

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ПРАКТИКУМ ПО КВАНТОВОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Шандаров Станислав Михайлович
Акрестина Анна Сергеевна

Практикум по квантовой и нелинейно оптике: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» / С.М. Шандаров, А.С. Акрестина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. – Томск : ТУСУР, 2018. – 12 с.

Целью настоящей работы является обучение студентов способности аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника» по дисциплине «Практикум по квантовой и нелинейной оптике».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2018 г.

**ПРАКТИКУМ
ПО КВАНТОВОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ**

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Разработчики

д-р. физ.-мат. наук,
проф. каф. ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2018 г.

канд. физ.-мат. наук,
ст. преподаватель каф. ЭП
_____ А.С. Акрестина
«__» _____ 2018 г.

Содержание

| | |
|--|----|
| 1 Введение..... | 5 |
| 2 Задачи | 5 |
| 2.1 Примеры решения задач..... | 5 |
| 2.2 Задачи для проработки..... | 7 |
| 3 Вопросы для подготовки к контрольной работе..... | 10 |
| Список литературы | 11 |

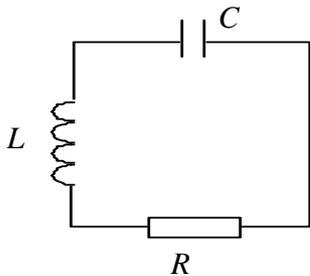
1 Введение

Целью занятий является обучение студентов способности аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.

2 Задачи

2.1 Примеры решения задач

Задача. Для последовательного колебательного контура (см. рис.) с параметрами $L = 4$ мкГн, $C = 25$ пФ, $R = 8$ Ом найти зависимость напряжения на конденсаторе от времени, если в момент времени $t = 0$ напряжение на конденсаторе $U_C(0) = 0$, а напряжение на сопротивлении потерь $U_R(0) = U_{R0} = 10$ мВ.



Р и с.

Решение. Воспользуемся уравнением свободных колебаний заряда в рассматриваемом последовательном колебательном контуре [1]:

$$\ddot{q} + 2\gamma\dot{q} + \omega_0^2 q = 0, \quad (2.1.1)$$

где $\gamma = R/2L$ и $\omega_0^2 = 1/LC$. Этому однородному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами соответствует характеристическое уравнение

$$p^2 + 2\gamma p + \omega_0^2 = 0, \quad (2.1.2)$$

корни которого имеют вид

$$p_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}, \quad (2.1.3)$$

а их характер определяется соотношением между собственной частотой колебаний в контуре ω_0 в отсутствие потерь и коэффициентом γ , определяющим эти потери. Для рассматриваемого контура находим:

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC} = 1 \cdot 10^8 \text{ рад/с}, \quad \gamma = R/2L = 1 \cdot 10^6 \text{ 1/с},$$

то есть выполняется условие $\omega_0 > \gamma$. Таким образом, корни характеристического уравнения (2.1.2) являются комплексно-сопряженными и могут быть представлены в виде

$$p_{1,2} = -\gamma \pm i\omega_1, \quad (2.1.4)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$. В результате общее решение рассматриваемого однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (2.1.1) может быть представлено в виде суперпозиции двух экспоненциальных функций

$$q(t) = A \exp(p_1 t) + B \exp(p_2 t). \quad (2.1.5)$$

С учетом (2.1.4) отсюда получаем

$$q(t) = \exp(-\gamma t) [A \exp(i\omega_1 t) + B \exp(-i\omega_1 t)], \quad (2.1.6)$$

где произвольные постоянные A и B должны быть определены из заданных начальных условий. Учитывая соотношение

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (2.1.7)$$

и начальное условие $U_C(0) = 0$, получаем, что $B = -A$ и временная зависимость (2.1.6) с использованием формулы Эйлера приводится к виду

$$q(t) = q_m \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t), \quad (2.1.8)$$

с максимальным значением амплитуды колебаний заряда $q_m = i2A$, наблюдаемым в момент времени $t = 0$. Эту амплитуду можно найти с использованием закона Ома

$$U_R(t) = RI(t) = R \frac{dq}{dt}, \quad (2.1.9)$$

и второго заданного начального условия $U_R(0) = U_{R0} = 10$ В. В результате получаем:

$$q_m = \frac{U_{R0}}{R\omega_1}, \quad (2.1.10)$$

что позволяет с учетом соотношений (2.1.7) и (2.1.8) найти зависимость напряжения на конденсаторе от времени, как

$$U_C(t) = U_m \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t),$$

с максимальным значением амплитуды, наблюдаемым в момент времени $t = 0$, равным $U_m = U_{R0} / (CR\omega_1) \approx U_{R0} / (CR\omega_0) = 500$ мВ. Здесь учтено, что частота ω_1 незначительно отличается от ω_0 .

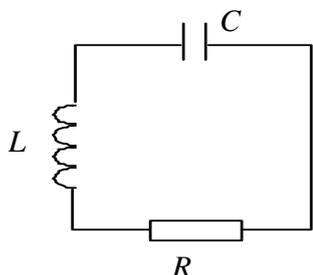
Ответ: Зависимость напряжения на конденсаторе от времени определяется выражением

$$U_C(t) = U_m \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t),$$

с параметрами $U_m = U_{R0} / (CR\omega_1) \approx U_{R0} / (CR\omega_0) = 500$ мВ, $\omega_1 \approx \omega_0 = 1 \cdot 10^8$ рад/с и $\gamma = 1 \cdot 10^6$ с⁻¹.

2.2 Задачи для проработки

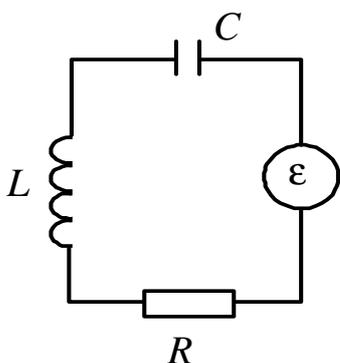
1. Для последовательного колебательного контура (см. рис.) с параметрами $L = 16$ мкГн, $C = 25$ пФ, $R = 4$ Ом найти:



Р и с .

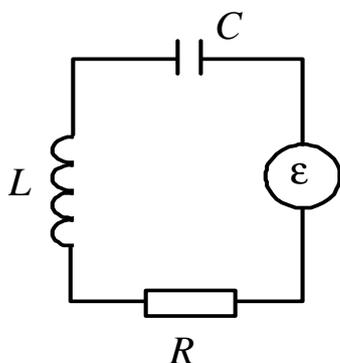
- Зависимость напряжения на конденсаторе от времени, если в момент времени $t = 0$ напряжение на конденсаторе $U_C(0) = 0$ В, а напряжение на сопротивлении потерь $U_R(0) = 1$ В.
- С использованием пакета OpenOffice Calc постройте временные зависимости: а) напряжения на конденсаторе $U_C(t)$; б) напряжения на сопротивлении потерь $U_R(t)$.

2. В последовательном колебательном контуре (рис.) действует электродвижущая сила $E(t) = E_m \cos(\omega t)$. Параметры элементов контура: $L = 16$ мкГн, $C = 64$ пФ, $R = 50$ Ом.



- Найдите закон изменения во времени заряда конденсатора $q(t)$, при условии $R/2L < 1/\sqrt{LC}$.
- Найдите в аналитическом виде временную зависимость напряжения на конденсаторе $U_C(t)$ при $t \gg 2L/R$ и приведите конечное выражение для $U_C(t)$ к тригонометрической форме.
- С использованием пакета OpenOffice Calc постройте зависимость амплитуды колебания напряжения на конденсаторе от частоты внешнего поля f , выраженной в Гц: а) для контура с параметрами, приведенными выше; б) для контура с параметрами $L = 16$ мкГн, $C = 64$ пФ, $R = 1$ Ом.

3. Для дифференцирующей цепи (см. рис.) с параметрами $C = 2$ мкФ, $R = 10$ Ом найдите:

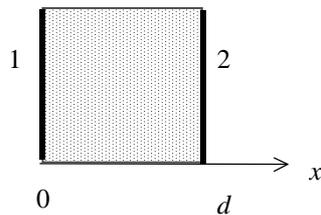


- Аналитические зависимости от времени для выходного напряжения $U_{out}(t)$ и напряжения на конденсаторе $U_C(t)$, при входном напряжении в виде функции Хэвисайда:

$$U_{in}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \leq 0, \\ U_0, & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

- С использованием пакета OpenOffice Calc постройте временные зависимости: а) входного напряжения $U_{in}(t)$; б) выходного напряжения $U_{out}(t)$; в) напряжения на конденсаторе $U_C(t)$, при $U_0 = 10$ В.

4. Электрический диполь состоит из положительного и отрицательного зарядов, равных по абсолютной величине значению $q_m = 1$ нКл и расположенных соответственно в точках $y = +r_0/2$ и $y = -r_0/2$ декартовой системы координат, где $r_0 = 10$ мкм.
- Найдите соотношения, описывающие распределения электрического потенциала $\varphi(x, y, z)$ и напряженности электрического поля $\vec{E}(x, y, z)$, создаваемых данным диполем.
 - Найдите аналитическое выражение для эквипотенциальных поверхностей, в декартовой системе координат.
 - С использованием пакета OpenOffice Calc постройте сечение эквипотенциальных поверхностей, для создаваемого диполем электрического поля, плоскостью YZ декартовой системы координат.
5. Проводящий диэлектрик, изображенный на рисунке, заключен между обкладками плоского конденсатора, отключенного от внешних источников, и имеющего поперечные размеры обкладок, многократно превышающие расстояние d между ними. В момент времени $t = 0$ разность потенциалов на обкладках 1 и 2 имела значение U_0 .



- Используя условие непрерывности линий полного тока, найдите общее решение для зависимости напряженности электрического поля в диэлектрике от времени.
 - Постройте с использованием пакета OpenOffice Calc временные зависимости для напряженности электрического поля в диэлектрике при $t \geq 0$, для следующих параметров диэлектрического слоя и значений начальной разности потенциалов:
 - $d = 1$ мм, $\varepsilon = 30\varepsilon_0$, $\sigma = 10^{-9}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$, $U_0 = 100$ В;
 - $d = 0,2$ мм, $\varepsilon = 200\varepsilon_0$, $\sigma = 10^{-6}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$, $U_0 = 1$ В.
6. Расположенная при $z = 0$ бесконечно тонкая по оси z и имеющая бесконечно большие размеры по осям x и y диэлектрическая пленка имеет поверхностный электрический заряд с плотностью $\xi = 10$ Кл/м 2 .
- Определите поле вектора электрической индукции, создаваемое данной пленкой в верхней и нижней полуплоскости.
 - Нарисуйте (постройте) картину создаваемого однородно заряженной пленкой распределения вектора электрической

напряженности в пространстве вблизи нее, по координатам x и y .

7. Плоская электромагнитная волна с вектором напряженности электрического поля $\vec{E}(z,t) = E_m \vec{j} \cos(\omega t - kz)$ и с длиной волны $\lambda = 500$ нм распространяется в вакууме.
- Найдите выражение для напряженности магнитного поля данной волны.
 - Нарисуйте картину распределения в пространстве, для $0 \leq z \leq \lambda$, вектора напряженности электрического поля, при $E_m = 10$ В/м и $t = 0$.
 - Нарисуйте картину распределения во времени, для $0 \leq t \leq 2\pi / \omega$, вектора напряженности магнитного поля, при $E_m = 10$ В/м и $z = \lambda / 4$.
8. Заряженная частица с массой $m = 1 \cdot 10^{-26}$ кг совершает гармонические колебания вдоль оси x относительно положения равновесия $x = x_0$ и характеризуется потенциальной энергией $U(x) = b(x - x_0)^2$, где $b = 2\pi^2$ Дж/м².
- Вычислите частоту колебаний частицы в Гц, соответствующую длину волны электромагнитного излучения и его волновое число.
 - Постройте временную зависимость отклонения частицы от положения равновесия $x(t)$ для начальных условий $x(0) = x_0$ и $x(T/4) = x_0 + 1 \times 10^{-13}$ м, где T – период гармонических колебаний, при $x_0 = 3 \cdot 10^{-10}$ м, с использованием пакета OpenOffice Calc.
9. Для колебательного процесса, заданного при $0 \leq t \leq 4T_0$ в виде зависимости $q(t) = 2 \left(1 - \frac{t}{4T_0} \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T_0} t \right)$, постройте фазовую траекторию с использованием пакета OpenOffice Calc.

3 Вопросы для подготовки к контрольной работе

1. Как можно описать математически гармоническое колебание? Какими параметрами характеризуется гармоническое колебание?
2. Нарисуйте график зависимости потенциальной энергии системы, в которой могут происходить механические колебания вблизи положения равновесия, от координаты. Запишите математическое выражение для этой зависимости при малых отклонениях от положения равновесия.
3. Запишите дифференциальное уравнение, описывающее одномерный линейный осциллятор. Каково его общее решение?
4. Из каких соотношений можно получить уравнение, описывающее свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре?
5. Какой временной зависимостью описываются свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре? Изобразите график данной зависимости.
6. Каким образом можно получить дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания в механической системе? Запишите соответствующее дифференциальное уравнение и поясните все обозначения.
7. Дайте определения понятиям «фазовая плоскость», «изображающая точка», «фазовая траектория». Поясните ответ рисунком.
8. Как можно получить уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы?
9. Запишите уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы и поясните на его основе особенности движения изображающей точки по фазовой траектории во времени.
10. Нарисуйте фазовый портрет гармонических колебаний и дайте ему физическую трактовку.
11. Нарисуйте фазовый портрет системы с мнимыми собственными частотами и дайте ему физическую трактовку.
12. Нарисуйте фазовый портрет затухающих колебаний и дайте ему физическую трактовку.
13. Нарисуйте фазовый портрет нарастающих колебаний и дайте ему физическую трактовку.
14. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Поясните все обозначения.
15. Выведите волновое уравнение из уравнений Максвелла в дифференциальной форме для непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.
16. Запишите математическую формулировку одномерного волнового уравнения. Поясните все обозначения.
17. Дайте определение понятию фазового или волнового фронта волны.

18. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.
19. Запишите уравнения Максвелла для плоских гармонических волн в непроводящей среде, в которой также отсутствуют свободные заряды и сторонние токи. Поясните все обозначения.
20. В чем состоит достоинство комплексного метода при описании гармонических плоских волн?

Список литературы

1. Введение в оптическую физику : учебное пособие для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» / С.М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2018. – 127 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7307>
2. Теоретические основы электротехники. Часть 1. Установившиеся режимы в линейных электрических цепях: Учебное пособие [Электронный ресурс] / Шандарова Е. Б. [и др.]. — Томск: ТУСУР: 2015. — 187 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5376>
3. Apache OpenOffice.org Calc [Электронный ресурс] : табличный процессор. URL: <https://www.openoffice.org/product/calc.html>

Учебное пособие

Шандаров С.М.
Акрестина А.С.

Практикум по квантовой и нелинейной оптике:

Методические указания к практическим работам
для студентов направления 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40