

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

В. М. Деткова, В. Б. Федюшин, Ю. В. Шарихина

**ФИЗИКА
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

Часть 2
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
КОЛЕБАНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ**

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023

УДК 537.86(076)
ББК 22.336я73
Д38

Рецензент
кандидат технических наук,
доцент факультета фундаментальной подготовки СПбГУТ
Е. Ю. Передистов

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебно-методического пособия*

Деткова, В. М.
Д38 Физика. Колебания и волны. Часть 2. Исследование вынужденных электрических колебаний в последовательном контуре : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы / В. М. Деткова, В. Б. Федюшин, Ю. В. Шарихина ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2023. – 13 с.

Написано в соответствии с программой курса физики по разделу «Колебания и волны». Приведены описание лабораторной установки и метода измерения, порядок выполнения работы, задания к работе и контрольные вопросы.

Предназначено для студентов первого курса технических специальностей всех форм обучения.

УДК 537.86(076)
ББК 22.336я73

© Деткова В. М., Федюшин В. Б., Шарихина Ю. В., 2023
© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы	4
Введение	4
Описание лабораторной установки	7
Порядок выполнения работы	7
Обработка результатов измерений	9
Контрольные вопросы	10
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	11
Приложение. РЕГУЛИРОВКА ГЕНЕРАТОРА	12

Цель работы

Исследование зависимости резонансной частоты и вида резонансной кривой от параметров последовательного колебательного контура.

Введение

Принципиальная схема установки для изучения вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре приведена на рис. 1. Контур состоит из катушки с индуктивностью L , конденсатора емкостью C , резистора с сопротивлением R и источника ЭДС (генератора).

Вынужденными колебаниями называют электрические колебания, обусловленные воздействием внешней периодически меняющейся электродвижущей силы (ЭДС).

Эти колебания возбуждаются и поддерживаются за счет работы генератора, электродвижущая сила которого меняется по гармоническому закону:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos(\Omega t), \quad (1)$$

где ε_m – амплитуда ЭДС источника; Ω – циклическая частота колебаний ЭДС источника.

Под воздействием этой ЭДС происходит движение электрических зарядов в колебательном контуре. Найдем, как меняется величина заряда на обкладках конденсатора с течением времени.

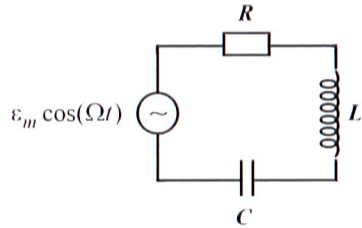


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Кирхгофа, для данного контура можно записать:

$$\varepsilon + \varepsilon_i = U_R + U_C. \quad (2)$$

Напряжение на сопротивлении определяется по закону Ома:

$$U_R(t) = I(t)R,$$

напряжение на конденсаторе –

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C},$$

ЭДС самоиндукции – по закону Фарадея:

$$\varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt},$$

заряд на конденсаторе связан с силой тока соотношением:

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

Подставляя перечисленные формулы в (2), получаем дифференциальное уравнение, определяющее зависимость заряда на обкладках конденсатора от времени:

$$\varepsilon - L \frac{dI}{dt} = IR + \frac{q}{C}.$$

Обозначим:

$$\alpha = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \frac{dq}{dt} \equiv \dot{q}; \quad \frac{dI}{dt} \equiv \ddot{q},$$

где ω_0 – собственная частота колебаний; α – коэффициент затухания.

Тогда уравнение колебаний запишем в таком виде:

$$\ddot{q} + 2\alpha\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_m}{L} \cos(\Omega t).$$

Это неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Его решение $q(t) = q_0(t) + q_1(t)$ является суммой общего решения уравнения (экспоненциально убывающего слагаемого $q_0(t) = q_m e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$) и частного решения $q_1(t)$ – гармонического колебания с той же частотой, что и частота источника. Для задач электротехники и радиотехники наибольший интерес представляет именно частное решение, которое записывается в виде

$$q_1(t) = q_m(\Omega) \cos(\Omega t - \Psi). \quad (3)$$

Из (3) видно, что частота вынужденных колебаний совпадает с частотой колебаний ЭДС (1).

Амплитудное значение заряда qm зависит от частоты генератора Ω . Колебания заряда сдвинуты относительно колебаний ЭДС:

$$q_m(\Omega) = \frac{\varepsilon_m}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\alpha^2\Omega^2}}, \quad (4)$$

Разность фаз Ψ между этими колебаниями определяется соотношением:

$$\operatorname{tg}(\Psi) = \frac{2\alpha\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}. \quad (5)$$

Кроме колебаний заряда конденсатора происходят колебания напряжения на нем и силы тока, протекающего через катушку индуктивности и резистор.

В лабораторной работе исследуется зависимость амплитудного значения напряжения на конденсаторе $U_{C_m} = q_m/C$ от частоты генератора Ω (амплитуда ЭДС при измерениях поддерживается постоянной). График этой зависимости называется *резонансной кривой*, ее характерный вид приведен на рис. 2. По горизонтальной оси отложены значения отношения частоты генератора к собственной частоте колебаний контура, по вертикальной оси – отношение амплитуды напряжения на конденсаторе к ЭДС генератора. Цифрами у кривых обозначены значения отношения α/ω_0 .

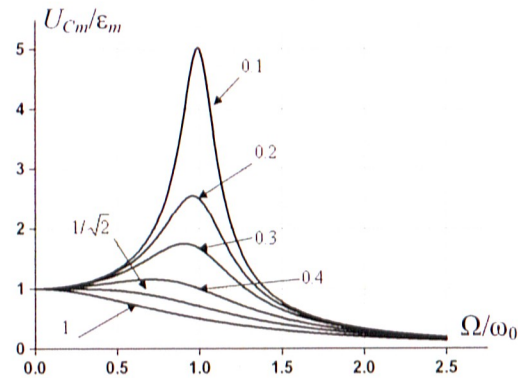


Рис. 2. Резонансная кривая

При условии $\omega_0^2 > 2\alpha^2$ зависимость $U_{C_m}(\Omega)$ немонотонна, амплитуда напряжения достигает максимума при $\Omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\alpha^2}$. Это явление

называется *резонансом*, а частота, при которой наблюдается максимум, называется *резонансной частотой*. При малом затухании в контуре ($\omega_0^2 \gg 2\alpha^2$) резонансное напряжение может в десятки и сотни раз превышать ЭДС генератора.

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки приведена на рис. 3.

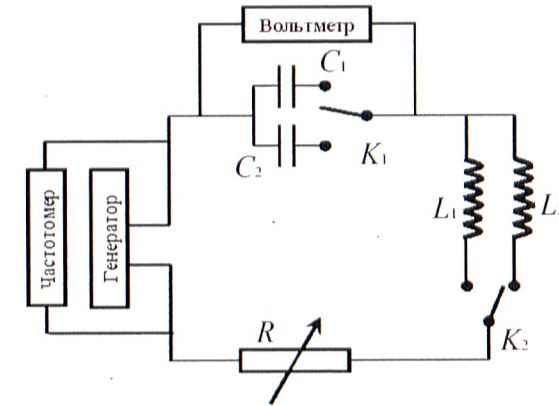


Рис. 3. Схема лабораторной установки

Источником ЭДС является генератор синусоидальных колебаний, частоту которых можно изменять в широком диапазоне. Магазин сопротивлений R , набор конденсаторов C_1, C_2 и набор катушек L_1, L_2 дают возможность изменять параметры контура. Для измерения частоты используется частотомер, для измерения напряжения на конденсаторе – вольтметр переменного тока.

Порядок выполнения работы

Часть I. Измерение резонансных частот

В этой части работы исследуется зависимость резонансной частоты от параметров контура.

1. Собрать схему, показанную на рис. 3, включив в нее контур 1 с параметрами R_1, C_1, L_1 (они указаны на рабочем месте).

2. Установить на выходе генератора значение ЭДС, указанное на рабочем месте, в процессе измерений эта величина должна поддерживаться постоянной. Эффективное значение ЭДС $\varepsilon_{эфф}$ связано с максимальным значением соотношением $\varepsilon_{эфф} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}$, шкалы приборов для измерения переменных токов и напряжений градуируются именно в эффективных значениях.

3. Изменяя частоту ν генератора, добиться наибольшего значения напряжения на конденсаторе. Записать значения напряжения и резонансной частоты в табл. 1, измерения провести три раза.

4. Исследовать зависимость резонансной частоты от сопротивления контура. Для этого необходимо включить в схему R_2, C_1, L_1 . Для контура 2 сделать измерения, указанные в пп. 2 и 3.

5. Исследовать зависимость резонансной частоты от емкости или индуктивности контура (по указанию преподавателя), включив в схему, соответственно, R_2, C_2, L_1 или R_2, C_1, L_2 . Для контура 3 сделать измерения, указанные в пп. 2 и 3.

Результаты измерений внести в табл. 1.

Таблица 1

Номер измерения	Напряжение на выходе генератора $\varepsilon_{эфф} =$					
	Контур 1		Контур 2		Контур 3	
	$R = \dots, C = \dots, L = \dots$		$R = \dots, C = \dots, L = \dots$		$R = \dots, C = \dots, L = \dots$	
	$\nu_{рез}, \text{Гц}$	$U_{эфф}, \text{В}$	$\nu_{рез}, \text{Гц}$	$U_{эфф}, \text{В}$	$\nu_{рез}, \text{Гц}$	$U_{эфф}, \text{В}$
1						
2						
3						
Среднее значение						

Часть II. Снятие резонансных кривых

1. Собрать схему (рис. 3), включить в нее контур 1.

2. Установить на выходе генератора напряжение $\varepsilon_{эфф}$, указанное на рабочем месте, и поддерживать его постоянным в процессе измерений.

3. Установить частоту генератора равной $\nu_{рез}$. **Уменьшая** частоту генератора таким образом, чтобы напряжение на конденсаторе уменьшалось примерно на одну и ту же величину (равную одной десятой части резонансного напряжения), записать напряжения и соответствующие им частоты. Результаты занести в табл. 2.

4. Еще раз установить частоту генератора равной $\nu_{рез}$. **Увеличивая** частоту генератора таким образом, чтобы напряжение на конденсаторе уменьшалось примерно на одну и ту же величину, записать напряжения и соответствующие им частоты. Результаты занести в табл. 2.

5. Сделать измерения пп. 2–4 для контуров 2 и 3.

Таблица 2

Номер измерения	Напряжение на выходе генератора $\varepsilon_{эфф} =$					
	Контур 1		Контур 2		Контур 3	
	$R = \dots, C = \dots, L = \dots$		$R = \dots, C = \dots, L = \dots$		$R = \dots, C = \dots, L = \dots$	
	$\nu, \text{Гц}$	$U_{эфф}, \text{В}$	$\nu, \text{Гц}$	$U_{эфф}, \text{В}$	$\nu, \text{Гц}$	$U_{эфф}, \text{В}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
$\nu_{рез}, \text{Гц}$						
7						
8						
9						
10						
11						

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 1 рассчитать относительную и абсолютную погрешности измерений $\nu_{рез}, U_{рез}, \Omega_{рез}$ для каждого из контуров. Обратите внимание, что шкалы генератора и частотомера проградуированы в Гц и для определения $\Omega_{рез}$ необходимо использовать формулу:

$$\Omega_{рез} = 2\pi \cdot \nu_{рез}$$

2. Для каждого контура рассчитать:

1) собственные частоты $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$;

2) коэффициенты затухания $\alpha = \frac{R}{2L}$;

3) резонансные частоты $\Omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\alpha^2}$ и соответствующие им $\nu_{\text{рез}}$, определить относительную и абсолютную погрешности этих величин.

Сравните результаты расчета с результатами измерений.

3. По данным табл. 2 построить резонансные кривые – зависимости $U_{\text{эфф}}$ от ν .

Контрольные вопросы

1. Какие колебания называются вынужденными?
2. Из каких элементов цепи состоит последовательный колебательный контур для генерации вынужденных колебаний? Нарисуйте эту схему.
3. Что такое резонанс в колебательном контуре?
4. Выведите выражение для резонансной частоты напряжения на конденсаторе.
5. Как зависит резонансная частота от сопротивления проводника при неизменных значениях емкости конденсатора и индуктивности катушки?
6. Как зависит резонансная частота от емкости конденсатора при неизменных значениях сопротивления проводника и индуктивности катушки?
7. Как зависит резонансная частота от индуктивности катушки при неизменных значениях емкости конденсатора и сопротивления проводника?
8. Выведите формулу для резонансной частоты для тока в цепи.
9. При каком соотношении между параметрами колебательного контура невозможно добиться резонанса напряжения на конденсаторе?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Андреев, А. Д.* Обработка результатов измерений в физическом практикуме / А. Д. Андреев, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2009. – 19 с.
2. *Андреев, А. Д.* Физика. Колебания : конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2013. – 38 с.
3. *Савельев, И. В.* Курс общей физики. Т. 1 / И. В. Савельев. – Москва : Наука, 1970. – 517 с.
4. *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – Москва : Наука, 1979. – 520 с.

Приложение

РЕГУЛИРОВКА ГЕНЕРАТОРА

Ручки регулировки генератора, изображенные на рис. 4, выполняют следующие функции:

- 1 – задает режим изменения частоты выходного сигнала;
- 2 – задает режим изменения напряжения выходного сигнала;
- 3 – изменяет значения параметра выходного сигнала, заданного при выборе режима (кнопками регулировки 1 или 2);
- 4, 5 – выбирают тот десятичный разряд в значении параметра, который изменяется ручкой регулировки 3;
- 6 – включает подачу выходного сигнала.

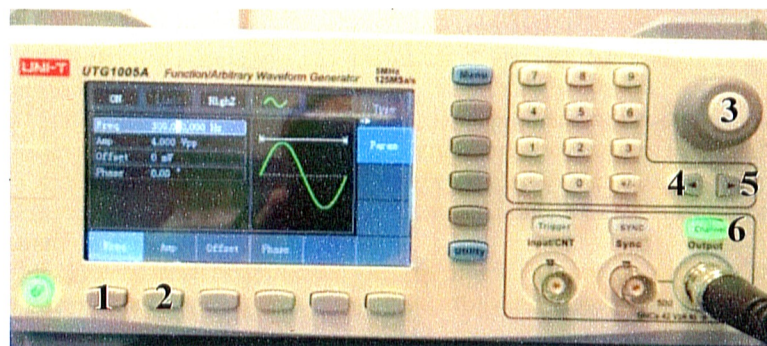


Рис. 4. Генератор переменного сигнала

При выполнении работы учитите следующие указания.

Выходное напряжение генератора (ручки регулировки 2, 3, 4, 5) установить равным 3 В.

Для подачи выходного сигнала нажать кнопку 6.

Изменять частоту выходного сигнала ручками регулировки 3, 4, 5 при нажатой кнопке 1.

При приближении частоты сигнала к резонансной изменение частоты производить более мелкими шагами (ручки регулировки 4, 5).

Предел измерения милливольтметра установить 3 В.

Проверить величину напряжения на выходе генератора можно, соединив его сигнал со входными клеммами вольтметра. Для этого использовать разъемы на стенде.

Перед экспериментальным определением резонансной частоты оцените ее значение теоретически и ведите поиск в окрестности вычисленного диапазона.

Деткова Вера Михайловна
Федюшин Владимир Борисович
Шарихина Юлия Валерьевна

ФИЗИКА КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Часть 2

Исследование вынужденных электрических колебаний в последовательном контуре

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы

Редактор И. И. Щеняк
Компьютерная верстка С. Н. Склярской

План издания 2023 г., п. 68

Подписано к печати 09.11.2023
Объем 0,75 печ. л. Тираж 13 экз. Заказ 1549

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в СПбГУТ