, и, следовательно, колебание ограниченной длительности не является гармоническим.

Проиллюстрируем этот важный факт: включим генератор гармонических колебаний. Установившийся режим достигается за несколько периодов. После выключения генератора также потребуются несколько периодов для исчезновения колебаний.

Получившийся цуг колебаний представлен на рис. 1.4.

Для определения частоты колебаний необходимо полное число циклов цуга N разделить на интервал времени Δt , в течение которого работал генератор:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Однако точное число цугов определить невозможно, так как на обоих концах цуга существует неопределенность порядка $\pm \frac{1}{2}$ цикла, т.е. абсолютная ошибка в определении числа циклов $\Delta N = 1$. Эта погрешность приводит к неопределенности $\Delta \nu$ при вычислении частоты:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta N}{N} \approx \frac{1}{N}. \quad (1.6)$$

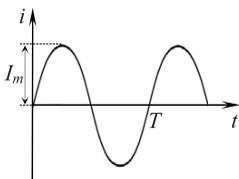


Рис. 1.2

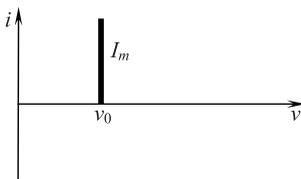


Рис. 1.3

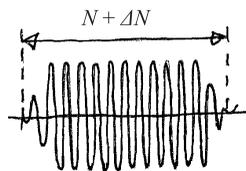


Рис. 1.4

Из выражений (1.5) и (1.6) получим:

$$\Delta v = \frac{1}{\Delta t}. \quad (1.7)$$

Анализ очень важного соотношения (1.7) показывает, что только в случае бесконечности колебательного процесса ($\Delta t \rightarrow \infty$) величина Δv равна нулю и колебания можно считать строго гармоническими. Представление о гармонических колебаниях является таким же идеализированным модельным понятием, как «материальная точка» и «абсолютно твердое тело».

Спектральная диаграмма реального, близкого к гармоническому, колебания – слегка уширенная. На рис. 1.5 показана спектральная диаграмма такого колебания, полученного с помощью специального прибора – спектроанализатора.

Спектрограмма негармонического колебания (рис. 1.6 а) состоит из ряда вертикальных полос (рис. 1.6б).

Векторные диаграммы. На плоскости выбирают произвольную ось X и начало координат на ней (рис. 1.7). Изучаемая гармоническая величина представляется вектором, имеющим длину, пропорциональную амплитуде, и составляющим с осью угол, равный начальной фазе. Тогда проекция вектора на ось определяет мгновенное значение величины в данный момент времени: $x = x_m \cos \varphi$.

Если вектор равномерно вращается вокруг начала координат с периодом T , то в любой момент его проекция на ось дает мгновенное значение исследуемого смещения. Условились считать положительным вращение вектора против часовой стрелки: $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$.

Ценность метода векторных диаграмм выяснится при изучении законов переменного тока и сложении нескольких колебаний с одинаковой частотой.

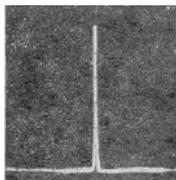
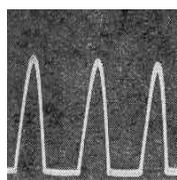
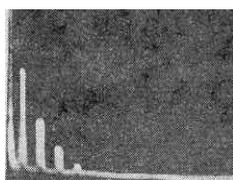


Рис. 1.5



а)



б)

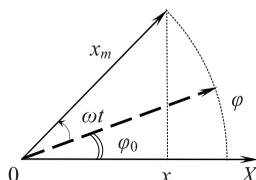


Рис. 1.7

III. Возможный вариант выполнения исследования

Лабораторный выпрямитель ВУ-4М (рис. 1.8) состоит из понижающего трансформатора и двух диодов (рис. 1.9).



Рис. 1.8



Рис. 1.9

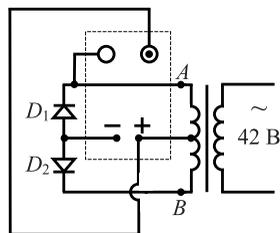


Рис. 1.10

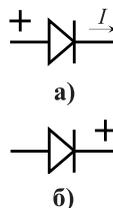


Рис. 1.11

Схема выпрямителя представлена на рис. 1.10. На ней «+» и «-» – клеммы постоянного напряжения; «○» и «⊙» – клеммы, позволяющие получить переменное напряжение (~); D_1 и D_2 – диоды.

Напомним, что направление вершины треугольника в обозначении диода – это направление, в котором ток (в идеальной модели) проходит без сопротивления (рис. 1.11а). Такое направление называется *прямым*. Для этого «основание» треугольника должно иметь положительный потенциал. При обратном включении (рис. 1.11б) сопротивление диода (в идеальной модели) бесконечно, ток через него не идет.

Теперь легко объяснить «происхождение» напряжений между любой парой клемм, выведенных на корпус выпрямителя.

Задание 1. Изучение выходных напряжений лабораторного выпрямителя ВУ-4М аналоговыми приборами.

1. Сборка измерительной установки.

В исследованиях а)–д) лампа подключается к заданным клеммам ВУ-4М. Параллельно ей подсоединяется вольтметр постоянного тока.

2. Проведение измерения.

а) Напряжение между клеммами «⊙» и «○».

Если на первичной катушке трансформатора напряжение переменное, на вторичной катушке напряжение тоже переменное.

Пусть между концами AB вторичной катушки (см. рис. 1.10) напряжение изменяется по закону: $u_{AB} = U_{AB} \cos \omega t$ (рис. 1.12а). Клеммы «⊙» и «○» подключены к половине катушки. Следовательно, (в идеальной модели) напряжение между ними изменяется по закону:

$u_1 = U_{01} \cos \omega t$, где $U_{01} = \frac{U_{AB}}{2}$ (рис. 1.12б). Соединенная с этими клем-

мами лампа светится, но вольтметр ничего не показывает (рис. 1.13).

Почему же вольтметр ничего не показывает? Дело в том, что рамка не успевает реагировать на силу Ампера, которая изменяется с периодом 0,02 с.

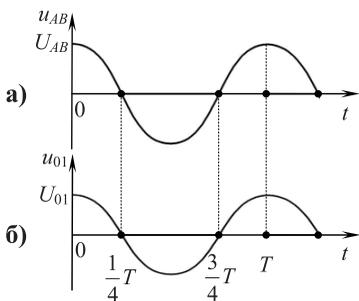


Рис. 1.12

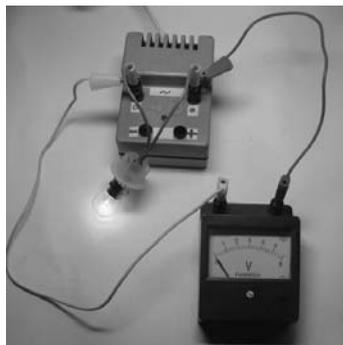


Рис. 1.13

Мощность переменного тока, выделяющаяся на лампе:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U_{01}^2}{2R},$$

где U – действующее значение напряжения.

б) Напряжение между клеммами «+» и «-».

При $u_{AB} = U_{AB} \cos \omega t$ в первую четверть периода точка A имеет положительный потенциал, B – отрицательный (рис. 1.10; 1.14а). В каком направлении идет ток через лампу, подключенную к клеммам «+» и «-»?

В этот промежуток периода диод D_1 заперт, через него ток не идет; диод D_2 открыт, через него идет ток. В первую четверть периода через лампу ток идет справа налево (рис. 1.14б; рис. 1.15а).

В промежутке времени от $\frac{T}{4}$ до $\frac{3}{4}T$ конец B катушки имеет положительный потенциал, конец A – отрицательный (рис. 1.10, 1.14а).

В этот промежуток периода диод D_1 открыт, диод D_2 – закрыт. Ток через лампу вновь идет справа налево (рис. 1.15б, 1.14б).

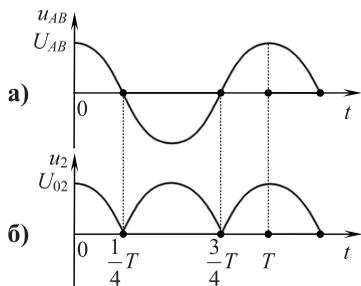


Рис. 1.14

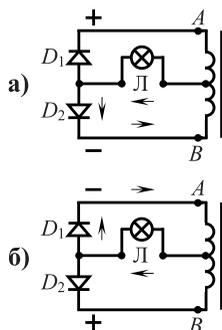


Рис. 1.15

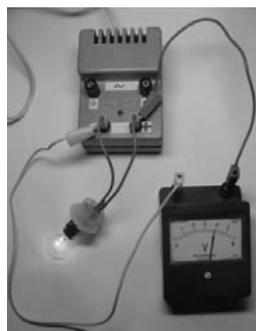


Рис. 1.16

Итак, напряжение между клеммами «+» и «-» выпрямителя изменяется по закону: $u_2 = U_{02}|\cos\omega t|$. Оказывается, оно вовсе *не постоянное*, а пульсирующее. Аналогия с постоянным напряжением ограничивается лишь тем, что под действием этого напряжения ток через лампу всегда идет в одном направлении (рис. 1.15).

Вольтметр постоянного тока *напряжение* показывает (рис. 1.16), потому что сила Ампера изменяется по модулю, а не по направлению: рамка реагирует на некоторое среднее значение момента силы Ампера.

в) Напряжение между клеммами «+» и «0» (рис. 1.17, 1.18).

Включение лампы между клеммами «+» и «0» (рис. 1.17) аналогично ее присоединению к клеммам «0» и «0». Значит, между клеммами «+» и «0» напряжение изменяется по закону $u_1 = U_{01}\cos\omega t$ (см. п. а).

з) Напряжение между клеммами «+» и «0».

Подключенная к клеммам «+» и «0» лампа (рис. 1.17, 1.19) не будет светиться, и понятно, почему: ведь эти клеммы внутри выпрямителя соединены проводом (провод *П* на рис. 1.17).

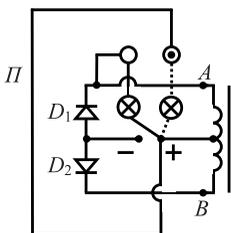


Рис. 1.17

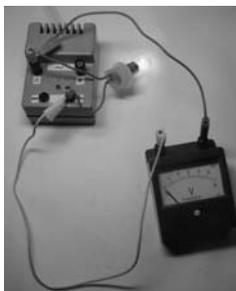


Рис. 1.18



Рис. 1.19

д) Напряжение между клеммами «-» и «0» (рис. 1.20, 1.21).

Подключение лампы к этим клеммам эквивалентно ее включению между клеммами «+» и «-». Ведь клемма «+» внутри выпрямителя соединена проводом с клеммой «0».

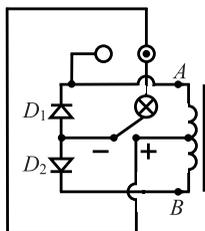


Рис. 1.20

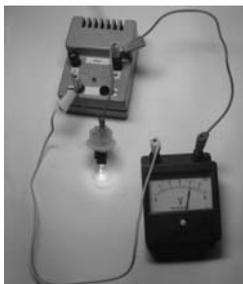


Рис. 1.21

е) Напряжение между клеммами «-» и «О» (рис. 1.22, 1.23).

Лампа, подключенная к этим клеммам, светится, но слабее по сравнению с ее подключением к клеммам «+» и «-» или «-» и «О»: вольтметр показывает некоторое среднее значение. Чтобы разобраться, схему (рис. 1.22) начертим по-другому (рис. 1.24).

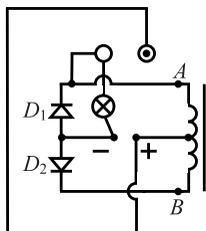


Рис. 1.22

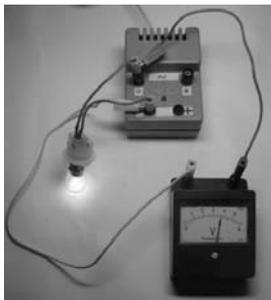


Рис. 1.23

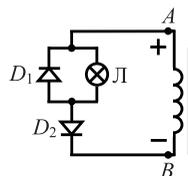


Рис. 1.24

В первую четверть периода точка A имеет положительный потенциал (рис. 1.25). Диод D_1 закрыт, диод D_2 – открыт. Ток проходит через лампу и диод D_2 (рис. 1.26). В промежутке времени от $\frac{1}{4} T$ до $\frac{3}{4} T$ точка B катушки имеет положительный потенциал, диод D_2 закрыт, ток не идет (рис. 1.27).

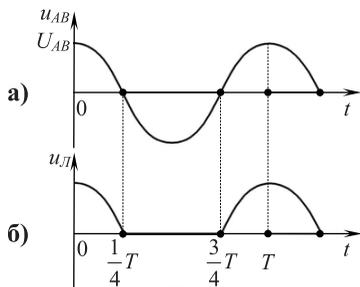


Рис. 1.25

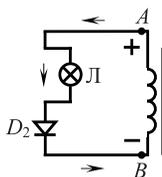


Рис. 1.26

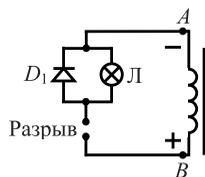


Рис. 1.27

Задание 2. Изучение выходных напряжений лабораторного выпрямителя ВУ-4М с использованием цифрового комплекса.

Цифровой измерительный комплекс позволяет проанализировать графики всех напряжений на выходе выпрямителя ВУ-4М.

1. Сборка измерительной установки.

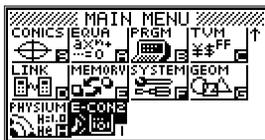
В каждом из исследований а)–д) лампа подключается к заданным клеммам ВУ-4М. Параллельно лампе подсоединяется датчик напряжения цифрового измерительного комплекса.

2. Настройка оборудования и подготовка к измерению.

2.1. Включение EA-200 и fx-9860GII.

Соедините EA-200 и fx-9860GII кабелем. Датчик напряжения вставьте в порт CN1 цифрового анализатора данных.

Включите калькулятор, нажав клавишу **AC/ON**. В главном меню (MAIN MENU) клавишей **REPLAY** переместите выделение черного цвета на пиктограмму режима E-CON2 и нажмите **EXE** для входа в него.

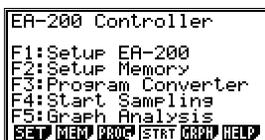


Быстрый способ перехода к нужному режиму – нажать букву или цифру, расположенную в правом нижнем углу соответствующей пиктограммы. Для режима E-CON2 это буква I. Она вводится последовательным нажатием клавиш **ALPHA** и **I** (I).

Для включения EA-200 переместите зеленый переключатель ON/OFF в направлении стрелки до упора и сразу же его отпустите. EA-200 можно не включать: при обращении калькулятора к анализатору данных он включится автоматически.

2.2. Настройка EA-200 на измерение напряжения.

В главном меню режима E-CON2



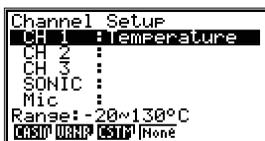
нажмите **F1** (SET) для входа в меню настройки анализатора. В нижней строке экрана появятся пиктограммы двух подменю выбора параметров: WIZ (мастер настройки) и ADV (ручная настройка):



Нажмите **F2** для выбора ADV. Откроется меню ручной настройки:

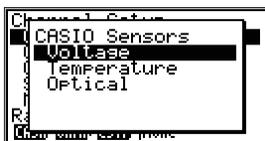


В нем нажмите **1** (Channel) для входа в подменю выбора канала подключения датчика:

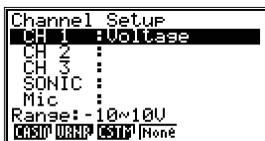


В этом окне клавишей **REPLAY** переместите выделение на строку CH1. Теперь все последующие настройки будут относиться к каналу CH1 анализатора EA-200.

Нажмите **F1** (CASIO) для входа в подменю выбора датчиков производства CASIO, входящих в комплект измерительного комплекса. На экране появится список датчиков:



Клавишей **REPLAY** выделите нужный датчик (в данном случае Voltage – напряжение) и нажмите **EXE**. В строке CH1 справа от двоеточия появится надпись Voltage, означающая, что канал CH1 настроен на прием данных от датчика напряжения.



Нажмите **EXIT** для возврата в меню ручной настройки.



2.3. Настройка пределов измерения во времени и шага замеров.

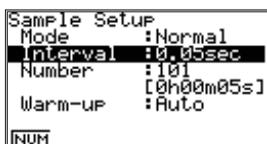
В меню ручной настройки нажмите клавишу **2** (Sample) для входа в подменю настройки параметров измерений:



Клавишей **REPLAY** выделите строку Mode (режим проведения измерений). В ней задается наиболее удобный из встроенных режимов измерений. Режимы различаются диапазоном интервала между соседними замерами. Выберите режим Normal (нормальный), нажав **F1** (Norm).



Переместите выделение на строку Interval (шаг). В этой строке задается временной интервал между соседними замерами, то есть шаг, в пределах выбранного режима проведения измерений.



Нажмите **F1** (NUM) для изменения шага: откроется окно, в которое необходимо ввести нужную величину шага в пределах указанного на экране интервала.



Шаг выбирается произвольно в рамках возможного интервала.

От шага зависит точность проводимых измерений. Например, в данном случае период колебаний переменного напряжения не превосходит 0,02 с. Если мы хотим исследовать два периода, то полное время измерения составит 0,04 с.

При интервале между соседними замерами 0,0005 с число замеров составит $\frac{0,04}{0,0005} = 80$. Погрешность определим как частное макси-

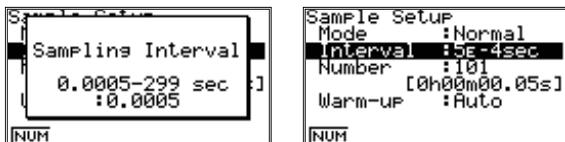
мального напряжения и числа замеров $\frac{5\text{ В}}{80} = 0,06\text{ В}$. Для данной работы она вполне допустима.

Если же мы хотим провести измерения с погрешностью не более 0,01 В, тогда $\frac{5\text{ В}}{0,01} = 500$, то есть нужно провести не менее 500 замеров.

Следовательно, шаг между замерами составит $\frac{0,04}{500} = 0,00008$ с или

80 мкс и в строке Mode потребуется выбрать режим быстрых измерений Fast (**F2**).

Введите число 0,0005 и нажмите **EXE** для сохранения заданного значения и возврата в подменю настройки параметров опыта.



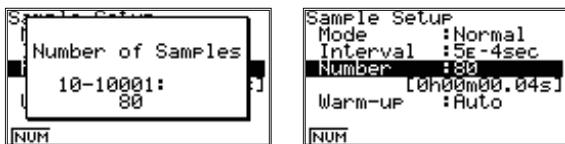
Переместите выделение в строку Number (количество замеров). В этой строке задается количество замеров, которые выполнит EA-200 в процессе измерения. В этой же строке в квадратных скобках указывается полная длительность измерения, рассчитываемая калькулятором по заданным шагу и количеству замеров.



Нажмите **F1** для изменения количества замеров: откроется окно, в которое необходимо ввести нужное число в пределах указанного на экране интервала.



Введите число 80 и нажмите **EXE** для сохранения введенного значения и возврата в подменю настройки параметров опыта.



Теперь в квадратных скобках в строке Number полная длительность измерения составляет 0,04 с.

Нажмите **EXIT** для возврата в окно ручной настройки.



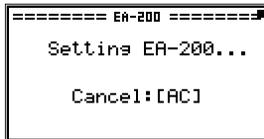
3. Проведение измерения.

Для проведения измерения нажмите **[F1]** (STRT – сокращ. от англ. start). На экране появится запрос о проверке готовности комплекса к выполнению измерения, а именно:

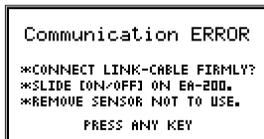
- 1) IS THE SENSOR CONNECTED? – Подключен ли датчик?
- 2) CONNECT LINK-CABLE FIRMLY? – Прочно ли закреплен кабель связи калькулятора с *EA-200*?
- 3) IS SAMPLING DONE? – Заданы ли параметры измерения?



Параметры измерения были заданы в пунктах 2.2 и 2.3. Проверьте подключение датчика и кабеля и нажмите **[EXE]**. Калькулятор приступит к подготовке *EA-200* к проведению измерения. В это время на экране отображается информационно-диалоговое окно:

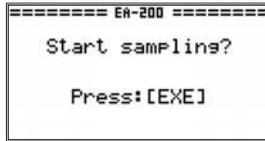


Если хотя бы одно из условий окажется невыполненным, калькулятор выдаст сообщение об ошибке – Communication ERROR:



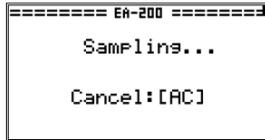
Нужно нажать любую клавишу калькулятора для возврата в меню настроек, проверить правильность подключения датчика, соединительного кабеля и соответствие настроек используемому датчику. Затем следует повторно нажать **[F1]** (STRT) для проведения измерения.

Если комплекс готов к работе, появится запрос на проведение измерения: Start sampling? (начать измерения?) – и указание нажать **[EXE]** для проведения измерения:



a) Напряжение между клеммами «O» и «O».

Нажмите **[EXE]**: EA-200 начнет проводить замеры. В это время на дисплее калькулятора отображается диалоговое окно, информирующее о проведении измерения:



Измерение завершается выводом на дисплей калькулятора графика (рис. 1.28) зависимости напряжения в электрической цепи от времени (горизонтальная ось – время, вертикальная ось – напряжение в цепи).

4. Обработка результатов эксперимента.

Просканируем полученный график зависимости напряжения от времени и определим период, частоту и амплитуду колебаний.

Для входа в режим трассировки Trace нажмите **[F1]** (Trace): на графике появится курсор в виде крестика, а в нижней строке экрана будут отображаться его текущие координаты. Перемещение курсора по графику осуществляется стрелками вправо/влево клавиши **[REPLAY]**.

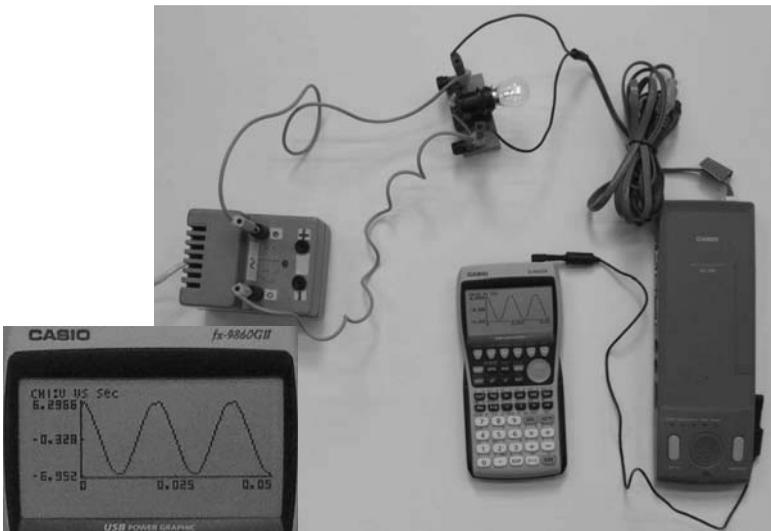


Рис. 1.28

Для нахождения периода выберите любое мгновенное значение напряжения и соответствующий ему момент времени. Например, на рис. 1.29 мы видим, что в момент времени 0,0185 с от начала измерения напряжение составляет 0,7303 В.

Переместим курсор вправо до точки, в которой напряжение совпадет с первым измеренным. Но будьте внимательны, это напряжение встретится вам два раза. Надо взять то из них, которое совпадает с первым по фазе. Из-за наличия погрешностей, связанных с выбранным шагом измерений, мы можем не найти на кривой точно совпадающее значение напряжения. Ближайшее к 0,7303 В значение напряжения, 0,7198 В, зафиксировано в момент времени 0,0385 с (рис. 1.30).

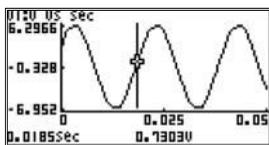


Рис. 1.29

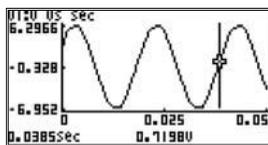


Рис. 1.30

По результатам исследования заполните таблицу:

$U_{\text{мгновенное}}, \text{ В}$	$t, \text{ с}$	$T = t_2 - t_1, \text{ с}$	$\nu = \frac{1}{T}, \text{ Гц}$

Для нахождения амплитуды нужно из максимального значения напряжения вычесть минимальное и полученное число поделить пополам. Возможные результаты представлены на рис. 1.31, 1.32.

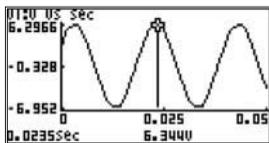


Рис. 1.31

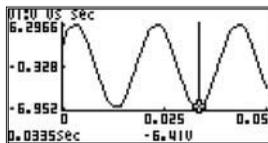


Рис. 1.32

Проведите измерения и заполните таблицу:

$U_{\text{max}}, \text{ В}$	$U_{\text{min}}, \text{ В}$	$U_0, \text{ В}$

Проведите исследование напряжений между клеммами:

б) «+» и «-»,

в) «+» и «0»,

з) «+» и «○»,

д) «-» и «○»,

е) «-» и «○».

Возможные экспериментальные графики напряжений между клеммами «+» и «-», «-» и «○» приведены, соответственно, на рис. 1.33, 1.34.

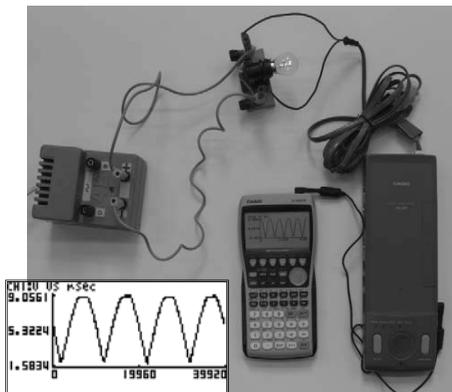


Рис. 1.33

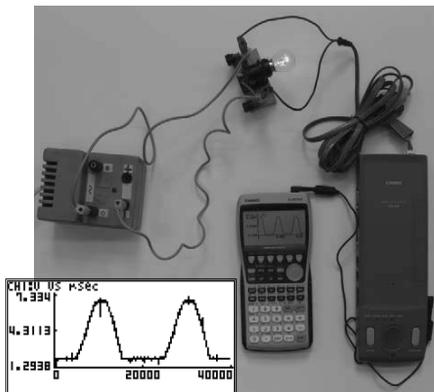


Рис. 1.34

Работа 2.

Исследование сдвига фаз между током и напряжением при последовательном соединении резистора и конденсатора

I. Оборудование и цель исследования



Рис. 2.1

Оборудование (рис. 2.1): цифровой анализатор данных EA-200; графический калькулятор fx-9860GII; кабель для обмена данными между EA-200 и fx-9860GII; два датчика (зонда) напряжения; источник напряжения ВУ-4М; неполярный электролитический конденсатор 220 мкФ; реостат с максимальным сопротивлением 10 Ом; потенциометр.

Цель исследования. При выполнении этого исследования вы научитесь анализировать одновременно два гармонических напряжения с использованием цифрового измерительного комплекса в качестве двухканального осциллографа.

Объектом является электрическая цепь, состоящая из последовательно включенных конденсатора и резистора, подключенных к источнику гармонического напряжения.

II. Явления, процессы, физические величины

При выполнении работы практикума по исследованию зависимости от времени напряжения на конденсаторе, подключенном к источнику постоянного тока через резистор (рис. 2.2), было выяснено, что напряжение на конденсаторе растет в соответствии с законом (рис. 2.3):

$$U = U_0 - U_0 e^{-\frac{t}{R \cdot C}}.$$

Исследуем амплитудные и фазовые соотношения при подключении конденсатора к источнику гармонического напряжения.

Пусть конденсатор емкостью C подключен к источнику гармонического напряжения:

$$u = u_m \cos \omega t.$$

Заряд конденсатора будет изменяться в соответствии с законом:

$$q = cu = Cu_m \cos \omega t.$$

Сила тока в проводах, соединяющих конденсатор с источником:

$$\begin{aligned} i &= q' = (Cu_m \cos \omega t)' = -\omega Cu_m \sin \omega t = \omega Cu_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \\ &= i_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \end{aligned}$$

Отсюда можно сделать два вывода:

1) Амплитуда силы тока, проходящего через конденсатор,

$$i_m = \omega C u_m.$$

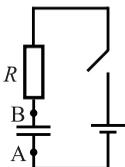


Рис. 2.2

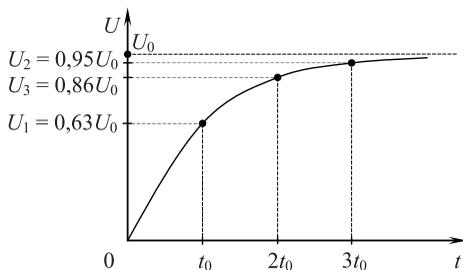


Рис. 2.3

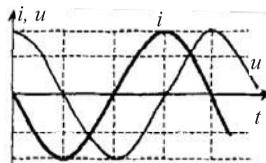


Рис. 2.4

2) Фаза гармонического тока, проходящего через конденсатор, опережает фазу колебаний напряжения на нем на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 2.4).

Запишем выражение $i_m = \omega C u_m$ в виде

$$i_m = \frac{u_m}{\frac{1}{\omega C}}.$$

Величина $X_C = \frac{1}{\omega C}$ называется емкостным сопротивлением конденсатора. График зависимости X_C от ω представлен на рис. 2.5.

Оценим для примера емкостное сопротивление конденсатора емкостью 220 мкФ при частоте 50 Гц:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1000000}{314 \cdot 220} \approx 14,5 \text{ (Ом)}.$$

Пользуясь полученными результатами и методом векторных диаграмм, выясним, какой ток пойдет через включенные последовательно резистор и конденсатор, подключенные к источнику гармонического напряжения.

Пусть сила тока в электрической цепи (рис. 2.6) $i = i_m \sin \omega t$. Тогда напряжение на резисторе совпадает по фазе с силой тока и вычисляется по формуле $u_1 = i_m R \sin \omega t$. Напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока и равно $u_2 = i_m X_C \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$. Диаграмма для этого случая представлена на рис. 2.7.

Из рис. 2.7 можно сделать три вывода:

1) Амплитуда приложенного напряжения:

$$u_m = \sqrt{(i_m R)^2 + (i_m X_C)^2} = i_m \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

Отсюда следует, что сопротивление последовательно соединенных резистора и конденсатора:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

2) Колебания напряжения отстают от колебаний тока на угол φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R}.$$

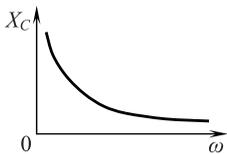


Рис. 2.5

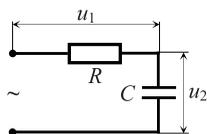


Рис. 2.6

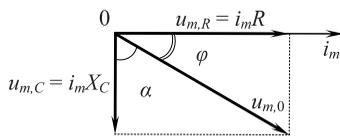


Рис. 2.7

Чаще всего задается напряжение $u = u_m \cos \omega t$, тогда

$$i = i_m \cos(\omega t + \varphi).$$

3) Сдвиг фаз между колебаниями входного напряжения и напряжения на конденсаторе

$$\cos \alpha = \frac{u_{m,C}}{u_{m,0}}.$$

III. Возможный вариант выполнения исследования

Задание 1. Исследование фазовых и амплитудных соотношений напряжений на резисторе и конденсаторе при их последовательном соединении.

1. Сборка электрической цепи.

Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 2.8. Рассчитайте полное сопротивление цепи Z , сдвиг фаз φ между током и напряжением, а также отношение амплитудных значений напряжений на резисторе и конденсаторе.

Подключите датчики напряжения к резистору (точки A и B) и конденсатору (точки B и B) (рис. 2.8, 2.9).

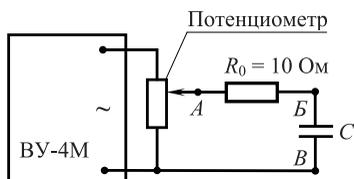


Рис. 2.8

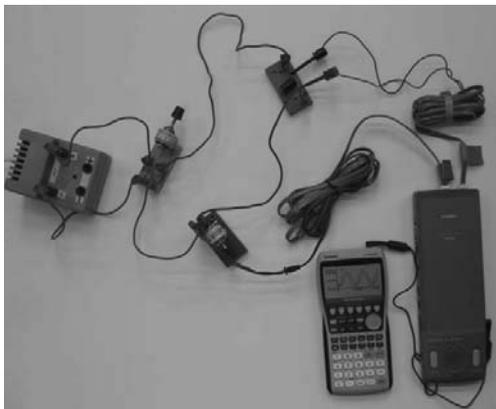


Рис. 2.9

2. Настройка оборудования и подготовка к измерению.

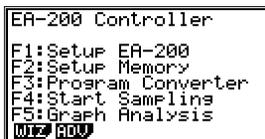
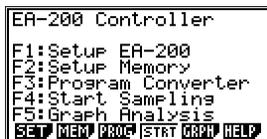
Подготовьте измерительный комплекс для исследования двух гармонических напряжений частотой 50 Гц.

2.1. Включение EA-200 и fx-9860GII.

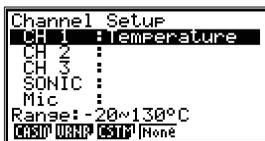
Включите комплекс как описано в п. 2.1 работы 1.

2.2. Настройка EA-200 на измерение напряжения.

Из главного меню режима E-CON2 перейдите в меню ручной настройки: **[F1]** (SET), **[F2]** (ADV).



В нем нажмите **[1]** (Channel) для входа в подменю выбора канала подключения датчика:



В этом окне клавишей **[REPLAY]** переместите выделение на строку CH1 для настройки канала CH1 анализатора EA-200.

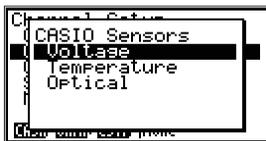
Нажмите **[F1]** (CASIO) для входа в подменю выбора датчиков производства CASIO, входящих в комплект комплекса. На экране появится список датчиков:



Клавишей **[REPLAY]** выделите нужный датчик (в данном случае Voltage – напряжение) и нажмите **[EXE]**. В строке CH1 справа от двоеточия появится надпись Voltage, означающая, что канал CH1 настроен на прием данных от датчика напряжения.



Переместите выделение на строку CH2 для настройки канала CH2 анализатора EA-200. Настройте его так же, как канал CH1:



Нажмите **[EXIT]** для возврата в меню ручной настройки.



2.3. Настройка пределов измерения во времени и шага замеров.

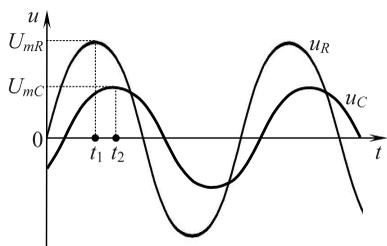
Пределы измерения задайте такие же, как в работе 1.

Необходимо иметь ввиду, что при одновременном подключении двух датчиков нельзя пользоваться режимом Fast.

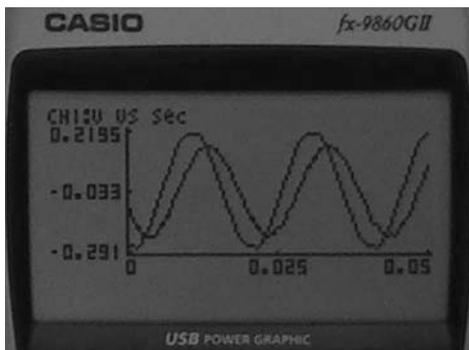
3. Проведение измерения.

Запустите комплекс на проведение измерения (см п. 3 работы 1).

На дисплее калькулятора вы получите графики, аналогичные представленным на рис. 2.10.



а)



б)

Рис 2.10

4. Обработка экспериментальных данных.

Измерьте сдвиг фаз между колебаниями напряжения на резисторе и конденсаторе. Проверьте экспериментально теоретический вывод о том, что сдвиг фаз между этими колебаниями равен 90° .

Для этого просканируйте графики в режиме Trace, определите моменты времени t_1 и t_2 и рассчитайте угол

$$\varphi = \frac{360 \cdot (t_2 - t_1)}{T}.$$

В этой формуле t_1 и t_2 – моменты времени, в которые напряжения достигают максимальных значений.

T, c	t_1, c	t_2, c	φ

Задание 2. Исследование фазовых и амплитудных соотношений напряжений на конденсаторе и источнике тока.

1) Самостоятельно оцените сдвиг фаз φ между колебаниями напряжения на входе цепи и конденсаторе. Для этого датчик, ранее подключенный к точкам A и B , переключите к точкам A и B (рис 2.11). Возможный результат измерений показан на рис. 2.12.

2) Измерьте амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе и источнике тока.

Амплитуда напряжения на конденсаторе, В	Амплитуда напряжения на источнике, В

Отметим, что вид графиков на экране может не соответствовать реальному соотношению напряжений, так как в режиме E-CON2 калькулятор строит каждую экспериментальную кривую в собственном масштабе, чтобы она занимала целиком весь дисплей.



Рис 2.11

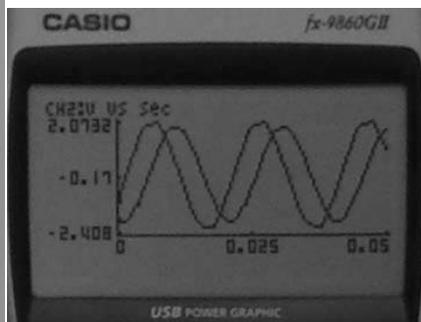
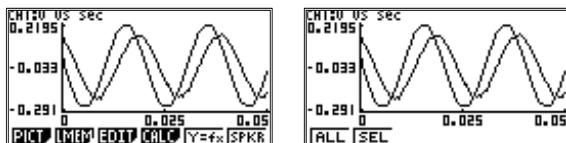


Рис. 2.12

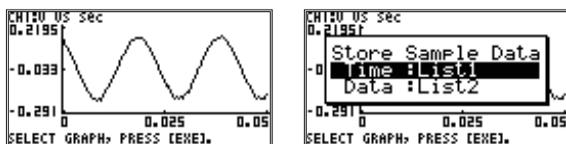
Задание 3. Обработка экспериментальных данных в режиме статистической обработки STAT.

Часто при проведении исследований важно чтобы вид графиков отражал реальное соотношение между амплитудами сигналов. Построить графики в одном масштабе можно в статистическом режиме STAT, скопировав в него экспериментальные данные.

Нажмите **[OPTN]** для вызова меню дополнительных функций. В нем выберите LMEM, нажав **[F2]**. В открывшемся подменю функция All (**[F1]**) копирует все экспериментальные точки в редактор статистических данных, функция SEL (**[F2]**) позволяет скопировать только часть экспериментальных данных.



Нажмите **[F1]**: калькулятор предложит выбрать один из графиков для копирования, о чем сообщает надпись в нижней строке дисплея: «SELECT GRAPH, press [EXE]». Стрелками **[▲]**, **[▼]** клавиши **[REPLAY]** выберите нужный график и нажмите **[EXE]** для подтверждения выбора. Откроется окно пути сохранения. В нем требуется задать столбцы таблицы, в которых будут сохранены выделенные данные.



По умолчанию время (Time) сохраняется в столбце List1, измеряемая величина (Data) – в столбце List2. Нажмите **[EXE]** для копирования выделенных данных. О завершении копирования сообщит надпись Complete (Выполнено). Нажмите любую клавишу для ее удаления с экрана.

Аналогично скопируйте данные второго графика. В окне пути сохранения для времени (Time) оставьте столбец List1, а для данных (Data) задайте столбец List3. Для изменения номера столбца клавишей **[REPLAY]** переместите выделение на нужную строку и нажмите стрелку вправо: в выделенной строке появится мигающий курсор. Клавишей **[DEL]** удалите число, введите новый номер столбца и нажмите **[EXE]**. Далее нажмите **[EXE]** для копирования.

Если требуется скопировать только часть экспериментальных данных, то в подменю LMEM нужно выбрать функцию SEL (**F2**). На выделенном для копирования графике появится курсор в виде крестика. Стрелками ◀, ▶ нужно его переместить в точку, с которой необходимо начать копирование, и нажать **EXE**. На графике появится вертикальная черта. Перемещение курсора в точку, на которой нужно закончить копирование, и нажатие **EXE** приведет к появлению окна пути сохранения.

Выйдите в главное меню, нажав **MENU**. В нем переместите выделение на пиктограмму STAT и нажмите **EXE** (можно в любом месте расположения выделения нажать **2**): цифра или буква, расположенная в правом нижнем углу пиктограммы, соответствует клавише, которая обеспечивает быстрый доступ к данному режиму работы калькулятора. В открывшемся редакторе списков столбец List1 назван «TIME» (время), столбцы List2 и List3 – «VOLTAG» (напряжение). Они содержат скопированные экспериментальные данные.

	List 1	List 2	List 3	List 4
SUB	TIME	Voltag	Voltag	
1	0	0.1563	0.3512	
2	5E-4	0.1405	-0.054	
3	1E-3	0.1142	-0.433	
4	1.5E-3	0.0984	-0.765	

GRAPH CALC TEST INTR. DIST

Войдите в подменю построения графиков GRPH (**F1**). В окне настроек SET (**F6**) задайте параметры построения графиков StatGraph1 (GPH1) и StatGraph2 (GPH2): в строке Graph Type (тип графика) – Scatter (точечный) (**F1**), в строке XList – List1 (**F1**, **1**, **EXE**), в строке YList – List2 и List3, в строке Mark Type (тип маркера) – \times и \square .

	List 1	List 2	List 3	List 4
SUB	TIME	Voltag	Voltag	
1	0	0.1563	0.3512	
2	5E-4	0.1405	-0.054	
3	1E-3	0.1142	-0.433	
4	1.5E-3	0.0984	-0.765	

GPH1 GPH2 GPH3 SEL SET

StatGraph1	
Graph Type	: Scatter
XList	: List1
YList	: List2
Frequency	: 1
Mark Type	: \times

GPH1 GPH2 GPH3

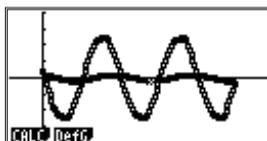
StatGraph2	
Graph Type	: Scatter
XList	: List1
YList	: List3
Frequency	: 1
Mark Type	: \square

GPH1 GPH2 GPH3

Нажмите **EXIT** для выхода из окна настроек SET и войдите в окно выбора графиков для одновременного построения SEL (**F4**). В строках StatGraph1 и StatGraph2 выберите On и постройте экспериментальные графики, нажав **F6** (DRAW).

StatGraph1	: DrawOn
StatGraph2	: DrawOn
StatGraph3	: DrawOff

On Off DRAW



Работа 3.

Исследование явления электромагнитной индукции

I. Оборудование и цель исследования

Оборудование (рис. 3.1): цифровой анализатор данных EA-200; графический калькулятор fx-9860GII; кабель для обмена данными между EA-200 и fx-9860GII; датчик (зонд) напряжения; магнит полосовой; катушка-моток; прибор для исследования явления электромагнитной индукции.



Рис. 3.1

Цель исследования. При выполнении этого исследования вы научитесь изучать переменные непериодические процессы на примере исследования зависимости ЭДС индукции от времени при перемещении магнита сквозь катушку.

II. Явления, процессы, физические величины

Основной закон электромагнитной индукции.

Электрическое и магнитное взаимодействие электрических зарядов. При изучении электрических явлений вы узнали, что взаимодействие неподвижных зарядов определяется законом Кулона. Кулоновское взаимодействие описывается на основе представлений о существовании вокруг каждого заряда электростатического поля, действующего на другие электрические заряды.

Между движущимися электрическими зарядами – электрическими токами – кроме кулоновских сил, действуют еще и магнитные силы. Магнитное взаимодействие описывается на основе представления о магнитном поле, существующем вокруг движущихся электрических зарядов. В отличие от кулоновского поля, действующего как на движущиеся, так и на неподвижные электрические заряды, магнитное поле действует только на движущиеся заряды.

Электрические и магнитные поля порождаются одними и теми же источниками – электрическими зарядами. Поэтому можно было предположить, что между этими полями существует определенная связь. Эта гипотеза нашла экспериментальное подтверждение в 1831 г. в опытах выдающегося английского физика М. Фарадея, в которых он открыл явление электромагнитной индукции.

Индукционный ток. Прделаем опыты, подобные тем, которые выполнил Фарадей. Возьмем две катушки из медной проволоки и первую подключим к источнику постоянного тока, а вторую расположим над первой таким образом, чтобы магнитный поток, создаваемый электрическим током в первой катушке, пронизывал витки второй катушки. Подключив выводы второй катушки к чувствительному гальванометру, убедимся, что магнитный поток, пронизывающий вторую катушку, не создает в ней электрического тока (рис. 3.2).

Отключим первую катушку от источника тока. Опыт показывает, что при этом через вторую катушку и гальванометр в течение короткого промежутка времени протекает электрический ток. При замыкании цепи первой катушки ключом мы увидим, что во второй катушке снова протекает кратковременный электрический ток, но его направление противоположно направлению тока в первом опыте.

Не отключая первой катушки от источника тока, изменим взаимное расположение катушек. Гальванометр обнаруживает возникновение электрического тока во второй катушке при всяком ее перемещении, сопровождающемся изменением магнитного потока через нее. Ток во второй катушке возникает и при перемещении относительно нее постоянного магнита (рис. 3.3).

При включении или выключении тока в первой катушке электрический ток во второй катушке возникает не всегда. Например, если плоскость, в которой лежат витки второй катушки, параллельна вектору индукции магнитного поля, создаваемого первой катушкой, то электрический ток во второй катушке не возникает. В этом случае, хотя и происходит изменение магнитного потока в первой катушке, магнитный поток через вторую катушку все время равен нулю.

Электрический ток, возникающий в замкнутом контуре при изменениях магнитного потока, пронизывающего этот контур, называется *индукционным током*.

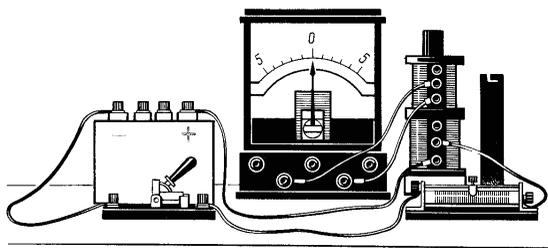


Рис. 3.2

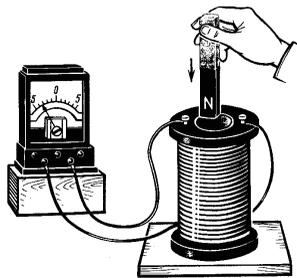


Рис. 3.3

Возникновение индукционного тока показывает, что на свободные электрические заряды в проводнике, по-видимому, действует электрическое поле (его называют *индукционным* или индуцированным). Для вывода количественных соотношений, описывающих явления, связанные с этим полем, рассмотрим сначала явления, наблюдающиеся при движении проводника в магнитном поле.

Пусть в однородном магнитном поле движется проводник, и вектор скорости его движения \vec{v} перпендикулярен вектору магнитной индукции \vec{B} . На свободные электроны и положительные ионы, из которых состоит металлический проводник, действуют со стороны магнитного поля силы, направленные в противоположные стороны (рис. 3.4). Свободные электроны приходят в движение. Это приводит к разделению электрических зарядов в проводнике и возникновению внутри проводника электрического поля, создаваемого зарядами, накапливающимися на торцах проводника.

Движение электронов в проводнике прекращается тогда, когда сила $\vec{F}_э$, действующая на электрон со стороны этого электрического поля, становится равной по модулю силе $\vec{F}_м$, действующей на него со стороны магнитного поля (рис. 3.5).

Так как $F_э = eE_{квл}$, где $E_{квл}$ – модуль напряженности кулоновского электрического поля, возникшего в проводнике в результате разделения зарядов, а $F_м = evB$, то условие равенства сил, действующих на электрон со стороны электрического и магнитного полей, запишется так:

$$eE_{квл} = evB.$$

Откуда

$$E_{квл} = vB. \tag{3.1}$$

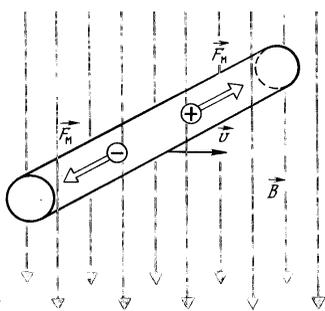


Рис. 3.4

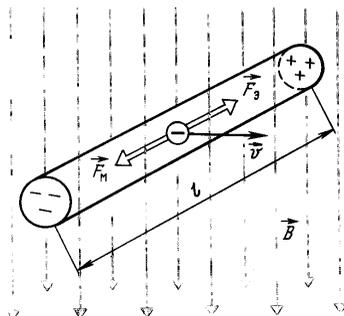


Рис. 3.5

Если проводник прямолинейный, и его длина равна l , то по напряженности $\vec{E}_{\text{кул}}$ электрического поля внутри проводника можно определить напряжение U на его концах:

$$U = E_{\text{кул}}l = \nu Bl.$$

Индукционное электрическое поле.

Возникновение электрического тока в проводнике, движущемся относительно источников магнитного поля, объясняется известными вам физическими законами. Но достаточно мысленно перейти при наблюдении того же самого физического явления в инерциальную систему отсчета, связанную с проводником, чтобы убедиться, что это явление – принципиально новое. В системе отсчета, связанной с равномерно движущимся проводником, наблюдаемое возникновение электрического тока и разделение зарядов нельзя объяснить действием магнитных сил – ведь они на неподвижные заряды не действуют! Конечно, физическое разделение электрических зарядов в проводнике и возникновение напряжения на его концах не зависит от выбора системы отсчета.

В системе отсчета, связанной с проводником, электрические заряды неподвижны и магнитные силы на них не действуют. Факт разделения зарядов в этом случае можно объяснить, если допустить, что в этой системе отсчета возникает индукционное электрическое поле напряженностью $\vec{E}_{\text{инд}}$, равной по модулю $\vec{E}_{\text{кул}}$, но направленной в противоположную сторону:

$$\vec{E}_{\text{инд}} = -\vec{E}_{\text{кул}}. \quad (3.2)$$

Электромагнитное поле.

Рассмотрев движение проводника в магнитном поле, мы пришли к следующему выводу: в системе отсчета, связанной с постоянным магнитным полем, нет индукционного электрического поля; в системе отсчета, связанной с движущимся проводником, существует индукционное электрическое поле. Следовательно, величины, описывающие электрические и магнитные поля, зависят от выбора системы отсчета.

Эта особенность электрического и магнитного полей объясняется следующим образом. Как показал Дж. Максвелл, а затем А. Эйнштейн, исторически сложившиеся в физике представления об электрических и магнитных полях как самостоятельных сущностях не соответствуют истине. В действительности существует только одно поле – *электромагнитное поле* – как особая форма материи. Это единое электромагнитное поле мы описываем в различных системах отсчета по-разному.

В частности, возникновение индукционного тока в системе отсчета, связанной с движущимся в магнитном поле проводником, объясняется как действие индукционного электрического поля, а в системе отсчета, связанной с неподвижными источниками постоянного магнитного поля (катушками, постоянными магнитами), – как действие этого магнитного поля на движущиеся заряды.

Электромагнитное поле никогда не исчезает при переходе из одной инерциальной системы в другую, но меняются его характеристики. В соответствии с исторически сложившейся традицией действие электромагнитного поля на электрический заряд представляют как результат действия двух полей (электрического и магнитного):

$$\vec{F}_л = \vec{F}_э + \vec{F}_м.$$

Сила $\vec{F}_л$, с которой электромагнитное поле действует на электрический заряд, называется *силой Лоренца*. При переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую могут изменяться обе составляющие силы Лоренца – электрическая $\vec{F}_э$ и магнитная $\vec{F}_м$, иногда одна из них может обратиться в нуль, однако физические явления будут протекать одинаково при одних и тех же начальных условиях (принцип относительности).

Закон электромагнитной индукции.

Для установления количественных закономерностей, описывающих процесс возникновения индукционного тока, продолжим рассмотрение явлений, происходящих при движении проводника в магнитном поле. Пусть прямолинейный проводник длиной l движется вдоль «рельсов» в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору магнитной индукции \vec{B} с постоянной скоростью \vec{v} относительно источника магнитного поля. На свободные электроны в движущемся проводнике действуют магнитные силы, играющие в этом случае роль сторонних сил, которые и служат причиной возникновения индукционного электрического тока в контуре, образуемом движущимся проводником и неподвижными «рельсами», по которым он скользит (рис. 3.6).

ЭДС индукции в контуре:

$$e_{\text{инд}} = \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \frac{F_{\text{стор}} l}{q} = E_{\text{инд}} l. \quad (3.3)$$

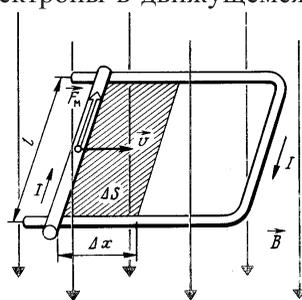


Рис. 3.6

Здесь $E_{\text{инд}}$ – проекция вектора напряженности индукционного электрического поля на направление вектора напряженности кулоновского поля. Учитывая соотношения (3.1) и (3.2), получим $E_{\text{инд}} = -vB$. Заметим, что если изменится направление вектора \vec{v} или \vec{B} , то направления векторов $\vec{E}_{\text{кул}}$ и $\vec{E}_{\text{инд}}$ изменятся на противоположные. Но всегда проекции обоих векторов будут иметь противоположные знаки.

Подставив $E_{\text{инд}} = -vB$ в (3.3), получим выражение для ЭДС индукции:

$$e_{\text{инд}} = -vBl. \quad (3.4)$$

Индукционный ток вызывает нагревание проводников в контуре. Это означает, что работа по перемещению электрических зарядов в индукционном электрическом поле по замкнутому пути не равна нулю. Следовательно, индукционное электрическое поле не является потенциальным. Такие поля называют вихревыми.

Во внешнем участке контура движение электрических зарядов происходит под действием кулоновского поля электрических зарядов, разделенных сторонней силой – силой Лоренца.

Умножив и разделив правую часть уравнения (3.4) на малый промежуток времени Δt , получим:

$$e_{\text{инд}} = -vBl = \frac{-v\Delta t Bl}{\Delta t} = \frac{-\Delta x Bl}{\Delta t} = \frac{-B\Delta S}{\Delta t}. \quad (3.5)$$

Здесь ΔS – изменение площади контура, пронизываемого магнитным полем. В случае перпендикулярности вектора магнитной индукции плоскости контура произведение изменения площади контура ΔS на модуль вектора магнитной индукции равно модулю изменения магнитного потока через контур:

$$B\Delta S = \Delta\Phi. \quad (3.6)$$

Подставив (3.6) в (3.5), получим:

$$e_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.7)$$

ЭДС индукции в контуре равна отношению изменения магнитного потока через контур к малому промежутку времени, за который произошло это изменение, взятому с противоположным знаком.

Полученный результат справедлив для частного случая равномерного движения проводника в однородном магнитном поле. В общем случае для расчета ЭДС индукции в контуре в любой момент времени

нужно найти предел отношения (3.7) при условии неограниченного уменьшения промежутка времени ($\Delta t \rightarrow 0$). При известной зависимости от времени магнитного потока через контур предел этого отношения определяется как производная от магнитного потока по времени:

$$e_{\text{инд}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(- \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = -\Phi'(t). \quad (3.8)$$

Выражения (3.7) и (3.8) для ЭДС индукции получены для случая изменения магнитного потока через контур в результате движения проводника в магнитном поле. Однако опыты показали, что они применимы для определения ЭДС индукции и во всех других случаях, при любом изменении магнитного поля.

Таким образом, *ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения во времени магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком.*

Этот закон природы, открытый М. Фарадеем, называют *законом электромагнитной индукции* или *законом Фарадея*.

ЭДС индукции в катушке. Если в последовательно соединенных контурах происходят одинаковые изменения магнитного потока, то ЭДС индукции в них равна сумме ЭДС индукции в каждом из контуров. Поэтому при изменении магнитного потока в катушке, состоящей из N одинаковых витков провода, возникает ЭДС индукции, в N раз большая, чем в одиночном контуре:

$$e_{\text{инд}} = -N\Phi'(t).$$

III. Возможный вариант выполнения исследования

Задание 1. Исследование зависимости ЭДС индукции от времени движения магнита.

1. Сборка экспериментальной установки.

Соберите установку для исследования в соответствии с рис. 3.7а, б. Подсоедините датчик напряжения к катушке (рис. 3.7в).

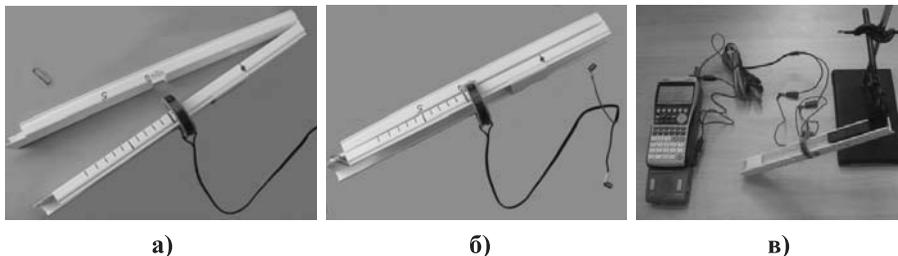


Рис. 3.7

2. Настройка оборудования и подготовка к измерению.

Подготовьте измерительный комплекс для проведения быстрых измерений напряжения порядка тысячных долей вольта.

2.1. Включение EA-200 и fx-9860GII.

Включите комплекс, как описано в п. 2.1 работы 1.

2.2. Настройка EA-200 на измерение напряжения.

Настройте комплекс, как описано в п. 2.2 работы 1.

2.3. Настройка пределов измерения во времени и шага замеров.

В данном случае наибольшее значение ЭДС индукции не превосходит $5 \text{ мВ} = 0,005 \text{ В}$.

Оценим время протекания процесса. Предположим, что магнит движется с ускорением 5 м/с^2 . Длина установки – 20 см, следовательно,

но, время опыта $t = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{0,4}{5}} = 0,3 \text{ с}$. Учтем время реакции чело-

века при синхронизации запуска магнита и нажатия кнопки запуска на калькуляторе: примерно 0,3 с для каждого из указанных действий, – поэтому общее запасное время примем равным 0,5 с. Тогда полное время проведения измерения составит 0,8 с.

Проведем опыт в режиме быстрых измерений. В нем минимальное время между измерениями составляет 20 мкс. А максимальное количество замеров – 10000. При этих параметрах время проведения измерения составит $10000 \times 20 \times 10^{-6} = 0,2 \text{ с}$. Эта величина меньше полного времени проведения измерения. Сохраним количество замеров, но тогда мы будем вынуждены увеличить интервал между соседними замерами, чтобы получить нужное полное время. Увеличенный интервал составит $0,8/10000 = 80 \times 10^{-6} \text{ с} = 80 \text{ мкс}$.

В окне ручной настройки нажмите клавишу **[2]** (Sample) для входа в подменю настройки параметров измерений:



В строке Mode (режим проведения измерений) выберите режим измерений Fast (быстрый), нажав **[F2]** (Fast).

В строку Interval (шаг) введите число 80.

В строку Number (количество замеров) введите число 10000.

```

Sample Setup
Mode      :Fast
Interval  :800nsec
Number    :10000
          [0h00m00.8s]
Full Graph :Off
On | Off

```

3. Проведение измерения.

Запустите комплекс на измерения так же, как в п. 2 работы 1, и пустите магнит. Отметим, что магнит нужно пустить максимально быстро после запуска комплекса.

Один из результатов опыта показан на рис. 3.8.

4. Обработка результатов эксперимента.

Первоначально экспериментальный график на дисплее целиком не виден. Чтобы вывести все значения на дисплей, нужно нажать **[F3]** для входа в меню изменения вида графика и выбрать в нем пункт FULL, нажав **[F2]** (рис. 3.9).

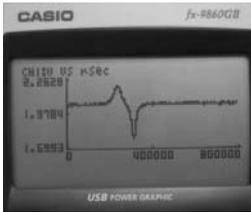


Рис. 3.8

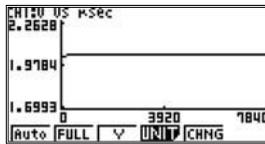


Рис. 3.9

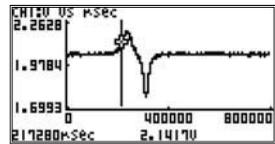


Рис. 3.10

На рис. 3.10 (режим Trace) мы видим, что в момент времени 217280 мкс, или 0,217 с, напряжение составляет 2,141 В. Просканировав график, определите максимальное напряжение U_1 и модуль максимального напряжения U_2 , а также моменты времени t_1-t_5 (рис. 3.11).

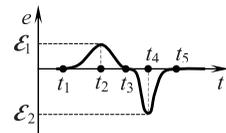


Рис. 3.11

Объясните, опираясь на основной закон электромагнитной индукции и правило Ленца, вид графика (объяснение изменения знака ЭДС индукции, сравнение максимальных значений ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , сравнение промежутков времени $(t_3 - t_1)$ и $(t_5 - t_3)$).

Просканируйте график от t_1 до t_5 и заполните таблицу:

$e, \text{В}$					
$t, \text{с}$					

Постройте график зависимости ЭДС индукции от времени в тетради.

Задание 2. Разработайте способ оценки ускорения, с которым магнит движется через катушку.

Часть 2. ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС *EA-200* – *fx-9860GII* – СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР

Работа 4.

Спектральный анализ акустических колебаний

I. Оборудование и цель исследования

Оборудование (рис. 4.1): цифровой анализатор данных *EA-200*; графический калькулятор *fx-9860GII*; кабель для обмена данными между *EA-200* и *fx-9860GII*; микрофон; источник напряжения ВУ-4М; динамик низкочастотный.

Цель исследования. При выполнении этого исследования вы научитесь проводить гармонический анализ периодических, но негармонических колебаний. Объектом исследования являются звуковые колебания диффузора динамика, подключенного к различным клеммам ВУ-4М (см. рис. 1.8). Под действием этих напряжений диффузор динамика совершает вынужденные колебания и излучает в пространство звуковые волны. Сигнал микрофона цифрового измерительного комплекса подвергается спектральному анализу. Его результаты мы видим на экране графического калькулятора.



Рис. 4.1

II. Явления, процессы, физические величины

Негармонические колебания.

Многие природные колебательные процессы отличаются от гармонических колебаний, например периодические изменения напряжения между разными участками тела человека, возникающие в результате работы сердца. График вырабатываемого сердечной мышцей напряжения называют электрокардиограммой (рис 4.2). Изучение ее формы часто помогает врачу определить характер сердечного заболевания.

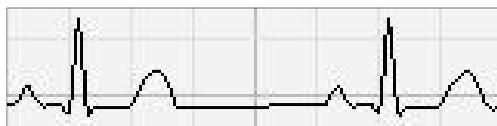


Рис. 4.2

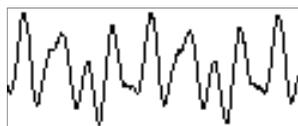


Рис. 4.3

Произнося перед подключенным к электронному осциллографу микрофоном различные звуки, можно убедиться, что разным звукам соответствуют разные осциллограммы, существенно отличающиеся от синусоиды. Например, на рис. 4.3 представлен фрагмент осциллограммы, полученной при произнесении звука «а». Полученные таким же образом осциллограммы звуков от различных музыкальных инструментов оказываются отличными от синусоиды и особыми у каждого инструмента. Эти опыты показывают, что звуковые колебания в окружающем мире в большинстве своем являются негармоническими.

Любое периодическое негармоническое колебание может быть представлено как результат сложения конечного (или бесконечного) числа гармонических колебаний. Например, при сложении гармонических колебаний, представленных на рис. 4.4, получается негармоническое колебание, представленное на рис. 4.5.

Правильность выдвинутой гипотезы была математически подтверждена французским ученым Жаном Фурье в XIX веке. Фурье доказал, что любая периодическая функция $f(t)$ с циклической частотой ω может быть представлена как сумма гармонических функций вида

$$f(t) = A_0 + \sum A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) =$$

$$= A_0 + A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + A_3 \cos(\omega_3 t + \varphi_3) + \dots,$$

где $\omega_1 = \omega$, $\omega_2 = 2\omega$, $\omega_3 = 3\omega$, ..., $\omega_n = n\omega$.

Разложение периодической негармонической функции на гармонические составляющие называется разложением в ряд Фурье. Первое слагаемое A_0 – постоянная составляющая функции $f(t)$, не зависящая от времени. Второе слагаемое $A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$ представляет собой первую составляющую разложения с частотой ω_1 , равной частоте ω функции $f(t)$, и т.д. Кратко эту процедуру называют Фурье-анализом.

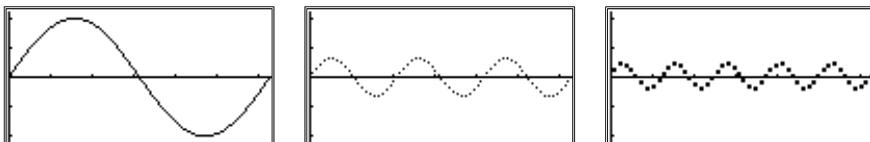


Рис. 4.4



Рис. 4.5

Например, Фурье-анализ графика, представленного на рис. 4.5, можно выразить так: это периодическое колебание состоит из трех гармоник. Первая гармоника имеет амплитуду x_m и частоту ω , вторая – $0,32x_m$ и 3ω , третья – $0,21x_m$ и 5ω .

При разложении в ряд Фурье значения коэффициентов A_n рассчитываются по специальным формулам. Как показывает наш пример, амплитуды гармоник ряда Фурье с ростом номера n убывают, поэтому для практических целей оказывается возможным использовать конечное число гармоник.

Измерительный комплекс оценивает амплитуду акустического давления, которое определяется суммой квадратов амплитуд всех гармоник. Квадрат амплитуды гармоники тем меньше, чем меньше сама амплитуда гармоники, поэтому гармониками высоких частот можно пренебречь.

Рассмотрим разложение для однополупериодного напряжения (см. рис. 1.35). Это напряжение можно представить следующим образом:

$$u = U_m \cos \omega t \text{ при } 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \text{ и } \frac{3\pi}{2} \leq \omega t \leq 2\pi.$$

$$u = 0 \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2}.$$

Разложение этой функции в ряд Фурье дает

$$u = 0,32U_m - 0,50 \cos \omega t + 0,21 \cos 2\omega t - \dots$$

Исследование акустических явлений с применением гармонического анализа позволило понять особенности восприятия человеческой речи.

Физическими характеристиками звуковых колебаний являются частота, амплитуда и фаза колебаний. Человеческое ухо воспринимает только частоту и амплитуду. Но если это так, то каким образом мы узнаем различные звуки, например «а», «о», «у» в речи разных людей? Ведь один человек говорит басом, другой – тенором, третий – сопрано, и частота колебаний при произнесении одних и тех же звуков оказывается у них различной. Можно пропеть на одной и той же гласной «а» целую октаву, изменяя частоту звуковых колебаний вдвое, и все же мы узнаем, что это «а», не «о» или «у». Не изменяется наше восприятие и при изменении амплитуды колебаний. И громко и тихо произнесенное «а» мы уверенно отличаем от «о» или «у».

Объяснение этой замечательной особенности человеческого слуха дают результаты анализа спектра звуковых колебаний, возникающих при произнесении звуков.

III. Возможный вариант выполнения исследования

Задание 1. Спектральный анализ звуковых колебаний, излучаемых динамиком, подключенным к клеммам «O» и «O».

1. Сборка экспериментальной установки.

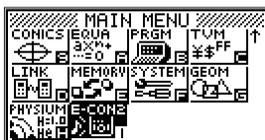
Подключите динамик к клеммам «O» и «O» (~) ВУ-4М. Подсоедините ВУ-4М к сети переменного тока 42 В. Разместите микрофон напротив диффузора динамика на расстоянии примерно 15 см.

2. Настройка оборудования и подготовка к измерению.

2.1. Включение EA-200 и fx-9860GII.

Соедините EA-200 и fx-9860GII кабелем. Подключите внешний микрофон к разъему на левой боковой грани корпуса EA-200, обозначенному изображением микрофона.

Включите калькулятор, нажав клавишу **AC/ON**. В главном меню (MAIN MENU) клавишей **REPLAY** выделите черным цветом пиктограмму режима E-CON2 и нажмите **EXE** для входа в него.



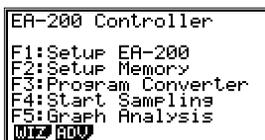
Для включения EA-200 переместите зеленый переключатель ON/OFF в направлении стрелки до упора и сразу же его отпустите. EA-200 можно не включать: при обращении калькулятора к анализатору данных он включится автоматически.

2.2. Настройка EA-200 на акустические измерения.

В главном меню режима E-CON2



нажмите **F1** (SET) для входа в меню настройки комплекса.

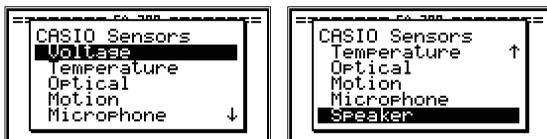


Нажмите **[F1]** для выбора WIZ. Комплекс перейдет к автоматической настройке проведения измерений. Первым откроется меню выбора датчиков:



К измерительному комплексу можно подключать не только датчики CASIO, но и совместимые датчики других производителей. Но в автоматическом режиме возможен выбор только между датчиками CASIO и VERNIER.

Нажмите **[F1]** для перехода к списку датчиков CASIO:



В списке представлены следующие датчики:

- Voltage – напряжения,
- Temperature – температуры,
- Optical – оптический,
- Motion – расстояния,
- Microphone – встроенный микрофон,
- Speaker – встроенный динамик.

Стрелки в правой части экрана показывают, что список продолжается соответственно их направлению. Перемещение выделения по списку осуществляется клавишей **[REPLAY]**.

Выделите датчик Microphone и нажмите **[EXE]**. Появится окно выбора типа экспериментального графика:



Sound wave – построение волнового графика – графика зависимости акустического давления в звуковой волне от времени;

Sound wave & FFT – построение волнового графика и спектрограммы (вывод результата Фурье-анализа);

FFT only – построение спектрограммы.

Клавишей **REPLAY** выделите нужную строку и нажмите **EXE**.



При выборе Sound wave откроется окно ввода длительности проведения измерений. Наберите нужное число из заданного интервала и нажмите **EXE**. На экране появится запрос на подтверждение введенных данных.

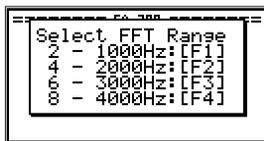


Если данные заданы неправильно, нажмите **F6** (Cancel) для возврата к вводу интервала проведения измерения.

Если параметры измерения верны, нажмите **F1** (OK). Откроется окно выбора дальнейших действий:



При выборе Sound wave & FFT или FFT only откроется окно выбора диапазона частот Фурье-анализа (FFT Range).



В данной работе используем режим Sound wave & FFT.

Выберите максимальную частоту в Герцах (Hz) такой, чтобы измеряемая частота была заведомо ниже. Для выбора нажмите соответствующую функциональную клавишу **F1**–**F4**.

Динамик излучает волну, у которой основная гармоника имеет частоту 50 Гц. Амплитуды более высоких гармоник (100, 150, 200 Гц и т.д.) быстро убывают, поэтому выберем максимальную частоту 1000 Гц, при которой всех высоких гармоник нет, нажав **F1**.

Откроется окно выбора дальнейших действий:



В этом списке:

Start Setup – начать измерения,

Save Setup-MEM – сохранить настройки проведения измерения,

Convert Program – преобразовать настройки в программу, распознаваемую совместимыми устройствами.

3. Проведение измерения.

Нажмите **[1]** для выбора Start Setup (начать измерения). Можно просто нажать **[EXE]**, если эта строка выделена. На экране появится запрос о проверке готовности комплекса к выполнению измерения. Далее следуйте п. 3 работы 1.

Отметим, что в данной работе сначала нужно замкнуть цепь динамика, а затем запустить комплекс на проведение измерения.

Появление квадратика в верхнем правом углу говорит о том, что измерения закончены и калькулятор обрабатывает полученные данные. Теперь звук можно выключить.

Возможный экспериментальный график приведен на рис. 4.6.

4. Анализ спектральной диаграммы.

Нажмите **[F1]** (Trace) для входа в режим трассировки Trace: на волновом графике появится курсор в виде крестика, а в нижней строке экрана – его текущие координаты. Стрелкой вниз клавиши **[REPLAY]** переместите курсор на спектральную диаграмму. Стрелкой влево (или вправо) клавиши **[REPLAY]** переместите курсор в точку с максимальной гармоникой. Максимальное значение амплитуды определите по текущим значениям координат в нижней строке экрана (см. рис. 4.6). Аналогично просмотрите значения остальных гармоник.

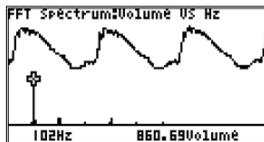


Рис. 4.6

Результаты запишите в таблицу:

Частота гармоники, Гц				
Амплитуда гармоники, условные единицы				

Задание 2. Спектральный анализ звуковых колебаний, издаваемых динамиком, подключенным к клеммам «О» и «О».

Результаты запишите в таблицу:

Частота гармоники, Гц				
Амплитуда гармоники, условные единицы				

Задание 3. Спектральный анализ звуковых колебаний, издаваемых динамиком, подключенным к клеммам «+» и «-».

Результаты запишите в таблицу:

Частота гармоники, Гц				
Амплитуда гармоники, условные единицы				

Задание 4. Спектральный анализ гласных звуков.

Сравните спектральный состав различных произносимых вами звуков, а также одного и того же гласного звука, произносимого разными учениками класса.

Звук				
Частота гармоники, Гц				

Работа 5.

Измерение скорости звука на основе интерференции падающей и отраженной волн

I. Оборудование и цель исследования

Оборудование (рис. 5.1): цифровой анализатор данных EA-200; графический калькулятор fx-9860GII; кабель для обмена данными между EA-200 и fx-9860GII; звуковой генератор; волновод трубчатый с подвижным поршнем; динамик; микрофон; стетоскоп.



Рис. 5.1

Цель исследования. При выполнении этого исследования вы научитесь сравнивать амплитуды акустических колебаний и измерять длины звуковых волн на основе явления интерференции падающей и отраженной волн.

II. Явления, процессы, физические величины

Стоячие волны в волноводе как частный случай интерференции.

Интерференция волн. Рассмотрим своеобразные и очень важные явления, которые возникают при наложении волн одинаковой частоты, имеющих, следовательно, одинаковую длину волны.

Пронаблюдаем это явление с помощью поверхностных волн в водяной ванне. Укрепим на одной колеблющейся пластинке два проволочных штифтика, которые будут одновременно ударять по поверхности воды. Получим две кольцевые волны с одинаковой длиной, разбегающиеся из двух центров и налагающиеся друг на друга. Если расстояние между штифтиками больше длины волны, то увидим картину, изображенную на рис. 5.2. Происходит не просто усиление волнения воды, чего можно было бы ожидать на первый взгляд, а более сложное явление. На поверхности воды получается ряд областей, в которых колебания особенно сильны (максимумы aa' , bb' , ...), разделенных областями сильно ослабленного волнения (минимумы mm' , nn' , ...). Чередование максимумов и минимумов колебаний называется интерференционной картиной. Явление наложения волн, при котором устанавливается независимое от времени распределение максимумов и минимумов колебаний называется *интерференцией волн*.

Стоячая волна. Особого вида интерференционная картина, называемая *стоячей волной*, получается в том случае, если две когерентные и одинаковые по интенсивности волны распространяются навстречу друг другу. Наложение таких волн происходит всякий раз, когда волна падает на хорошо отражающее препятствие, перпендикулярное к направлению ее распространения. Действительно, по закону отражения отраженная волна будет распространяться при этом как раз навстречу падающей и будет почти равна ей по интенсивности, если препятствие почти полностью отражает волну. Когерентность же прямой и обратной волн обеспечена тем, что они представляют собой более раннюю и более позднюю части *одной и той же* волны.

Протрепируем соответствующий опыт в водяной ванне. На пути волны, создаваемой ударяющей по воде линейкой, поставим параллельно линейке, т.е. перпендикулярно к направлению распространения волны,

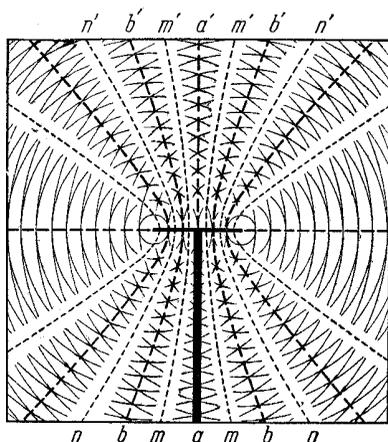


Рис. 5.2

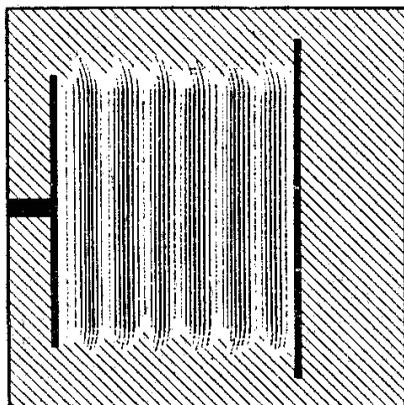


Рис. 5.3

пластинку (рис. 5.3). Опыт показывает: когда волна, бегущая от линейки, отражается и идет обратно, между колеблющейся линейкой и отражающей пластинкой получается ряд параллельных им и не перемещающихся полос, удаленных друг от друга на полволны. Как и всегда при интерференции, эти полосы представляют собой чередование максимумов и минимумов, причем в минимумах поверхность воды практически неподвижна. Так выглядит стоячая волна на поверхности воды.

Аналогичная картина получается при распространении поперечных волн в шнуре.

Волна отражается от закрепленной точки шнура и бежит по нему вниз, складываясь с идущей навстречу волной, создаваемой колебаниями руки. Таким образом, здесь также должна получиться стоячая волна, и она действительно получается.

На рис. 5.4 показано, какой вид приобретает колеблющийся шнур. На шнуре образуются чередующиеся неподвижные точки и точки, в которых размах колебаний наибольший. Неподвижные точки называются *узлами* стоячей волны, а места наибольшей амплитуды колебаний — ее *пучностями*. Расстояние между двумя соседними узлами (или двумя соседними пучностями) равно половине длины волны. Чем быстрее мы колеблем нижний конец шнура, т.е. чем выше частота, тем короче длина волны и тем больше узлов и пучностей укладывается на шнуре. Большое их количество с помощью руки получить трудно, так как надо слишком часто ею двигать. Можно воспользоваться небольшим электромотором, заставив его вращать простой кривошипный механизм. Установив этот механизм горизонтально и прикрепив

к нему нижний конец шнура, можно получить большое число узлов и пучностей, как это показано в правой части рис. 5.4.

Каким образом в результате сложения двух встречных бегущих волн получаются чередующиеся узлы и пучности?

Рис. 5.5 показывает, как это происходит. Пунктиром на нем изображены две волны, бегущие друг другу навстречу. Помещенные один под другим рисунки дают картину процесса через каждую восьмую часть периода. За это время бегущие волны передвигаются навстречу друг другу вдоль AB на одну восьмую длины волны. В каждой точке прямой AB взята алгебраическая сумма отклонений от AB (+ вверх, – вниз), и полученные таким путем точки соединены сплошной линией. Таким образом, сплошная кривая изображает результат сложения обеих бегущих волн.

Если проследим от рисунка к рисунку, как ведет себя сплошная кривая, то мы увидим, что в точках, отмеченных черными кружками, она все время проходит через положение равновесия, т.е. здесь колебаний нет, – это узлы стоячей волны. В промежутках между узлами, наоборот, получаются пучности, наибольший размах колебаний. Все точки, лежащие между двумя соседними узлами, колеблются в одинаковой фазе, но при переходе из одного промежутка между узлами к следующему фаза меняется на 180° . Расстояние между ближайшими пучностью и узлом равно $1/4$ длины волны, а расстояние между двумя ближайшими пучностями или ближайшими узлами – $1/2$ длины волны.

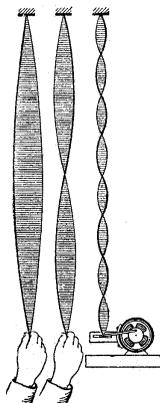


Рис. 5.4

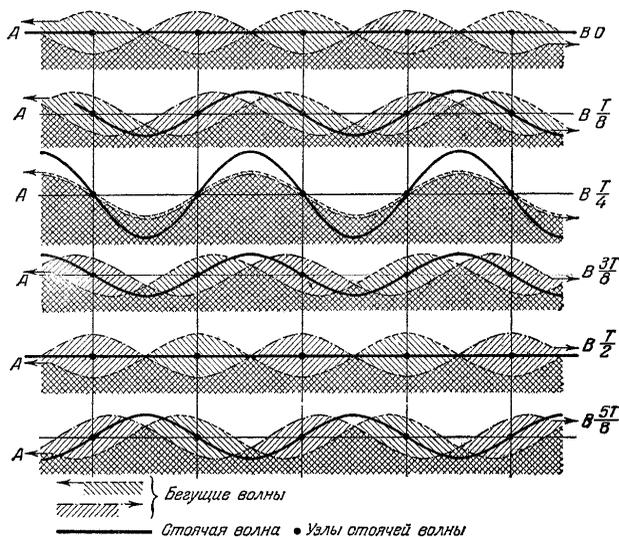


Рис. 5.5

Стоячие волны в волноводах. Возьмем прямоугольный деревянный ящик, у которого нет стенки $A'B'C'D'$ (рис. 5.6). Если воздух колеблется параллельно ребру AA' , то при основном колебании (низшая частота, наибольшая длина волны) мы получим узловую плоскость на стенке $ABCD$ и пучность в отверстии $A'B'C'D'$. На длине ящика AA' укладывается, таким образом, четверть волны (рис. 5.7а).

В первом обертоне мы имеем две узловые плоскости: одна по-прежнему на стенке $ABCD$, где, очевидно, узел должен получаться во всех случаях, а другая – на расстоянии полволны от этой стенки и четверти волны от открытого конца, в котором опять мы имеем пучность. Вдоль AA' теперь укладывается $3/4$ волны (рис. 5.7б), т.е. волна втрое короче, а частота втрое выше основной. Частота второго обертона будет в пять раз выше основной (рис. 5.7в) и т.д.

Если закрыть отверстие ящика, то при любых собственных колебаниях, параллельных AA' , узловая плоскость должна будет получаться как на $ABCD$, так и на $A'B'C'D'$. На рис. 5.8а, б, в показаны основное колебание и два первых обертона в этом случае.

Такого же характера стоячие волны получаются в трубах разных сечений. На рис. 5.9а, б, в показаны основное колебание и два первых обертона в круглой трубе, открытой с обоих концов. В этом случае у обоих концов получаются пучности колебаний.

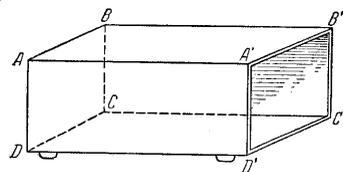
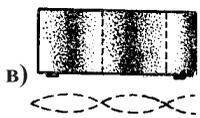
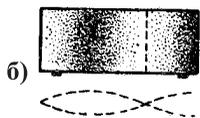
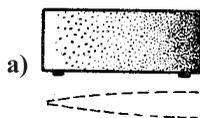


Рис. 5.6



а) основное колебание; б) первый обертон; в) второй обертон

Рис. 5.7

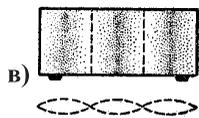
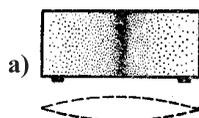


Рис. 5.8

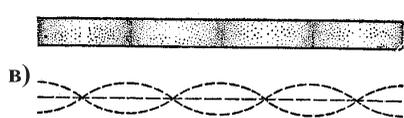
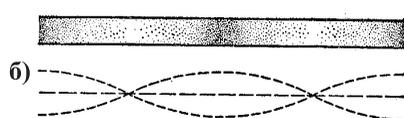
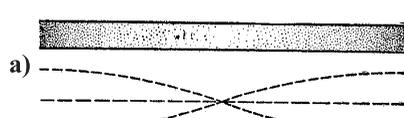


Рис. 5.9

Колебания воздушных столбов в трубах используются в духовых музыкальных инструментах (орган, флейта и т.д.).

III. Возможный вариант выполнения исследования

Идея измерения скорости звуковых волн в воздухе состоит в следующем. Генератор звуковых гармонических колебаний известной частоты создает в волноводе стоячую волну. В качестве волновода используется труба с закрытым торцом. Поэтому расстояние между пучностью волны и ее узлом равно четверти длины волны λ , а расстояние между ближайшими пучностями равно половине длины волны λ .

Длина волны $\lambda = \frac{u}{\nu}$, где ν – известная частота колебаний, а u – иско-

мая скорость звука. Чтобы найти скорость звука, необходимо измерить длину волны.

Длина волны λ равна либо $4L$ (если L расстояние между пучностью и узлом стоячей волны) либо $2L$ (если L – расстояние между двумя ближайшими пучностями). Для нахождения пучности или узла воспользуемся режимом Фурье-анализа (см. работу 4), в котором есть возможность измерять в относительных единицах амплитуду акустического давления. Узел стоячей волны соответствует минимуму акустического давления, пучность – максимуму.

1. Сборка измерительной установки.

Соберите измерительную установку в соответствии с рис. 5.10: разместите в волноводе мембрану стетоскопа и микрофон.

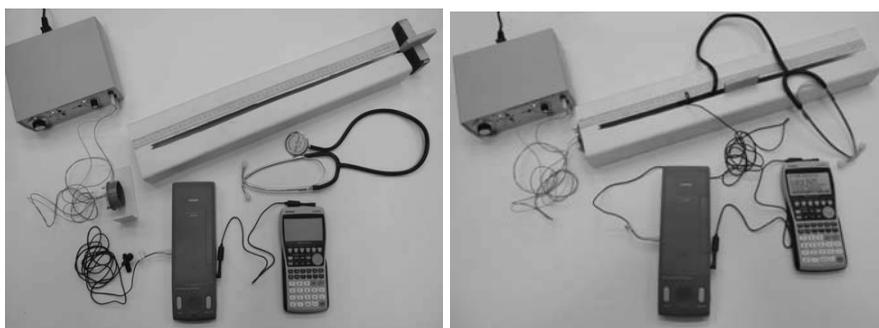


Рис. 5.10

2. Настройка оборудования и подготовка к измерению.

Подготовьте измерительный комплекс для проведения акустических измерений как описано в п. 2 работы 4. Задайте границу диапазона Фурье-анализа 1000 Гц.

3. Проведение измерения.

Задание 1. Наблюдение явления интерференции волн в волноводе с использованием стетоскопа.

Установите частоту 1000 Гц. Рассчитайте длину волны λ , приняв скорость звука равной 330 м/с. Поместите подвижный поршень волновода в положение $l_1 = \frac{3}{4} \lambda$ от динамика (рис. 5.11). Перемещая мембрану стетоскопа вдоль прорези волновода, определите на слух положения максимумов и минимумов амплитуды акустического давления. Запишите координаты этих положений.

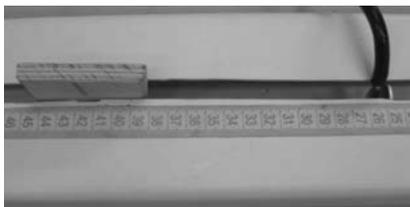


Рис. 5.11

Разместите мембрану стетоскопа на расстоянии 5–10 см от динамика. Пронаблюдайте изменение громкости звука при непрерывном плавном перемещении поршня и объясните наблюдаемое явление.

Задание 2. Анализ интерференции с использованием цифрового измерительного комплекса и измерение скорости звука.

Поместите микрофон в ближайшее к динамику положение минимума амплитуды акустического давления, определенное в задании 1. Проведите Фурье-анализ и измерьте амплитуду акустического давления в относительных единицах (пример на рис. 5.12).

Проведите аналогичное измерение в ближайшей к минимуму точке максимума. Пример приведен на рис. 5.13.

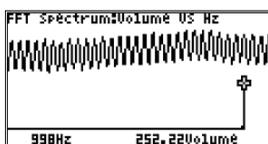


Рис. 5.12



Рис. 5.13

Вычислите по результатам нахождения максимума и минимума скорость звука и сравните ее с табличным значением 330 м/с.

Определите скорость звука, переместив поршень на расстояние $\frac{5}{4}\lambda$ от динамика.

Работа 6.

Исследование явления интерференции звуковых волн от двух когерентных источников

I. Оборудование и цель исследования



Рис. 6.1

Оборудование (рис. 6.1.): цифровой анализатор данных EA-200; графический калькулятор fx-9860GII; кабель для обмена данными между EA-200 и fx-9860GII; микрофон; стетоскоп; источник/генератор ИНГЛ-А; два динамика; рулетка.

Цель исследования. При выполнении этого исследования вы научитесь исследовать явления интерференции.

II. Явления, процессы, физические величины

Условия образования максимумов и минимумов. Можно ли сказать заранее, где в интерференционной картине получатся максимумы колебаний, а где минимумы?

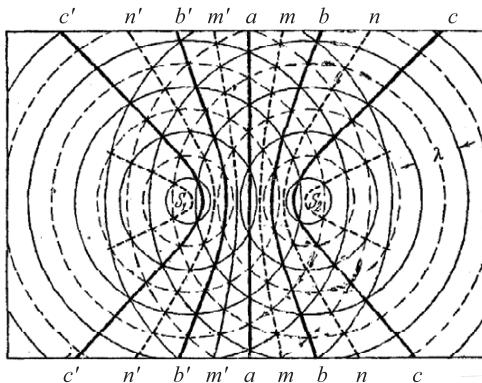


Рис. 6.2

На рис. 6.2 изображена схема интерференции волн от двух когерентных источников S_1 и S_2 .

Пусть оба источника колеблются в одной фазе, т.е. гребни (или впадины) выходят из них одновременно. Очевидно, на линии aa , каждая точка которой одинаково удалена и от S_1 , и от S_2 , будет максимум колебаний, так как гребни (или впадины) обеих волн достигают точек

этой линии одновременно и фазы обеих волн здесь совпадают. Точно так же усиление колебаний получится на линии bb , все точки которой на одну длину волны λ ближе к S_2 , чем к S_1 . Во всех точках линии bb волна от источника S_1 запаздывает ровно на один период по сравнению с волной от S_2 , а значит, фазы обеих волн опять совпадут. То же самое будет иметь место и на линии cc , точки которой на 2λ ближе к S_2 , чем к S_1 , т.е. одна волна запаздывает на два периода по сравнению с другой, и на линиях $b'b'$, $c'c'$ и т.д., точки которых расположены на λ , 2λ и т.д. ближе к S_1 , чем к S_2 .

Такое же рассуждение показывает, что на линиях mm , nn , ... и $m'm'$, $n'n'$, ..., все точки которых расположены ближе к одному из источников,

чем к другому, на полволны $\frac{\lambda}{2}$, три полуволны $\frac{3\lambda}{2}$ и вообще не-

четное число полуволн, получится ослабление колебаний – минимум. Действительно, во всех точках этих линий гребень одной волны будет встречаться со впадиной другой, или, иначе говоря, фазы обеих волн будут противоположны.

Будем называть разность расстояний от какой-либо точки до источников S_1 и S_2 *разностью хода* двух интерферирующих волн до этой точки. Тогда найденное правило можно коротко сформулировать следующим образом.

Максимумы интерференционной картины от двух колеблющихся в одинаковой фазе источников получаются в тех местах, где разность хода равна целому числу длин волн, или, что то же, четному числу полуволн, а минимумы – в тех местах, где разность хода равна нечетному числу полуволн.

Итак, в случае наложения когерентных волн получается устойчивая интерференционная картина, показывающая, что энергия волн при этом перераспределяется: возникают места, где интенсивность больше, чем простая сумма интенсивностей двух волн (максимумы), но имеются места, где интенсивность меньше суммы интенсивностей двух волн (минимумы). Если общее количество энергии, излучаемое обоими источниками, при этом остается неизменным, то все дело сводится к перераспределению энергии (рис.6.3а). В том же случае, когда накладываются некогерентные волны, интенсивности просто складываются, так что добавление второй волны повсюду ведет к увеличению интенсивности на величину, равную интенсивности второй волны; таким образом, максимумов и минимумов не наблюдается (рис.6.3б).

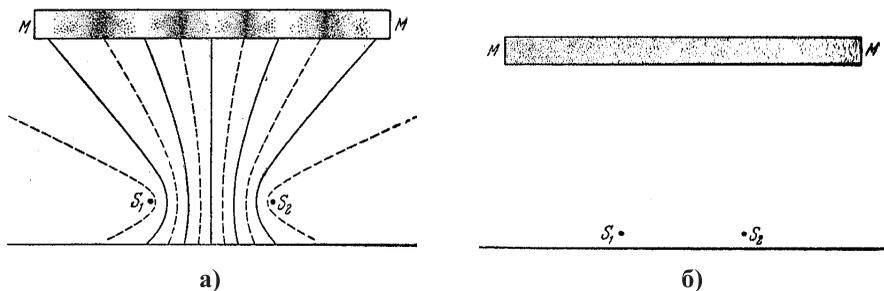


Рис. 6.3

III. Возможный вариант выполнения исследования

Исследование основано на рис. 6.3. В ходе работы необходимо оценить распределения амплитуд акустического давления вдоль направления ММ (см. рис. 6.3) и выяснить, насколько точно разность хода до точек, в которых наблюдается максимум амплитуд, близка к четному числу длин волн.

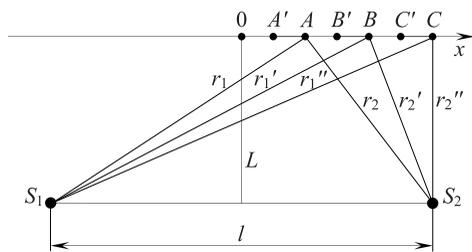


Рис. 6.4

Модель исследования представлена на рис. 6.4. Микрофон измерительного комплекса перемещается вдоль оси Ox , и в режиме Фурье-анализа находятся точки A, B, C , в которых амплитуда акустического давления максимальна.

Модель исследования представлена на рис. 6.4. Микрофон измерительного комплекса перемещается вдоль оси Ox , и в режиме Фурье-анализа находятся точки A, B, C , в которых амплитуда акустического давления максимальна.

1. Сборка измерительной установки.

Соберите измерительную установку в соответствии с рис. 6.5.

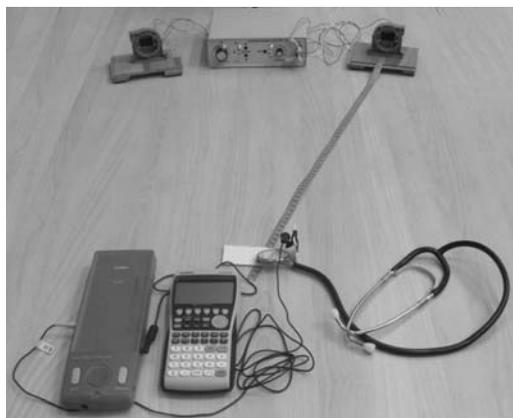


Рис. 6.5

2. Настройка оборудования и подготовка к измерению.

Подготовьте измерительный комплекс для проведения акустических измерений как описано в п. 2 работы 4. Задайте границу диапазона Фурье-анализа 3000 Гц.

3. Проведение измерения.

Задание 1. Анализ интерференционной картины.

Перемещая микрофон измерительного комплекса вдоль оси x из точки центрального максимума с шагом 1–2 см и проводя в каждой точке Фурье-анализ, отыщите точки A , B , C , в которых наблюдается максимум акустического давления P . Заполните таблицу:

Точка	x , см	P , усл. ед.	r_1 , см	r_2 , см	Δr , см	
					$r_2 - r_1$	$n\lambda_0$
A						$1\lambda_0 =$
B						$2\lambda_0 =$
C						$3\lambda_0 =$

Сделайте вывод.

Задание 2. Измерение акустического давления в точках максимумов интерференционной картины.

Зафиксируйте микрофон в точке 0 (см. рис. 6.4), которая находится на одинаковом расстоянии от динамиков. В режиме Фурье-анализа определите амплитуду колебаний звукового давления в этой точке.

Зафиксируйте микрофон в точке A , для которой $r_2 - r_1 = \lambda \approx 11$ см. Измерьте амплитуду колебаний в этой точке.

Проведите аналогичные измерения в точках B ($r_2 - r_1 = 2\lambda \approx 22$ см) и C ($r_2 - r_1 = 3\lambda \approx 33$ см).

Задание 3. Измерение акустического давления в точках минимумов интерференционной картины.

Отыщите точки A' , B' , C' , для которых $\Delta r = \frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}$, $\frac{5\lambda}{2}$, и измерьте амплитуды колебаний в них.

Точка	x , см	P , усл. ед.	r_1 , см	r_2 , см	Δr , см	
					$r_2 - r_1$	$(2n + 1)\lambda_0/2$
A'						$1\lambda_0/2 =$
B'						$3\lambda_0/2 =$
C'						$5\lambda_0/2 =$

Оглавление

Введение.....	3
Часть 1. ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС <i>EA-200 – fx-9860GII – ОСЦИЛЛОГРАФ</i>	4
Работа 1. Исследование выходных напряжений выпрямителя ВУ-4М.....	4
Работа 2. Исследование сдвига фаз между током и напряжением при последовательном соединении резистора и конденсатора.....	20
Работа 3. Исследование явления электромагнитной индукции.....	29
Часть 2. ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС <i>EA-200 – fx-9860GII – СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР</i>	38
Работа 4. Спектральный анализ акустических колебаний.....	38
Работа 5. Измерение скорости звука на основе интерференции падающей и отраженной волн.....	45
Работа 6. Исследование явления интерференции звуковых волн от двух когерентных источников.....	52

Верстка и редактирование - Никитина Н.С.

Подписано в печать 30.09.2011 г.
Формат 60x84/16. Печ. л. 3,5
Тираж 1000 экз. Заказ 6135.

Издательство «Тривант»
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства «Тривант».
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д. 52.
Тел. (495) 775-43-35, (4967) 50-21-81
E-mail: trovant@trtk.ru, <http://www.trovant.ru/>