

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.12

Вынужденные колебания в RLC -контуре

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником [3], т.2, § 91-92. Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Вынужденные колебания в RLC -контуре». Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ, с.5 еще раз.

Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения и запишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа сверху этого окна.

Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием процессов в колебательном RLC -контуре.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей при вынужденных колебаниях в RLC -контуре.

Краткая теория

Повторите основные определения для колебательного движения, а также теорию к ЛР № 3.11, в которой рассмотрены свободные колебания в контуре.

Вынужденными колебаниями называются процессы, происходящие в контуре, содержащем конденсатор, катушку индуктивности, резистор и источник с переменной ЭДС, включенные последовательно и образующие замкнутую электрическую цепь.

Если ЭДС источника меняется по гармоническому закону, то в контуре наблюдаются вынужденные гармонические колебания. При этом ток в контуре также будет переменным, подчиняющимся закону Ома в комплексной форме.

Комплексная величина есть определенная совокупность двух алгебраических чисел $\hat{Z} = A + iB = Ze^{i\varphi}$, где A – действительная часть; B – мнимая часть; Z – модуль; φ – фаза комплексной величины. ГРАФИЧЕСКИ \hat{Z} изображается, как радиус-вектор на комплексной плоскости: его длина равна Z , а угол между вектором и горизонтальной (действительной) осью равен φ .

Комплексный ток и комплексное напряжение

$$\hat{I}(t) = \hat{I}_0 \cdot e^{i\omega t},$$

$$\hat{U}(t) = \hat{U}_0 \cdot e^{i\omega t}.$$

Это векторы, которые вращаются с угловой скоростью ω .

Здесь $\hat{U}_0 = U_0 \cdot e^{i\varphi_{0u}}$ – комплексная амплитуда напряжения;

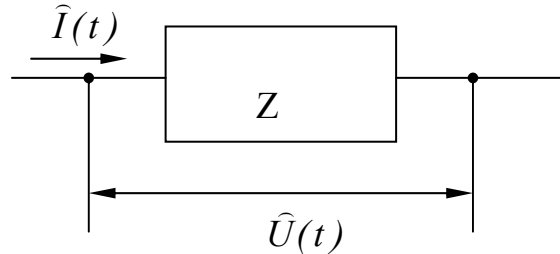
$\hat{I}_0 = I_0 \cdot e^{i\varphi_{0i}}$ – комплексная амплитуда тока.

\hat{I}_0 и \hat{U}_0 - комплексные векторы, которые на комплексной плоскости неподвижны. Они соответствуют «мгновенной фотографии» реальных комплексных токов и напряжений, сделанной в начальный момент времени ($t=0$).

Комплексная амплитуда – сама комплексная величина, взятая в начальный момент времени.

Математически

$$\frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = \hat{Z} \text{ (импеданс).}$$



Импеданс – это отношение комплексной амплитуды напряжения на данном элементе, к комплексной амплитуде тока через данный элемент. Модуль импеданса называется полным электрическим сопротивлением цепи.

$$\hat{Z} = \frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = \frac{U_0}{I_0} e^{i(\Delta\varphi)};$$

$$\underbrace{\Delta\varphi}_{\substack{\text{сдвиг фаз} \\ \text{между током} \\ \text{и напряжением}}} = \varphi_{ou} - \varphi_{oi}$$

а. РЕЗИСТОР: $\frac{U}{I} = R$; $\frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = R$; фазы напряжения и тока одинаковые. Импеданс равен R : $Z_R \equiv X_R = R$.

б. КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ: действует закон электромагнитной индукции (самоиндукции)

$$\varepsilon_{\text{си}} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Используя его и закон Ома для комплексных величин, получим:

$$\begin{aligned} \hat{U}_L &= L \frac{d\hat{I}}{dt}; \\ \hat{I} &= I_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_{oi})} \Rightarrow \frac{d\hat{I}}{dt} = I_0 \cdot e^{\varphi_{oi}} (i\omega) \cdot e^{i\omega t} \Rightarrow \\ \hat{U}_L &= L(i\omega) \underbrace{I_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_0)}}_{\hat{I}(t)} \\ \frac{\hat{U}_L}{\hat{I}} &= i\omega L \Rightarrow \hat{X}_L = i\omega L \text{ - импеданс катушки индук-} \end{aligned}$$

тивности.

Напряжение на катушке **опережает** по фазе ток через нее на $\pi/2$.

в. КОНДЕНСАТОР: $U_C = \frac{q}{C} \Rightarrow \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{C} I;$

или $\frac{d\hat{U}_C}{dt} = \frac{1}{C} \hat{I}.$

Пусть $U_C = U_{0C} \cdot e^{i(\omega t + \varphi_{ou})};$

тогда $\hat{I} = C \cdot \frac{d\hat{U}_C}{dt} = C \cdot i \cdot \omega \cdot \hat{U}_C(t).$

Найдем отношение $\frac{\hat{U}_C}{\hat{I}} = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C};$

отсюда $\hat{X}_C = -\frac{i}{\omega C}$ - комплексное сопротивление (импеданс) конденсатора.

Напряжение на конденсаторе **отстает** по фазе от тока через него на $\pi/2$.

Модуль комплексного сопротивления (катушки или конденсатора) называется реактивным сопротивлением (индуктивным или емкостным). Обозначается символом без крышечки над ним.

Все элементы в контуре соединены последовательно, поэтому для нахождения импеданса контура надо просуммировать импедансы всех элементов:

$$\hat{Z}_K = R + \hat{X}_L + \hat{X}_C.$$

После подстановки можем получить модуль импеданса т.е. полное сопротивление контура:

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

Резонансом для тока называется явление резкого увеличения амплитуды колебаний тока при приближении частоты ЭДС к некоторому значению, называемому резонансной частотой $\omega_{\text{рез}}$. Максимум амплитуды тока будет тогда, когда минимально полное сопротивление контура, или $Z_{\text{рез}} = R$ и

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$

отсюда $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - частота свободных колебаний в контуре.

МАКСИМУМ напряжения на конденсаторе соответствует резонансу для напряжения, который наблюдается при несколько меньшей частоте ЭДС:

$$\omega_{\text{РЕЗ.U}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2},$$

где $\delta = \frac{R}{2L}$ - коэффициент затухания для данного контура.

Амплитуда резонансного напряжения на конденсаторе U_{0C} пропорциональна амплитуде ЭДС и добротности контура Q : $U_{0C} = Q \cdot \varepsilon_0$.

При небольшом затухании добротность определяется соотношением

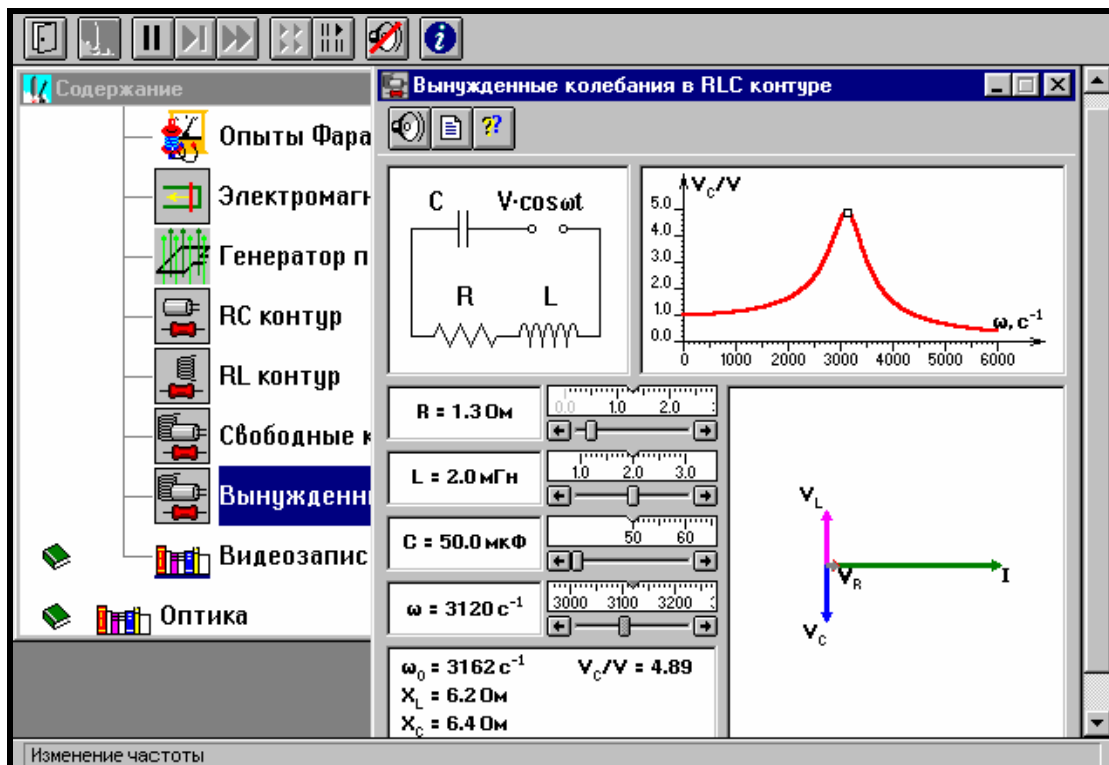
$$Q = \frac{\rho}{L},$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - называется характеристическим сопротивлением контура. Чем больше добротность, тем «острее» резонанс.

РЕЗОНАНСНОЙ КРИВОЙ называется зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты ЭДС.

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Рассмотрите рисунок компьютерной модели.



Перерисуйте необходимое в конспект, используя обозначения, принятые в нашей теоретической части (ε_0 вместо V , U_{0C} вместо V_C , U_{0L} вместо V_L и U_{0R} вместо V_R).

Подготовьте три таблицы, используя форму 1.

Результаты измерений (12 столбцов). Значения характеристик (не перерисовывать)
 $L = \underline{\hspace{1cm}}$ мГн

Форма 1					Табл. 1				
C (мкФ) =	50	55	...	100	Бригады	R (Ом)	L_1 (мГн)	L_2 (мГн)	L_3 (мГн)
$\omega_{РЕЗ}$, 1/с					1 или 5	1 или 2	1.0	1.7	2.4
ω_0 , 1/с					2 или 6	2 или 1	1.2	1.9	2.6
U_{0C}/ε_0					3 или 7	1 или 2	1.4	2.1	2.8
$1/\sqrt{C}$					4 или 8	2 или 1	1.6	2.3	3.0

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Измерения

1. Закройте окно теории, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Изменяйте величину емкости конденсатора и наблюдайте изменение резонансной кривой.
2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов:
 R – сопротивления резистора,
 L – индуктивности катушки,
 и зафиксируйте значения, указанные в табл/ 1 для вашей бригады.
3. Установите указанное в таблице по форме 1 значение емкости конденсатора. Изменяя величину частоты ЭДС, следите за перемещением отметки на резонансной кривой и числовым значением добротности (U_{0C}/ε_0). Добейтесь максимального значения добротности и соответствующие значения частоты источника ЭДС и собственной частоты контура занесите в таблицу по форме 1. Повторите измерения для других значений емкости из формы 1.
4. Повторите измерения для двух других значений индуктивности катушки, выбирая их из табл. 1. Результаты запишите в таблицы по форме 1.

Обработка результатов и оформление отчета

1. Постройте на одном листе графики зависимости резонансной частоты от корня из обратной емкости при трех значениях индуктивности.
2. Для каждой прямой определите котангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{ctg}(\varphi) = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\sqrt{C}}\right)}{\Delta\omega_{\text{РЕЗ}}} \equiv A_{\text{ЭКСП.}}$$

3. Вычислите теоретическое значение константы $A_{\text{ТЕОР}}$ для каждой прямой по формуле $A_{\text{ТЕОР}} = \sqrt{L}$.
4. Заполните таблицу результатов измерений по Форме 2.

Результаты измерений

Форма 2

Номер измерения	$A_{\text{ЭКСП}} (\text{Гн}^{1/2})$	$A_{\text{ТЕОР}} (\text{Гн}^{1/2})$

Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вынужденным колебаниям.
2. Что такое колебательный контур?
3. Когда возникают вынужденные гармонические колебания?
4. Как графически изображается комплексная величина?
5. Что такое комплексная амплитуда тока или напряжения?
6. Дайте определение импеданса.
7. Что такое полное электрическое сопротивление?
8. Чему равен импеданс резистора?
9. Чему равен импеданс идеальной катушки индуктивности?
10. Как формулируется закон электромагнитной индукции для катушки?
11. Чему равен импеданс конденсатора?
12. Чему равны реактивные сопротивления катушки и конденсатора?
13. Чему равно реактивное сопротивление катушки и конденсатора, соединенных последовательно?
14. Чему равен импеданс колебательного контура?
15. Чему равно полное сопротивление колебательного контура?
16. Дайте определение резонанса для тока в колебательном контуре.
17. На какой частоте наблюдается резонанс для тока в колебательном контуре?
18. На какой частоте наблюдается резонанс для напряжения на конденсаторе в колебательном контуре?
19. Чему равно отношение амплитуд напряжения на конденсаторе при резонансе и ЭДС?

20. Чему равно характеристическое сопротивление контура? Как оно влияет на добротность?
21. Что такое резонансная кривая контура?

(Подробное изложение теории можно найти в курсе общей физики [3], §92-101, 1970 (в последующих изданиях отсутствует).

Библиографический список

Основной:

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2003 и др. года изданий.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2004.

Дополнительный:

3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1989 и др. года изданий.
4. Физика: Текст лекций. Ч. 1. Электростатика. Постоянный ток / Цаплев В.М., Орехова И.Г., Лиходаева Е.А., Стабровский К.А.– СПб.: СЗПИ, 1999.
5. Физика: Текст лекций. Ч 1. Магнитостатика. Электромагнетизм / Цаплев В.М., Орехова И.Г., Лиходаева Е.А., Стабровский К.А.– СПб.: СЗПИ, 1999.

Справочные таблицы

Физические константы

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	γ или G	$6.67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9.8	$\text{м}/\text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6.02 \cdot 10^{26}$	кмоль^{-1}
Универсальная газовая постоянная	R	$8.31 \cdot 10^3$	$\text{Дж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1.6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$	кг
Постоянная Фарадея	F	$9.65 \cdot 10^4$	$\text{Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	10^1
гекто	г	10^2
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	10^{-1}
санتي	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	5
ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К РАБОТЕ.....	5
ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ.....	6
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.1. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ.....	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.3. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШ- НЕЙ НАГРУЗКИ.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.5. ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО- ГАУССА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВАКУУМЕ.....	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.6. ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОД- НОГО УЧАСТКА ЦЕПИ.....	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.7. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОНДЕНСАТОРОМ.....	40
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.8. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.....	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦЫ МЕТОДОМ ОТКЛОНЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.....	56

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.11. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ.....	61
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.12. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В <i>RLC</i> -КОНТУРЕ.....	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	72
СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ.....	73

Редактор А.В. Алехина

Сводный темплан 2005 г.

ЛР № № 020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение №78.01.07.953.П.11.03 от 21.11.2003г.

Подписано в печать	. 04. 2005	Формат 60x84 1/16.
Б.кн.-журн.	П.л. 4,75	Б.л. 2,375. РТП РИО СЗТУ.
Тираж 200.		Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
РИО СЗТУ,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5