

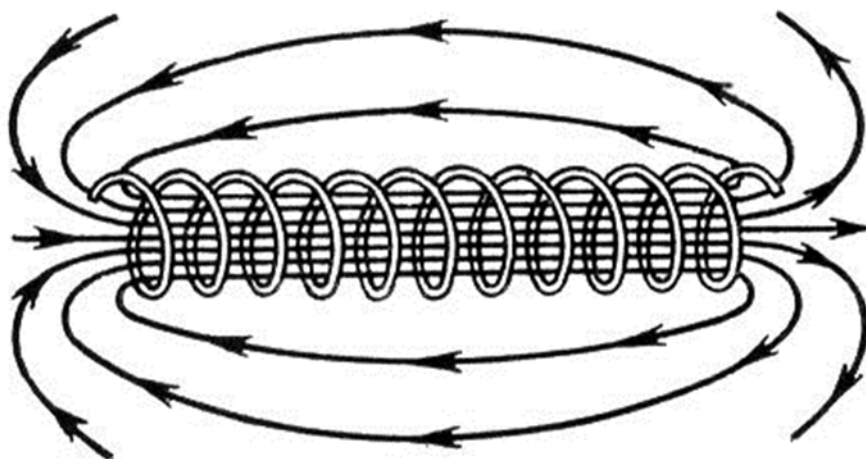
А.А. Королёв

С.А. Курашова

А.В.Смирнов

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ  
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Часть вторая



Санкт-Петербург  
2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.А. Королёв**

**С.А. Курашова**

**А.В.Смирнов**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ  
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

**Учебно-методическое пособие**  
Часть вторая

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

Королёв А.А., Курашова С.А. Смирнов А.В. Электричество и магнетизм. Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ. Часть вторая – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 70 с.

Пособие содержит методические рекомендации к выполнению лабораторных работ и теоретические сведения, необходимые для объяснения результатов эксперимента. При подготовке данного пособия использованы материалы научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) техники эксперимента Новосибирского государственного технического университета. Для выполнения лабораторных работ используются установки, разработанные НИЛ техники эксперимента Новосибирского государственного технического университета, производства ООО «Опытные приборы».

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с программой курса «Физика» (Б.2.2.2) Федерального образовательного стандарта высшего образования для бакалавров по направлениям подготовки 01.03.02, 44.03.04, 13.03.02, 24.03.02, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.05, 12.03.03, 11.03.02, 11.03.03, 27.03.04, 15.03.06, 16.03.01, 09.03.01, 09.03.02.

Рекомендовано к печати на заседании Ученого совета ЕНФ , 1 ноября 2016г, протокол №1.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

© А.А. Королёв , С.А. Курашова А.В.Смирнов, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №7 Изучение свойств ферромагнетика.....	4
Лабораторная работа №8 Определение индуктивности соленоида.....	10
Лабораторная работа №9 Взаимная индукция .....	14
Лабораторная работа №10 Изучение свободных затухающих колебаний.....	18
Лабораторная работа №11 Вынужденные электромагнитные колебания в последовательном колебательном контуре.....	33
Лабораторная работа №12 Изучение сложения колебаний.....	46

## Лабораторная работа №7

### ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА

#### Цель работы:

Исследовать петлю гистерезиса, кривую первоначальной намагниченности и график магнитной проницаемости ферромагнетика.

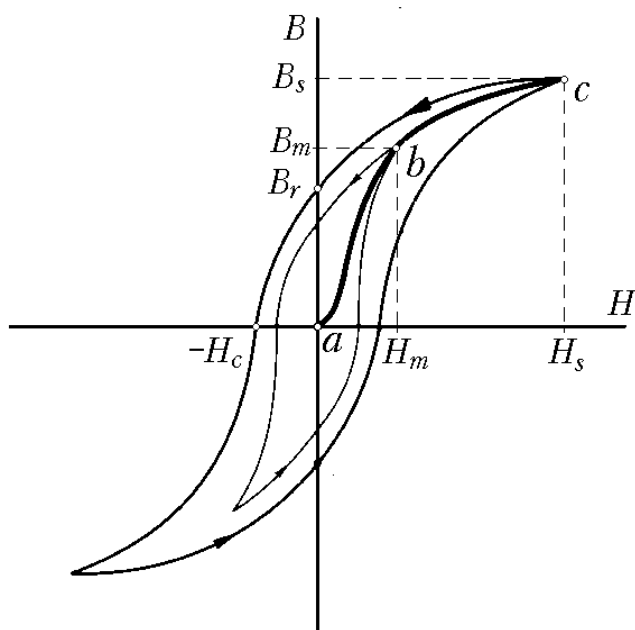
#### Требуемое оборудование

1. Блок генератора напряжений ГН1.
2. Осциллограф ОЦЛ2.
3. Стенд с объектом исследования.
4. Проводники Ш4/Ш4 (2 шт), 2Ш4/BNC (2 шт).

#### Краткое теоретическое введение

Ферромагнитный материал ниже точки Кюри находится в так называемом магнитоупорядоченном состоянии: весь объем образца разбивается на области, в каждой из которых атомные магнитные моменты ориентированы в одинаковом направлении. Эти области, размеры которых заметно превосходят межатомные расстояния, называются ферромагнитными доменами. Магнитные свойства ферромагнетика определяется перестройкой его доменной структуры (прежде всего смещением границ доменов) под действием внешнего магнитного поля. Характер изменения магнитной индукции  $B$  в зависимости от напряженности  $H$  магнитного поля внутри типичного ферромагнетика показан на рисунке 1. Если к первоначально ненамагниченному образцу прикладывать усиливающееся внешнее магнитное поле, то магнитная индукция изменяется в соответствии с кривой первоначального намагничивания  $abc$ . На начальном участке этой кривой магнитная индукция быстро и нелинейно возрастает с ростом магнитной напряженности. Затем в некоторой точке  $(H_s, B_s)$  рост функции  $B(H)$  сильно замедляется и становится линейным. Этот второй участок графика (он не изображен на рис.1) называется областью насыщения намагниченности. Если же после достижения некоторого значения

напряженности, например,  $H_m$  в точке  $b$  начать уменьшать напряженность, то намагниченность образца и магнитная индукция внутри него уменьшаются с некоторым запаздыванием, не обращаясь в ноль при  $H = 0$ . Такое запаздывание называется гистерезисом. Петля, которую описывает точка, изображающая состояние образца в координатах  $(H, B)$  при периодическом изменении магнитной напряженности, называется петлей гистерезиса. На рисунке 1 изображены две таких петли, одна – для колебаний напряженности с амплитудой  $H_m$ , другая – для колебаний с амплитудой  $H_s$ .



*Рис. 1. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в ферромагнетике. Петля гистерезиса*

Важными характеристиками ферромагнетика являются остаточная магнитная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ .

Магнитная проницаемость ферромагнетика  $\mu$  определяется следующим соотношением

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m}, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $B_m, H_m$  – индукция и напряженность магнитного поля в магнетике, соответствующие кривой начального намагничивания. Кривая начального намагничивания строится по вершинам петель гистерезиса с разным максимальным значением магнитной напряженности  $H_m$ .

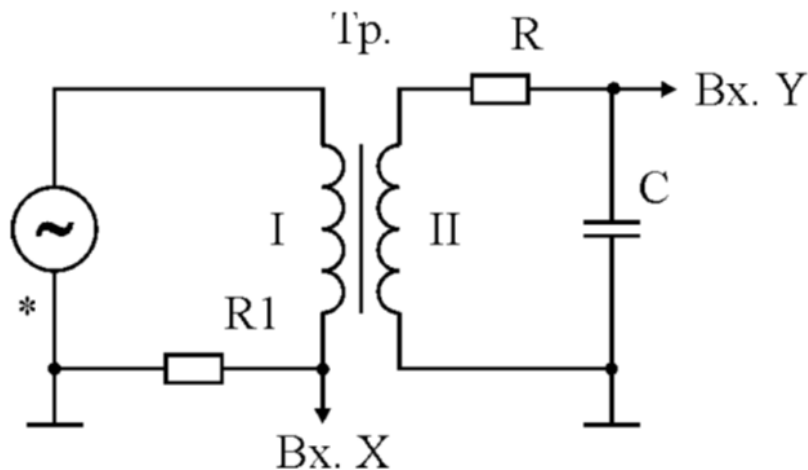
В качестве образца для изучения магнитных свойств ферромагнитного материала выбран сердечник трансформатора, размещенного на лабораторном стенде (см. рис.2.). Мгновенная напряженность  $H$  магнитного поля, создаваемого первичной обмоткой в образце, отображается по горизонтальной оси осциллографа, при этом

$$H = \alpha X, \quad (2)$$

где  $X$  – координата луча по горизонтальной оси  $OX$  экрана осциллографа при условии, что начало координат находится в центре петли гистерезиса. Коэффициент в формуле (2) равен

$$\alpha = \frac{K_X N_1}{l R_1}, \quad (3)$$

где  $K_X$  (В/дел) – масштаб развертки по оси  $OX$ ;  $N_1$  – число витков первичной обмотки;  $l$  – длина средней линии сердечника, на котором равномерно распределена первичная обмотка;  $R_1$  – сопротивление, соединенного последовательно с первичной обмоткой резистора.



*Рис. 2. Электрическая схема подключения стенда для изучения магнитных свойств материала. Исследуемым образцом служит сердечник трансформатора*

Мгновенное значение индукции  $B$  магнитного поля в образце отображается по вертикальной оси экрана осциллографа:

$$B = \beta Y, \quad (4)$$

где  $Y$  – координата луча по вертикальной оси  $OY$  экрана осциллографа при условии, что начало координат находится в центре петли гистерезиса. Коэффициент  $\beta$  равен

$$\beta = \frac{K_Y RC}{N_2 S}, \quad (5)$$

где  $K_Y$  (В/дел) – масштаб развертки по оси  $OY$ ;  $R$  и  $C$  – соответственно, сопротивление и емкость, подключенные ко вторичной обмотке трансформатора;  $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника.

Временное запаздывание магнитной индукции в образце относительно напряженности магнитного поля приводит к потерям энергии. При этом средняя мощность, расходуемая внешним источником тока при циклическом перемагничивании ферромагнитного образца, пропорциональна площади  $S_{\text{пт}}$  петли гистерезиса:

$$P = \chi S_{\text{пт}}. \quad (6)$$

Здесь  $S_{\text{пт}}$  – площадь петли, измеренная в делениях шкалы осциллографа, а коэффициент  $\chi$  равен

$$\chi = K_X K_Y \frac{\nu N_1 RC}{N_2 R_1}, \quad (7)$$

где  $\nu$  – частота колебаний напряжения, подаваемого на первичную обмотку.

### Порядок выполнения работы

1. Спишите значения параметров измерительного стенда  $N_1$ ,  $l$ ,  $R_1$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $N_2$ ,  $S$ , необходимые для расчета коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\chi$ .



2. Соберите лабораторную установку соединив проводами выход гармонического сигнала генератор напряжения ГН1, стенд с образцом и осциллограф в соответствии со схемой, изображенной на рис .2.
3. Включите приборы. Установите и запишите выходную частоту генератора  $\nu = 40$  Гц. Установите максимальное выходное напряжение генератора. Выберите такие масштабы  $K_X, K_Y$  по осям экрана осциллографа, чтобы сигналы каждого из каналов занимали по вертикали существенную часть экрана (при необходимости можно немного уменьшить амплитуду выходного сигнала генератора). Запишите выбранные значения масштабов. Для наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа перейдите в режим XY. С помощью ручек смещения сигнала каналов по вертикали расположите петлю так, чтобы ее центр совпал с началом координат на экране. При правильном выборе масштабов по осям петля должна иметь максимальные размеры, но не выходить за пределы экрана.
4. Измерьте координаты  $X_c$  и  $Y_r$  пересечения петли гистерезиса с осями координат. Вычислите коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Пользуясь формулами (2) и (4) определите коэрцитивную силу  $H_c$  и остаточную индукцию  $B_r$  для исследуемого образца. Заполните таблицу 1

Таблица 1.

$X_c$ , дел	$Y_r$ , дел	$H_c$ А/м	$B_r$ Тл

5. Измерьте координаты  $X_m$  и  $Y_m$ , соответствующие вершине петли гистерезиса. По формулам (2) и (4) определите соответствующие  $H_m$  и  $B_m$  и по формуле (1) определите соответствующее значение магнитной проницаемости  $\mu$ . Заполните таблицу 2.

Таблица 2.

$X_m$ , дел	$Y_m$ дел	$H_m$ А/м	$B_m$ Тл	$\mu$

6. Перенесите в лабораторный журнал изображение петли гистерезиса в масштабе 1см/дел по каждой из осей. Измерьте в делениях шкалы

площадь  $S_{\text{пт}}$  петли, вычислите коэффициент  $\chi$  и по формуле (6) определите среднюю мощность  $P$ , расходуемую на перемагничивание образца.

7. Устанавливая поочередно меньшие напряжения генератора (7 – 10 значений), получите соответствующие им петли гистерезиса и повторите для каждого напряжения п.5.
8. По полученным данным постройте кривую начального намагничивания  $B_m=f(H_m)$  и график магнитной проницаемости  $\mu=f(H_m)$ .

### Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .
2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие: Для студ. 1,2 и 3-го курсов всех спец. и направлений очной и заочной форм обучения. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.- 56 с

## Лабораторная работа №8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

#### Цель работы:

Измерение индуктивности соленоида различными методами.

#### Требуемое оборудование

Модульные учебные комплексы:

1. Модульный учебный комплекс МУК-ЭМ2

Приборы:

1. Блок генератора напряжений ГН1;
2. Блок генератора звуковых частот ЗГ1;
3. Осциллограф лабораторный ОЦЛ2;
4. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01.

#### Краткое теоретическое введение

##### *1. Определение индуктивности при использовании закона изменения тока в RL-цепи при подключении и отключении источника.*

Рассмотрим RL-цепь. Включим в нее генератор прямоугольных импульсов (рис.1).

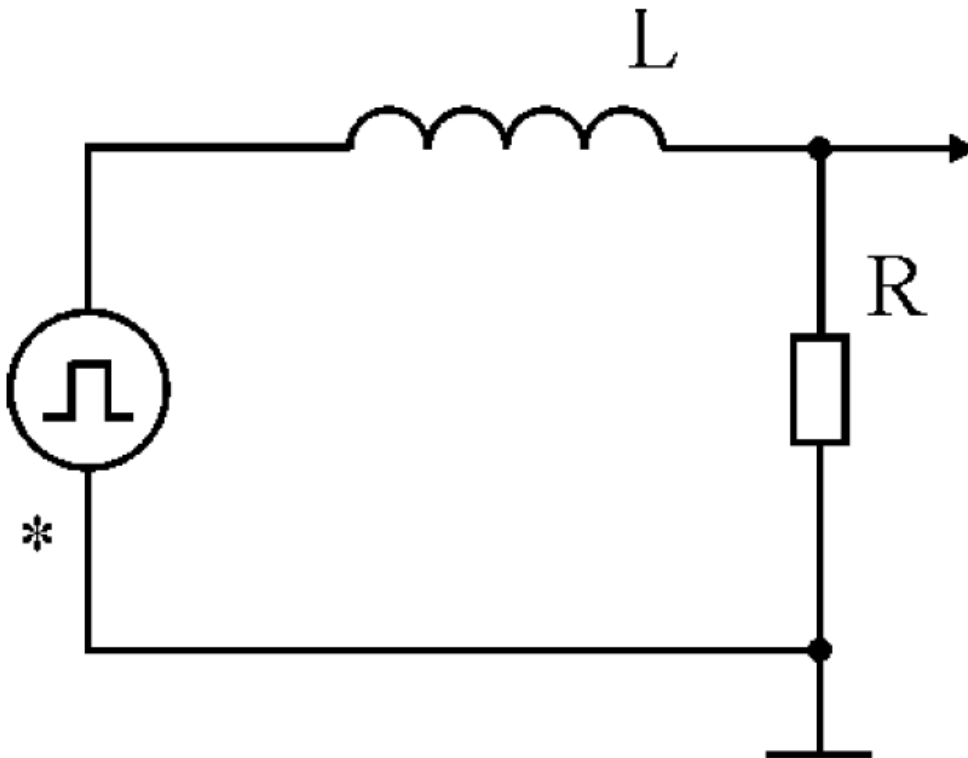


Рис 1 RL-цепь

Зависимость силы тока  $I$  от времени  $t$  при отключении источника имеет вид:

$$I(t) = I_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau}\right) \quad (1)$$

где  $t_1$  – момент времени, в который отключается источник;  
 $\tau$  – время релаксации, т.е. время, за которое сила тока после подключения или после отключения изменится в  $e \approx 2.71$  раз.

Индуктивность  $L$ , выраженная через время релаксации  $\tau$  будет равна:

$$L = R\tau \quad (2)$$

## ***2. Применение вынужденных электромагнитных колебаний в RL-цепи для измерения индуктивности.***

Рассмотрим RL-цепь. Включим в нее генератор переменного напряжения (рис.2).

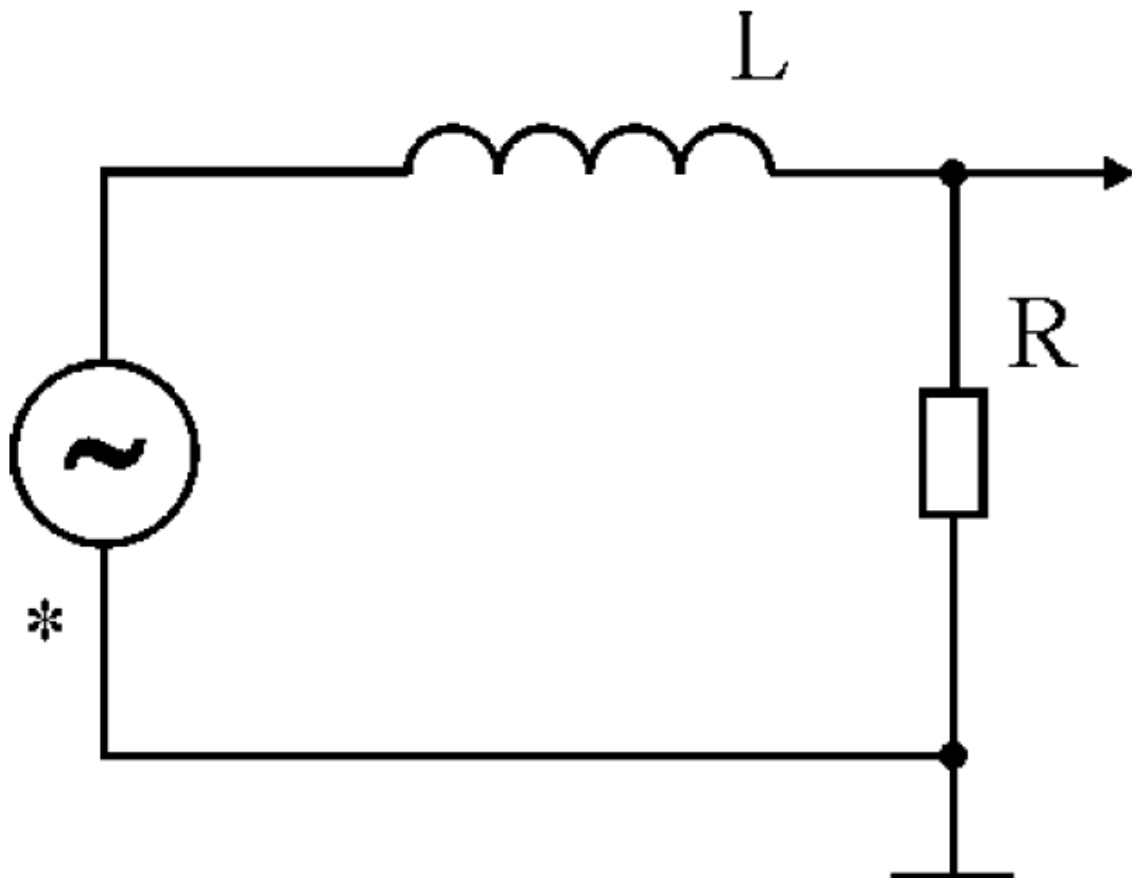


Рис. 2. Схема для вынужденных колебаний

Амплитуда силы тока в такой цепи равна

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (3)$$

где  $\omega$ - циклическая частота;

$E_0$  - амплитуда ЭДС источника;

$R$  – сопротивление цепи.

С другой стороны амплитуда силы тока в цепи равна

$$I_0 = \frac{U_R}{R} \quad (4)$$

где  $U_R$  – амплитуда падения напряжения на сопротивлении  $R$ .

Из выражений (3) и (4) получим:

$$L = \frac{R}{\omega} \sqrt{\frac{E_0^2}{U_R^2} - 1} \quad (5)$$

### ***Методика эксперимента***

В качестве исследуемого элемента необходимо использовать катушку индуктивности без сердечника. Такой катушкой в стенде СЗ-ЭМ01 является одна из магнитосвязанных катушек  $L_1$  или  $L_2$ .

На рис. 1 представлена электрическая схема для измерения индуктивности при использовании закона изменения тока в RL-цепи при отключении или подключении источника. В качестве генератора прямоугольных импульсов используется источник сигнала типа «меандр», содержащийся в блоке ГН1.

На рис. 2 представлена электрическая схема для измерения индуктивности при использовании вынужденных электромагнитных колебаний в RL-цепи.

### ***Рекомендуемое задание к работе***

1. Соберите схему, подключив одну из катушек индуктивности без сердечника (рис.1).

Рекомендуемая частота следования импульсов, подаваемых с генератора прямоугольных импульсов (блок ГН) 2500 Гц. Рекомендуемое сопротивление стенда -  $R_1$ . Подключите «У»-вход осциллографа к концам резистора  $R$  и получите устойчивую картину изменения напряжения на экране.

2. Зная время развертки осциллографа, определите время релаксации  $\tau$ , а затем по формуле (2) вычислите индуктивность.

3. Повторите измерения с другим резистором стенда  $R_2$ . Убедитесь, что результат измерений с учетом погрешностей повторяется. Заполните таблицу 1.

Таблица 1.

$R_1, \text{ Ом}$	$\tau_1, \text{ с}$	$R_2, \text{ Ом}$	$\tau_2, \text{ с}$

4. Соберите схему, подключив одну из катушек индуктивности без сердечника (рис.2). Рекомендуемый диапазон частот генератора ЗГ1 от 5кГц до 10кГц.

5. Измерьте  $E_0$  и  $U_R$ .  $\omega$ . Рассчитайте по формуле 5 значение индуктивности.

6. Определите индуктивность, установив другие значения  $R$ ,  $E_0$ ,  $\omega$ . Убедитесь, что результаты с, учетом погрешностей, не зависят от этих параметров.

7. Проведите сравнение с результатами измерений п.п.3. и убедитесь, что величины индуктивности не зависят от способов измерений.

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .

2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие: Для студ. 1,2 и 3-го курсов всех спец. и направлений очной и заочной форм обучения. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.- 56 с

## Лабораторная работа №9

### ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

#### Цель работы:

Изучение явления взаимной индукции.

#### Требуемое оборудование

Модульные учебные комплексы:

1. Модульный учебный комплекс МУК-ЭМ2

Приборы:

1. Блок генератора напряжений ГН1;
2. Блок генератора звуковых частот ЗГ1;
3. Осциллограф лабораторный ОЦЛ2;
4. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01.

#### Краткое теоретическое введение

Рассмотрим два последовательно соединенных соленоида без ферромагнитных сердечников  $L_1$  и  $L_2$  (Рис.1а, 1б), имеющих общий магнитный поток.

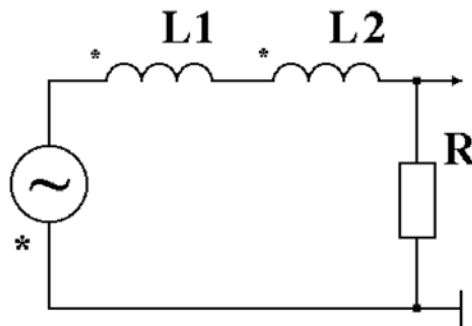


Рис. 1а. Случай полей, направленных одинаково

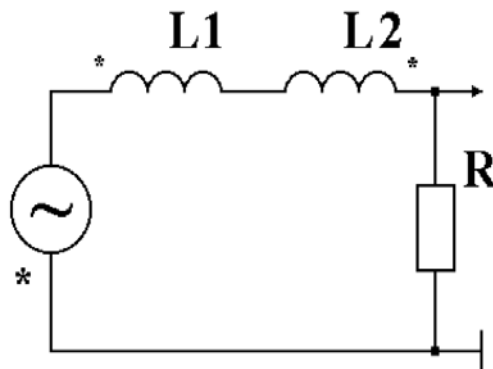


Рис 1б. Случай полей, направленных навстречу друг другу  
При таких соединениях контуров общая индуктивность системы равна:

$$L=L_1+L_2\pm 2L_{12} \quad (1)$$

где  $L_{12}$  – коэффициент взаимной индукции, знак плюс соответствует случаю полей, направленных одинаково, знак минус – полям, направленным навстречу друг другу.

### ***Методика эксперимента***

В качестве исследуемого элемента необходимо использовать магнитосвязанные катушки индуктивности без сердечника. Такими катушками на стенде СЗ-ЭМ01 являются катушки L1 и L2. Для определения индуктивности можно воспользоваться методами измерения, представленными в работе № 8 «Определение индуктивности соленоида»:

#### ***1. Определение индуктивности при использовании закона изменения тока в RL-цепи при подключении и отключении источника.***

Рассмотрим RL-цепь (рис.2).

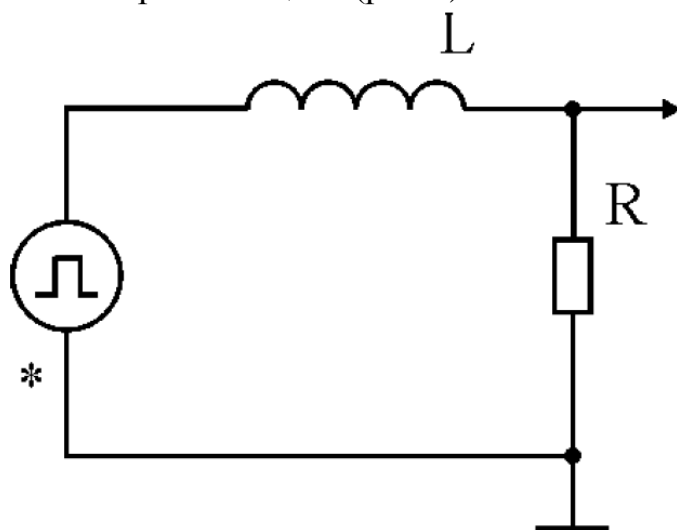


Рис. 2. RL-цепь

Зависимость силы тока  $I$  от времени  $t$  при отключении источника:

$$I(t) = I_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau}\right) \quad (1)$$

где  $t_1$  – момент времени в который отключается источник;  
 $\tau$  - время релаксации, т.е. время, за которое сила тока после подключения или после отключения изменится в  $e \approx 2.71$  раз



Индуктивности  $L$ , выраженная через время релаксации  $\tau$  будет равна:

$$L = R\tau \quad (2)$$

## 2. Применение вынужденных электромагнитных колебаний в RL-цепи для измерения индуктивности.

Рассмотрим RL-цепь с источником переменного напряжения (рис.3).

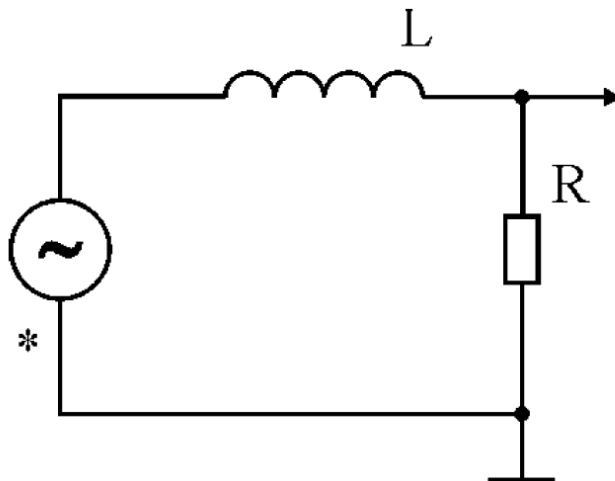


Рис. 3. Схема для вынужденных колебаний

Амплитуда силы тока в такой цепи равна

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (3)$$

где  $\omega$ - циклическая частота;

$E_0$  - амплитуда ЭДС источника;

$R$  – сопротивление цепи.

С другой стороны амплитуда силы тока в цепи равна

$$I_0 = \frac{U_R}{R} \quad (4)$$

где  $U_R$  – амплитуда падения напряжения на сопротивлении  $R$ . Из выражений (3) и (4) получим:

$$L = \frac{R}{\omega} \sqrt{\frac{E_0^2}{U_R^2} - 1} \quad (5)$$

### Методика эксперимента

На рис. 2 представлена электрическая схема для измерения индуктивности при использовании закона изменения тока в RL-цепи при отключении или

подключении источника. В качестве генератора прямоугольных импульсов используется источник сигнала типа «меандр», содержащийся в блоке ГН1.

На рис. 3 представлена электрическая схема для измерения индуктивности при использовании вынужденных электромагнитных колебаний в RL-цепи.

### *Рекомендуемое задание к работе*

1. Используя любой метод измерения индуктивности (работа «**Определение индуктивности соленоида**») измерьте индуктивность катушки  $L_1$ , затем аналогичным способом измерьте индуктивность катушки  $L_2$ .
2. Измерьте общую индуктивность системы двух катушек для случая полей, направленных одинаково. Вычислите, используя формулу 1, коэффициент взаимной индукции.
3. Измерьте общую индуктивность системы двух катушек для случая полей, направленных навстречу друг другу. Вычислите коэффициент взаимной индукции. Сравните с результатом п.2.

### *Литература*

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .
2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие: Для студ. 1,2 и 3-го курсов всех спец. и направлений очной и заочной форм обучения. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.- 56 с

## Лабораторная работа №10

# ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

### Цель работы:

Изучение основных характеристик свободных затухающих колебаний.

### Требуемое оборудование

5. Блок генератора напряжений ГН1.
6. Осциллограф ОЦЛ2.
7. Стенд с объектом исследования СЗ-ЭМ01.
8. Проводники Ш4/Ш2 (4 шт), Ш2/Ш2 (3 шт), 2Ш4/BNC (2 шт).

### Краткое теоретическое введение

В цепи, содержащей катушку индуктивности и конденсатор, могут возникать электромагнитные колебания. Такую цепь называют колебательным контуром. Выясним, каким образом в колебательном контуре возникают и поддерживаются электрические колебания.

Обозначим полное электрическое сопротивление контура  $R$ , индуктивность катушки  $L$ , ёмкость конденсатора  $C$  (см. рис 1). Пусть вначале правая обкладка конденсатора (см. рис 1а) заряжена положительно, а левая – отрицательно. При этом вся энергия колебательного контура сосредоточена в конденсаторе. Замкнём ключ, конденсатор начнёт разряжаться, и через катушку потечёт ток  $I$  (см. рис 1б).

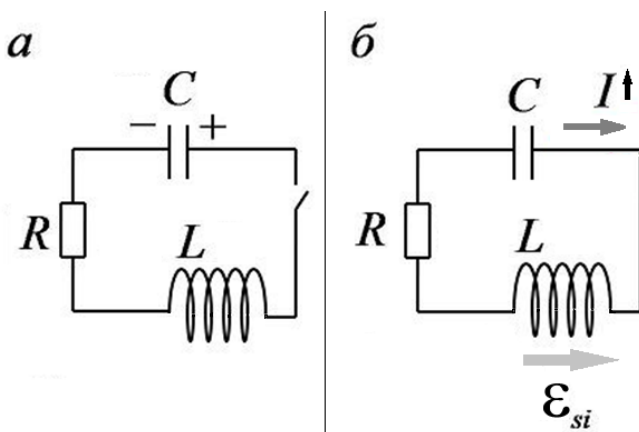


Рис. 1. Начало свободных затухающих колебаний в контуре

По мере разряда конденсатора и возрастания силы тока в контуре энергия электрического поля конденсатора будет превращаться в энергию магнитного поля катушки и в джоулево тепло на активном сопротивлении. Возникающая в катушке при нарастании тока ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{si}$  будет тормозить рост тока. Предположим, что сопротивление  $R$  достаточно мало, чтобы выделившееся при разрядке конденсатора количество теплоты было невелико по сравнению с первоначальной энергией конденсатора. Процесс нарастания тока закончится, когда конденсатор полностью разрядится, а ток в цепи достигнет максимума. В этот момент вся энергия контура будет сосредоточена в магнитном поле катушки. С этого момента ток в цепи, не меняя направления, начнёт убывать. Однако, он прекратится не сразу, его будет поддерживать ЭДС самоиндукции, которая поменяет знак после смены возрастания тока на его убывание. Ток будет перезаряжать конденсатор: на левой обкладке будет накапливаться положительный заряд, на правой – отрицательный. Возрастающее электрическое поле будет уменьшать силу тока. Наконец, ток прекратится, а заряд на конденсаторе достигнет максимума. С этого момента конденсатор опять начнёт разряжаться, ток потечёт в направлении обратном к изображенному на рис. 1б и т.д. – процесс будет многократно повторяться.

В ходе процесса заряд на обкладках конденсатора и ток через катушку будут совершать колебания вблизи нулевых значений, а энергии электрического и магнитного полей будут переходить друг в друга. При отсутствии сопротивления проводников в контуре совершались бы строго периодические незатухающие колебания. Но, поскольку сопротивление проводников  $R$  отлично от нуля, на каждом периоде описанного колебательного процесса будет происходить преобразование энергии электромагнитного поля в джоулеву теплоту и амплитуды колебаний заряда и тока будут постепенно уменьшаться, стремясь к нулю.

Найдём уравнение, которому подчиняется зависимость заряда конденсатора от времени. Выберем положительно направление тока как указано на рис. 2. и направление обхода контура по часовой стрелке.

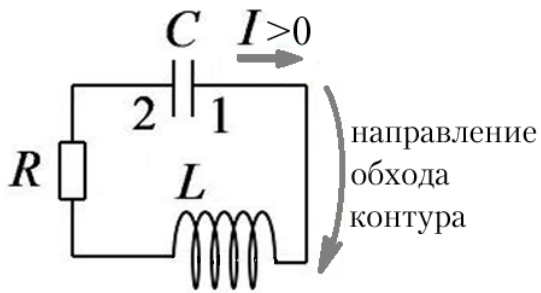


Рис 2. Выбор положительного направления тока и направления обхода контура.

Обозначим  $q$  заряд той обкладки конденсатора, которая заряжается при токе, текущем в выбранном положительном направлении (на рис. 2 – левая обкладка). Тогда ток в контуре связан с зарядом  $q$  формулой

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

По закону Ома для неоднородного участка цепи

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{si}. \quad (2)$$

Здесь  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  электрические потенциалы правой и левой обкладок конденсатора, соответственно,  $\mathcal{E}_{si}$  – ЭДС самоиндукции в катушке. Разность потенциалов связана с введенным выше зарядом  $q$  конденсатора соотношением

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{C}. \quad (3)$$

Для ЭДС самоиндукции имеем

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4)$$

Учитывая выражения (1), (3) и (4) закон Ома (2) преобразуем к виду:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (5)$$

Это уравнение для заряда на конденсаторе в колебательном контуре – линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка. Найдя с помощью этого уравнения зависимость  $q(t)$ , мы сможем вычислить для любого момента времени напряжение  $U_C$  на конденсаторе:

$$U_C = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{q}{C} \quad (6)$$

и силу тока  $I$  в контуре по формуле (1).

Уравнение (5) принято записывать в виде

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (7)$$

где величина

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (8)$$

называется коэффициентом затухания,  $\beta$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

собственная циклическая частота незатухающих колебаний контура.

Из теории линейных дифференциальных уравнений известно, что при малом затухании (т.е. при  $\beta \ll \omega_0$ ) общее решение уравнения (7) имеет вид:

$$q(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (10)$$

Величину  $\omega$  в этой формуле определяется соотношением

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (11)$$

Её принято называть собственной циклической частотой затухающих колебаний контура. Постоянные  $q_0$  и  $\varphi_0$  в уравнении (10) определяются из начальных условий, например, из значения тока и напряжения на конденсаторе в начальный момент времени. Величина

$$q_m = q_0 e^{-\beta t} \quad (12)$$

называется амплитудой затухающих колебаний заряда.

График функции (10) показан на рисунке 3. Видно, что это функция не периодическая.

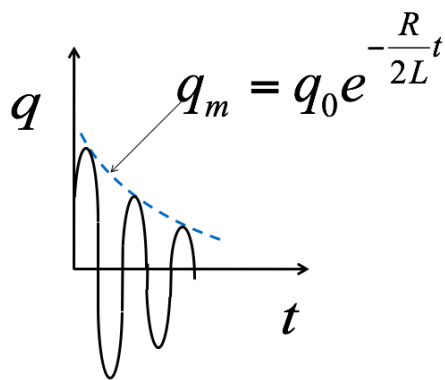


Рис 3. Зависимость заряда конденсатора от времени.

Тем не менее, величину

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (13)$$

называют периодом затухающих колебаний.

Для изучаемого колебательного контура выражение (13) с учетом определений (8) и (9) принимает вид

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (14)$$

Из этой формулы видно, что если сопротивление цепи равно

$$R_{\text{кр}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (15)$$

то период (14) обращается в бесконечность. Это сопротивление называется критическим сопротивлением контура.

Исходя из зависимости (10) заряда конденсатора от времени, можно определить напряжение (6) на конденсаторе и ток (1) в катушке:

$$U_C(t) = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \text{ где } U_0 = \frac{q_0}{C}; \quad (16)$$

$$I(t) = -q_0 e^{-\beta t} [\beta \cos(\omega t + \varphi_0) + \omega \sin(\omega t + \varphi_0)], \quad (17)$$

Выражение в квадратных скобках в последнем уравнении можно преобразовать к одному косинусу. Для этого умножим и разделим выражение в квадратных скобках  $\sqrt{\omega^2 + \beta^2} = \omega_0$  и введём угол  $\delta$  такой, что

$$\cos \delta = -\frac{\beta}{\omega_0}, \quad \sin \delta = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (18)$$

С учетом этих соотношений преобразуем выражение (17) к виду

$$I(t) = \omega_0 q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0 + \delta). \quad (19)$$

Из соотношений (18) следует, что угол  $\delta$  лежит во второй четверти:  $\frac{\pi}{2} < \delta < \pi$ . Это означает, что при наличии активного сопротивления  $R$  ток в контуре опережает по фазе напряжение на конденсаторе более, чем на  $\frac{\pi}{2}$ . При  $R = 0$  выполнялось бы соотношение  $\delta = \frac{\pi}{2}$ . Графики зависимостей от времени напряжения (16) и тока (19) показаны на рис 4.



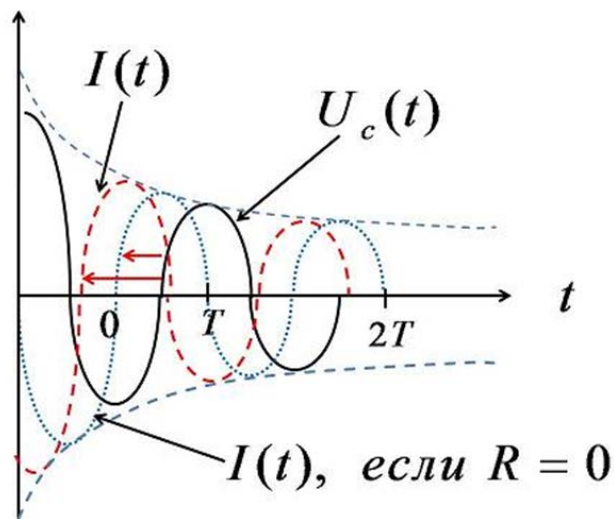


Рис 4. Зависимости напряжения на конденсаторе и тока в контуре от времени. Горизонтальные стрелки изображают временной сдвиг  $\Delta t = \frac{\delta}{\omega}$  между колебаниями тока и напряжения

Кроме величин  $\omega_0$ ,  $\omega$  и  $\beta$  для характеристики затухающих колебаний в контуре используют следующие величины: *время релаксации*  $\tau$ , *логарифмический декремент затухания*  $\lambda$ , *добротность контура*  $Q$ .

Время релаксации  $\tau$  – время, за которое амплитуда колебаний (12) уменьшается в  $e$  раз. Из (12) и (8) получаем

$$\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2L}{R}. \quad (20)$$

Логарифмическим декрементом затухания называется натуральный логарифм отношения двух значений амплитуды (12), разделённых периодом колебаний  $T$ :

$$\lambda = \ln \frac{q_m(t)}{q_m(t+T)}. \quad (21)$$

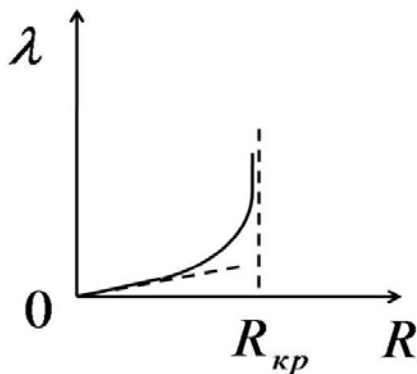
Подставляя сюда выражение (12), в соответствии с определениями (8) и (14) находим выражение для логарифмического декремента через параметры элементов контура:

$$\lambda = \beta T = \frac{R}{L} \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (22)$$

Интерес представляет зависимость логарифмического декремента от активного сопротивления  $R$  контура при фиксированных ёмкости  $C$  и индуктивности  $L$ . Если затухание мало, т.е.  $\beta \ll \omega_0$  или с учетом (8) и (9)  $\frac{R}{2L} \ll \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , то зависимость (22) логарифмического декремента от сопротивления является практически линейной:

$$\lambda \approx \pi R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (23)$$

Очевидно, что при приближении сопротивления к критическому значению (15) логарифмический декремент обращается в бесконечность. На рисунке 5 изображена зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления контура.



*Рис 5. Зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления контура*

Согласно формулам (20) и (22), логарифмический декремент можно представить, как

$$\lambda = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}, \quad (24)$$

где  $N_e$  число колебаний за время релаксации, т.е., напомним, за время, в течение которого амплитуда уменьшится в  $e$  раз.

При экспериментальном измерении логарифмического декремента затухания измеряют два значения напряжения на конденсаторе:  $U_i$  и  $U_{i+n}$ , отвечающие максимумам зависимости  $U_C(t)$ , разделенных количеством  $n$

периодов. С использованием этих значений напряжения, учитывая формулы (6) и (12), из (21) получаем

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{U_i}{U_{i+n}}. \quad (25)$$

Добротность контура с точностью до коэффициента  $2\pi$  характеризует отношение энергии  $W(t)$ , запасенной в контуре, к потере энергии за период и определяется следующим соотношением

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}. \quad (26)$$

Поскольку энергия конденсатора  $W = q^2/2C$  и, следовательно, электромагнитная энергия, запасенная в контуре, пропорциональна квадрату амплитуды (12), для добротности контура при малом затухании получаем выражение

$$Q = 2\pi \frac{q_m^2(t)}{q_m^2(t) - q_m^2(t+T)} = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\beta T}}. \quad (27)$$

При малом затухании показатель экспоненты в знаменателе второй дроби мал. Разложим экспоненту в ряд и воспользуемся формулой (22), тогда

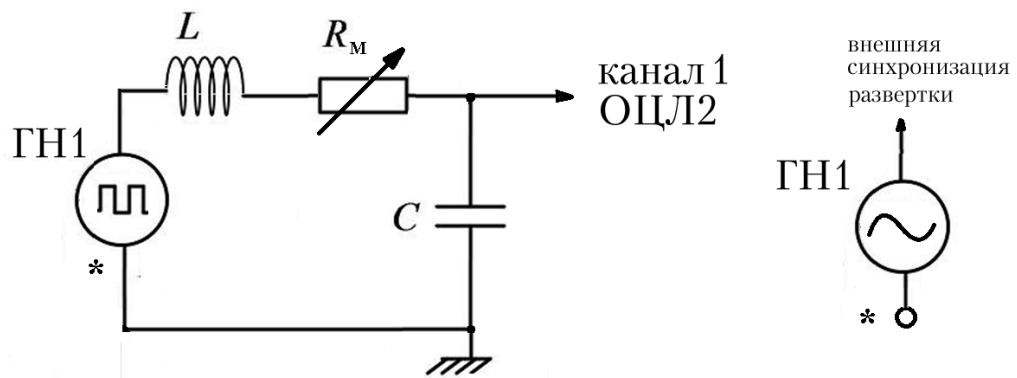
$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e. \quad (28)$$

В случае малого затухания для логарифмического декремента справедлива формула (23) и выражение (28) преобразуется к виду

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (29)$$

## Порядок выполнения работы

1. Спишите значения индуктивности  $L$  катушки и емкостей конденсаторов  $C_1, C_2, C_3, C_4$  с измерительного стенда.
2. Соберите схему, изображенную на рисунке 6. В качестве индуктивности используйте катушку  $L$ , в качестве ёмкости – конденсатор  $C_1$ . Роль добавочного сопротивления в контуре будет играть магазин сопротивлений  $R_M$ . Сигнал в виде прямоугольных импульсов с генератора переменных напряжений ГН-1 подайте в колебательный контур. Установите на генераторе частоту 40 Гц. Сигнал с конденсатора подайте на вход канала 1 осциллографа ОЦЛ2. Выход синусоидального сигнала генератора ГН-1 соедините с сигнальным входом синхронизации осциллографа. Включите осциллограф в режим внешней синхронизации. Получите на экране устойчивую картину затухающих колебаний. Обратите внимание, что регулировка амплитуды выходного синусоидального напряжения генератора ГН-1 позволяет смещать наблюдаемую осциллограмму по горизонтали.



*Рис 6. Рабочая схема для изучения затухающих колебаний напряжения на конденсаторе*

3. При разных сопротивлениях магазина  $R_M$  измерьте период колебаний в контуре и значения  $2U_i, 2U_{i+n}$  удвоенной амплитуды (размаха) колебаний напряжения на конденсаторе для двух моментов времени разделённых количеством периодов  $n = 1-5$ . На рисунке 7 показана примерная осциллограмма напряжения на конденсаторе и измеряемые напряжения для случая  $n = 3$ . Для большей точности

измерение периода необходимо проводить с минимально возможным масштабом по горизонтальной оси. При измерении величин  $2U_i$  и  $2U_{i+n}$  в одном масштабе по вертикальной оси их можно записывать в делениях экрана, не переводя в *вольты*, поскольку в дальнейших расчетах используется отношение напряжений. При этом желательно выбирать максимальное значение  $n$ , но не слишком маленькое значение второго напряжения:  $2U_{i+n}(\text{дел.}) \geq 2$ . Измерения проведите при сопротивлении магазина  $R_M$  в диапазоне от 0 до 100 Ом с шагом 10 Ом и при значениях 200, 300, 400 Ом. Заполните первые пять столбцов таблицы 1.

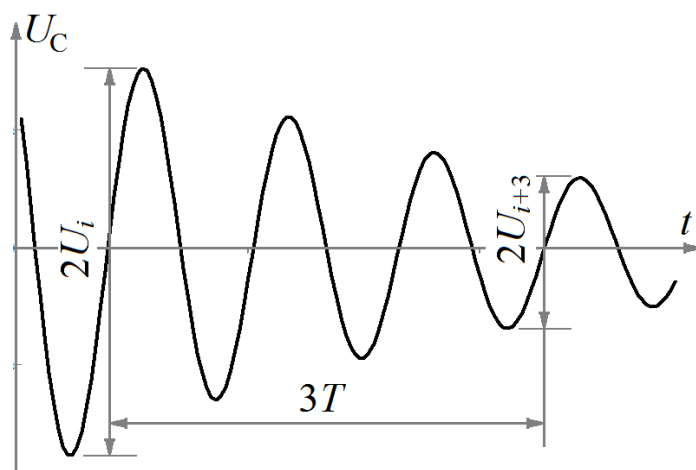


Рис 7. Осциллограмма затухающих колебаний напряжения на конденсаторе при измерении удвоенной амплитуды для моментов времени, разделенных тремя периодами

По формуле (25) вычислите значения логарифмического декремента  $\lambda$ , заполните соответствующие столбцы таблицы 1

Таблица 1.

$R_M, \text{ Ом}$	$T, \text{ мс}$	$2U_i, \text{ дел}$	$2U_{i+n}, \text{ дел}$	$n$	$\lambda$	$Q$	$R, \text{ Ом}$	$L, \text{ мГн}$

4. Постройте график зависимости логарифмического декремента  $\lambda$  от сопротивления магазина  $R_M$ . По начальному участку графика ( $R_M \leq 100 \text{ Ом}$ ) найдите наклон и отсечку аппроксимирующей прямой и рассчитайте абсциссу точки пересечения этой прямой с осью абсцисс. Этой точке отвечало бы нулевое значение логарифмического декремента и в соответствии с формулой (22) — нулевое полное сопротивление  $R$  контура. Полное сопротивление

складывается из собственного сопротивления контура  $R_0$  и сопротивления магазина  $R_M$ :

$$R = R_M + R_0. \quad (30)$$

Поэтому абсцисса  $R_M|_{\lambda=0}$  точки  $\lambda = 0$  позволяет определить собственное сопротивление контура:

$$R_0 = -R_M|_{\lambda=0}. \quad (31)$$

5. Используя формулы (30) и (23) вычислите значения полного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$ , занесите результаты в таблицу 1. Вычисления индуктивности проведите только для малых значений сопротивления магазина:  $R_M \leq 100 \text{ Ом}$ . Усредните полученные значения  $L$  и оцените погрешность среднего значения  $L_{\text{ср}}$ . Сравните среднее значение индуктивности с данными измерительного стенда.
6. По формулам (14) и (30) вычислите период колебаний в контуре при сопротивлении магазина 0, 200 и 400 Ом. Результаты сравните с измеренными значениями.
7. Вычислите по формуле
- 8.

$$Q = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\lambda}} \quad (32)$$

добротность контура  $Q$  при различных сопротивлениях магазина. Результаты занесите в таблицу 1. Постройте график зависимости добротности от сопротивления контура. Для 1—2 малых сопротивлений вычислите добротность по формуле (29). Сравните полученные результаты.

8. Увеличивая сопротивление магазина, подберите его значение, при котором исчезает периодичность процесса разряда конденсатор. Используя полученное таким образом значение с учетом формулы (30) оцените критическое сопротивление контура. Вычислите

критическое сопротивление по формуле (15). Сравните полученные значения критического сопротивления.

9. Установите нулевое сопротивление магазина. Последовательно включая в качестве ёмкости контура конденсаторы  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  измерьте период  $T_{\text{эксп}}$  колебаний в контуре. Вычислите соответствующие значения периода  $T_{\text{теор}}$  по формуле (14), используя найденные выше индуктивность  $L_{\text{ср}}$  и собственное сопротивление  $R_0$  контура. По результатам измерений и вычислений заполните таблицу 2.

Таблица 2.

$C, \text{мкФ}$	$T_{\text{эксп}}, \text{мс}$	$T_{\text{теор}}, \text{мс}$	$\delta T = \frac{T_{\text{эксп}} - T_{\text{теор}}}{T_{\text{теор}}}, \%$

Постройте графики зависимости периодов  $T_{\text{эксп}}$  и  $T_{\text{теор}}$  от ёмкости конденсатора. Оцените, можно ли вычислять период по формуле Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (32)$$

и выполняется ли в данном случае условие  $\beta \ll \omega_0$ .

10. Включите в качестве ёмкости контура конденсатор  $C_1$ . Установите сопротивление магазина 30—50 Ом. Соберите схему, изображенную на рисунке 8. Напряжение, подаваемое на вход второго канала осциллографа, будет пропорционально току в контуре, в соответствии с законом Ома:

$$U_R = IR_M. \quad (33)$$

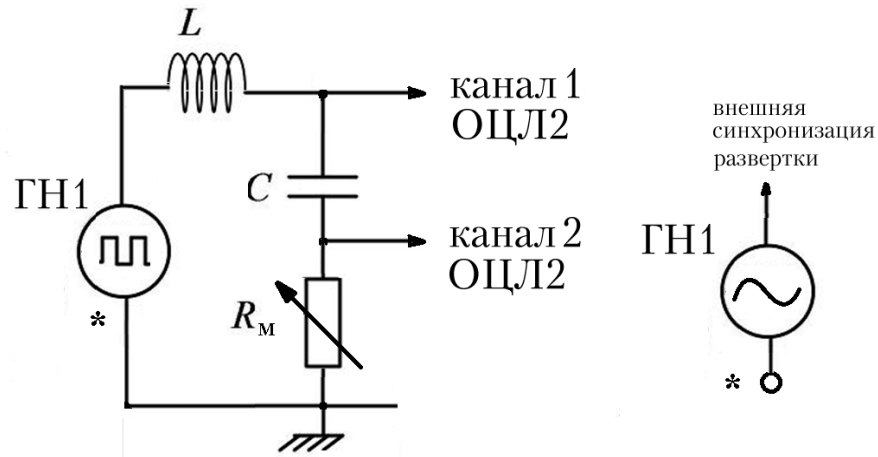


Рис 8. Рабочая схема для одновременного изучения затухающих колебаний напряжения на конденсаторе и тока в контуре

В то же время напряжение, подаваемое на вход первого канала, будет практически совпадать с напряжением  $U_C$  на конденсаторе. Переключите осциллограф в режим одновременного наблюдения двух сигналов (режим «1,2»). Ручками перемещения сигналов по вертикали добейтесь того, чтобы колебания обоих напряжений происходили относительно одной и той же горизонтали. Примерный вид осциллограмм изображен на рисунке 9. Измерьте в делениях экрана период  $T$  колебаний и временной сдвиг  $\Delta t$  между сигналами обоих каналов. По формуле

$$\delta_{\text{эксп}} = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad (34)$$

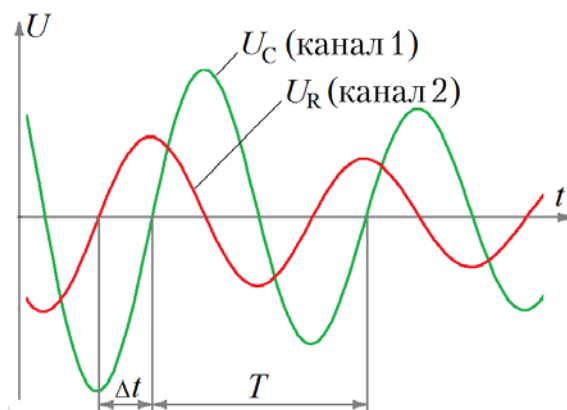


Рис 9. Осциллограммы затухающих колебаний напряжения на конденсаторе и тока в контуре при измерении фазового сдвига между током и напряжением



вычислите сдвиг фаз между током в контуре и напряжением на конденсаторе. Вычислите значения сдвига фаз  $\delta_{\text{теор}}$ , используя формулы (8), (9), (11) и (18). Сравните полученные значения  $\delta_{\text{эксп}}$  и  $\delta_{\text{теор}}$ .

11. Установите частоту генератора 1200 Гц. Подберите масштаб по времени и масштабы отображения напряжения каналов, при которых на экране осциллографа в режиме «X-Y» наблюдается плавная и яркая фазовая кривая  $I(U)$ . Наблюдаемая кривая состоит из двух симметричных частей, поскольку возбуждение затухающих колебаний происходит как передними, так и задними фронтами входных прямоугольных импульсов. Зарисуйте с сохранением масштаба или сфотографируйте часть кривой, отвечающую затухающим колебаниям, возбуждаемым одним из фронтов входного сигнала. Запишите масштабы отображения напряжения для обоих каналов.

## Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .
2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие: Для студ. 1,2 и 3-го курсов всех спец. и направлений очной и заочной форм обучения. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.- 56 с

## Лабораторная работа №13

### ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ.

**Цель работы:** Изучение вынужденных колебаний и явления резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре. Изучение зависимости сдвига фаз колебаний от частоты. Изучение закона Ома для цепи переменного тока.

#### *Требуемое оборудование*

Осциллограф лабораторный ОЦЛ-2

Генератор звуковой частоты ЗГ1

Блок амперметра-вольтметра

Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01

Соединительные провода.

#### *Краткое теоретическое введение*

##### **Вынужденные электромагнитные колебания.**

Рассмотрим случай, когда в контур включена внешняя переменная ЭДС, изменяющаяся со временем по гармоническому закону

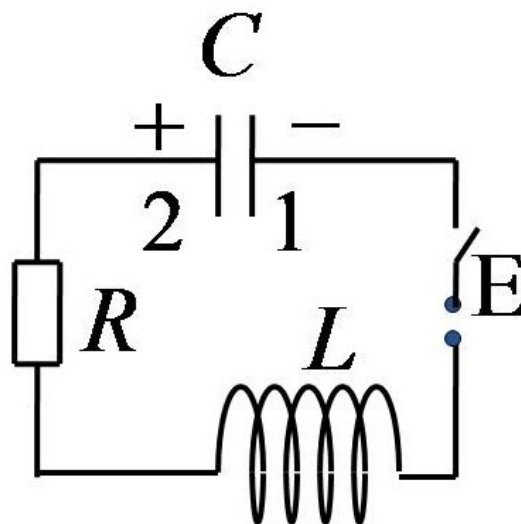


Рис. 1. Схема для изучения затухающих колебаний.

$$E = E_0 \cos \omega t \quad (1)$$

Этот закон занимает особое положение благодаря свойствам самого колебательного контура сохранять гармонический вид колебаний при действии внешней гармонической ЭДС. Получим уравнение колебаний в контуре.

По закону Ома для неоднородного участка цепи:

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + E_{si} + E. \quad (2)$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке индуктивности

$$E_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3)$$

Разность потенциалов между обкладками конденсатора

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}. \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2)

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = \frac{E_0}{L} \cos \omega t. \quad (5)$$

Введём обозначения:

собственная частота контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (6)$$

коэффициент затухания

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad (7)$$

тогда уравнение (5) примет вид:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{E_0}{L} \cos \omega t. \quad (8)$$

Решение этого уравнения, представляет собой сумму общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения.

Общее решение однородного уравнения экспоненциально затухает и по прошествии некоторого времени оно практически исчезнет, поэтому нас будут интересовать только установившиеся колебания, когда остаётся только частное решение неоднородного уравнения.

Докажем, что установившиеся колебания будут определяться уравнением

$$q = q_0 \cos(\omega t - \psi), \quad (9)$$

$q_0$  – амплитуда колебаний заряда на конденсаторе,

$\psi$  – разность фаз между колебаниями заряда и внешней ЭДС.

Сначала получим выражение для тока. Для этого продифференцируем (9) по времени:

$$I = -\omega q_0 \sin(\omega t - \psi) = I_0 \cos\left(\omega t - \psi + \frac{\pi}{2}\right) = I_0 \cos(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

Здесь введены обозначения:

$\varphi$  – сдвиг по фазе между током и внешней ЭДС

$$\varphi = \psi - \frac{\pi}{2}, \quad (11)$$

$I_0$  – амплитуда силы тока

$$I_0 = \omega q_0. \quad (12)$$

Наша задача определить  $I_0$  и  $\varphi$ . Для этого мы поступим следующим образом. Представим исходное уравнение (8) в виде

$$U_L + U_R + U_C = E_0 \cos \omega t \quad (13)$$

Здесь слева написана сумма напряжений на индуктивности  $L$ , сопротивлении  $R$ , и ёмкости  $C$ . Мы видим, что сумма этих напряжений в любой момент времени должна совпадать с внешней ЭДС. Учитывая (11) и (12), запишем выражение для напряжения на резисторе

$$U_R = RI_0 \cos(\omega t - \psi) \quad (14)$$

Оно изменяется в фазе с внешней ЭДС, напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{q_0}{C} \cos(\omega t - \psi) = \frac{I_0}{\omega C} \cos\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (15)$$

отстает по фазе от внешней ЭДС на  $\frac{\pi}{2}$ ,  
напряжение на катушке индуктивности

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = -\omega L I_0 \sin(\omega t - \psi) = \omega L I_0 \cos\left(\omega t - \psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (16)$$

опережает по фазе внешнюю ЭДС на  $\frac{\pi}{2}$ .

В соответствии с (14), (15) и (16), мы можем представить полное сопротивление цепи как сумму трёх сопротивлений: емкостного

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (17)$$

индуктивного

$$X_L = \omega L, \quad (18)$$

В сумме они определяют реактивное сопротивление цепи

$$X = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right), \quad (19)$$

и активного сопротивления  $R$ . (20)

Полное сопротивление цепи получило название “импеданс”. Учитывая сдвиги фаз в (14), (15) и (16), получим

$$X = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (21)$$

### Векторная диаграмма

Согласно уравнениям (13)–(16), решение (8) удобно искать в виде векторной диаграммы, изобразив амплитуды напряжений  $U_{R_0} = R I_0$ ,

$U_{C_0} = \frac{I_0}{\omega C}$ ,  $U_{L_0} = \omega L I_0$  и их векторную сумму, равную согласно (13) вектору величиной  $E_0$ . Эта диаграмма показана на рис 2.

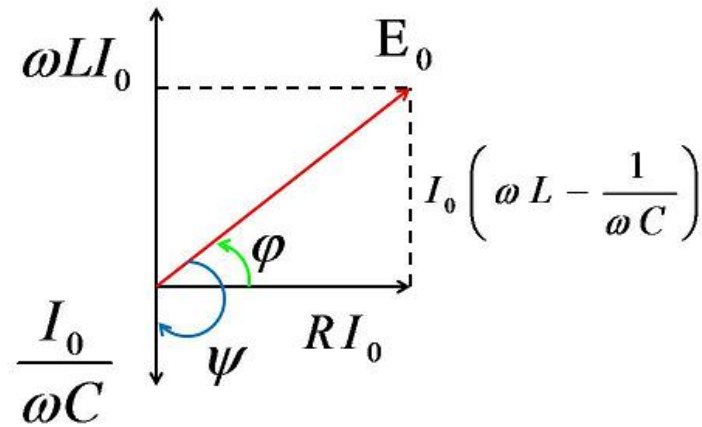


Рис. 2 Векторная диаграмма.

Из прямоугольного треугольника этой диаграммы легко получить следующие выражения для  $I_0$  и  $\varphi$ .

$$I_0 = \frac{E}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (23)$$

Задача, таким образом, решена. Заметим, в заключение, что построенная нами векторная диаграмма оказывается весьма полезной при решении многих конкретных вопросов. Она позволяет наглядно, легко и быстро анализировать различные ситуации.

### Резонансные кривые для тока.

Резонансными кривыми называют графики зависимости амплитуд силы тока  $I_0$ , заряда на конденсаторе  $q_0$  и напряжений  $U_C$ ,  $U_L$  и  $U_R$ , определяемых формулами (14), (15) и (16) от частоты внешней ЭДС  $\omega$ .

Резонансные кривые для силы тока  $I_0(\omega)$  показаны на рис. 3.

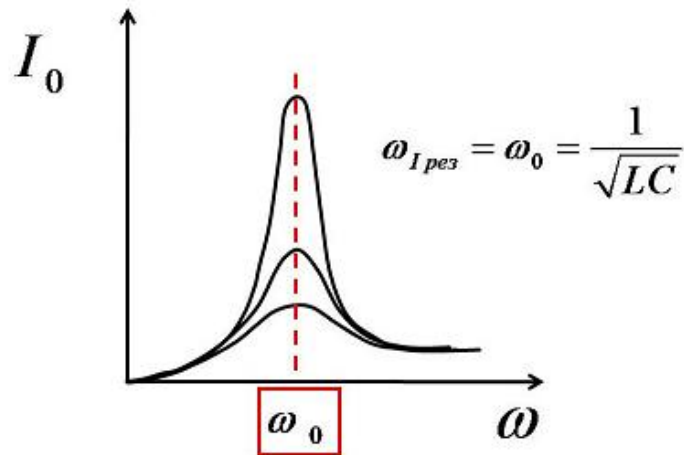


Рис. 3. Резонансные кривые для силы тока.

Знаменатель (22) минимален, при

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (24)$$

Следовательно, резонансная частота для силы тока совпадает с собственной частотой контура

$$\omega_{I_{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (25)$$

Резонансная частота для тока не зависит от коэффициента затухания, но максимум при резонансе оказывается тем выше и острее, чем меньше коэффициент затухания  $\beta = \frac{R}{2L}$ .

### Резонансные кривые для заряда конденсатора.

Резонансные кривые для заряда на конденсаторе показаны на рис 4. Резонансные кривые для напряжения на конденсаторе, естественно, имеют такой же вид. Выполним преобразования, чтобы получить в явном виде зависимость  $q_0$  от  $\omega$ :

$$q_0 = \frac{I_0}{\omega} = \frac{E_0}{\omega \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{\frac{E_0}{L}}{\omega \sqrt{\frac{R^2 \omega^2}{L^2} + \omega^4 - \frac{2\omega^2}{CL} + \frac{\omega^2}{C^2 L^2}}}. \quad (26)$$

Учитывая, что

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (27)$$

и

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (28)$$

получаем :

$$q_0 = \frac{\frac{E_0}{L}}{\sqrt{4\beta^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}. \quad (29)$$

Приравняем производную знаменателя (29) к нулю и найдем резонансную частоту

$$\omega_{q_{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (30)$$

Резонансная частота для заряда конденсатора меньше собственной частоты контура и зависит от коэффициента затухания.

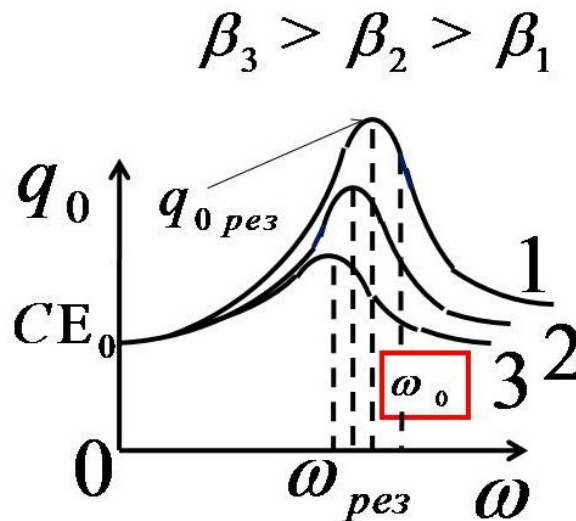


Рис. 4. Резонансные кривые для заряда на конденсаторе.

Чем меньше коэффициент затухания, тем острее резонанс и тем ближе резонансная частота к собственной частоте колебаний контура.

Аналогично можно вычислить и резонансную частоту для напряжения на катушке индуктивности. Окажется, что эта частота



несколько превышает собственную частоту колебаний контура и приближается к ней по мере убывания коэффициента затухания.

На рис 5. Показаны зависимости амплитуд напряжений  $U_{C_0}$ ,  $U_{L_0}$  и  $U_{R_0}$  от частоты внешней ЭДС. Резонансные частоты

$$\omega_{I_{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (31)$$

$$\omega_{q_{рез}} = \sqrt{1 - 2\left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2}, \quad (32)$$

$$\omega_{L_{рез}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + 2\left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2}}. \quad (33)$$

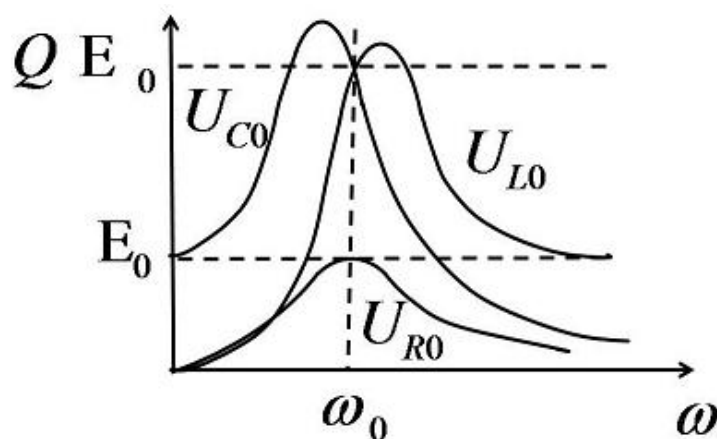


Рис. 5. Зависимости амплитуд напряжений  $U_{C_0}$ ,  $U_{L_0}$  и  $U_{R_0}$  от частоты внешней ЭДС  $\omega$ .

Чем меньше коэффициент затухания  $\beta$ , тем ближе резонансные частоты всех величин к собственной частоте контура  $\omega_0$ .

### Резонансные кривые и добротность.

Форма резонансных кривых определённым образом связана с добротностью контура  $Q$ . Особенно простой эта связь оказывается для случая слабого затухания, когда  $\beta \ll \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

В этом случае

$$U_{C_{рез}} = \frac{I_0}{\omega C} = \frac{E_0}{\omega_0 CR}. \quad (34)$$

Выразим  $\omega_0$  через характеристики контура и найдём отношение  $U_{C_{рез}}$  к амплитудному значению ЭДС источника  $E_0$ :

$$\frac{U_{C_{рез}}}{E_0} = \frac{\sqrt{LC}}{CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q. \quad (35)$$

Эта формула совпадает с выражением для добротности контура при слабом затухании.

Таким образом, при слабом затухании добротность контура показывает во сколько раз максимальное значение амплитуды напряжения на конденсаторе (и на индуктивности) превышает амплитуду внешней ЭДС.

Добротность связана и с другой важной характеристикой резонансной кривой – её шириной. Оказывается, что при  $\beta \ll \omega_0$

$$Q = \frac{\omega_0}{\delta\omega'}, \quad (36)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота,  $\delta\omega'$  – ширина резонансной кривой на “высоте” равной 0,7 от максимальной (в резонансе). Это соответствует уменьшению мощности по сравнению с мощностью при резонансе в 2 раза.

### **Фазочастотная характеристика.**

Зависимость разности фаз от частоты вынужденных колебаний называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ). На рис 6. Представлены ФЧХ для ёмкости  $\Delta\varphi_C$ , индуктивности  $\Delta\varphi_L$  и на реактивном сопротивлении  $\Delta\varphi_{LC}$  в зависимости от частоты внешней ЭДС. Объясните вид представленных зависимостей, используя формулу (23) и векторную диаграмму рис 2.

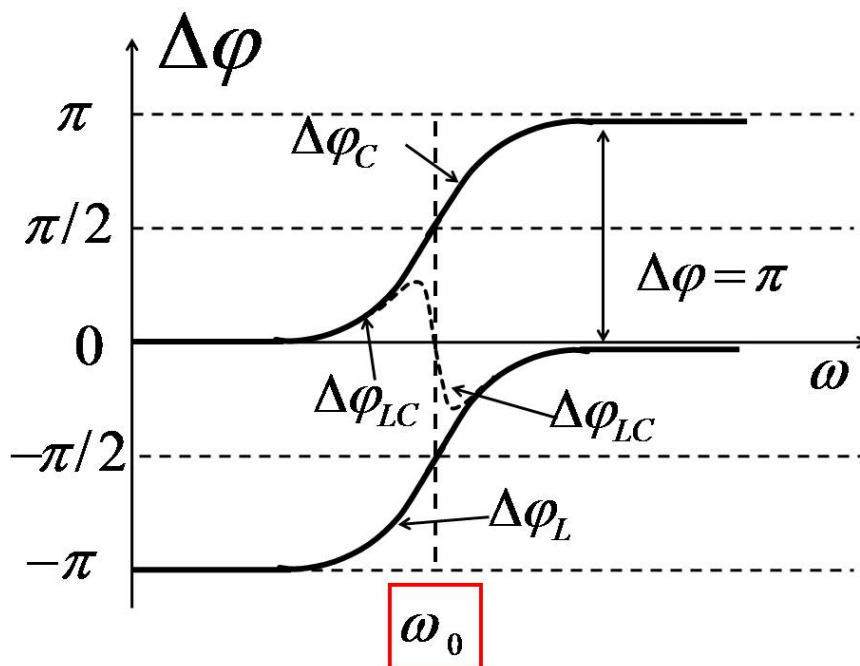


Рис 6. Фазочастотные характеристики.

### Резонанс в технике.

Явление резонанса в нашем случае – это возбуждение сильных колебаний при частоте внешней ЭДС близкой к собственной частоте колебательного контура. Резонанс используют для выделения из сложного напряжения нужной составляющей. На этом основана техника регистрации радиосигнала. Для того, чтобы приёмник принимал интересующую нас радиостанцию, его необходимо настроить, т.е. изменением  $C$  и  $L$  колебательного контура добиться совпадения его собственной частоты с частотой электромагнитных волн, излучаемых радиостанцией.

С явлением резонанса может быть связана и определённая опасность: внешняя ЭДС или напряжение могут быть малы, однако, при этом напряжение на отдельных элементах контура (на ёмкости или индуктивности) могут достигать опасного для жизни значения. Это требует осторожности при работе с контурами, особенно при больших ёмкостях.

### Рекомендуемое задание к работе.

Соберите рабочую схему (рис 7). Звуковой генератор подключён к последовательно соединённым магазину сопротивлений  $R_M$ , катушке индуктивности  $L$  и конденсатору  $C$ . (По указанию преподавателя используйте конденсатор  $C_2$  или  $C_3$ .) Выходной сигнал звукового генератора ЗГ1 (точки 0 и 3) подаётся на вход I Осциллографа ОЦЛ-2. Канал II осциллографа может быть подключён либо к точкам 0 и 1, чтобы

измерять напряжение на конденсаторе, либо к точкам 0-2, чтобы измерять напряжение на реактивном сопротивлении цепи. Проследите, чтобы клеммы “земля” ЗГ1 и ОЦЛ2 были подключены к общей точке.

Разность фаз сигналов на I и II канале осциллографа может быть определена двумя способами: во-первых, в режиме развёртки по времени по сдвигу одного сигнала относительно другого по горизонтальной оси, во-вторых, путём сложения сигналов как взаимно перпендикулярных гармонических колебаний с одинаковой частотой. Для того, чтобы уложиться в отведённое для выполнения работы время, лучше выбрать первый способ. В случае необходимости на высоких частотах используйте кнопку “Стоп”, чтобы остановить картину на экране осциллографа.

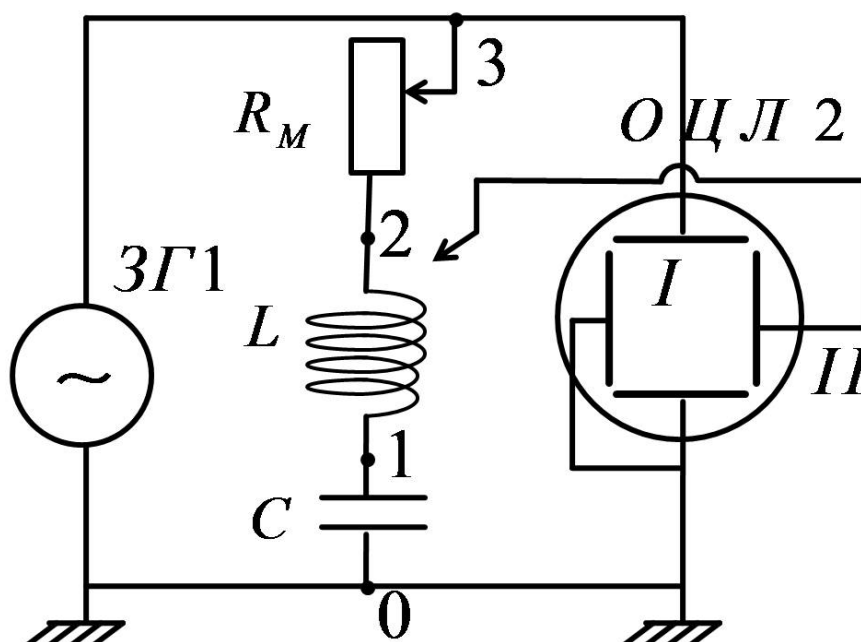


Рис 7. Рабочая схема

2. Установите ручку регулировки напряжения выходного сигнала на генераторе ЗГ1 в среднее положение. Включите генератор. Подайте на канал II осциллографа сигнал с конденсатора. Установите минимально возможное сопротивление резистора. Включите генератор развёртки, установите режим одновременного наблюдения на экране осциллографа сигнала I и II каналов.

3. Изменяя частоту генератора ЗГ1 в интервале от 5000Гц до 10000Гц, определите резонансную частоту  $\omega_{q\text{рез}}$ , при которой амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе достигает наибольшего значения.

4. Для известных значений ёмкости конденсатора  $C$  и индуктивности катушки  $L$  вычислите резонансную частоту без учёта активного сопротивления катушки. Сравните с частотой, найденной экспериментально. Объясните различие. Сопротивление катушки указано на установке. Вычислите резонансную частоту. Сравните с частотой, найденной экспериментально.

5. Определите разность фаз между напряжениями на генераторе и на конденсаторе при резонансе. Вычислите теоретическую разность фаз по формуле (23) и диаграмме на рис 2. Сравните полученные результаты.
6. Измерьте ЭДС генератора  $E_0$  и амплитуду напряжения на конденсаторе при резонансе  $U_{C рез}$ . По формуле (35) оцените добротность контура  $Q$ .
7. Выполните измерения по определению зависимости амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе  $U_{C_0}$  от частоты  $\nu$ . Измерения проводите в диапазоне частот от 1000 до 20000 Гц с шагом 500 Гц. В районе резонанса шаг уменьшите до 200 Гц. По полученным данным постройте амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)  $U_{C_0}(\nu)$ . По результатам измерений в пункте 7 заполните левый столбец таблицы 1.

Таблица 1.

$R_M = 0$		$R_M =$ Ом	
$\nu$ , Гц	$U_{C_0}$ , В	$\nu$ , Гц	$U_{C_0}$ , В
Шаг 20 Гц			

8. Выполните измерения по определению зависимости разности фаз колебаний ЭДС  $E_0$  и напряжения на конденсаторе  $U_C$  от частоты  $\nu$  при сопротивлении магазина равном нулю  $R_M = 0$ . Измерения проводите в диапазоне частот от 1000 до 20000 Гц с шагом 500 Гц. В районе резонанса шаг уменьшите до 200 Гц. По полученным данным постройте фазочастотную характеристику (ФЧХ)  $\varphi_C(\nu)$ . Заполните левый столбец таблицы 2.

Таблица 2.

$R_M = 0$		$R_M =$ Ом	
$\nu$ , Гц	$\varphi_C$ , рад	$\nu$ , Гц	$\varphi_C$ , рад
Шаг 20 Гц			

9. Установите сопротивление резистора  $R_M$  в интервале от 300 до 500 Ом. Запишите его значение. Проведите аналогичные измерения (пункты 7 и 8). По результатам измерений заполните правые столбцы таблицы 1 и таблицы 2.
- Проведите анализ полученных результатов.
10. Подайте на канал II осциллографа сигнал с реактивного сопротивления контура (точки подключения 0 и 2 рис. 7.). Сопротивление магазина оставьте таким же, как в пункте 9.

11. Выполните измерения по определению зависимости амплитуды колебаний напряжения на реактивном сопротивлении от частоты  $U_{LC_0}(\nu)$ . Измерения проводите в диапазоне частот от 1000 до 20000 Гц с шагом 500 Гц. В районе резкого изменения амплитуды на реактивном сопротивлении шаг уменьшите до 200 Гц. По результатам измерений заполните таблицу 3.

Таблица 3.

$\nu$ , Гц	$U_{LC_0}$
Шаг 20 Гц	

Постройте амплитудно-частотную характеристику. Объясните резкое отличие АЧХ от полученной в пункте 7. (Для этого воспользуйтесь векторной диаграммой рис.2.)

12. Выполните измерения по определению зависимости разности фаз колебаний ЭДС  $E_0$  и напряжения на реактивном сопротивлении от частоты  $\Delta\varphi_{LC}(\nu)$ . Измерения проводите в диапазоне частот от 1000 до 20000 Гц с шагом 500 Гц. В районе резкого изменения амплитуды на реактивном сопротивлении (см пункт 12) шаг уменьшите до 200 Гц. Результаты измерений занесите в таблицу 4.

Таблица 4.

$\nu$ , Гц	$\Delta\varphi_{LC}$ , рад
Шаг 20 Гц	

По полученным данным постройте фазочастотную характеристику ФЧХ  $\Delta\varphi_{LC}(\nu)$ . Проанализируйте полученные результаты.

### Литература

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .

2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие: Для студ. 1,2 и 3-го курсов всех спец. и направлений очной и заочной форм обучения. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.- 56 с

## Лабораторная работа №14

### ИЗУЧЕНИЕ СЛОЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ

**Цель работы:** Изучение сложения двух одинаково направленных электромагнитных колебаний и двух взаимно перпендикулярных колебаний.

**Требуемое оборудование:**

1. Модульный учебный комплекс: МУК-ЭМ2;
2. Генератор звуковых частот ЗГ1 - 1 шт.
3. Генератор напряжений ГН1 - 1 шт.
4. Осциллограф ОЦЛЗ - 1 шт.
5. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01 - 1 шт.

#### Теоретическое введение

##### **Векторная диаграмма.**

Решение ряда вопросов, в частности сложение нескольких колебаний одинакового направления (или сложение нескольких гармонических функций), значительно облегчается и становится наглядным, если изображать колебания графически в виде векторов на плоскости. Полученная таким способом схема называется векторной диаграммой.

Возьмем ось, которую обозначим буквой  $X$  (рис.1). Из точки  $O$ , взятой на оси отложим вектор длины  $\vec{a}$ , образующий с осью угол  $\alpha$ . Если привести этот вектор во вращение с угловой скоростью  $\omega_0$ , то проекция конца вектора будет перемещаться по оси  $x$  в пределах от  $-a$  до  $+a$ , причем координата этой проекции будет изменяться со временем по закону:

$$x = a \cos(\omega_0 t + \alpha) \quad (1)$$

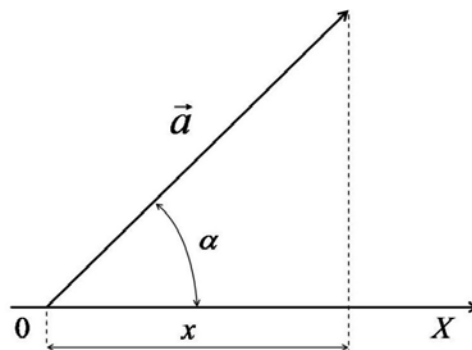


Рис.1. Векторная диаграмма.

Следовательно, проекция конца вектора на ось будет совершать гармоническое колебание с амплитудой, равной длине вектора  $a$ , с круговой частотой, равной, угловой скорости вращения вектора  $\omega_0$ , и с

начальной фазой, равной углу  $\alpha$ , образуемому вектором с осью в начальный момент времени.

Из сказанного следует, что гармоническое колебание может быть задано с помощью вектора, длина которого равна амплитуде колебания, а направление вектора образует с осью  $x$  угол, равный начальной фазе колебания.

Рассмотри сложение двух гармонических колебаний одинакового направления и одинаковой частоты. Смещение  $x$  колеблющегося тела будет суммой смещений  $x_1$  и  $x_2$ , которые запишутся следующим образом:

$$x_1 = a_1 \cos(\omega_0 t + \alpha_1) \quad (2)$$

$$x_2 = a_2 \cos(\omega_0 t + \alpha_2) \quad (3)$$

Представим оба колебания с помощью векторов  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$  (рис. 2). Построим по правилам сложения векторов результирующий вектор  $\vec{a}$ . Проекция этого вектора на ось  $x$  равна сумме проекций слагаемых векторов:

$$x = x_1 + x_2 \quad (4)$$

Следовательно, вектор  $\vec{a}$  представляет собой результирующее колебание. Этот вектор вращается с той же угловой скоростью  $\omega_0$ , как и векторы  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$ , так что результирующее движение будет гармоническим колебанием с частотой  $\omega_0$ , амплитудой  $a$  и начальной фазой  $\alpha$ .

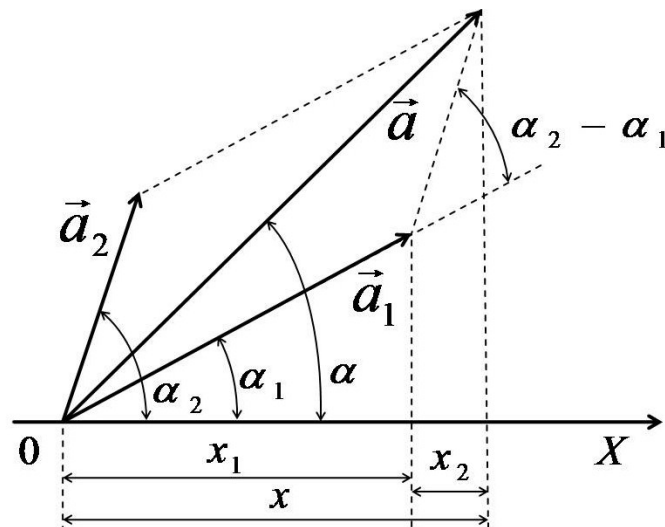


Рис.2. Векторная диаграмма для сложения колебаний.

Из построения видно, что

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos[\pi - (\alpha_2 - \alpha_1)] = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (5)$$



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2}{a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2}. \quad (6)$$

Итак, представление гармонических колебаний посредством векторов дает возможность свести сложение нескольких колебаний к операции сложения векторов. Этот прием бывает особенно полезен, например, в оптике, где световые колебания в некоторой точке определяются как результат наложения многих колебаний, приходящих в данную точку от различных участков волнового фронта.

Формулы (5) и (6) можно, конечно, получить, сложив выражения (2) и (3) и произведя соответствующие тригонометрические преобразования. Но примененный нами способ получения этих формул отличается большей простотой и наглядностью.

Проанализируем выражение (5) для амплитуды. Если разность фаз обоих колебаний  $\alpha_2 - \alpha_1$  равна нулю, амплитуда результирующего колебания равна сумме  $a_1$  и  $a_2$ . Если разность фаз  $\alpha_2 - \alpha_1$  равна  $+\pi$  или  $-\pi$ , т.е. оба колебания находятся в противофазе, то амплитуда результирующего колебания равна  $|a_2 - a_1|$ .

Если частоты колебаний  $x_1$  и  $x_2$  неодинаковы, векторы  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$ , будут вращаться с различной скоростью. В этом случае результирующий вектор  $\vec{a}$  пульсирует по величине и вращается с непостоянной скоростью. Следовательно, результирующим движением будет в этом случае негармоническое колебание, а некоторый сложный колебательный процесс.

### Биения.

Особый интерес представляет случай, когда два слагаемых гармонических колебания одинакового направления мало различаются по частоте. Как мы сейчас покажем, результирующее движение при этих условиях можно рассматривать как гармоническое колебание с пульсирующей амплитудой. Такое колебание называется биениями.

Обозначим частоту одного из колебаний буквой  $\omega$ , частоту второго колебания через  $\omega + \Delta\omega$ . По условию  $\Delta\omega \ll \omega$ . Амплитуды обоих колебаний будем полагать одинаковыми и равными  $a$ . Чтобы не усложнять без надобности формул, допустим, что начальные фазы обоих колебаний равны нулю. Тогда уравнения колебаний будут иметь следующий вид:

$$x_1 = a \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$x_2 = a \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \quad (8)$$

Складывая эти выражения и применяя тригонометрическую формулу для суммы косинусов, получаем:

$$x = x_1 + x_2 = 2a \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos(\omega t) \quad (9)$$

Во втором множителе пренебрегаем членом  $\Delta\omega / 2$  по сравнению с  $\omega$ . График функции (9) изображен на рис. 3 а.

График построен для  $\omega / \Delta\omega = 10$ .

Заклученный в квадратные скобки множитель в формуле (9) изменяется гораздо медленнее, чем второй множитель. Ввиду условия  $\Delta\omega \ll \omega$  за то время, за которое множитель  $\cos(\omega t)$  совершает несколько полных колебаний, множитель, стоящий в квадратных скобках, почти не изменяется. Это дает нам основание рассматривать колебание (9) как гармоническое колебание частоты  $\omega$ , амплитуда которого изменяется по некоторому периодическому закону. Выражением этого закона не может быть множитель, стоящий в квадратных скобках, так как он изменяется в пределах от  $-2a$  до  $+2a$ , в то время как амплитуда по определению – положительная величина. График амплитуды показан на рис. 3 б. Аналитическое выражение амплитуды, очевидно, имеет вид:

$$A = \left| 2a \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \right|. \quad (10)$$

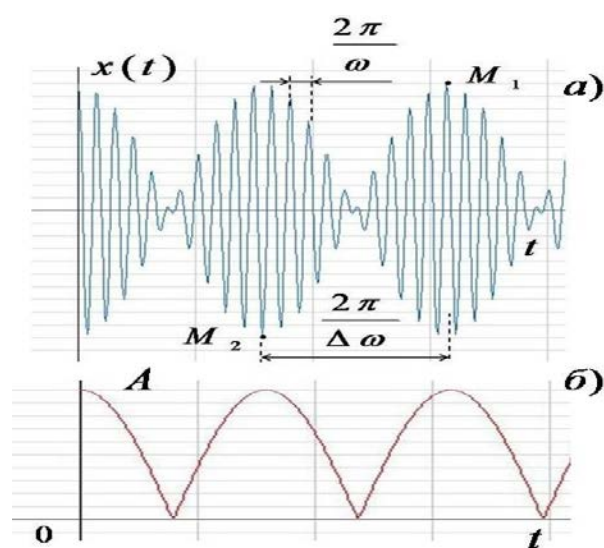


Рис3. Биения.

а) Результат сложения колебаний

б) Зависимость амплитуды результирующего колебания от времени

Функция (10) – периодическая функция с частотой, в два раза превышающей частоту выражения, стоящего под знаком модуля (на рис. 4 сопоставлены графики косинуса и его модуля), т.е. с частотой  $\Delta\omega$ . Таким образом, частота пульсаций амплитуды – ее называют частотой биений – равна разности частот складываемых колебаний.

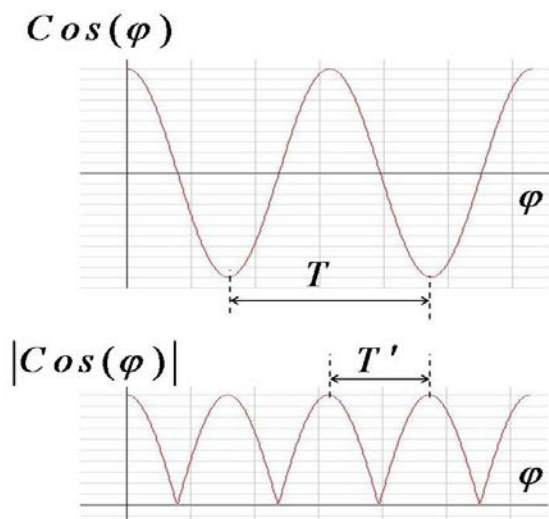


Рис 4. Период колебаний амплитуды при биениях  $T'$ .

Отметим, что множитель  $2a \cos(\Delta\omega / 2t)$  не только определяет амплитуду, но и влияет на фазу колебания. Это проявляется, например, в том, что отклонения, соответствующие соседним максимумам амплитуды, имеют противоположные знаки (см. точки  $M_1$  и  $M_2$  на рис. 3 а).

#### Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.

Допустим, что материальная точка может совершать колебания как вдоль оси  $x$ , так и вдоль перпендикулярной к ней оси  $y$ . Если возбудить оба колебания, материальная точка будет двигаться по некоторой, вообще говоря, криволинейной траектории, форма которой зависит от разности фаз обоих колебаний.

Выберем начало отсчета времени так, чтобы начальная фаза первого колебания была равна нулю. Тогда уравнения колебаний запишутся следующим образом:

$$x = a \cos(\omega t) \quad (11)$$

$$y = b \cos(\omega t + \alpha) \quad (12)$$

где  $\alpha$  – разность фаз обоих колебаний.

Выражения (11) – (12) представляют собой заданное в параметрической форме уравнение траектории в обычном виде, нужно исключить из уравнения (11) – (12) параметр  $t$ . Из первого уравнения следует, что

$$\cos(\omega t) = \frac{x}{a}. \quad (13)$$

Следовательно

$$\sin(\omega t) = \pm \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \quad (14)$$

Теперь развернем косинус в (12) по формуле для косинуса суммы, подставляя при этом вместо  $\cos(\omega t)$  и  $\sin(\omega t)$  их значения (13) и (14). В результате получим:

$$\frac{y}{b} = \frac{x}{a} \cos \alpha \mp \sin \alpha \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \quad (15)$$

Последнее уравнение после несложных преобразований можно привести к виду:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собой уравнение эллипса, оси которого повернуты относительно координатных осей  $x$  и  $y$ . Ориентация эллипса и значения его полуосей зависят довольно сложным образом от амплитуд  $a$  и  $b$  и разности фаз  $\alpha$ .

Определим форму траектории для некоторых частых случаев. Разность фаз равна нулю. В этом случае уравнение (16) принимает вид:

$$\left( \frac{x}{a} - \frac{y}{b} \right)^2 = 0, \quad (17)$$

откуда получается уравнение прямой

$$y = \frac{b}{a} x. \quad (18)$$

Результирующее движение является гармоническим колебанием вдоль этой прямой с частотой  $\omega$  и амплитудой, равной  $\sqrt{a^2 + b^2}$  (рис. 5).

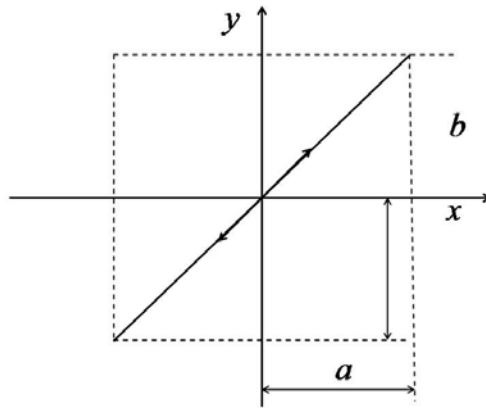


Рис.5. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты. Разность фаз равна нулю.

В случае, если разность фаз  $\alpha$  равна  $\pm\pi$ . Уравнение (16) имеет вид:

$$\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right)^2 = 0 \quad (19)$$

откуда получается, что результирующее движение представляет собой гармоническое колебание вдоль прямой :

$$y = -\frac{b}{a}x, \quad (20)$$

см. рис. 6.

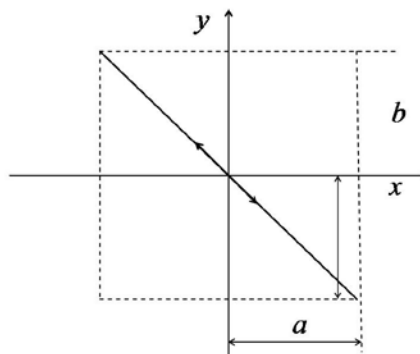


Рис 6. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты. Разность фаз равна  $\pi$ .

При  $\alpha = \pm\frac{\pi}{2}$  уравнение (16) переходит в

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (21)$$

т.е. в уравнение эллипса, приведенного к координатным осям, причем полуоси эллипса равны соответствующим амплитудам колебаний. При равенстве амплитуд  $a$  и  $b$  эллипс вырождается в окружность.

Случаи  $\alpha = +\frac{\pi}{2}$  и  $\alpha = -\frac{\pi}{2}$  различаются направлением движения по эллипсу или по окружности. Если  $\alpha = +\frac{\pi}{2}$ , уравнения (11) - (12) можно записать следующим образом:

$$x = a \cos(\omega t) \quad (22)$$

$$y = -b \sin(\omega t) \quad (23)$$

В момент  $t = 0$  тело находится в точке  $I$  (рис. 7.). В последующие моменты времени координата  $x$  уменьшается, а координата  $y$  становится отрицательной. Следовательно, движение совершается по часовой стрелке.

При  $\alpha = -\frac{\pi}{2}$  уравнения колебаний имеют вид:

$$x = a \cos(\omega t) \quad (24)$$

$$y = b \sin(\omega t) \quad (25)$$

Отсюда можно заключить, что движение происходит против часовой стрелки.

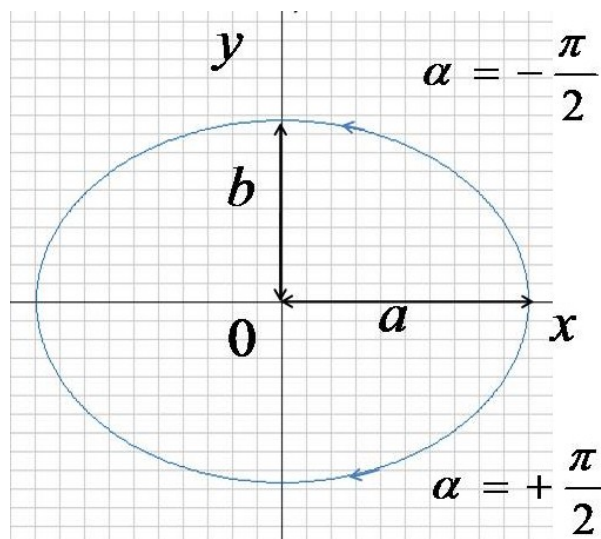


Рис.7. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний . Разность фаз равна  $+\pi/2$  и  $-\pi/2$

Из сказанного следует, что равномерное движение по окружности радиуса  $R$  с угловой скоростью  $\omega$  может быть представлено, как сумма двух взаимно перпендикулярных колебаний:

$$x = R \cdot \cos(\omega t) \quad (26)$$

$$y = \pm R \cdot \sin(\omega t) \quad (27)$$

(знак «+» в выражении для  $y$  соответствует движению против часовой стрелки, знак «-» – движению по часовой стрелке).

В случае, когда частоты взаимно перпендикулярных колебаний различаются на очень малую величину  $\Delta\omega$ , их можно рассматривать как колебания одинаковой частоты, но с медленно изменяющейся разностью фаз. В самом деле, уравнения колебаний можно представить следующим образом:

$$x = a \cdot \cos(\omega t) \quad (28)$$

$$y = b \cdot \cos[\omega t + (\Delta\omega t + \alpha)] \quad (29)$$

и выражение  $\Delta\omega t + \alpha$  рассматривать как разность фаз, медленно изменяющуюся со временем по линейному закону.

Результирующее движение в этом случае происходит по медленно видоизменяющейся кривой, которая будет последовательно принимать форму, отвечающую всем значениям разности фаз от  $-\pi$  до  $+\pi$ .

Если частоты взаимно перпендикулярных колебаний неодинаковы, то траектория результирующего движения имеет вид довольно сложных кривых, называемых фигурами Лиссажу (Жюль Антуан Лиссажу

(1822-1880) – французский физик). На рис. 8 показана одна из простейших траекторий, получающаяся при отношении частот 1:2 и разности фаз  $\pi/2$ . Уравнения колебаний имеют вид:

$$x = a \cdot \cos(\omega t) \quad (30)$$

$$y = b \cdot \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (31)$$

За то время, пока вдоль оси  $x$  точка успевает переместиться из одного крайнего положения в другое, вдоль оси  $y$ , выйдя из нулевого положения, она успевает достигнуть одного крайнего положения, затем другого и вернуться в нулевое положение.

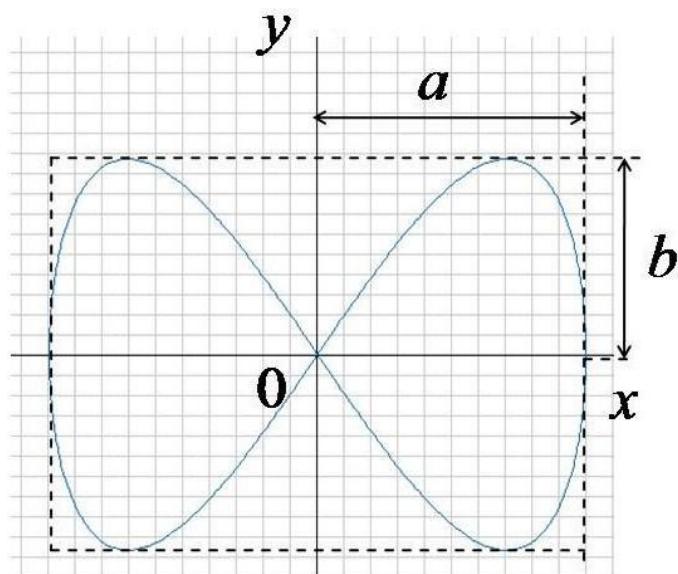


Рис.8. Сложение колебаний, частоты которых относятся как 1 к 2.  
Разность фаз колебаний равна  $\pi/2$ .

При отношении частот  $1:2$  и разности фаз, равной нулю, траектория вырождается в незамкнутую кривую (рис. 9), по которой точка движется туда и обратно. Чем ближе к единице рациональная дробь, выражающая отношение частот колебаний, тем сложнее оказывается фигура Лиссажу. На рис. 10. для примера показана кривая для отношения частот  $3:4$  и разности фаз  $\pi/2$ .

$$x = a \cdot \cos(3\omega t) \quad (32)$$

$$y = a \cdot \cos(4\omega t + \pi/2) \quad (33)$$

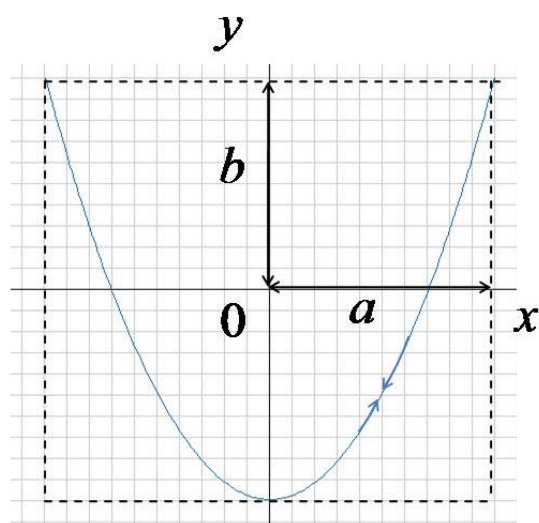


Рис.9. Сложение колебаний, частоты которых относятся как 1 к 2.  
Разность фаз колебаний равна нулю.



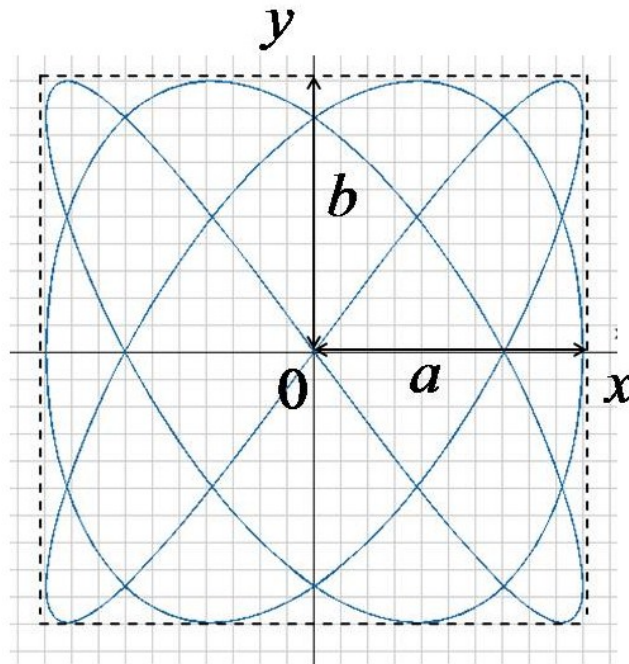


Рис.10. Сложение колебаний, частоты которых относятся как 3 к 4.  
Разность фаз колебаний равна  $\pi/2$ .

Иногда фигурами Лиссажу называют также траектории (в частности, эллиптические кривые), получающиеся при равенстве частот складываемых колебаний.

В данной работе предлагается изучить сложение двух синусоидальных напряжений, приложенных к X и Y обкладкам осциллографа.

### ***Сложение однонаправленных колебаний с одинаковыми частотами.***

Амплитуда  $U_0$  результирующих колебаний равна:

$$U_0 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (34)$$

где  $U_1, U_2$  – амплитуды складываемых колебаний;  
 $\varphi_1, \varphi_2$  – начальные фазы складываемых колебаний.

Начальная фаза результирующих колебаний  $\varphi_{рез}$  подчиняется соотношению:

$$tg \varphi_{рез} = \frac{U_1 \sin \varphi_1 + U_2 \sin \varphi_2}{U_1 \cos \varphi_1 + U_2 \cos \varphi_2}. \quad (35)$$

### **Биения.**

Амплитуда биений  $A(t)$  в момент времени  $t$ :

$$A(t) = \left| 2U_0 \cos \left[ \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \right) t \right] \right|, \quad (36)$$

где  $U_0$  – амплитуда двух складываемых колебаний (предполагается одинаковой);

$\omega_1, \omega_2$  – циклические частоты складываемых колебаний ( $\Delta\omega \ll \omega_{1,2}$ ).

$$T' = \frac{1}{\nu'} = \frac{1}{\nu_1 - \nu_2}, \quad (37)$$

где  $\nu'$  – частота биений;

$\nu_1, \nu_2$  – частоты складываемых колебаний.

### **Сложение взаимно перпендикулярных колебаний**

При сложении на осциллографе взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковыми частотами результирующее напряжение описывается уравнением эллипса:

$$\frac{U_x^2}{U_1^2} + \frac{U_y^2}{U_2^2} - \frac{2U_x U_y}{U_1 U_2} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi \quad (38)$$

где  $U_x, U_y$  – напряжения, регистрируемые на пластинах X и Y соответственно;

$\Delta\varphi$  – разность фаз складываемых колебаний.

При сложении взаимно перпендикулярных колебаний с разными частотами устойчивую картину колебаний можно наблюдать только при кратных частотах.

Для фигур Лиссажу, получающихся при сложении взаимно перпендикулярных колебаний отношение частот  $\nu_x$  и  $\nu_y$  соответствует формуле:

$$\frac{\nu_x}{\nu_y} = \frac{n_y}{n_x} \quad (39)$$

где  $n_x, n_y$  – количество пересечений линии, образующей фигуру Лиссажу, с осями координат  $OX$  и  $OY$ , причём, если ось проходит через точку пересечения ветвей фигуры, то эту точку считают дважды.

Можно определить  $n_x$  и  $n_y$  как наибольшее число пересечений ветвей фигуры вертикальными и горизонтальными прямыми.

См рис 10.

### Методика эксперимента

Для изучения сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с равными частотами собирают схему, показанную на рис.11. Схема состоит из звукового генератора (блок ЗГ1) и  $RC$ -цепи или  $RL$ -цепи (стенд СЗ-ЭМ01). Вход канала I осциллографа подключен к точкам 1 и 3 и 3 и, следовательно, измеряет сигнал непосредственно с ЗГ1. Вход канала II подключен к точкам 2 и 3 и на него подается напряжение с реактивного сопротивления  $X$ . Режим работы осциллографа – суммирование каналов I и II.

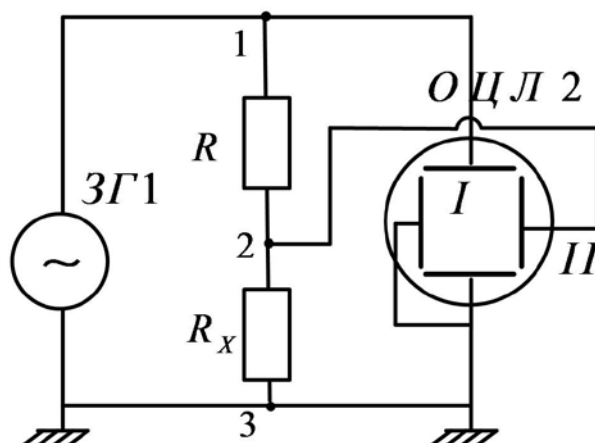


Рис 11. Рабочая схема для изучения сложения однонаправленных колебаний.

Колебания напряжения на реактивном сопротивлении  $X$  являются вынужденными, они определяются колебаниями звукового генератора ЗГ, частота которых  $\nu$ . Следовательно, на каналы I и II осциллографа подаются гармонические колебания с равными частотами. Поскольку между вынужденными колебаниями напряжения на реактивном сопротивлении  $X$  в последовательной  $R-X$  цепочке и колебаниями генератора ЗГ может возникать сдвиг по фазе, величина которого зависит от частоты вынужденных колебаний  $\nu$  и численных значений сопротивлений  $R$  и  $X$ , то при помощи осциллографа можно проводить исследования сложения однонаправленных колебаний с одинаковыми частотами, но разными амплитудами и начальными фазами

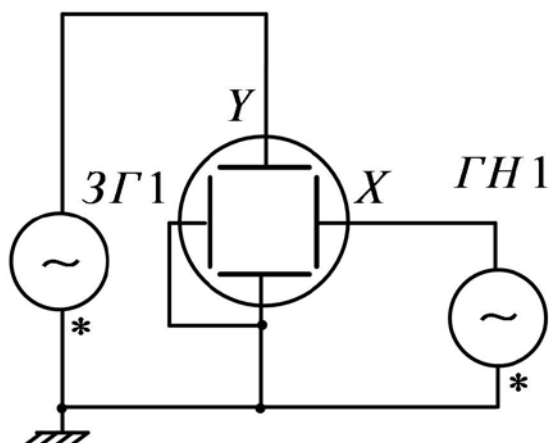


Рис 12. Рабочая схема для сложения двух одинаково направленных колебаний с близкими частотами и взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковыми и разными частотами.

Для изучения сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с близкими частотами собирают схему, показанную на рис.12. При этом сигналы берутся от разных источников (блок генератора напряжений ГН1 и 3Г1). Режим работы осциллографа – суммирование каналов I и II.

Для изучения сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний с одинаковыми и разными частотами используется схема рис.12. Режим работы осциллографа – функциональное отображение зависимости X-Y.

### Рекомендуемое задание к работе

#### *Сложение однонаправленных колебаний с одинаковыми частотами*

1. Соберите схему рис.11. В качестве реактивных сопротивлений можно использовать конденсатор  $C3$  или катушку  $L$ . В качестве активного сопротивления можно использовать  $R3$ . Работать рекомендуется в диапазоне частот 2000...10000 Гц. Установите регулятор выходного напряжения 3Г1 в положение 4-5 делений.
2. Получите на экране осциллографа одновременно два гармонических сигнала (режим I, II). Изменяя частоту 3Г1 в интервале 2000 Гц-12000 Гц с шагом в 1000 Гц, проследите за изменением разности фаз между колебаниями. Для произвольной частоты из диапазона 6000-10000 Гц найдите амплитуды колебаний и их разность фаз. Чувствительность по каналам осциллографа выбирайте таким образом, чтобы обеспечить максимальную точность измерений. Результаты измерений занесите в таблицу 1. Рассчитайте теоретически, пользуясь формулой (34) амплитуду результирующего колебания  $U_{0\text{ выч}}$ .

3. Переведите осциллограф в режим I+II. Измерьте результирующую амплитуду  $U_{0изм}$  и её погрешность. Занесите эти значения в таблицу 1.

Таблица 1.

Измеряемые величины						Вычисляемые величины	
$\nu \pm \Delta\nu,$ <i>Гц</i>	$U_x \pm \Delta U_x,$ <i>В</i>	$U_y \pm \Delta U_y,$ <i>В</i>	$\varphi_2 - \varphi_1$ <i>рад</i>	$\Delta(\varphi_2 - \varphi_1)$ <i>рад</i>	$U_{0изм} \pm \Delta U_{0изм},$ <i>В</i>	$U_{0выч},$ <i>В</i>	$\Delta U_{0выч},$ <i>В</i>

Проанализируйте полученные результаты.

### **Фигуры Лиссажу**

1. Соберите схему рис.12. Установите на ГН1 один из диапазонов с известной частотой (0-3). Запишите её значение  $\nu_x \pm \Delta\nu_x$ . Изменяя частоту ЗГ1  $\nu_y$  добейтесь получения на экране устойчивой во времени фигуры Лиссажу. Определите число пересечений  $n_x$  и  $n_y$ . По формуле (39) рассчитайте частоту ГН1.

Изменяйте частоту ЗГ1  $\nu_y$ , получите последовательно ещё 3-4 фигуры Лиссажу, соответствующие той же частоте  $\nu_x$ . Заполните таблицу 2.

Таблица 2.

Измеряемые величины				Вычисляемые величины	
$\nu_x \pm \Delta\nu_x, Гц$	$n_x$	$n_y$	$\nu_y \pm \Delta\nu_y, Гц$	$\nu_x, Гц$	$\Delta\nu_x, Гц$

По результатам вычислений найдите среднее значение  $\nu_x$ , вычислите его погрешность. Сравните полученный результат с показаниями датчика частоты ГН1. Проанализируйте полученные результаты.

2. Действуя аналогично, проградуируйте, диапазоны ГН1 с неизвестными частотами (4-7). Для каждого диапазона заполните таблицу 3.

Таблица 3.

	Измеряемые величины	Вычисляемые величины

№ диапазона	$n_x$	$n_y$	$\nu_y \pm \Delta\nu_y, \text{Гц}$	$\nu_x, \text{Гц}$	$\Delta\nu_x, \text{Гц}$

### **Биения.**

1. Соберите схему рис.12. Установите на ЗГ1 и ГН1 близкие частоты в диапазоне от 1000 до 2500 Гц. Переведите осциллограф в режим I+II. Вращая ручку частоты блока ЗГ1 добейтесь биений на экране осциллографа. Измерьте период биений  $T'_o$  и сравните его с вычисленным по формуле (37). Заполните таблицу 4.

Таблица 4.

Измеряемые величины			Вычисляемые величины	
$\nu_x \pm \Delta\nu_x, \text{Гц}$	$\nu_y \pm \Delta\nu_y, \text{Гц}$	$T'_{изм} \pm \Delta T'_{изм}, \text{мс}$	$T'_{выч}, \text{мс}$	$\Delta T'_{выч}, \text{мс}$

Проанализируйте полученные результаты.

### **Литература**

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики.— 8-е изд., стер. — М. : Издательский центр "Академия", 2009 .

2. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие: Для студ. 1,2 и 3-го курсов всех спец. и направлений очной и заочной форм обучения. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.- 56 с

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## КАФЕДРА ФИЗИКИ

Кафедра Физики как общеобразовательная кафедра университета обеспечивает преподавание курса общей физики по двум (стандартной и расширенной) учебным программам в количестве 324 и 500 аудиторных часов для всех дневных факультетов, а также заочного и вечернего отделений. Лекции, практические и лабораторные занятия проводятся в течение 1-4 семестров на 1 и 2 курсах и заканчиваются сдачей зачетов и экзаменов в конце каждого семестра. Также на кафедре физики разработаны и реализуются специализированные дисциплины для студентов старших курсов – физика низких температур, биофизика, специальные и дополнительные главы физики.

Кафедра оснащена учебно-лабораторным оборудованием по всем разделам физики и имеет, помимо традиционных, специализированные компьютеризированные учебные лаборатории по электромагнетизму, колебательным процессам, волновой и квантовой оптике, физике низких температур.

В 2011 г. в соответствии с приказом Министра образования и науки Российской Федерации от 18.08.2011 г. № 2209 произошло объединение Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) и Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ). После реорганизации в структуре Университета ИТМО с 01.01.2012 г. по 31.08.2015 г. функционировали две кафедры физики: 1) физики-1, заведующий д.т.н., профессор Стафеев Сергей Константинович; 2) физики-2, заведующий д.т.н., профессор Баранов Игорь Владимирович. С 01.09.2015 г. с целью оптимизации образовательного процесса вышеуказанные кафедры объединены в единую кафедру Физики.

Учитывая богатую и плодотворную историю педагогической и научной работы кафедр физики Университета ИТМО и СПбГУНиПТ,

ниже представлена краткая историческая справка об их развитии образовательной и научной деятельности.

Кафедра физики Университета ИТМО (1930-2011 гг.).

Преподавание физики как учебной дисциплины велось в Ремесленном училище цесаревича Николая всегда с момента его создания. Механико-оптическое и часовое отделение, а затем — Техникум точной механики и оптики имели в своем составе Физический кабинет. Преподаванию дисциплины Физика для учащихся всегда уделялось большое внимание. В 1930 году при организации вуза — Ленинградского института точной механики и оптики — была организована кафедра Физики как одна из общеобразовательных кафедр.

Организатором и первым заведующим кафедрой Физики явился профессор А.П. Ющенко. Затем в довоенные годы кафедру возглавляли: профессора В.Ф. Трояновский, Л.С. Полак. С 1935 года кафедру возглавил известный специалист в области рентгенометрии профессор И.В. Поройков.

В эвакуации в г. Черепаново Новосибирской области кафедру Физики возглавил известный ученый, сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ), занимавшийся дозиметрией и метрологией рентгеновских лучей, профессор К.К. Аглинцев.

С 1945 года кафедру Физики возглавил крупный специалист в области рентгенографии и физики твердого тела профессор Д.Б. Гогоберидзе. В 1946 году профессор Д.Б. Гогоберидзе стал первым деканом нового Инженерно-физического факультета.

Во второй половине 1940-ых годов на кафедре работал выдающийся советский физик-теоретик, член-корреспондент Академии наук СССР Я.И. Френкель. Впоследствии кафедру Физики возглавляли: основоположник теплофизической школы ЛИТМО профессор Г.М. Кондратьев, профессор Н.А. Толстой, доцент С.В. Андреев, доцент А.Ф. Бегункова, профессор А.Я. Вяткин и профессор Н.А. Ярышев.

В течение 16 лет с 1957 по 1973 г. под руководством доктора физико-математических наук, профессора А.Я. Вяткина на кафедре было сформулировано научное направление по исследованию физики взаимодействия электронных пучков с веществом.

С 1973 года на кафедре под руководством профессора Н.А. Ярышева получили развитие научные исследования в области теплофизики, в частности, изучение нестационарной теплопроводности и теплотметрии.

В 1987 году сотрудником кафедры стал С.А. Козлов (ныне декан факультета фотоники и оптоинформатики), Лауреат премии Ленинского комсомола по науке и технике, в 1998 году им была открыта лаборатория волновых процессов.



С конца XX века на кафедре проводится комплексная работа по совершенствованию всего учебного процесса, включая создание фронтальных компьютеризированных учебных лабораторий, банков контроля и проверки усвоения знаний, подготовку программно-методического обеспечения по дистанционному обучению студентов через компьютерные сети RUNNET и INTERNET. В этих учебно- и научно-методических направлениях деятельности кафедры принимали активное участие ведущие сотрудники кафедры доценты С.К. Стафеев (ныне профессор, декан естественнонаучного факультета), Ю.Л. Колесников (ныне профессор, проректор по учебно-организационной и административной деятельности), А.В. Смирнов, А.А. Королев, Г.Л. Башнина, ст.преподаватель С.А. Курашова.

С 2000 по 2015 годы кафедрой заведовал профессор, декан естественнонаучного факультета С.К. Стафеев. Под его руководством было сформировано научное направление, связанное с оптическими методами неразрушающего контроля, сотрудники кафедры А.А. Зинчик, Я.А. Музыченко подготовили и защитили кандидатские диссертации. С.К.Стафеев является организатором и научным руководителем первой в России интерактивной образовательной экспозиция "Музей оптики", созданной в рамках инновационной образовательной программы Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Расположена экспозиция на стрелке Васильевского острова, на первом этаже бывшего дома купца Елисеева. Знакомит с широким кругом применений оптических и оптико-информационных технологий, стимулирует дальнейшее изучение оптики. Главная цель Музея оптики — не только произвести впечатление, но и помочь в обучении школьникам и студентам профильных вузов. Для этого действуют залы практикумов и демонстраций.

Также С.К. Стафеев является куратором выставки Magic of light (Магия света) проходящей с России в рамках в рамках международного Года света, проводимого в 2015 г. в соответствии с решением Генеральной Ассамблеи ООН.

#### Кафедра физики СПбГУНиПТ (1931-2011 гг.).

В составе Университета низкотемпературных и пищевых технологий кафедра физики существовала с момента его основания в 1931 г. и обеспечивала фундаментальную общенаучную подготовку инженеров по всем специальностям.

Кафедрой руководили известные в СССР и России ученые, авторы многочисленных научных работ, монографий, учебников и учебных пособий по физике: доцент А.Н. Святозаров (1931 – 1942 гг.), профессор Л.М. Розенфельд (1942-1949 гг.), доцент Е.А. Штрауф (1949-1959 гг.), доцент К.В. Струве (1960-1968 гг.), профессор Н.В. Солнцев (1969-1975 гг.), заслуженный деятель науки РФ профессор Е.С. Платунов (1975-

2002 г.), профессор С.Е. Буравой (2002-2010 г.), профессор И.В. Баранов (2010-2011 г.).

В 1976-1985 гг. по инициативе заведующего кафедрой Е.С. Платунова коллективом кафедры была осуществлена коренная реконструкция учебно-лабораторной базы. Была переосмыслена логика проведения лабораторных и практических занятий и их связь с лекционной теоретической частью курса. В основу реорганизации была положена идея системного объединения всех видов занятий в логически обоснованную схему фронтального обучения «лекция – практическое занятие – лабораторная работа». Было создано 5 оригинальных учебных лабораторий стендового типа, охватывающих основные разделы курса: 1) Лаборатория физической механики (авторы - профессор Е.С. Платунов, доценты В.В. Курепин, З.В. Сигалова, старший преподаватель Л.В. Соколова); 2) Лаборатория термодинамики и молекулярной физики (Е.С. Платунов, В.В. Курепин, З.В. Сигалова); 3) Лаборатория электромагнетизма (доценты Д.Ю. Иванов, Э.Л. Китанина, А.Ф. Костко, С.М. Бунин); 4) Лаборатория оптики и атомной физики (доценты Л.С. Крайнова, С.Е. Буравой, В.А. Самолетов, преподаватели В.А. Павлов, В.А. Рыков); 5) Лаборатория физики твердого тела (доцент В.И. Соловьев, профессор Н.В. Солнцев, доцент В.М. Козин).

Каждая лаборатория имеет в своем составе 15 стендов, рассчитанных на проведение от 10 до 20 различных лабораторных работ по всем основным темам соответствующего раздела курса. Многие лабораторные работы отличаются оригинальным содержанием и не имеют аналогов в других учебных заведениях. Стенды оснащены современными приборами (цифровыми вольтметрами, лазерами, монохроматорами и т. п.).

Преподавателями кафедры был выполнен большой объем методической работы: составлено и издано около 100 новых оригинальных методических указаний по выполнению лабораторных работ, В.В. Курепиным, И.В. Барановым и В.Е. Куцаковой разработано пособие по оценке погрешностей в лабораторных работах, выдержавшее более 5 изданий.

В 1995-2005 г.г. профессором Е.С. Платуновым подготовлено и дважды издано учебное пособие по курсу общей физики в четырех томах общим объемом около 80 печ. листов.

В 2002 – 2006 гг. для студентов, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур», и магистров всех специальностей создана не имеющая аналогов учебно-исследовательская лаборатория «Физика низких температур» (авторы проф. Е.С. Платунов, проф. И.В. Баранов, проф. В.В. Курепин, доценты В.М. Козин, С.С. Прошкин). Авторским коллективом (Е.С. Платунов, И.В. Баранов, Е.В. Тамбулатова, А.Е. Платунов) издано учебное пособие для этой лаборатории с аналогичным названием. Лаборатория оснащена 15 автоматизированными

стендами каждый из которых позволяет выполнить 13 лабораторных работ по изучению физических свойств веществ в области температур от минус 196 °С до 100 °С.

В 2002 – 2004 гг. преподавателями кафедры С.С. Прошкиным, Н.В. Нименским, В.А. Самолетовым подготовлено и издано учебное пособие «Сборник задач» с методическими указаниями и примерами решения. Сборник содержит около 1700 задач в трех книгах по разделам «Молекулярная физика и термодинамика», «Электродинамика и электромагнитные волны», «Квантовая физика».

Сотрудниками кафедры (проф. Е.С. Платунов, проф. В.А. Самолетов, проф. С.Е. Буравой) подготовлен и дважды издан словарь-справочник «Физика», объемом 40 печ. листов. Доцентом С.С. Прошкиным подготовлено и издано в 2009 году учебное пособие «Физика. История и развитие» объемом около 40 печатных листов для студентов, обучающихся по специальности «Экономика и менеджмент», а также аспирантов и магистров всех специальностей.

На кафедре физики под руководством профессора Е.С. Платунова к началу 80-х годов прошлого столетия сложилась оригинальная самостоятельная научная школа теплофизиков-прибористов, получившая мировое признание и известность.

В 1977 г. при кафедре была открыта Отраслевая научная лаборатория динамических методов теплофизических измерений и приборов. Лаборатория стала базой для научного роста аспирантов и инженеров, формирования нового поколения преподавателей кафедры.

Совместно с ГСКБ теплофизического приборостроения (ГСКБ ТФП) за 15 лет функционирования лаборатории было создано более двадцати различных образцов приборов для изучения теплофизических свойств веществ, охватывающих в совокупности диапазон температур от 4,2 до 1200 К. Некоторые из них были приняты к промышленному производству и выпускались серийно на опытном производстве ГСКБ ТФП и на одном из заводов Казахстана вплоть до распада СССР в 1991 году. По своей методической сути эти разработки значительно превышали уровень таких известных фирм, как «Dynatech» (США), «Feuotron» (ФРГ), «Setaram» (Франция). Созданные приборы обладали большой производительностью, позволяя за один эксперимент изучать температурную зависимость измеряемых параметров (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность). В Советском Союзе основной объем информации о теплофизических свойствах твердых веществ в области от 200 до 700 К был получен на приборах, разработанных научной школой профессора Е.С. Платунова. Во многих научных и учебных лабораториях стран СНГ эти приборы успешно функционируют и в настоящее время.

По данной научной тематике к 1992 году было опубликовано свыше 150 статей, получено 40 авторских свидетельств на изобретения.

Разработаны оригинальные методы исследования теплофизических свойств в области криогенных температур (от 4,2 до 300 К). Созданы средства измерения, не требовавшие специальных криостатирующих устройств, экспрессные по своей сути, что означало значительный прорыв в области техники низкотемпературного теплофизического эксперимента.

Сотрудниками кафедры проведены оригинальные исследования в области создания методов и средств неразрушающего контроля тепловых свойств материалов и изделий. Эти разработки стали основой кандидатских диссертаций Е.А. Белова и Г.Я. Соколова.

В 1976 г. на кафедре развивалась научное направление, связанное с поиском методов построения уравнений состояния и расчетом свойств индивидуальных веществ идеальных газов, имеющих широкое применение в холодильной и криогенной технике. По результатам этих исследований были защищены 4 кандидатских и 2 докторские диссертации, опубликовано более 70 научных статей в отечественных и зарубежных журналах.

С 1992 года ведется поиск новых методов определения тепловых и влажностных характеристик разнообразных групп дисперсных влагосодержащих материалов в условиях их промерзания и размораживания. В настоящее время создан комплекс автоматизированных приборов, позволяющих изучать кинетику изменения энтальпии, дифференциальной теплоты плавления, теплопроводности и влагосодержания пищевых материалов животного и растительного происхождения в области температур от минус 30 °С до 40 °С, в условиях замораживания и размораживания продуктов, разработаны приборы, предназначенных для измерения интенсивности внутренних тепловых источников, непрерывно действующих в пищевых продуктах в условиях их производства и хранения.

При кафедре под руководством профессоров Е.С. Платунова и И.В. Баранова с 2008 г. функционирует научная лаборатория «Теплофизические измерения и приборы». В лаборатории создан комплекс методов автоматизированных приборов для изучения теплопроводности, теплоемкости, теплоты структурных и фазовых переходов в различных веществах, в том числе в процессах замораживания, оттайки, исследуются свойства пищевых продуктов и конструкционных материалов холодильной и криогенной техники.

Коллективом преподавателей кафедры по этому направлению подготовлена к изданию фундаментальная монография «Теплофизические измерения», обобщающая исследования авторов за последние 30 лет.

С конца 60-х годов на кафедре проводятся экспериментальные и теоретические исследования фазовых переходов и критических явлений. Начало этим работам было положено исследованием гравитационного эффекта вблизи критической точки парообразования, проведенным

доцентом Д.Ю. Ивановым. В 80-ые годы группой сотрудников кафедры были проведены работы по корреляционной спектроскопии многократно рассеянного света. По результатам этих исследований опубликована серия научных статей, сделано более 10 докладов на конференциях и защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 90-х годах совместно с одним из ведущих университетов Франции проводились исследования процессов нуклеации наночастиц в растворах. Совокупные результаты исследований критических явлений легли в основу докторской диссертации доцента Д.Ю. Ивановым (2001 г.) и его монографии «Критическое поведение неидеализированных систем».

Научные исследования в области фазовых переходов, предпереходных явлений и рассеяния света в сложных жидких системах успешно развивает доцент, кандидат физико-математических наук А.Ф. Костко. Во время многолетней стажировки в ведущих университетах США А.Ф. Костко совместно с американскими коллегами методами рассеяния света проводил исследования растворов полимеров, водных растворов электролитов, биогелей и лиотропных хромонических жидких кристаллов в широком диапазоне температур и давлений. Результаты этих исследований, проведенных А.Ф. Костко после 2000 года, опубликованы в 13 статьях в ведущих международных научных журналах по физике и химии, а также доложены на 15 международных конференциях.

На сегодня кафедра Физики – одна из крупнейших в университете – представляет собой динамично развивающийся творческий коллектив, способный решать масштабные задачи развития и подготовки инженерных и научно-педагогических кадров. В связи с реорганизацией и объединением кафедр с 1 сентября 2015 года кафедра Физики находится под руководством доктора технических наук, профессора Игоря Владимировича Баранова.

С 2010 г. Игорь Владимирович является членом докторского диссертационного Совета Д 212.234.01. Им опубликовано 57 научных и 7 учебно-методических работ. За последние 3 года издано: 21 научная работа и 2 учебно-методических работы, в том числе в соавторстве Барановым И.В. в 2010 г. издано учебное пособие “Теплофизические измерения” с грифом УМО по политехническому образованию. Баранов И.В. выступал с докладами на 25 международных и всероссийских научных конференциях. Баранов И.В. является с 2008 г. академиком Международной академии холода. Исполняет обязанности заместителя главного редактора научно-технического журнала “Вестник МАХ”.

В настоящее время коллектив кафедры включает в себя 30 преподавателей и 10 учебно-вспомогательного персонала.

Под руководством профессора кафедры физики ИТМО Чирцова А.С. и доцента Демидова В.И. из Университета Западной Вирджинии работает

Международная лаборатория «Нелокальная плазма в нанотехнологиях и медицине, которая ведет исследования по следующим направлениям:

- Исследование параметров нелокальной плазмы модифицированного короткого газового разряда постоянного тока с накаливаемым катодом
- Плазмохимическое моделирование разрядов в газах SF<sub>6</sub> и O<sub>2</sub>
- Изучение особенностей дрейфа микрочастиц в плазме, обусловленных спецификой функции распределения электронов по энергиям в нелокальной плазме
- Моделирование разряда с использованием аналитических методов  
Силами профессора А.С.Чирцова и старшего преподавателя С.А.Курашовой создаются on-line курсы по физике, которые размещены в Lectorium на сайте Университета ИТМО.

Под руководством С.К.Стафеева на кафедре Физики в 2016 году открыта программа подготовки магистров по уникальному в России направлению Science communications.

Королёв Александр Александрович  
Курашова Светлана Александровна  
Смирнов Александр Витальевич

**Электричество и магнетизм**  
**Методические рекомендации**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**часть вторая**  
**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе