

№ 4070

**53
К 602**

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Методические указания

**НОВОСИБИРСК
2011**

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Методические указания
к лабораторным работам по физике № 21, 23, 25–27
для студентов I и II курсов всех факультетов

УДК 534 (076.5)
К 602

Составители:

Г. Е. Невская (лаб. работа № 27),
А. М. Погорельский (лаб. работа № 25–27),
Н. Я. Усольцева (лаб. работа № 23),
В. В. Христофоров (лаб. работа № 21, 23, 25),
А. В. Морозов (лаб. работа № 21, 25),
А. А. Шевченко (лаб. работа № 21, 25)

Рецензент доцент *А.В. Баранов*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Методические указания

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Подписано в печать 08.12.2011. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 200 экз. Уч.-изд. л. 3,25. Печ. л. 3,5. Изд. № 337. Заказ №
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

© Новосибирский государственный
технический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 21. ИЗУЧЕНИЕ СЛОЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ	4
Лабораторная работа № 23. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ	14
Лабораторная работа № 25. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ.....	23
Лабораторная работа № 26. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ НА СТРУНЕ.....	37
Лабораторная работа № 27. ИЗУЧЕНИЕ СЛОЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ	47
Приложение	52

Лабораторная работа № 21

ИЗУЧЕНИЕ СЛОЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы – с помощью осциллографа изучить сложение одинаково направленных и взаимно перпендикулярных гармонических колебаний.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Работа включает следующие этапы.

1. Для изучения сложения двух **одинаково направленных** гармонических колебаний с равными частотами собирают схему, показанную на рис. 21.1. Схема состоит из звукового генератора (ЗГ), подключенного к цепочке последовательно соединенных активного сопротивления R и реактивного (емкостного или индуктивного) сопротивления X . Вход канала I осциллографа (ОСЦ) подключен к точкам 1 и 3 и, следовательно, на него подается сигнал непосредственно с ЗГ. Вход канала II подключен к точкам 2 и 3, на него подается напряжение с реактивного сопротивления X . Каналы ОСЦ включаются таким образом, чтобы оба поступающих на них сигнала отклоняли луч на экране ОСЦ вдоль вертикальной оси y . Генератор развертки осциллографа должен быть включен. Это позволяет наблюдать изменение сигналов со временем.

Колебания напряжения на сопротивлении X являются вынужденными и происходят с частотой колебаний сигнала ЗГ. Следовательно, на каналы I и II осциллографа подаются гармонические колебания с равными частотами.

Известно [1–4], что между вынужденными колебаниями напряжения на реактивном сопротивлении X в последовательной RX -цепочке и колебаниями генератора ЗГ имеется сдвиг по фазе, величина которого зависит от частоты вынужденных колебаний ν , а также от значений сопротивлений R и X .

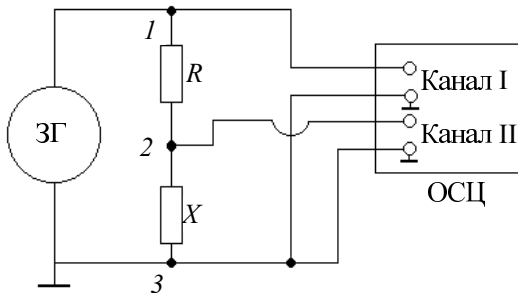


Рис. 21.1

Теоретически сложение однонаправленных гармонических колебаний удобно выполнять с помощью метода векторных диаграмм [1–4].

Пусть напряжения, поступающие на первый и второй каналы ОСЦ с ЗГ и реактивного сопротивления соответственно, изменяются по закону:

$$U_1 = U_{01} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (21.1)$$

$$U_2 = U_{02} \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (21.2)$$

где ω – циклическая частота колебаний.

Пользуясь методом векторных диаграмм, можно показать, что суммарное напряжение будет определяться выражением

$$U = U_0 \cos(\omega t + \varphi_{\text{рез}}), \quad (21.3)$$

где

$$U_0 = \sqrt{U_{01}^2 + U_{02}^2 + 2U_{01}U_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (21.4)$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{рез}} = \frac{U_{01} \sin \varphi_1 + U_{02} \sin \varphi_2}{U_{01} \cos \varphi_1 + U_{02} \cos \varphi_2}. \quad (21.5)$$

Из формулы (21.4) видно, что только при отсутствии сдвига фаз $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ амплитуда суммарных колебаний равна сумме амплитуд складываемых колебаний $U_0 = U_{01} + U_{02}$. Если же $\varphi_2 - \varphi_1 \neq 0$, то $U_0 < U_{01} + U_{02}$.

В экспериментах сдвиг фаз между двумя колебаниями с одинаковыми частотами удобно определять путем их сравнения с использованием двухканального режима работы осциллографа. При этом один из сигналов подается на вход первого канала, а другой – на вход второго. Генератор развертки должен быть включен.

По осциллограмме (рис. 21.2) сдвиг фаз между колебаниями $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ вычисляют по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{L_1}{L_2} 360^\circ \text{ (в градусах) или } \Delta\varphi = \frac{L_1}{L_2} 2\pi \text{ (в радианах).}$$

В данной лабораторной работе сложение колебаний, одно из которых подается на первый, а другое – на второй канал, выполняется автоматически самим осциллографом при включении нужных управляющих кнопок.

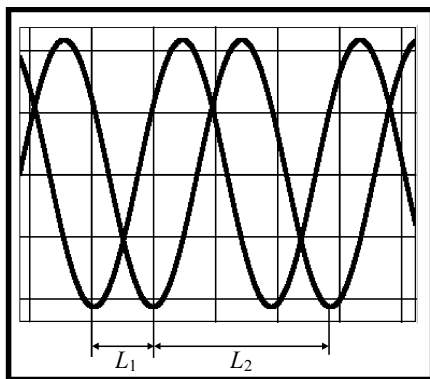


Рис. 21.2

Важно отметить, что колебания напряжения на ЗГ представляют собой сумму колебаний напряжения на последовательно соединенных активном R и реактивном X сопротивлениях. Зная характеристики колебаний на ЗГ и X , можно определить характеристики колебаний на R .

2. Для изучения сложения двух **взаимно перпендикулярных** гармонических колебаний с одинаковыми частотами также используют схему рис. 21.1. С помощью управляющих кнопок осциллографа ОСЦ отключают генератор развертки и отклонение луча одного из каналов с оси y меняют на отклонение вдоль оси x . При этом траектория луча

на экране осциллографа будет результатом сложения тех же колебаний (21.1) и (21.2), но как взаимно перпендикулярных.

Исключив из формул (21.1) и (21.2) время, можно получить уравнение этой траектории [1–4]

$$\frac{x^2}{U_{01}^2} + \frac{y^2}{U_{02}^2} - \frac{2xy}{U_{01}U_{02}} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (21.6)$$

где $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$ – разность фаз складываемых колебаний. Это уравнение эллипса, ориентация которого относительно осей x и y и форма определяются величиной разности фаз $\Delta\varphi$ и амплитудами колебаний. Из уравнения (21.6) следует, что, получив в опыте при сложении взаимно перпендикулярных колебаний на экране осциллографа эллипс и измерив в делениях шкалы экрана параметры, показанные на рис. 21.3, можно определить амплитуды и разность фаз складываемых колебаний по формулам

$$U_{01} = K_x \frac{C}{2};$$

$$U_{02} = K_y \frac{B}{2};$$

$$\sin \Delta\varphi = \frac{A}{B}.$$

Здесь K_x , K_y – коэффициенты усиления осциллографа по осям x и y соответственно, В/дел.

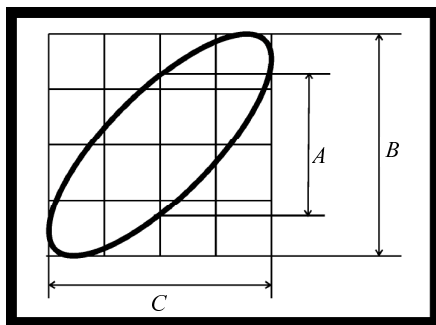


Рис. 21.3

3. Если частоты складываемых взаимно перпендикулярных колебаний v_x и v_y не равны друг другу, то траектория уже не будет эллипсом. В общем случае она имеет вид сложной незамкнутой линии. Только

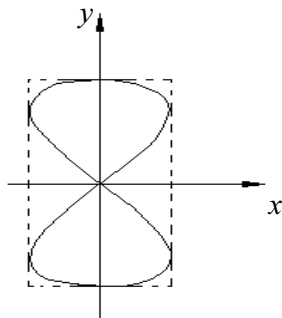


Рис. 21.4

когда частоты колебаний v_x и v_y относятся как целые числа, получают замкнутые траектории, называемые **фигурами Лиссажу**.

Форма фигуры Лиссажу позволяет определить отношение частот складываемых колебаний. Для этого достаточно подсчитать число пересечений фигуры с осью x и осью y . Если ось координат проходит через точку пересечения ветвей фигуры Лиссажу, то эту точку считают дважды.

Для фигуры Лиссажу, изображенной на рис. 21.4, число пересечений ее ветвей с осью x равно $n_x = 2$, а с осью y – $n_y = 4$.

Можно показать, что отношение частот складываемых колебаний связано с числом пересечений формулой

$$\frac{v_x}{v_y} = \frac{n_y}{n_x}. \quad (21.7)$$

Для примера, представленного на рис. 21.4, это отношение: $\frac{v_x}{v_y} = \frac{4}{2} = 2$.

Эллипс – простейшая фигура Лиссажу, для которой $\frac{v_x}{v_y} = 1$.

Пользуясь методом фигур Лиссажу, удобно сравнивать частоты складываемых колебаний. Например, можно с помощью эталонного генератора градуировать шкалу генератора неизвестных частот.

Для получения фигур Лиссажу собирают схему рис. 21.5. Схема состоит из генератора переменного напряжения (ГПН), звукового генератора ЗГ и осциллографа ОСЦ. Сигналы с ГПН и ЗГ подаются на каналы I и II осциллографа, включенные как отклоняющие луч во взаимно перпендикулярных направлениях.

4. Изучение сложения двух одинаково направленных колебаний с различными частотами ω_1 и ω_2 возможно также с помощью схемы

рис. 21.5. При этом каналы I и II осциллографа включают так, чтобы оба поступающих на них сигнала отклоняли луч вдоль вертикальной оси y . Включают также генератор развертки осциллографа и режим сложения сигналов.

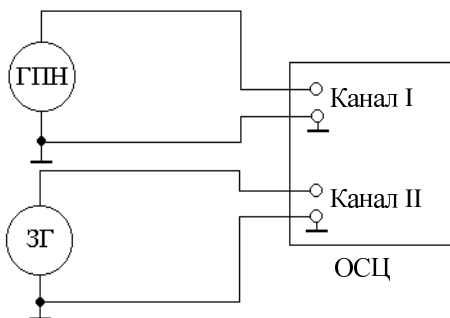


Рис. 21.5

Расчет показывает [1–4], что при одинаковых амплитудах складываемых колебаний напряжения ($U_{01} = U_{02} = U_0$) и при нулевых начальных фазах ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$) сигналов

$$U_1 = U_{01} \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$$

и

$$U_2 = U_{02} \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$$

суммарное колебание будет определяться выражением

$$U = U_1 + U_2 = 2U_0 \cos\left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)t\right] \cos\left[\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)t\right]. \quad (21.8)$$

Полученное суммарное колебание не является гармоническим. Если $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega_{1,2}$, т. е. частоты складываемых колебаний мало отличаются друг от друга, то колебания (21.8) называют **биениями** (рис. 21.6). Биения приближенно можно рассматривать как гармонические колебания с циклической частотой $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, амплитуда которых медленно меняется по закону

$$A(t) = \left| 2U_0 \cos \left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \right) t \right] \right|. \quad (21.9)$$

Частота

$$\nu_{\bar{6}} = \frac{\omega_{\bar{6}}}{2\pi} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} = \nu_1 - \nu_2 \quad (21.10)$$

называется частотой биений.

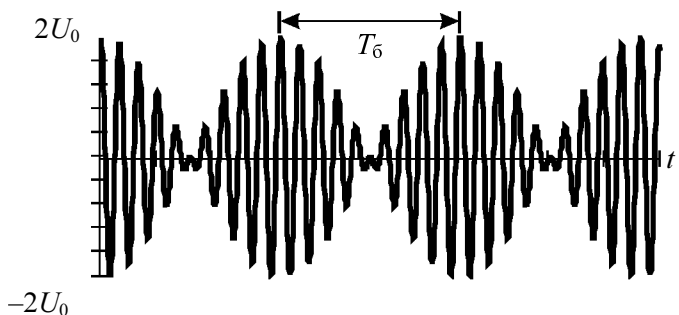


Рис. 21.6

Обратная величина

$$T_{\bar{6}} = \frac{1}{\nu_{\bar{6}}} \quad (21.11)$$

является периодом биений.

ЗАДАНИЕ

1. Изучите инструкцию по эксплуатации осциллографа, назначение ручек и кнопок управления (см. приложение).

2. Соберите схему рис. 21.1. Следите, чтобы клеммы «земля» каналов осциллографа ОСЦ и звукового генератора ЗГ были подключены к общей точке. В качестве реактивного сопротивления X рекомендуется подключить конденсатор C_3 . В качестве сопротивления рекомендуется использовать либо резистор R_3 , либо переменный резистор R .

3. Получите на экране одновременно два гармонических сигнала. Меняя частоту ЗГ (грубо и плавно), проследите за изменением разности фаз между колебаниями. Установите частоту колебаний ~ 100 Гц, запишите установленное значение частоты. Определите (см. рис. 21.2) и запишите разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ между колебаниями напряжения на ЗГ и на реактивном сопротивлении X . Измерьте и запишите амплитуды колебаний. Установите частоту колебаний $\sim 10\,000$ Гц, запишите установленное значение частоты. Определите и запишите разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ между колебаниями напряжения на ЗГ и на реактивном сопротивлении X . Измерьте и запишите амплитуды колебаний.

4. Перейдите в режим сложения сигналов «I + II», нажав соответствующие кнопки осциллографа. Установив вновь ранее записанную частоту ЗГ ~ 100 Гц, убедитесь в том, что амплитуда суммарного сигнала практически равна сумме амплитуд складываемых колебаний:
$$U_0 = U_{10} + U_{20}.$$

Установив вновь ранее записанную частоту ЗГ $\sim 10\,000$ Гц, убедитесь в том, что $U_0 < U_{10} + U_{20}$. Измерьте U_0 . Зная U_0 , U_{10} , U_{20} , по формуле (21.4) вычислите разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ между колебаниями напряжения на ЗГ и напряжения на реактивном сопротивлении X . Сравните полученное значение с измеренным ранее в п. 3 $(\varphi_2 - \varphi_1)$.

Пользуясь методом векторных диаграмм, зная U_{10} , U_{20} и $(\varphi_2 - \varphi_1)$, найдите амплитуду колебаний напряжения на активном сопротивлении R , а также сдвиг фаз между колебаниями напряжений на активном и реактивном сопротивлениях.

5. Сложите колебания как взаимно перпендикулярные. Для этого, не меняя схемы, перейдите в режим « $X - Y$ ». Зарисуйте траекторию движения луча на экране ОСЦ при частотах, соответствующих $\Delta\varphi = 0$ и $\Delta\varphi_{\max}$. Определите U_{10} , U_{20} , $\Delta\varphi_{\max}$ по эллипсу (см. рис. 21.3). Сравните с результатами, полученными ранее другими методами.

6. Соберите схему рис. 21.5. Установите на ГПН один из сигналов с неизвестной частотой, например № 4. Меняя частоту ЗГ, получите на экране эллипс. Добейтесь, чтобы форма эллипса как можно медленнее изменялась с течением времени. Сняв показания частоты генератора, определите неизвестную частоту сигнала ГПН. Получая эллипсы, определите остальные неизвестные частоты сигналов № 5–7, подаваемые

с ГПН. Полученные значения частот сигнала ГПН диапазонов № 4 – 7 запишите.

Не переключая частоту сигнала ГПН, изменяя частоту ЗГ, получите вместо эллипса более сложную фигуру Лиссажу. Пользуясь формулой (21.7), определите частоту и убедитесь в том, что результаты совпадают с полученными ранее методом эллипса. Повторите градуировку с помощью более сложных фигур Лиссажу на других частотах ГПН.

Перед тем как перейти к выполнению следующего п. 7, переключите ГПН на диапазон № 3 с известной частотой и **методом эллипса** определите **точное** значение частоты на этом диапазоне. Кроме того, установите одинаковые амплитуды складываемых колебаний. Измерьте установленную амплитуду колебаний в делениях шкалы экрана осциллографа.

7. Не меняя схемы измерений и диапазонов ГПН и ЗГ, сложите эти колебания как однонаправленные. Для этого перейдите в режим «I + II». Немного изменив частоту ЗГ, добейтесь устойчивой картины биений на экране. Убедитесь в том, что при одинаковой амплитуде складываемых колебаний амплитуда биений будет удвоенной. Измерьте период биений T_{δ} в делениях экрана. Зная время развертки ОСЦ, определите T_{δ} в секундах. Зная точное значение частоты ГПН на диапазоне № 3 и частоту сигнала ЗГ (см. цифровой индикатор), вычислите по формулам (21.10) и (21.11) теоретически ожидаемое значение периода биений. Сравните с непосредственно измеренным значением T_{δ} по картине на экране ОСЦ. Сделайте выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое колебания? Что такое гармонические колебания? Почему они играют особую роль в теории колебаний?

2. Что такое амплитуда, период, частота, циклическая частота, фаза, начальная фаза колебаний?

3. Как сложить однонаправленные колебания с помощью метода векторных диаграмм? Когда амплитуда результирующего колебания максимальна, когда минимальна?

4. Что такое биения? Получите уравнение биений. Как определить частоту и период биений? Как по картине биений установить, что амплитуды двух складываемых колебаний одинаковы?

5. Как получаются и как можно использовать фигуры Лиссажу? Когда они имеют вид эллипса?

6. Можно ли по виду эллипса определить разность фаз складываемых взаимно перпендикулярных колебаний?

7. Почему при определении неизвестной частоты ГПН методом эллипса (п. 6 задания) не удастся наблюдать устойчивую картину на экране осциллографа?

8. Почему колебания напряжения на реактивном сопротивлении в последовательной R – X -цепочке могут быть сдвинуты по фазе относительно колебаний генератора. Как определить этот сдвиг с помощью векторной диаграммы?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т.1: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев. – СПб., 2007 (и другие издания этого курса).

2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 2: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев. – СПб., 2008 (и другие издания этого курса).

3. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 2007 (и другие издания этого курса).

4. *Трофимова Т.И.* Краткий курс физики: учеб. пособие для втузов / Т.И. Трофимова. – М., 2009 (и другие издания этого курса).

Лабораторная работа № 23

СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Цель работы – изучить затухающие колебания в контуре. Экспериментально и теоретически установить зависимости периода колебаний T , логарифмического декремента λ , добротности Q от параметров контура (R , L , C).

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотрим колебательный контур (рис. 23.1). Сопротивление всякого реального контура не равно нулю. Вследствие этого энергия, первоначально запасенная в контуре, непрерывно расходуется на выделение джоулева тепла в сопротивлении R . Поэтому амплитуда электромагнитных колебаний постепенно уменьшается и в конце концов они прекращаются. Таким образом, в реальном контуре свободные колебания являются затухающими [1–4].

Чтобы найти уравнение колебаний в контуре, воспользуемся правилом Кирхгофа [2–4]

$$U_R + U_C = \varepsilon, \quad (23.1)$$

где учтена ЭДС самоиндукции $\varepsilon = \varepsilon_S$.

Выражая в (23.1) напряжения на сопротивлении U_R , на конденсаторе U_C и ЭДС самоиндукции ε_S через заряд конденсатора q и пара-

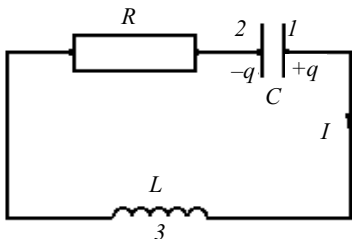


Рис. 23.1

метры контура, получаем дифференциальное уравнение затухающих колебаний в контуре [2–4]

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0. \quad (23.2)$$

Вводя коэффициент затухания

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (23.3)$$

и обозначая

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad (23.4)$$

где ω_0 – собственная частота контура, т. е. частота свободных незатухающих колебаний без потерь энергии (при $R = 0$), уравнение (23.2) можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (23.5)$$

Если затухание мало, т. е. $\delta^2 < \omega_0^2$, решение уравнения (23.5) имеет вид

$$q = q_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (23.6)$$

где

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (23.7)$$

– циклическая частота затухающих колебаний в контуре.

Таким образом, при замыкании заряженного конденсатора на цепь из последовательно соединенных L и R заряд на обкладках конденсатора изменяется с течением времени согласно выражению (23.6). Частота затухающих колебаний ω определяется параметрами контура R , L , C , причем $\omega < \omega_0$. Если же активное сопротивление контура $R = 0$, то

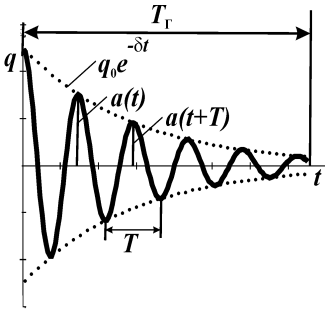


Рис. 23.2

$\omega = \omega_0$. Затухающие колебания не являются, строго говоря, периодическим процессом, так как изменяющаяся со временем величина, например заряд, не принимает одинакового значения через промежуток времени, равный периоду колебаний T . Тем не менее в рассматриваемом случае, когда затухание мало, можно говорить о затухающих колебаниях как о периодических, амплитуда которых $a(t) = q_0 e^{-\delta t}$ постепенно уменьшается по закону $e^{-\delta t}$ (рис. 23.2).

Период затухающих колебаний T определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right) - \left(\frac{R^2}{4L^2}\right)}}. \quad (23.8)$$

При малом затухании ($\delta \ll \omega$) период затухающих колебаний можно приближенно считать равным периоду незатухающих:

$$T \approx \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC} \quad (\text{формула Томсона}). \quad (23.9)$$

Напряжение на конденсаторе U_C , сила тока в контуре I , напряжение на катушке индуктивности U_L , так же как и заряд, совершают затухающие колебания, поскольку они связаны с зарядом выражениями

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha) = U_{0C} e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha),$$

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha + \psi),$$

где $\frac{\pi}{2} < \psi < \pi$.

Кроме коэффициента затухания δ для количественной характеристики затухания вводят логарифмический декремент

$$\lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)}. \quad (23.10)$$

Под $a(t)$, $a(t+T)$ (см. рис. 23.2) понимают соседние амплитуды колебаний либо заряда, либо тока, либо напряжения в моменты времени t и $(t+T)$. Из (23.10) можно вывести выражение, связывающее λ , δ и T :

$$\lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)} = \ln \frac{a_0 e^{-\delta t}}{a_0 e^{-\delta(t+T)}} = \delta T.$$

Заменив в последнем выражении δ и T формулами (23.3) и (23.8), получим

$$\lambda = \frac{R}{2L} T = \pi \frac{R}{\omega L}. \quad (23.11)$$

При малом затухании

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

и

$$\lambda \approx \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (23.12)$$

С увеличением сопротивления контура коэффициент затухания растет, частота ω уменьшается (23.7), а период затухающих колебаний увеличивается. При некотором сопротивлении контура период становится равным бесконечности, а частота колебаний обращается в нуль ($T = \infty$, $\omega = 0$). В этом случае в контуре вместо колебаний происходит апериодический разряд конденсатора (рис. 23.3).

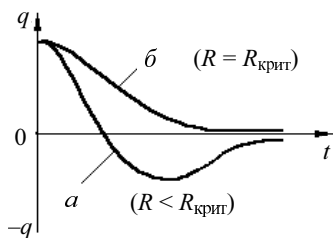


Рис. 23.3

Сопротивление контура, при котором колебательный процесс переходит в апериодический, называется критическим $R_{\text{крит}}$. Величину критического сопротивления определяют из условия $\delta^2 = \omega_0^2$:

$$R_{\text{крит}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (23.13)$$

Для определения качества контура как колебательной системы часто используется, в частности в радиотехнике, особый параметр – добротность контура Q . Выясним физический смысл этого параметра.

Рассмотрим собственные колебания в контуре, которые описывает уравнение (23.6). Энергия, запасенная в контуре в начальный момент времени ($t = 0$), пропорциональна квадрату амплитуды колебаний в этот момент:

$$W(0) \sim q_0^2.$$

Через один период ($t = T$) для энергии будет выполняться соотношение

$$W(T) \sim q_0^2 e^{-2\delta T}.$$

Изменение энергии колебаний за период T , отнесенное к начальной энергии, равно

$$\frac{W(0) - W(T)}{W(0)} = 1 - e^{-2\delta T} \approx 2\delta T.$$

Относительное изменение энергии за время, в течение которого фаза колебаний возрастает на 1 радиан, равно

$$\frac{2\delta T}{2\pi} = \frac{2\delta}{\omega} = \frac{2\delta}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \approx \frac{2\delta}{\omega_0},$$

где последнее выражение верно при $\delta \ll \omega_0$ (малое затухание).

Обратная величина

$$Q = \frac{\omega}{2\delta} \approx \frac{\omega_0}{2\delta}$$

называется **добротностью** колебательного контура (последнее выражение верно при $\delta \ll \omega_0$).

Приведем другие выражения для добротности [1, 2]:

$$Q = \frac{\omega}{2\delta} = \frac{\pi}{\delta T} = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{L\omega}{R}, \quad (23.14)$$

где λ – логарифмический декремент затухания; R – активное сопротивление контура; L – индуктивность контура.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Свободные электромагнитные колебания можно получить в цепи, собранной по схеме рис. 23.4. Схема состоит из генератора импульсов 1, контура 2 и осциллографа 3. (Пунктиром обведена та часть цепи, которая собирается студентом.)

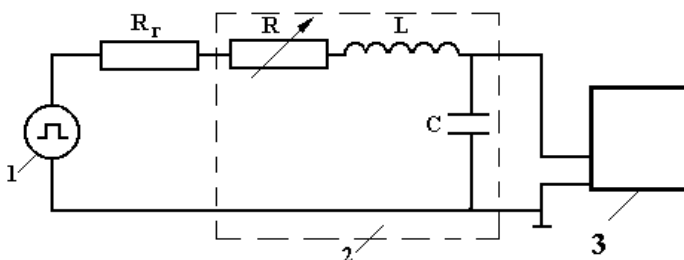


Рис. 23.4

Генератор формирует прямоугольные импульсы напряжения, которые периодически заряжают конденсатор C контура. При последующем разряде конденсатора в контуре возникают свободные затухающие колебания. Регистрируется этот колебательный процесс с помощью осциллографа: на его экране получим картину затухающих колебаний, показанную на рис. 23.2.

Период повторения импульсов T_r выбирают таким, чтобы за время T_r колебания в контуре успевали почти полностью затухнуть (см. рис. 23.2).

В работе требуется измерить период свободных колебаний контура T , определить логарифмический декремент λ , критическое сопротив-

ление контура $R_{\text{крит}}$ и добротность контура Q . Логарифмический декремент λ можно определить непосредственно по осциллограмме затухающих колебаний (рис. 23.2), используя формулу (23.10). Если увеличивать активное сопротивление контура $R_{\text{акт}}$, то при $R_{\text{акт}} = R_{\text{крит}}$ на экране осциллографа получится картина аperiодической разрядки конденсатора (рис. 23.3, кривая a). При определении $R_{\text{крит}}$ нужно учесть, что активное сопротивление контура определяется не только активным сопротивлением переменного резистора R , включенного в цепь, но и активными сопротивлениями катушки и генератора:

$$R_{\text{акт}} = (R_L + R_r) + R, \quad (23.15)$$

где R_L – активное сопротивление катушки индуктивности; R_r – сопротивление генератора импульсов; R – сопротивление переменного резистора, включенного в контур.

ЗАДАНИЕ

1. Ознакомьтесь с инструкцией по работе с осциллографом (см. приложение).

2. По приближенной формуле $T \approx 2\pi\sqrt{LC}$ рассчитайте период затухающих колебаний контура для тех трех значений емкости C_1 , C_2 и C_3 , которые будут использоваться в работе. В координатах T , $\sqrt{C}$ постройте график зависимости периода колебаний от корня из емкости по вычисленным значениям T и $\sqrt{C}$.

3. Получите на экране осциллографа картину свободных затухающих колебаний в контуре. Измерьте период колебаний T для трех значений емкости C_1 , C_2 и C_3 при нулевом сопротивлении R . Измеренные значения периода нанесите на ранее построенный теоретический график зависимости T от $\sqrt{C}$. Сравните результаты опыта и теории.

4. Для контура с одним из значений емкости (рекомендуется C_3) по картине затухающих колебаний, полученной на экране осциллографа, измерьте логарифмический декремент λ при нулевом сопротивлении переменного резистора R [см. рис. 23.2 и формулу (23.10)].

5. Зная период затухающих колебаний в контуре, для выбранных значений емкости конденсатора и индуктивности катушки определите по (23.11) активное суммарное сопротивление генератора импульсов и

катушки индуктивности $(R_L + R_r)$, за счет которого и затухают колебания в этом случае.

6. Изменяя сопротивление переменного резистора R_x , получите на экране осциллографа картину, соответствующую критическому значению активного сопротивления контура (см. рис. 23.3). (Рекомендуется при этом выбрать конденсатор C_3 .) Если сопротивления переменного резистора для получения нужной картины на экране осциллографа окажется недостаточно, то добавьте к нему дополнительный резистор с известным сопротивлением. По формуле (23.15) найдите $R_{\text{крит}}$, с учетом значения $(R_L + R_r)$, определенного в п. 5.

7. Рассчитайте теоретическое значение $R_{\text{крит}}$ по формуле (23.13). Сравните с экспериментальным, полученным в п. 6.

8. Для контура с одним из значений емкости по картине затухающих колебаний, полученной на экране осциллографа, измерьте логарифмический декремент λ при различных ненулевых значениях сопротивления переменного резистора R [см. рис. 23.2 и формулу (23.10)].

9. Оцените добротность контура Q по формуле (23.14) при разных сопротивлениях контура. Воспользуйтесь результатами, полученными в п. 8.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие колебания называются свободными?
2. Как получить дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний? Какой вид имеет его решение?
3. Что такое период свободных затухающих колебаний? От чего он зависит?
4. Что понимают под амплитудой затухающих колебаний?
5. Чем определяется частота затухающих колебаний?
6. Какие характеристики служат количественной мерой затухания? Как они связаны с параметрами контура и между собой?
7. Как измерить логарифмический декремент затухания? От каких параметров контура он зависит?
8. Как измерить и рассчитать критическое сопротивление контура?
9. Каково назначение генератора импульсов в цепи контура?
10. При каком условии допустимо применять формулу Томсона для расчета периода затухающих колебаний?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т.1: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2007 (и другие издания этого курса).
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 2: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2008 (и другие издания этого курса).
3. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 2007 (и другие издания этого курса).
4. *Трофимова Т.И.* Краткий курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М., 2009 (и другие издания этого курса).

Лабораторная работа № 25

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы – изучить вынужденные колебания и явления резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре; рассмотреть зависимость сдвига фаз колебаний от частоты; изучить закон Ома для цепи переменного тока.

ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Колебательное движение какого-либо физического объекта под действием периодической внешней силы называется вынужденным. Особый интерес представляют вынужденные колебания осцилляторов – систем, способных совершать свободные колебания. При этом может наблюдаться явление резонанса, имеющее исключительно большое практическое значение.

Примером такого осциллятора является последовательный колебательный контур, состоящий из катушки с индуктивностью L , конденсатора емкости C и резистора с сопротивлением R . Для возбуждения вынужденных колебаний последовательно с этими элементами в цепь включается источник переменной ЭДС (рис. 25.1).

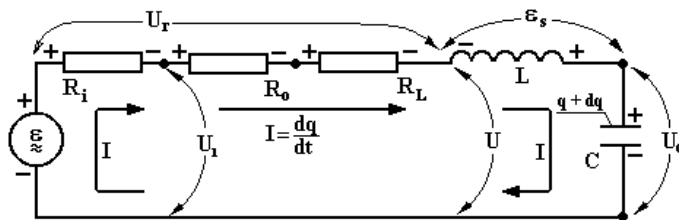


Рис. 25.1

Пусть ЭДС источника изменяется по гармоническому закону

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos(\omega t). \quad (25.1)$$

Для замкнутого контура в каждый момент времени справедливо второе правило Кирхгофа, согласно которому с учетом выбранных мгновенных направлений тока и полярности ЭДС

$$U_r + U_C = \varepsilon + \varepsilon_S, \quad (25.2)$$

где $U_r = JR = R \frac{dq}{dt}$ – напряжение на общем активном сопротивлении контура; $U_C = \frac{1}{C} q$ – напряжение на конденсаторе; ε – ЭДС, создающая переменный ток в контуре; $\varepsilon_S = -L \frac{dJ}{dt} = -L \frac{d^2 q}{dt^2}$ – ЭДС самоиндукции в катушке.

Подставляя соответствующие выражения, после преобразований получаем

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = \frac{\varepsilon_m}{L} \cos(\omega t). \quad (25.3)$$

Поскольку при выполнении лабораторной работы измеряемой величиной будет напряжение на конденсаторе, перейдем в полученном уравнении к переменной U_C :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{d(CU_C)}{dt} = C \frac{dU_C}{dt};$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = C \frac{d^2 U_C}{dt^2}.$$

Кроме того, введем обозначения:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \delta = \frac{R}{2L}.$$

В результате уравнение (25.3) приобретает вид

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + 2\delta \frac{dU_C}{dt} + \omega_0^2 U_C = \varepsilon_m \omega_0^2 \cos(\omega t), \quad (25.4)$$

где ω_0 – циклическая частота собственных незатухающих колебаний в контуре; δ – коэффициент затухания.

Общее решение уравнения (25.4) складывается из общего решения соответствующего однородного уравнения U_1 и любого частного решения U_2 неоднородного уравнения (25.4):

$$U_C = U_1 + U_2.$$

Известно [2–4], что если $\delta < \omega_0$, U_1 равно

$$U_1 = B e^{-\delta t} \cos(\omega_{\text{соб}} t - \theta), \quad (25.5)$$

где $\omega_{\text{соб}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота собственных затухающих колебаний осциллятора.

Амплитуда этих собственных колебаний $B \exp(-\delta t)$ зависит от начальных условий и от времени. Со временем она становится пренебрежимо малой и в контуре остаются только вынужденные колебания U_2 , амплитуда которых от времени не зависит. В этом случае вынужденные колебания называют установившимися. Для них

$$U_C = U_2.$$

Вынужденные колебания становятся с течением времени установившимися и в случае, когда выполняется обратное неравенство: $\delta > \omega_0$. Разница только в том, что функция $U_1(t)$ уменьшается со временем аperiodически.

Частное решение уравнения (25.4) проще всего искать в комплексной форме, заменив в его правой части $\cos(\omega t)$ на $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$. Найдя решение в виде комплексной функции $\hat{U}$, нужно взять действительную часть, т. е. $\text{Re } \hat{U}$, которая и будет искомым решением уравнения (25.4).

Будем искать частное решение уравнения

$$\frac{d^2\hat{U}}{dt_2} + 2\delta \frac{d\hat{U}}{dt} + \omega_0^2 \hat{U} = \varepsilon_m \omega_0^2 e^{i\omega t} \quad (25.6)$$

в виде

$$\hat{U} = \hat{A} e^{i\omega t}. \quad (25.7)$$

Подставляя предполагаемое решение (25.7) в (25.6), получаем

$$\left(-\omega^2 + 2i\delta\omega + \omega_0^2\right) \hat{A} e^{i\omega t} = \varepsilon_m \omega_0^2 e^{i\omega t}.$$

Сокращая на $e^{i\omega t}$ и выражая $\hat{A}$, найдем

$$\hat{A} = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega}.$$

Представим знаменатель этого выражения в показательном виде

$$\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega = |Z| e^{i\Psi}.$$

Модуль этого выражения равен

$$|Z| = \sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + (2\delta\omega)^2}, \quad (25.8)$$

а аргумент определяется формулой

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (25.9)$$

Подставляя (25.8) и (25.9) в (25.7), найдем:

$$\hat{U} = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2}{|Z|} e^{i(\omega t - \Psi_c)},$$

и, следовательно,

$$U_2 = \operatorname{Re} \hat{U} = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2}{|Z|} \cos(\omega t - \Psi_C). \quad (25.10)$$

В результате для установившихся вынужденных колебаний напряжения на конденсаторе получаем

$$U_C = U_2 = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\delta\omega)^2}} \cos(\omega t - \Psi_C), \quad (25.11)$$

где Ψ_C дает сдвиг фаз между колебаниями напряжения на конденсаторе и колебаниями ЭДС источника.

Из (25.11) видно, что амплитуда вынужденных установившихся колебаний U_C равна

$$U_{mC} = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\delta\omega)^2}} = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2 / 2\delta\omega}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \frac{\omega_0^2}{4\delta^2}}}. \quad (25.12)$$

Величина U_{mC} при $\omega = \omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$ (резонансная частота) достигает максимума, который равен

$$U_{\text{рез}} = \frac{\varepsilon_m \omega_0^2}{2\delta \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \approx \frac{\varepsilon_m \omega_0}{2\delta}, \quad (25.13)$$

причем последняя формула верна при $\delta \ll \omega_0$.

Необходимо отметить (проверьте это самостоятельно), что резонансная частота колебаний напряжения на катушке $\omega_{L\text{рез}}$ больше, чем $\omega_{C\text{рез}}$, и, следовательно, резонанс напряжения на LC -цепочке наблюдается при промежуточной частоте

$$\omega_{L\text{рез}} > \omega_{LC\text{рез}} > \omega_{C\text{рез}}.$$

Уравнение (25.12) определяет форму амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебаний на конденсаторе, которую называют резонансной кривой (рис. 25.2). Ширина и высота этой кривой зависят от коэффициента $(\omega_{\text{собр}} / 2\delta)$. Эта величина называется **добротностью**

колебательного контура Q . Физический смысл этого параметра поясняется в лабораторной работе № 23.

Итак, добротность – это

$$Q = \frac{\omega_{\text{соб}}}{2\delta} \approx \frac{\omega_0}{2\delta}. \quad (25.14)$$

Последнее выражение верно при $\delta \ll \omega_0$.

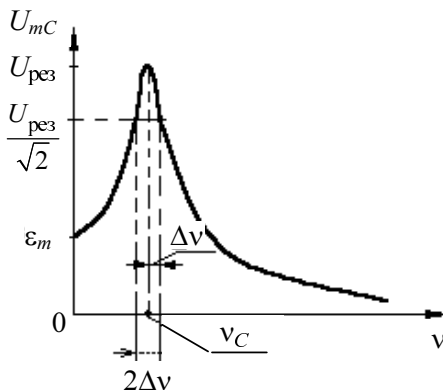


Рис. 25.2

Приведем другие выражения для добротности [2–4]:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{\pi}{\delta T} = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{L\omega_0}{R_K} = \frac{1}{\omega_0 R_K C}, \quad (25.15)$$

где λ – логарифмический декремент колебаний; R_K – активное сопротивление контура.

Из (25.12) – (25.14) можно получить при $\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0$

$$\frac{U_{mC}}{U_{\text{рез}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}}. \quad (25.16)$$

Ширина резонансной кривой зависит, как отмечалось, от добротности контура. При $Q \gg 1$ резонансный максимум оказывается узким, так что в области резонанса

$$\frac{|\omega - \omega_0|}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \ll 1.$$

В этом случае формула (25.16) принимает более простой вид:

$$\frac{U_{mC}}{U_{\text{рез}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}}. \quad (25.17)$$

Обычно ширина резонансной кривой $2\Delta\omega$ измеряется на уровне $U_{mC} = U_{\text{рез}} / \sqrt{2}$, что соответствует уменьшению мощности колебаний по сравнению с мощностью при резонансе в 2 раза. Подставляя в (25.17) $U_{mC} / U_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, найдем, что ширина резонансной кривой $2\Delta\omega$ на этом уровне и добротность Q связаны соотношением

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = \frac{\nu_0}{2\Delta\nu}, \quad (25.18)$$

где $\nu_0 = \nu_C$ – резонансная частота. Из (25.18) видно, что добротность обратна относительной ширине резонансной кривой.

Из формул (25.13) и (25.14) следует, что

$$U_{\text{рез}} \approx \frac{\varepsilon_m \omega_0}{2\delta} = \varepsilon_m Q. \quad (25.19)$$

Следовательно, добротность равна отношению резонансного напряжения $U_{\text{рез}}$ на конденсаторе к амплитуде напряжения источника ЭДС ε_m :

$$Q = \frac{U_{\text{рез}}}{\varepsilon_m}, \quad (25.20)$$

т. е. характеризует не только ширину, но и высоту резонансного пика.

Вернемся к рассмотрению цепи, изображенной на рис. 25.1. Пусть ЭДС источника изменяется по закону

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (25.21)$$

Воспользовавшись вторым правилом Кирхгофа (25.2) и считая искомой величиной силу тока, получим

$$L \frac{dI}{dt} + RJ + \frac{1}{C} \int J dt = \varepsilon_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (25.22)$$

Используя комплексное представление правой части [см. (25.6), (25.7)] и считая искомую величину комплексным числом, вместо (25.22) записываем:

$$L \frac{d\hat{J}}{dt} + R\hat{J} + \frac{1}{C} \int \hat{J} dt = \hat{\varepsilon}_m e^{i\omega t}, \quad (25.23)$$

где $\hat{\varepsilon}_m = \varepsilon_m e^{i\varphi}$.

Будем искать частное решение уравнения (25.23) в виде

$$\hat{J} = \hat{J}_m e^{i\omega t}. \quad (25.24)$$

Подставляя (25.24) в (25.23) и сокращая на $e^{i\omega t}$, получаем

$$\hat{J}_m \left[R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] = \hat{\varepsilon}_m. \quad (25.25)$$

Величина, стоящая в квадратных скобках, носит название **импеданса** контура и обозначается $\hat{Z}$,

$$\hat{Z} = R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right). \quad (25.26)$$

Выражение для $\hat{Z}$ определяется только свойствами пассивных элементов, входящих в состав контура. Подставляя (25.26) в (25.25), получаем

$$\hat{\varepsilon}_m = \hat{Z} \hat{J}_m. \quad (25.27)$$

Это выражение является законом Ома для переменного тока. Роль сопротивления здесь играет $\hat{Z}$.

Выражение для величины $\hat{Z}$ содержит действительную часть, называемую **активным сопротивлением**, и мнимую часть, называемую **реактивным сопротивлением**.

Из формулы (25.26) видно, что импеданс идеального резистора равен R , идеальной катушки $i\omega L$, идеального конденсатора $\frac{-i}{\omega C} = \frac{1}{i\omega C}$.

Представим импеданс $\hat{Z}$ в показательной форме:

$$\hat{Z} = Z_0 e^{i\Psi_I}, \quad (25.28)$$

$$\text{где } Z_0 = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad \Psi_I = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Переходя к действительному выражению для силы тока из (25.24), (25.27) и (25.28), получаем

$$\begin{aligned} J &= \operatorname{Re} \left(\hat{J}_m e^{i\omega t} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{\hat{\varepsilon}_m}{\hat{Z}} e^{i\omega t} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{\varepsilon_m e^{i\varphi}}{Z_0 e^{i\Psi_I}} e^{i\omega t} \right) = \\ &= \frac{\varepsilon_m}{Z_0} \cos(\omega t + \varphi - \Psi_I). \end{aligned} \quad (25.29)$$

Сравнивая (25.29) и (25.21), видим, что ток отстает по фазе от ЭДС генератора на величину Ψ_I .

Рассмотрим важные частные случаи.

1. В цепь включено только сопротивление R . Тогда из (25.28) следует, что $\Psi_I = 0$. Колебания тока в активном сопротивлении совпадают по фазе с колебаниями напряжения на нем.

2. В цепь включена только емкость C (конденсатор без утечки), из (25.28) $\Psi_I = -\frac{\pi}{2}$. Ток по фазе опережает напряжение на $\frac{\pi}{2}$ радиан.

3. В цепь включена только индуктивность L (катушка, активным сопротивлением которой R_L можно пренебречь). Из выражения (25.28)

следует, что $\Psi_I = \frac{\pi}{2}$. Ток цепи отстает по фазе от напряжения на $\frac{\pi}{2}$

радиан. Если же $R_L \neq 0$, то $\Psi_I < \frac{\pi}{2}$.

Если теперь рассмотреть цепочку, состоящую из резистора, конденсатора и катушки, в каждом из которых сила тока I за счет последовательного соединения колеблется в одинаковой фазе, то сдвинутыми по фазе относительно друг друга окажутся напряжения на каждом из этих элементов цепи. При этом напряжения на идеальной емкости и идеальной индуктивности всегда будут сдвинутыми относительно друг друга по фазе на π радиан (колебания U_C и U_L – противофазные).

Зависимость разности фаз от частоты вынужденных колебаний называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ). На рис. 25.3 представлены ФЧХ для емкости $\Delta\varphi_C$, индуктивности $\Delta\varphi_L$ и LC -цепочки $\Delta\varphi_{LC}$ по отношению к колебаниям источника ЭДС.

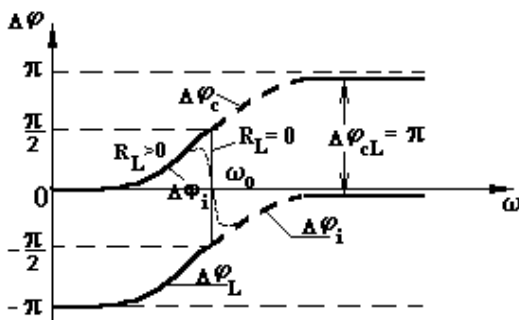


Рис. 25.3

Из формулы (25.29), кроме того, следует, что при любых значениях активного сопротивления R максимум амплитуды колебаний силы тока

достигается при условии $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$.

Следовательно, резонансная частота для силы тока равна собственной частоте незатухающих колебаний контура: $\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 25.4 показана схема измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) контура с применением осциллографа (ОСЦ). Предполагается, что осциллограф имеет два канала, один из которых может включаться как на вертикальное, так и на горизонтальное отклонение луча (см. приложение).

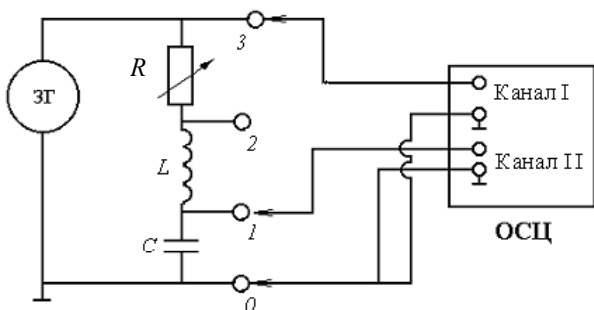


Рис. 25.4

Звуковой генератор ЗГ подключен к последовательно соединенным переменному резистору R , катушке индуктивности L и конденсатору C . Канал I осциллографа подключен к точкам $0-3$, т. е. измеряет переменное напряжение на выходе ЗГ. Канал II может быть подключен либо к точкам $0-1$, чтобы измерять напряжение на конденсаторе, либо к точкам $0-2$, чтобы измерять напряжение на LC -цепочке. Сигналы, поступающие на оба канала, могут наблюдаться одновременно. Включение генератора развертки осциллографа позволяет проследить изменение напряжений со временем.

Амплитуда колебаний напряжения, поступающего на каналы осциллографа, определяется по делениям шкалы, расположенной на экране, с учетом цены деления этой шкалы.

Разность фаз колебаний напряжений, подаваемых на каналы осциллографа, может быть определена двумя способами. Во-первых, путем определения сдвига одного сигнала по отношению к другому в горизонтальном направлении (см. рис. 21.2). Во-вторых, сложением сигналов как взаимно перпендикулярных гармонических колебаний с одинаковой частотой (см. рис. 21.3).

ЗАДАНИЕ

В таблице указаны номера заданий и параметры исследуемого контура для каждой учебной бригады.

1. Соберите схему рис. 25.4. При этом номер конденсатора рекомендуется выбрать в соответствии с номером учебной бригады, в которую вы входите (см. таблицу). Следите, чтобы клеммы «земля» каналов осциллографа и ЗГ были подключены к общей точке. Канал II подключите к выбранному конденсатору (точки 0 – 1). Генератор развертки должен быть включен.

Таблица рекомендуемых для каждой учебной бригады параметров колебательного контура и пунктов задания

Номер бригады	Номер конденсатора	Сопротивление переменного резистора, Ом	Пункты задания
1	C_1	100	1–7
2	C_2	200	1–5, 8, 9
3	C_3	300	1–5, 10, 11, 12
4	C_1	100	1–5, 10, 13, 14
5	C_2	200	1–7
6	C_3	300	1–5, 8, 9
7	C_1	100	1–5, 10, 11, 12
8	C_2	200	1–5, 10, 13, 14
9	C_3	300	1–7
10	C_1	100	1–5, 8, 9
11	C_2	200	1–5, 10, 11, 12
12	C_3	300	1–5, 10, 13, 14

2. Установите сопротивление переменного резистора вначале на ноль ($R = 0$). Ручку напряжения ЗГ установите в среднее положение.

3. Получите на экране одновременно два гармонических сигнала. Меняя частоту ЗГ, определите резонансную частоту ν_C , при которой амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе U_{mC} достигает наибольшего значения.

4. Для известных значений емкости конденсатора C и индуктивности катушки L рассчитайте резонансную частоту без учета активного

сопротивления катушки. Сравните с частотой, найденной экспериментально. Объясните возможное различие.

5. Определите, сравнивая сигналы, разность фаз между колебаниями напряжения на генераторе и на конденсаторе при резонансе, сравните с величиной разности фаз, полученной теоретически. Измерив с помощью осциллографа $U_{mCрез}$ и ε_m , вычислите добротность контура по формуле (25.20).

6. Выполните измерения по определению зависимости амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе U_{mC} от частоты ν при $R = 0$. По полученным данным постройте амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) $U_{mC} = f(\nu)$.

7. Проведите аналогичные измерения для сопротивления, значение которого для каждой бригады указано в таблице. Проведите анализ полученных результатов.

8. Выполните измерения по определению зависимости разности фаз колебаний ЭДС и напряжения на конденсаторе U_{mC} от частоты ν при $R = 0$. По полученным данным постройте фазочастотную характеристику (ФЧХ) $\Delta\varphi_C = f(\nu)$.

9. Проведите аналогичные измерения для сопротивления, значение которого для каждой бригады указано в таблице. Проведите анализ полученных результатов.

10. Измените точку подключения канала II, подсоединив его к концам LC-цепочки (точки 0 – 2).

11. Выполните измерения по определению зависимости амплитуды колебаний напряжения на LC-цепочке U_m от частоты.

12. По полученным в п. 11 данным постройте АЧХ. Объясните резкое отличие этих графиков от графиков, ожидаемых для RC-цепочки.

13. Выполните измерения по определению зависимости разности фаз $\Delta\varphi_i$ на LC-цепочке от частоты.

14. По полученным в п. 13 данным постройте ФЧХ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие колебания осцилляторов называются вынужденными?

2. Получите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре для заряда, напряжения, силы тока.

3. Получите решение дифференциального уравнения вынужденных колебаний. Объясните, что такое установившиеся вынужденные колебания.

4. Что такое резонанс? Чему равна резонансная частота колебаний напряжения на конденсаторе и силы тока в контуре?

5. Как амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе зависит от частоты установившихся вынужденных колебаний?

6. Как разность фаз между колебаниями напряжения на конденсаторе и генераторе зависит от частоты?

7. Чему равна разность фаз колебаний силы тока и напряжений на элементах последовательного колебательного контура?

8. Почему АЧХ для LC -цепочки отличается от АЧХ для конденсатора?

9. Что такое добротность контура? Как связана добротность с высотой и шириной резонансной кривой?

10. Запишите закон Ома для переменного тока. Что такое импеданс?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 1: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2007 (и другие издания этого курса).

2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 2: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2008 (и другие издания этого курса).

3. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 2007 (и другие издания этого курса).

4. *Трофимова Т.И.* Краткий курс физики: учеб. пособие для втузов / Т.И. Трофимова. – М., 2009 (и другие издания этого курса).

Лабораторная работа № 26

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ НА СТРУНЕ

Цель работы – изучить условия образования и свойства стоячих волн на струне, спектра собственных частот колебаний и их зависимости от силы натяжения струны; определить фазовую скорость упругих волн и амплитудное значение скорости колебания струны в пучности волны.

ХАРАКТЕРИСТИКА СТОЯЧИХ ВОЛН

Стоячей называется волна, образующаяся в результате суперпозиции двух бегущих навстречу друг другу синусоидальных волн, имеющих одинаковые частоты и амплитуды, а для поперечных волн – еще и одинаковые плоскости колебаний.

На практике стоячие волны получают, ограничивая область распространения бегущей волны и тем самым формируя волну отраженную. При этом происходит сложение колебаний падающей и отраженной волн.

Рассмотрим стоячую волну на струне (рис. 26.1), концы которой жестко закреплены. Струна имеет предварительное натяжение, упругие силы в ней обеспечивают возможность возникновения поперечных (в направлении оси y) колебаний частиц и распространения этих колебаний в направлении оси x . Если струна выведена из положения равновесия и затем предоставлена самой себе, то в ней возникает бегущая волна (на рис. 26.1 – сплошная линия), распространяющаяся с фазовой скоростью $\vec{V}_\phi$. На границе $x = \ell$ происходит ее отражение, и отраженная волна (на рис. 26.1 – пунктирная линия) с такой же по значению фазовой скоростью распространяется в обратном направлении.

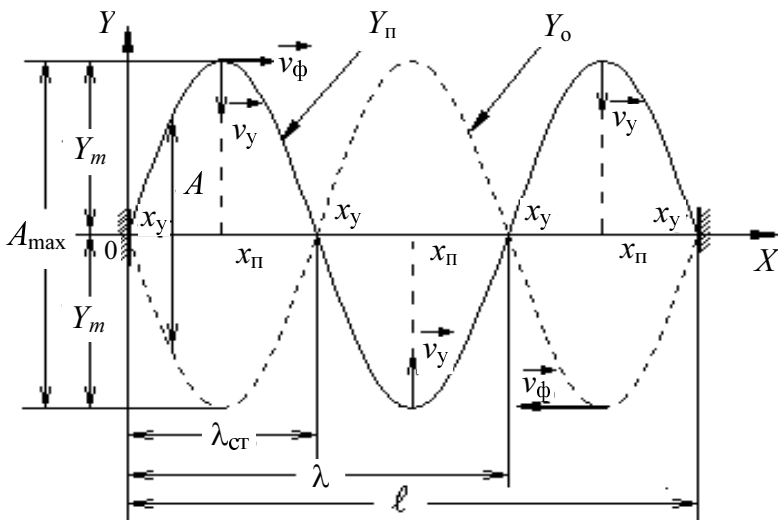


Рис. 26.1

Бегущие волны описываются [1–4] волновым уравнением

$$\frac{d^2 Y(x, t)}{dx^2} = \frac{1}{V_{\phi}^2} \frac{d^2 Y(x, t)}{dt^2},$$

решениями которого для падающей и отраженной волн являются

$$Y_{\Pi} = Y_m \cos(\omega t - kx),$$

$$Y_O = Y_m \cos(\omega t + kx + \Delta\phi),$$

где Y_m – амплитуда колебаний частиц струны (амплитуда волны);

$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{V_{\phi}}{\lambda}$ – круговая частота, выраженная через частоту колебаний ν либо через фазовую скорость V_{ϕ} и длину бегущей волны λ ;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; x – расстояние, пройденное волной от начала координат за время t ; $\Delta\phi$ – фазовый сдвиг отраженной волны относи-

тельно волны падающей ($\Delta\varphi$ зависит от условий на границе отражения).

При суперпозиции падающей и отраженной волн получим стоячую волну

$$Y = Y_{\Pi} + Y_{\text{O}} = 2Y_m \cos\left(kx + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\Delta\varphi}{2}\right),$$

где фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ найдем исходя из того, что в точке закрепления струны ее колебания отсутствуют. Так, при $x = 0$ смещение $Y = 0$, а это возможно, если $\cos\left(kx + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) = \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = 0$, т. е. при $\Delta\varphi = \pi$. Это означает, что падающая и отраженная волны в данной точке струны находятся в противофазе. При суперпозиции образуется стоячая волна, описываемая уравнением

$$Y = 2Y_m \sin(kx) \sin(\omega t). \quad (26.1)$$

Амплитуда стоячей волны

$$A = 2Y_m \left| \sin(kx) \right| = 2Y_m \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \right|$$

зависит от координаты x и изменяется от $A_{\min} = 0$ до $A_{\max} = 2Y_m$ (см. рис. 26.1).

Точки, в которых $A = 0$, называются узлами стоячей волны. Их координаты x_y получим из условия $\sin\left(2\pi \frac{x_y}{\lambda}\right) = 0$, откуда

$$x_y = m \frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0, 1, 2, 3 \dots$

Точки, в которых $A = A_{\max} = 2Y_m$, называются пучностями стоячей волны и из условия $\sin\left(2\pi \frac{x_{\Pi}}{\lambda}\right) = 1$ имеют координаты

$$x_{\Pi} = \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0, 1, 2, 3 \dots$

Точки струны, расположенные между двумя узлами, колеблются синфазно, а при переходе через соседний узел фаза их колебаний скачком изменяется на противоположную. Через положение равновесия (ось x) все точки колеблющейся струны проходят одновременно. Расстояние между двумя соседними узлами, равное половине длины бегущих волн, называется длиной стоячей волны $\lambda_{\text{ст}} = \frac{\lambda}{2}$ (рис. 26.1).

На длине ℓ струны может укладываться только целое число длин стоячей волны $\lambda_{\text{ст}}$, поэтому всегда выполняется условие

$$\ell = n\lambda_{\text{ст}} = n\frac{\lambda}{2},$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

Из этого простого условия следуют важные выводы.

1. На ограниченной струне стоячая волна может возникать только в том случае, если длина λ падающей и отраженной волн равна какому-либо значению из дискретного ряда, разрешенного условием

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n},$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

2. Колебания ограниченной струны могут происходить только при «собственных частотах», имеющих какое-либо значение из дискретного ряда

$$\nu_n = \frac{\nu_{\Phi}}{\lambda_{\Pi}} = n \frac{\nu_{\Phi}}{2\ell}, \quad (26.2)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

Число n принято называть номером гармоники. Колебания при $n = 1$ на частоте

$$v_1 = \frac{V_\phi}{2\ell} \quad (26.3)$$

называют первой гармоникой (в акустике – основным тоном). Высшие гармоники (в акустике – обертоны) соответствуют $n = 2, 3, 4, \dots$, т. е. частотам

$$v_n = n v_1.$$

Фазовая скорость V_ϕ бегущей волны на струне определяется [1–4] только силой F натяжения струны и ее линейной плотностью ρ :

$$V_\phi = \sqrt{\frac{F}{\rho}}, \quad (26.4)$$

причем значение ρ при известной силе F может быть найдено экспериментально с помощью (26.2) или (26.3).

На рис. 26.2 показаны стоячие волны, соответствующие первым трем гармоникам.

Скорость $\vec{v}_y$ (рис. 26.1) различных точек струны в процессе ее колебательного движения найдем, взяв производную по времени от (26.1):

$$v_y = \frac{dy}{dt} = 2\omega Y_m \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos \omega t.$$

Амплитуда этой скорости

$$v_{ym} = 2\omega Y_m \left| \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \right| = \omega A$$

принимает наибольшее значение $v_{ym(\max)}$ в пучности x_Π стоячей волны при прохождении струной положения равновесия. Для первой гармоники ($\omega_1 = 2\pi v_1$) это наибольшее значение скорости струны наблюдается в точке $x_\Pi = \frac{\lambda_1}{4} = \frac{\ell}{2}$ и равно

$$v_{ym(\max)1} = 2\pi v_1 A_{1\max}. \quad (26.5)$$

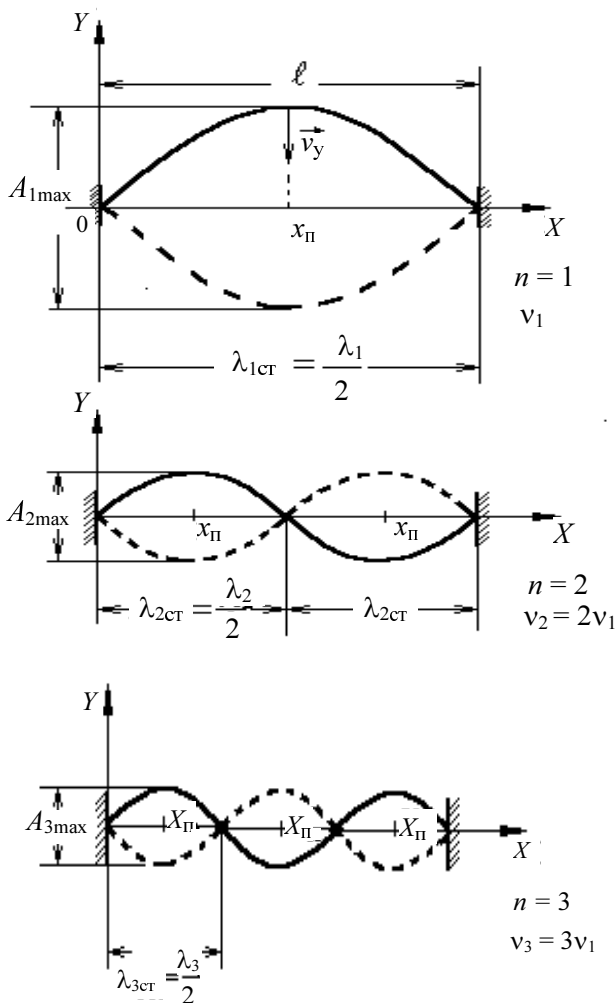


Рис. 26.2

Особенность стоячих волн состоит в том, что они не имеют направления распространения, не переносят энергию колебательного движения. Частицы колеблющейся среды, находящиеся в узлах стоячей волны, всегда покоятся, а координаты узлов во времени и в пространстве не меняются. Остаются постоянными и координаты пучностей.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Свободные колебания струны вследствие потерь энергии быстро затухают. Поэтому в экспериментальной установке поддерживают вынужденные колебания струны. Для возникновения стоячей волны на струне необходимо, чтобы частота внешнего периодического воздействия равнялась одной из «собственных частот» (26.2), соответствующих той или иной гармонике. При этом возбуждение колебаний струны происходит в условиях резонанса. Схема экспериментальной установки показана на рис. 26.3. Однородная струна 1, ограниченная в точках 2 и 3, под действием груза 4 имеет натяжение $F = Mg$, где M – масса груза. Вблизи конца, закрепленного в точке 2, струна соединена с электромагнитным преобразователем (реле) 5, обмотка которого подключена к генератору 6 электрических сигналов. Частота этих сигналов контролируется подключенным к генератору частотомером 7.

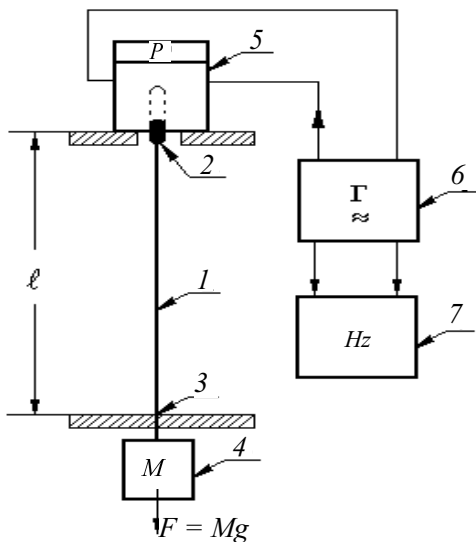


Рис. 26.3

Установка работает следующим образом. Ток I генератора 6 питает обмотку электромагнитного преобразователя 5 и возбуждает колебания его якоря с частотой ν_r генератора. Эти колебания якоря переда-

ются струне, имеющей при данном натяжении F собственные частоты $\nu_n = n\nu_1$. При $\nu_\Gamma = \nu_n$ на струне устанавливается стоячая волна, соответствующая n -й гармонике.

Из (26.2) и (26.4) следует, что $\nu_n = \frac{n}{2\ell} \sqrt{\frac{F}{\rho}}$, и при $\nu_\Gamma = \nu_n$ и $F = Mg$ получим формулу

$$\rho = n^2 \frac{Mg}{4\ell^2 \nu_\Gamma^2}, \quad (26.6)$$

позволяющую через известные значения ускорения свободного падения g , массы M груза, длины ℓ струны, частоты ν_Γ генератора и номера n полученной на струне гармоники вычислить линейную плотность материала струны.

ЗАДАНИЕ

1. Получите формулу для вычисления доверительной погрешности измерения линейной плотности струны в соответствии с (26.6).

2. Установив груз M_1 и необходимую частоту $\nu_{\Gamma 1}$ генератора, получите на струне стоячую волну, соответствующую 1-й гармонике. Измерьте частоту генератора и амплитуду стоячей волны $A_{1\max}$ в пучности. Повторите измерения пять раз.

3. Для груза M_1 , изменяя частоту генератора, получите на струне стоячие волны, соответствующие 2-й и 3-й гармоникам. Измерьте частоты $\nu_{\Gamma 2}$ и $\nu_{\Gamma 3}$ генератора.

4. Для грузов M_2 и M_3 получите на струне стоячие волны, соответствующие 1-й гармонике, и измерьте частоты $\nu'_{\Gamma 1}$ и $\nu''_{\Gamma 1}$ генератора.

5. По данным п. 2 для пятикратных измерений и вероятности $P = 99\%$ (коэффициент Стьюдента $t_S = 4,6$) вычислите:

а) выборочное среднее частоты генератора $\bar{\nu}_{\Gamma 1}$ и доверительную погрешность δ_ν ;

б) выборочное среднее плотности материала струны $\bar{\rho}$ и доверительную погрешность δ_ρ (используя формулы (26.6) и формулу, най-

денную в п. 1). Значения $\bar{M}$, δ_M , $\bar{g}$, δ_g , $\bar{\ell}$ и δ_ℓ приведены в паспорте установки.

6. Используя полученные в п. 2 $A_{1\max}$ и в п. 5 величины $\bar{v}_{Г1}$ и $\bar{\rho}$, по формулам (26.4) и (26.5) оцените значения наибольшей амплитуды скорости колебательного движения струны и фазовой скорости волны на струне. Результаты сравните.

7. По данным, полученным в пп. 2 и 3, постройте график зависимости $v_{Г} = f(n)$ и проанализируйте его.

8. По данным, полученным в пп. 2 и 4, постройте график зависимости $v_{Г1} = f(\sqrt{M})$ и проанализируйте его с точки зрения теории по формуле (26.6) для $n = 1$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие колебания называются свободными, а какие – вынужденными?

Каковы условия их получения? В чем сущность резонанса? Почему в работе используется резонанс?

2. Что называется волной? Охарактеризуйте бегущие и стоячие волны. Как можно получить стоячие волны на струне?

3. Покажите, что в точке отражения бегущих волн от жесткой преграды фаза колебаний в отраженной волне меняется на противоположную.

4. Назовите условия образования стоячих волн на струне и основные свойства стоячих волн.

5. Приведите уравнение и амплитуду стоячей волны. Что такое узлы и пучности?

6. Что такое фазовая скорость волны, чем она определяется для волн на струне? Приведите скорость частиц струны при колебательном движении, ее амплитуду, наибольшее значение амплитуды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 1: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2007 (и другие издания этого курса).
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 2: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2008 (и другие издания этого курса).
3. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 2007 (и другие издания этого курса).
4. *Трофимова Т.И.* Краткий курс физики: учеб. пособие для втузов / Т.И. Трофимова. – М., 2009 (и другие издания этого курса).

Лабораторная работа № 27

ИЗУЧЕНИЕ СЛОЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы – изучение частотных зависимостей фазы и амплитуды колебаний в электрических цепях, содержащих активные и реактивные элементы.

ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

При сложении двух однонаправленных гармонических колебаний с одинаковыми частотами $S_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ и $S_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$ результирующее колебание также является гармоническим той же частоты и описывается функцией

$$S = A \cos(\omega t + \varphi),$$

где амплитуда и фаза определяются как

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (27.1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}. \quad (27.2)$$

Приведенные результаты могут быть применены для анализа цепей переменного тока.

1. Рассмотрим цепь, содержащую резистор и индуктивность (рис. 27.1).

Пусть в этой цепи течет электрический ток $i = I \cos \omega t$, создающий падение напряжения $u = u_R + u_L$, где

$$u_R = iR = IR \cos \omega t = U_R \cos \omega t, \quad (27.3)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -I \omega L \sin \omega t = x_L I \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_L \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (27.4)$$

Здесь x_L – индуктивное сопротивление; U_R , U_L – амплитудные значения напряжений.

Формулы (27.3) и (27.4) свидетельствуют о том, что напряжение на резисторе изменяется в фазе с током, а на индуктивности – опережает ток на $\frac{\pi}{2}$. Общее напряжение $u = U \cos(\omega t + \varphi)$, где U и φ рассчитываются по формулам (27.1) и (27.2) и равны

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega L}{R}.$$

2. Рассмотрим цепь, содержащую резистор и конденсатор (рис. 27.2).

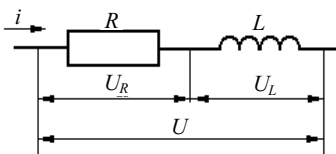


Рис. 27.1

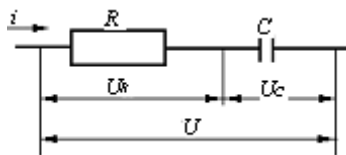


Рис. 27.2

Общее напряжение

$$u = u_R + u_L = U \cos(\omega t + \varphi),$$

где $u_R = U_R \cos \omega t$,

$$u_C = \frac{q}{C} = \frac{\int i dt}{C} = I \frac{1}{\omega C} \sin \omega t = U_C \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (27.5)$$

$x_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление конденсатора. Формула (27.5)

свидетельствует о том, что напряжение на конденсаторе отстает от тока на угол $\frac{\pi}{2}$. Амплитудное значение общего напряжения

$$U = \sqrt{U_C^2 + U_R^2},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{\omega CR}.$$

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Установка состоит из генератора переменного напряжения, двух сопротивлений и осциллографа (см. приложение).

Измерения амплитуды напряжений U , U_Z и сдвига фаз наиболее просто проводить методом фигур Лиссажу (рис. 27.3).

На вход Y осциллографа подается сигнал с сопротивления Z_2 , поэтому смещение луча на экране осциллографа пропорционально падению напряжения на элементе Z_2 , а полное отклонение по оси Y равно $2U_Z$. Сигнал с выхода генератора подается на вход X осциллографа и отклонение луча по оси X пропорционально напряжению U , а полное отклонение по оси X равно $2U$.

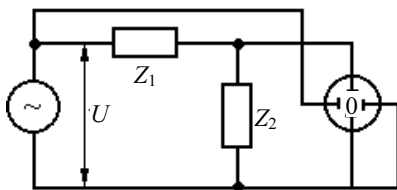


Рис. 27.3

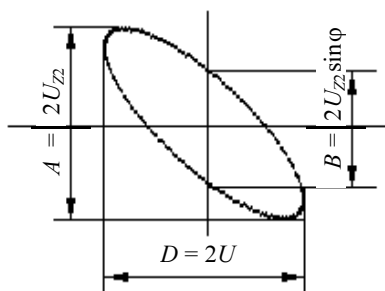


Рис. 27.4

На рис. 27.4 показана результирующая траектория на экране осциллографа (эллипс), по которой легко определяются амплитуды и сдвиг фаз между U_x и U_y из

$$\sin \varphi = \frac{B}{A}. \quad (27.6)$$

На рис. 27.5 показаны результирующие траектории для разных значений φ .

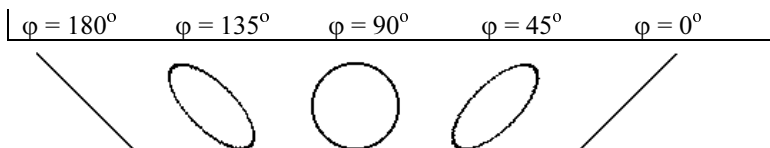


Рис. 27.5

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Соберите схему (рис. 27.3), используя в качестве Z_1 резистор, в качестве Z_2 – конденсатор.

2. Измерьте параметры эллипса A , B , D для различных частот в диапазоне от минимальной до максимальной частоты, выдаваемой генератором (для десяти частот).

Примечание. Параметры A , B , D должны быть определены в единицах напряжения.

3. По полученным результатам рассчитайте по формуле (27.6) сдвиг фаз и коэффициент передачи напряжения

$$K = \frac{A}{D}.$$

4. Постройте зависимости φ и K от частоты (f).

5. Соберите схему рис. 27.3, используя в качестве Z_1 конденсатор, в качестве Z_2 – резистор, и для собранной схемы повторите пп. 2 – 4.

6. Постройте на одном графике векторную диаграмму для трех частот и проверьте выполнение соотношений

$$\varphi_R + \varphi_C = \frac{\pi}{2} \quad \text{и} \quad U_R^2 + U_C^2 = U^2 \quad (27.7)$$

для этих частот.

7. Соберите схему рис. 27.3, используя в качестве Z_1 резистор, в качестве Z_2 – индуктивность, для собранной схемы повторите пп. 2 – 4.

8. Соберите схему рис. 27.3, используя в качестве Z_1 индуктивность, в качестве Z_2 – резистор, и для собранной схемы повторите пп. 2 – 4.

9. Постройте графики по пп. 6 и проверьте выполнение соотношений

$$\varphi_R + \varphi_L = \frac{\pi}{2} \quad \text{и} \quad U_R^2 + U_L^2 = U^2. \quad (27.8)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы результаты сложения однонаправленных гармонических колебаний одной частоты?

2. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением в цепочках R , L и R , C ? Постройте векторные диаграммы.

3. Почему должны выполняться соотношения (27.7) и (27.8) для фаз и напряжений? Докажите с помощью векторных диаграмм.

4. Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления? Как они изменяются с частотой?

5. В чем заключается метод, который вы использовали для исследования частотных зависимостей фазы и амплитуды в электрических цепях?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 1: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2007 (и другие издания этого курса).

2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 2: учеб. пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев – СПб., 2008 (и другие издания этого курса).

3. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 2007 (и другие издания этого курса).

4. *Трофимова Т.И.* Краткий курс физики: учеб. пособие для втузов / Т.И. Трофимова. – М., 2009 (и другие издания этого курса).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОСЦИЛЛОГРАФ ОЦЛ2-02

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Внешний вид, расположение и назначение элементов управления показаны на рис. П1.

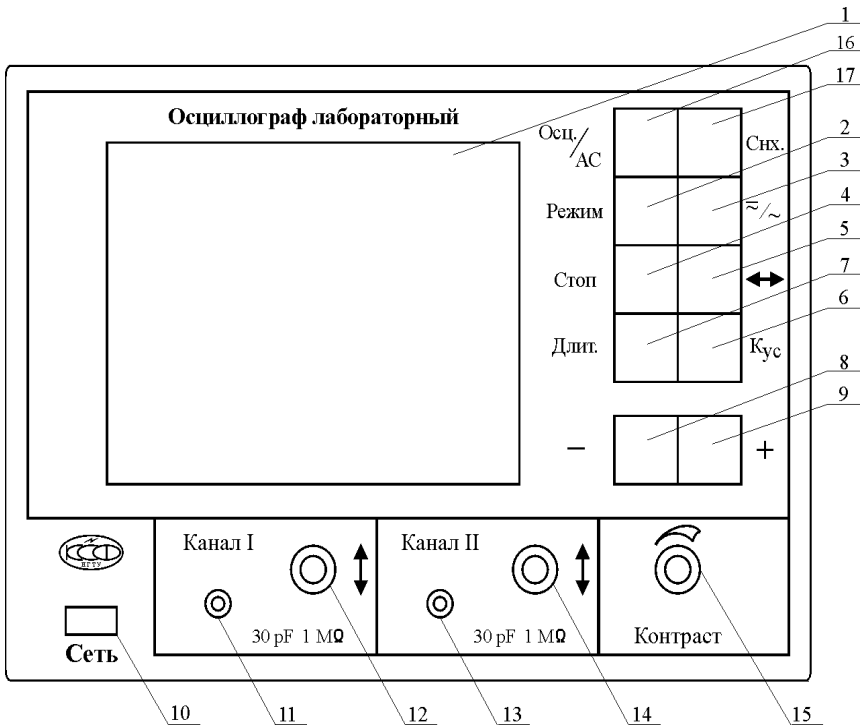


Рис. П1

На передней панели прибора расположены:

- 1 – графический дисплей;
- 2 – кнопка выбора режима работы;
- 3 – кнопка переключателя закрытого или открытого канала;
- 4 – кнопка запоминания оцифрованного сигнала;

- 5 – кнопка смещения оцифрованного сигнала;
 6 – кнопка выбора коэффициента отклонения;
 7 – кнопка выбора временной развертки;
 8 – кнопка уменьшения выбранной величины;
 9 – кнопка увеличения выбранной величины;
 10 – кнопка выключателя «Сеть»;
 11 – вход первого канала;
 12 – ручка смещения первого канала по вертикали;
 13 – вход второго канала;
 14 – ручка смещения второго канала по вертикали;
 15 – ручка регулировки контраста изображения;
 16 – кнопка выбора типа прибора (осциллограф или анализатор сигнала), в данной версии не используется;
 17 – кнопка выбора типа синхронизации.
- Экран дисплея разделен на два поля (рис. П2):
- поле отображения сигнала;
 - информационное поле.

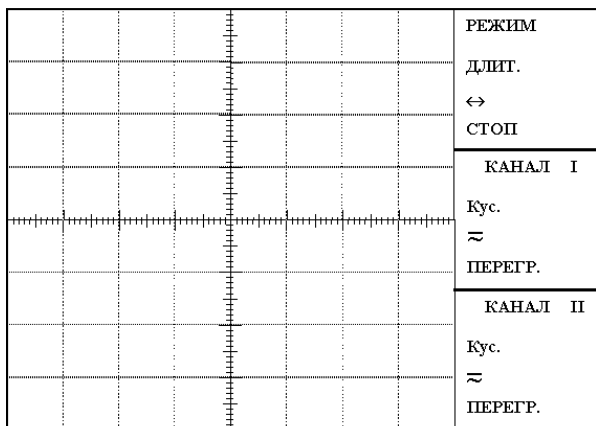


Рис. П2

Поле отображения сигнала содержит координатную сетку, на которую накладывается измеряемый сигнал.

Информационное поле разделено на три области:

- область общих установок, отображающую режим работы осциллографа (строка «Режим»), временную развертку (строка «Длитель-

ность»), смещение привязки сигнала по оси времени (строка « $\leftrightarrow$ ») и состояние «Стоп-кадр» (строка «стоп»);

- область состояния канала I, отображающую коэффициенты отклонения канала I (строка « K_{yc} »), указатель переключателя закрытого или открытого канала, индикатор перегрузки (линия «ПЕРЕГР.»);

- область состояния канала II, отображающую информацию, аналогичную для канала I.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Для включения прибора соедините кабель питания с питающей сетью и нажмите кнопку 10 «Сеть», при этом загорится индикатор 1.

2. Регулировка контраста изображения проводится вращением ручки 15 «КОНТРАСТ».

3. Для переключения режима работы нажмите кнопку 2 «РЕЖИМ». При этом надпись «Режим» должна подсветиться, затем кнопками «+» или «-» выберите необходимый режим:

I (наблюдение сигнала канала I);

II (наблюдение сигнала канала II);

I, II (одновременное наблюдение сигналов каналов I и II);

I + II (сигнал, равный алгебраической сумме сигналов каналов I и II, прошедших через калибровочные усилители) X-Y (режим X-Y).

4. Подайте исследуемый сигнал на гнезда 11 (канал I) или 13 (канал II). Для подключения исследуемого сигнала в комплект прибора входят соединительные кабели. При подключении кабеля входное сопротивление прибора равно 1 МОм с параллельной емкостью, значение которой зависит от типа используемого кабеля.

5. Для установления вида связи входного усилителя прибора с источником исследуемого сигнала (подключение входного конденсатора) необходимо нажать кнопку 3. При этом подсветится соответствующая строка в информационном окне рабочего канала. Кнопкой «+» или «-» установите нужное. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то для перехода в информационное окно другого канала нажмите повторно кнопку 3. Установка производится аналогично.

В положении $\approx$ связь с источником сигнала осуществляется по постоянному току. Если постоянная составляющая исследуемого сигнала намного больше переменной, то целесообразно выбирать связь

источника исследуемого сигнала по переменному току $\sim$. В этом случае конденсатор входной цепи не пропускает постоянную составляющую. При исследовании низкочастотных сигналов следует помнить, что в режиме $\sim$ нижний предел полосы пропускания составляет несколько герц.

6. Смещение графиков сигналов относительно координатной сетки по вертикали осуществляется регуляторами 12 и 14.

7. Для смещения графиков сигналов относительно координатной сетки по горизонтали необходимо нажать кнопку 5 (« $\leftrightarrow$ »). Кнопкой «+» или «-» установите нужное положение. При этом высвечивается направление смещения $\rightarrow$ или $\leftarrow$ соответственно. Перемещение наблюдаемого сигнала осуществляется не более чем на 1/2 дисплея. При ограничении перемещения высвечивается соответствующий символ.

8. Для изменения коэффициента отклонения нажмите кнопку 6 (« K_{yc} »). При этом подсветится надпись «УСИЛ.» того канала, который соответствует выбранному режиму работы. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то переход между выбором коэффициентов отклонения каналов осуществляется повторным нажатием кнопки 6 (« K_{yc} »).

Установить необходимое значение коэффициента отклонения для выбранного канала можно при помощи кнопок «+» или «-».

9. Для изменения времени развертки необходимо нажать кнопку 7 «Длит.». Изменения необходимо проводить при помощи кнопок «+» или «-».

10. Для включения режима «Стоп-кадр» необходимо нажать кнопку 4 «СТОП». При этом кадр будет остановлен для проведения измерений. Для выхода из этого режима необходимо нажать кнопку «СТОП» повторно.

В режиме «Стоп-кадр» активна только кнопка (« $\leftrightarrow$ »).

11. При работе в режиме $X-Y$ рекомендуется предварительно получить два-три периода отображаемых сигналов в режиме I, II, а затем перейти в режим $X-Y$. Это связано с тем, что количество отображаемых отсчетов ограничено.

12. В данной модели предусмотрена автоматическая синхронизация по заданному фронту сигнала. Переключение вида синхронизации осуществляется нажатием кнопки 17 «Снх.», при этом на дисплее подсвечивается слово «Синхр.». Далее при помощи кнопок «+» и «-»

переключается фронт синхронизации («+» соответствует переднему фронту сигнала, «-» – заднему).

13. Если при включении прибора или во время его работы происходят какие-нибудь сбои, рекомендуется произвести сброс путем выключения и повторного включения прибора.

ЛИТЕРАТУРА

Осциллограф цифровой лабораторный ОЦЛ2-01. Техническое описание. – Новосибирск, 2005.