

Министерство образования Российской Федерации
Российский государственный гидрометеорологический университет

И.Р. Рябухов, Ю.М. Шапаренко

ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

Лабораторный практикум



Санкт-Петербург
2002

УДК 621.396

И.Р. Рябухов, Ю.М. Шапаренко. Теория колебаний и волн. Лабораторный практикум – СПб: изд. РГТМУ, 2002. – 40 с.

Практикум по дисциплине «Теория колебаний и волн» содержит материалы, посвященные экспериментальному исследованию гармонических и несинусоидальных колебаний и волн. Предназначен для студентов по специальности 141000, и специализации 141005 – «Дистанционное зондирование Мирового океана». Может быть использован в учебном процессе при подготовке бакалавров и инженеров 141000 – «Морские информационные системы и оборудование».

Утверждено

Редакционно-издательским советом университета

Корпус 2

8/м

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

08.04.03. Дамин АВ 1201				

университет
(РГТМУ).

ПРЕДИСЛОВИЕ

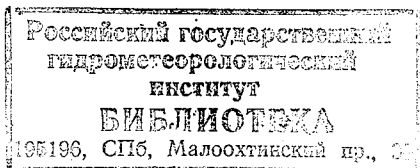
Теория колебаний и волн является одной из дисциплин, обеспечивающих фундаментальную подготовку специалистов в научном направлении, связанном с морскими информационными технологиями, в частности по специализации «Дистанционное зондирование Мирового океана». Более эффективному освоению знаний в этой дисциплине способствуют экспериментальные исследования, проводимые в рамках лабораторного практикума.

Данный практикум содержит сведения об измерительных приборах, используемых в исследованиях и задания на исследования.

Лабораторные работы состоят из двух групп. Одна группа предполагает проведение исследований характеристик колебаний на экспериментальных макетах с использованием измерительных приборов, вторая группа предполагает проводить исследования методом моделирования на ПЭВМ. Такое сочетание позволяет освоить физический и математический методы исследований, что в настоящее время является необходимым условием успешной деятельности специалистов в области, связанной с получением и обработкой информации в океанологических исследованиях.

Цель лабораторных работ будет достигнута при условии, что студенты, перед тем как приступить к практическим измерениям, основательно ознакомятся с предметом исследования и экспериментальным стендом. Результаты исследований оформляются в виде отчета по каждой лабораторной работе. Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему исследуемой системы, стенда или алгоритм моделирования.
3. Результаты экспериментов и расчетов в виде осциллограмм, графиков и таблиц.
4. Сравнение результатов расчета и эксперимента.
5. Выводы по работе.



ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Первоначальные сведения о параметрах колебаний даются на примере гармонических сигналов $U(t) = A \sin(2\pi \frac{t}{T} + \varphi_0)$.

На рис.1 приведены графические изображения сигнала $U(t)$ и модуля его спектра $|S(f)|$. Параметры сигнала обозначены следующим образом: A — амплитуда, f — частота, $\varphi = \frac{2\pi}{T}t + \varphi_0$ — фаза.

Амплитуда A гармонических и импульсных сигналов измеряется осциллографом: размер h (см) изображения по вертикали умножается на чувствительность $n_y \left(\frac{\text{В}}{\text{см}} \right)$ канала Y .

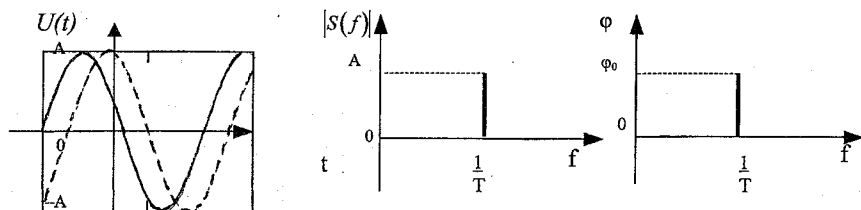


Рис.1. Графические изображения гармонического сигнала.

Для синусоиды удобно измерять полный размах сигнала и пользоваться расчетной формулой

$$A = \frac{2A}{2} = \frac{hn_y}{2}.$$

Действующее значение напряжения может быть вычислено так: $U_{\{ } = \frac{A}{\sqrt{2}}$,
либо измерено вольтметром.

Циклическая частота f (Гц) периодических сигналов измеряется частотомером, либо рассчитывается по значению периода $T = 1/f$, измеренного осциллографом: размер l (см) изображения между ближайшими периодически повторяющимися характерными точками умножается на масштаб m_x (с/см) развертки канала X :

$$f = \frac{1}{l \cdot m_x}.$$

Угловая частота ω (рад/с) рассчитывается как $2\pi f$.

Абсолютная фаза φ как аргумент синусоидальной функции $U = A \sin \varphi$ может быть измерена специальным прибором – фазометром. Чаще всего измеряется относительный сдвиг по фазе $\Delta\varphi$ двух гармонических колебаний с помощью осциллографа методом фигур Лиссажу. Для синусоид одной частоты фигура имеет вид эллипса с размерами по осям a и b (частные случаи – прямая при $a = 0$ или $b = 0$ и круг при $a = b$). Изображение должно быть вписано в квадрат. При затухающих колебаниях фигура превращается в спираль (набор эллипсов).

Расчетная формула: $\Delta\varphi = 2\arctg \frac{b}{a}$.

Для измерения параметров сигналов используются следующие основные измерительные приборы.

Вольтметр постоянного тока служит для измерения постоянных напряжений и имеет стрелочный или знаковый индикатор.

Вольтметр переменного тока предназначен для измерения действующих значений напряжений гармонических сигналов. Переменные сигналы фильтруют, выпрямляют и передают на индикатор.

Измерительный *генератор* является калиброванным датчиком гармонических сигналов. С помощью органов управления генератора меняют частоту и амплитуду сигналов.

Магазин *сопротивлений* представляет собой комплекс последовательно соединенных переключаемых резисторов и позволяет с высокой точностью устанавливать разные значения сопротивлений.

Осциллограф – универсальный прибор с электронно-лучевой трубкой, на экране которой отображается форма сигнала. Трубка снабжена двумя парами пластин. Измеряемый сигнал подают на горизонтальные пластины (через вход U), в результате чего вертикальное отклонение луча в каждый момент времени определяется мгновенным значением напряжения сигнала. На вертикальные пластины подают пилообразное напряжение развертки, под действием которого луч смещается по экрану слева направо. Если периоды измеряемого сигнала

кратны периоду сигнала развертки, то на экране образуется устойчивое изображение сигнала. Органы управления позволяют регулировать период развертки и масштаб изображения сигнала по вертикали. Сигнал развертки можно совсем отключить: в этом случае на вертикальные пластины может быть подан сигнал от внешнего источника (через вход X). Подачу двух разных сигналов на входы X и Y осциллографа используют при измерениях кратных частот сигналов, а также при определении набега фаз при прохождении гармонического сигнала через электронную схему.

Для генерации СВЧ-колебаний используется специальный генератор, структурная схема которого приведена на рис.2. Инструкция пользователю в качестве примера приведена ниже. Аналогичные инструкции имеются для каждого прибора. На рис.3 показана структурная типовая схема измерений.

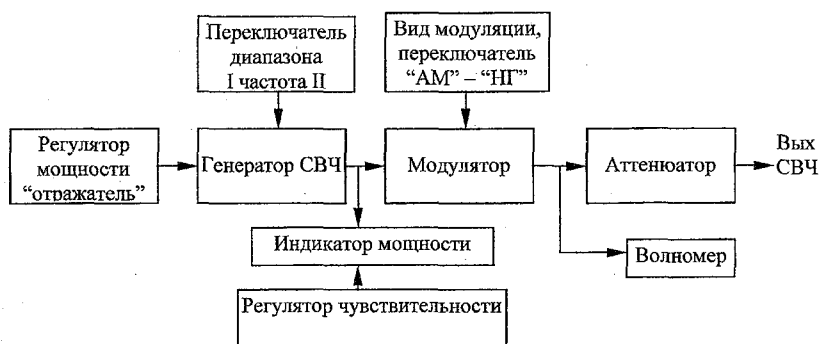


Рис. 2 Структурная схема генератора СВЧ.



Рис.3. Типовая схема измерений.

Подготовка к работе источника СВЧ-колебаний

1. Получить разрешение у преподавателя на запуск установок.
2. Подключить генератор к электросети (тумблер "Сеть" – в положение "ВКЛ", загорается красная лампочка).
3. Переключатель "Волномер – Детектор" переместить в положение "Детектор".
4. Через 3 мин после прогрева прибора повернуть переключатель диапазона в положение 1, а переключатель вида модуляции в положение "НГ" (0 непрерывная генерация).
5. Установить требуемую частоту с помощью ручки "Частота" по таблице на приборе и шкале "0 – 30 дел" в левом окошке на лицевой панели прибора. Контроль генерации вести по встроенному измерителю выходной мощности. В небольших пределах частоту можно регулировать ручкой "Коррекция", но это может привести к срыву колебаний.
6. Установить максимальную мощность с помощью рукоятки "Отражатель" и стрелочного индикатора мощности. Если индикатор зашкаливает, следует уменьшить его чувствительность соответствующей ручкой "Чувствительность индикатора".
7. Включить импульсную внутреннюю амплитудную модуляцию, переведя переключатель вида модуляции в положение "Вн".
8. Установить выходной уровень колебаний, соответствующий положению "30" аттенюатора.

Измерение частоты колебаний с помощью волномера, встроенного в прибор

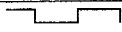
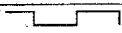
1. Перевести переключатель "Волномер–Детектор" в положение "Волномер".
2. Медленно вращая ручку "Волномер", добиться максимального отклонения стрелки индикатора мощности. Пользоваться ручкой "Чувствительность" – при необходимости.
3. Отсчет частоты произвести при максимальном отклонении стрелки по набору цифр шкалы волномера на пересечении с красной меткой.

Контрольный тест: Измерение параметров колебаний

1. Установить, пользуясь генератором, вольтметром и осциллографом, следующие параметры колебаний:

Таблица 1

Варианты заданий

№ п/п	Форма колебаний	Частота, кГц	Амплитуда, В	Действующе е значение, В
1		35	A	0,120
2		17,5	1,2	U_d
3		180	A	0,050
4		2,5	0,150	—
5		0,105	A	1,3
6		27	0,250	—

2. Определить фазовые соотношения между синусоидальными напряжениями на выходах генератора.

3. Измерить параметры колебаний, указанных преподавателем, пользуясь разными методами и приборами. Сравнить результаты измерений и расчетов.

В качестве отчета представляется протокол измерений по одному из заданий пп. 1 – 3

Лабораторная работа № 1

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЛИНЕЙНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Цель работы. Ознакомление с гармоническим колебанием и изучение связи характеристик колебания с параметрами колебательной системы.

Колебательную систему, в которой процессы колебаний описываются одной независимой переменной величиной, называют системой с одной степенью свободы или осциллятором. В случае линейных процессов система называется линейным осциллятором. Примерами линейных осцилляторов являются: маятник, колеблющийся в одной плоскости; масса связанная с пружиной; одиночный LCR – контур; сообщающиеся сосуды, заполненные водой; поплавков на поверхности воды и множество других простых колебательных систем.

Для всех линейных осцилляторов, независимо от их физической природы, смещение "движущегося элемента" от положения равновесия определяется одной и той же временной зависимостью, называемой гармоническим колебанием:

$$U(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

или

$$U(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)$$

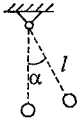
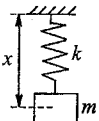
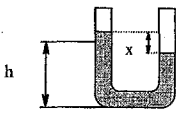
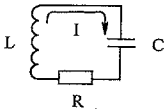
В этом выражении $U(t)$ – координата во времени "движущегося элемента" относительно положения равновесия; A_0 – максимальное отклонение от положения равновесия, называемое амплитудой; ω_0 – угловая частота, имеющая размерность радиан в секунду (рад/сек), равная $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T_0$; где f_0 – частота, измеряемая в герцах (Гц), обратная величина – $1/f_0$ – называется периодом T_0 и измеряется в секундах; φ_0 – фазовая постоянная или начальная фаза колебания.

Приведенное выше выражение (1) описывает свободные колебания линейного осциллятора, в котором отсутствуют потери энергии. В этом случае основная характеристика колебания частота f_0 или период T_0 определяются параметрами системы. Так, для маятника частота колебаний определяется его длиной l и равна $f_0 = 1/2\pi \sqrt{g/l}$, где g – ускорение свободного падения.

В таблице приведены некоторые типы линейных осцилляторов и связь периода колебаний с параметрами.

Таблица 1.1

Типы линейных осцилляторов

Тип осциллятора	Параметры осциллятора	Период колебания
1. Маятник 	l – длина α – угол отклонения (независимая переменная)	$T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$, g – ускорение свободного падения. $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $l = (1 \div 5) \text{ м}$
2. Масса на пружине 	m – масса, k – жесткость пружины, x – текущая координата отклонения h – коэффициент трения	$T_0 = 2\pi\sqrt{m/k}$ $m = (0,1 \div 10) \text{ кг}$, $k = 900 \text{ н/м}; 150$ $h = (1 \div 5)$
3. Сообщающиеся сосуды с жидкостью 	h – высота столба жидкости в положении равновесия, x – отклонение от положения равновесия	$T_0 = 2\pi\sqrt{h/g}$ $h = (0,1 \div 0,5) \text{ м}$ $g = 9,8 \text{ м/с}^2$
4. LC – контур 	L – индуктивность (Гн), C – емкость (Ф)	$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ $L = 2 \cdot 10^{-6}; 8 \cdot 10^{-3}$ $C = (50 \div 500) \cdot 10^{-3}$ $R = 0,01 \div 0,1 \text{ Ом}$

В реальных колебательных системах происходит потеря энергии колебаний, что приводит к постепенному уменьшению амплитуды колебаний и по истечении некоторого времени к их полному затуханию. В таких осцилляторах колебания описываются выражением (2):

$$U(t) = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t + \varphi_0) \quad (2)$$

В этом выражении величина δ характеризует затухание и называется коэффициентом затухания. На рис.1.1 представлен график такого колебания.

В механических осцилляторах потери обусловлены силами трения, а в электрических – активным сопротивлением цепей.

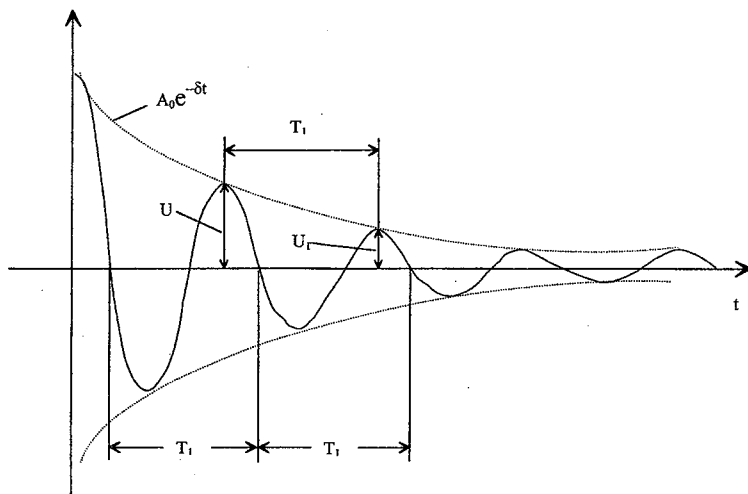


Рис.1.1 График затухающего колебания.

В этих осцилляторах коэффициент затухания определяется следующими соотношениями:

$\delta = h/2m$, h – коэффициент трения, m – масса осциллятора;

$\delta = R/2L$, R – активное сопротивление, L – индуктивность. Величину $T_1 = 2\pi/\omega_1$ называют условным периодом колебаний, а частота ω_1 определяется соотношением:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \frac{1}{T_0}$.

На практике для оценки характера затухания используют величину $\mathfrak{D} = \delta T_1$, которую называют декрементом затухания. Часто эту величину определяют через логарифм отношения амплитуд колебания, разделенным периодом T_1 (рис.1.1)

$$\vartheta = \ln \frac{U_1(t+T)}{U(t)} \quad (4)$$

Наглядным представлением динамики колебательного процесса в линейных осцилляторах является изображение их движения на так называемой фазовой плоскости в координатах смещение – скорость. Траектория движения осциллятора в этих координатах называется фазовой траекторией, каждая точка которой характеризуется смещением $U(t)$ и скоростью $dU(t)/dt = U'(t)$ в данный момент времени. На рис.1.2 приведены фазовые траектории осциллятора без потерь (рис.1.2а) и с потерями (рис.1.2б).

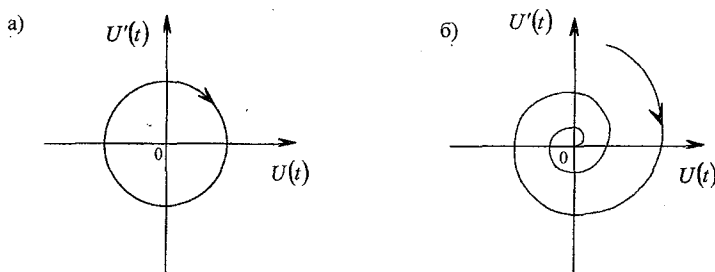


Рис.1.2 Фазовые траектории осциллятора.

Задание на исследование

1.1. Изучить зависимость частоты колебаний линейного осциллятора без потерь от его параметров.

1.2. Исследовать влияние потерь энергии в осцилляторе на амплитудные характеристики колебательного процесса и на фазовые траектории движения осциллятора.

Рекомендации по проведению исследований

По п.1.1.:

а) реализовать на ПЭВМ колебательный процесс согласно выражению (1) для заданного линейного осциллятора по таблице.

б) измерить период колебаний для пяти значений параметра линейного осциллятора (m или c) для двух значений K , для механического осциллятора, или L — для электрического осциллятора.

с) построить графики зависимости частоты колебаний от изменения параметра линейного осциллятора.

По п.1.2.:

а) реализовать на ПЭВМ колебательный процесс согласно выражению (2) для линейного осциллятора заданного преподавателем для двух значений параметра системы (m или L).

б) определить декременты затухания, используя соотношение (4) при различных коэффициентах h или сопротивления R (взять из таблицы).

с) построить зависимость декремента затухания от величины коэффициента потерь (h или R) для двух значений m или L .

д) определить экспериментально частоту ω_1 и сравнить ее с расчетной по формуле (3). Построить графики $\omega_1(h)$ или $\omega_1(R)$.

е) исследовать влияние параметров колебательной системы по п.п. а) и г) на фазовые траектории линейного осциллятора. Зарисовать осциллограммы.

Для получения фазовых траекторий необходимо на оси X и Y декартовой системы координат подать $U(t)$ и $U'(t)$ соотношения (1) или (2).

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы. Ознакомление с характером зависимостей амплитудных характеристик колебаний линейного осциллятора от частоты внешнего воздействия и затухания в осцилляторе.

Общие сведения: Колебания линейного осциллятора, которые возникают под действием внешней периодической силы, называются вынужденными колебаниями. Характер вынужденных колебаний определяется как свойствами колебательной системы, так и характеристиками внешнего воздействия. При этом

важно знать, какова зависимость характеристик вынужденных колебаний от параметров колебательной системы и от частоты внешнего воздействия. В качестве основной характеристики вынужденных колебаний обычно принимают амплитуду. Особенно важное значение имеет величина амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой колебательной системы, которая называется резонансной частотой. Не менее важной характеристикой является влияние на значение резонансной частоты и вид частотной зависимости амплитуды вынужденных колебаний от величины потерь в колебательной системе. Величина потерь определяется значением активного сопротивления R , когда осциллятор представляет собой LRC – контур.

Задание на исследование

1. Исследовать частотную зависимость амплитуды вынужденных колебаний линейного осциллятора, на примере LCR одиночного контура, при различных значениях его параметров в соответствии с данными приведенными в таблице. Построить графики.

Варианты заданий

Таблица 2.1

№ п/п.	L , Гн	C , Ф	R , Ом	$f_{рез}$, КГц
1	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	
2	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	
3	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	
4	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0,01	
5	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0,1	

2. Рассчитать точное значение резонансной частоты колебаний и сравнить с экспериментальными данными.

$$f_{рез} = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ при } R \approx 0. \quad (\text{Варианты 1–3})$$

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(2\pi f_0)^2 - 2\left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{ при } R \neq 0. \quad (\text{Варианты 4–5})$$

3. Оценить смещение резонансной частоты (в %) и расширение частотной характеристики вынужденных колебаний на уровне 0,5 от максимума при введении в колебательный контур сопротивления потерь ($R = 0,001 \div 0,1 \text{ Ом}$) относительно частотных характеристик при отсутствии потерь $R \approx 0$.

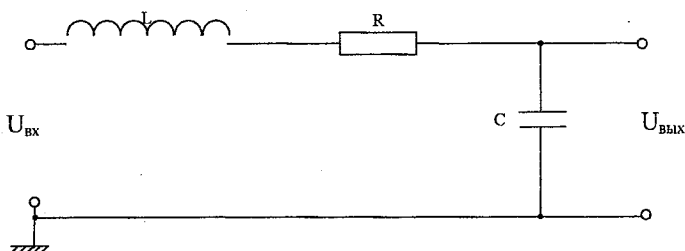


Рис. 2.1 Схема линейного осциллятора.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

Цель работы. Ознакомление с гармоническим колебанием на примере собственных и вынужденных колебаний в одиночном LC контуре.

Общие сведения. Систему, положение которой в любой момент времени может быть описано единственным параметром, называют системой с одной степенью свободы. Примерами колебательных систем с одной степенью свободы являются: маятник, колеблющийся в одной плоскости; масса, связанная с пружиной; одиночный LC -контур. Для всех систем с одной степенью свободы смещение "движущегося элемента" от положения равновесия определяется одной и той же временной зависимостью, называемой гармоническим колебанием:

$$\psi(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0).$$

В случае LC -контура в этом выражении $m = (0.1 \div 10) \text{ кг}$ – либо ток в индуктивности, либо заряд на обкладках конденсатора; A – положительная величина, называемая амплитудой; ω – угловая частота, имеющая размерность рад/с; $f = \frac{\omega}{2\pi}$ – частота, измеряемая в герцах (Гц), обратная величина $1/f$ называется периодом T и измеряется в секундах; φ_0 называется фазовой постоянной.

Задание на исследование

1. Изучить зависимость частоты колебаний от параметров колебательной системы согласно формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

2. Исследовать влияние параметров колебательной системы на амплитудные и фазовые характеристики колебательного процесса.

3. Исследовать характер вынужденных колебаний.

Рекомендации по проведению исследования

По п.1. Дискретным изменением емкости C (3 значения) зафиксировать колебательный процесс на экране осциллографа и измерить его частоты. Рассчитать значения емкостей C_i ($i=1,2,3$) по вышеприведенной формуле при известной индуктивности L и построить график $\omega = \psi(h)$, зарисовать осциллограммы.

По п.2. Изменением емкости C и с помощью опорного колебания зафиксировать на экране осциллографа фигуры Лиссажу, произвести их анализ, с точки зрения фазовых изменений в колебании при изменении емкости C . Измеряя спад амплитуды колебаний за их период T , оценить декремент затухания:

$$\frac{A(t+T)}{A(t)} = e^{-\delta T}, \delta T = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}.$$

Исследовать характер изменения δT , вводя в колебательную систему различные затухания с помощью магазина сопротивлений.

По п.3. Снять зависимость амплитуды колебаний (резонансную характеристику) контура от частоты внешнего воздействия при фиксированных L , C , R . Изучить влияние параметров колебательной системы на форму этой зависимости.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд, состоящий из лабораторного макета и измерительных приборов, предназначен для проведения исследования колебаний в одиночном колебательном LC -контуре.

На лицевой панели лабораторного макета показаны (L_i, C_i, R_i) элементы контура, гнезда X_i и переключатель f_i — (i — порядковый номер элемента).

Дискретное изменение значений C_i осуществляется переключателем П. Изменение внутреннего сопротивления R_i контура осуществляется с помощью магазина сопротивлений или потенциометра, подключаемых к гнезду X_4 . Переключение режима колебаний «собственные» и «вынужденные», т.е. включение активного или пассивного режимов соответственно, осуществляется тумблером ВК, включающим напряжение питания автоматического электронного ключа-генератора (АК).

В активном режиме АК генерирует через катушку индуктивности короткий импульс тока, возбуждающий собственные колебания с периодичностью T . После затухания собственных колебаний импульс автоматически повторяется, что обеспечивает возможность наблюдений и измерений параметров колебаний с помощью осциллографа в соответствующем режиме развертки (внешней или внутренней).

В пассивном режиме АК не работает. Для исследования параметров колебательной системы применяется внешний генератор синусоидальных колебаний, подключаемый к гнезду X_1 , осциллограф и ламповый вольтметр, подключаемые к гнезду X_3 .

I. Для выполнения задания по пп.1 и 2:

- подсоединить вход $У$ осциллографа к гнезду X_1 , установив чувствительность 1 В/дел. И масштаб внутренней развертки 1 мкс/дел.;
- подключить магазин сопротивлений, установив $R_i = 1$ кОм;
- подсоединить источник напряжения питания $E = 12$ В к макету.

II. Включить АК с помощью ВК или кнопки К. Расчет производить при $L = 26$ мГн.

Форма таблицы экспериментальных данных:

Положение П	Период колебаний	Расчетные значения
N	T , мкс	f , кГц, C , Φ

Примечания к эксперименту:

- картинка на экране имеет вид затухающих колебаний;
- при отключенном R_i видна форма запускающего импульса.

III. Выполнить п. 2, устанавливая различные значения R_i с помощью магазина сопротивлений.

IV. Для измерения фазовых характеристик по п. 2 задания:

- переключить осциллограф в режим внешней развертки;
- подсоединить гнездо X_5 ко входу X осциллографа, делитель на входе X установить в положение 1:1;
- включить АК.

При правильном соединении макета и приборов стенда картинка на экране имеет вид концентрических эллипсов. При изменении R_i меняется масштаб картинки, при переключении f_1 меняется соотношение размеров эллипсов, что подтверждает изменение фазовых соотношений между током и напряжением в контуре.

После выполнения п.2 задания выключить АК.

V. Для выполнения п.3 задания:

- перевести осциллограф в режим внутренней развертки;
- соединить вход Y осциллографа с гнездом X_5 ;
- подключить генератор синусоидальных сигналов к гнезду X_1 (или Г1) макета, работающего в пассивном режиме.

Для любой комбинации значений RLC картинка на экране осциллографа имеет вид непрерывных синусоидальных колебаний с постоянной амплитудой.

Изменяя значения частоты f генератора от 100 до 400 кГц, можно наблюдать соответствующее изменение амплитуды колебаний.

Рекомендуется сопоставить результаты измерений по пп.1 и 3 задания. Для построения амплитудно-частотной характеристики необходимо вместо осциллографа использовать вольтметр.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА МОДЕЛИ

Цель работы. Исследование амплитудно-частотных характеристик вынужденных колебаний в колебательной системе, состоящей из двух связанных линейных осцилляторов.

Общие сведения. Вынужденными колебаниями называются колебания, обусловленные внешним гармоническим воздействием на колебательную систему. При этом колебания в системе состоят из собственных и вынужденных колебаний. На практике, как правило, представляет интерес зависимость амплитуд вынужденных колебаний в каждой так называемой парциальной системе от частоты внешнего воздействия. При этом внешняя сила может воздействовать одновременно на оба связанных осциллятора, либо на один из них. Второй случай является более распространенным на практике. При этом, если внешняя сила воздействует на один осциллятор, то амплитудно-частотная зависимость колебаний измеряется во втором осцилляторе. В этом случае при совпадении частоты внешней силы с одной из собственных частот (мод) системы ($\omega = \omega_1$ или $\omega = \omega_2$) наступает резонанс, и амплитуды колебаний в обоих осцилляторах растут. При наличии потерь в системе устанавливается режим с амплитудой вынужденных колебаний. Кроме того, при совпадении частоты внешней силы ω с собственной частотой осциллятора, на выходе которого наблюдаются колебания $\omega = \omega_{02}$, колебания в осцилляторе, на который воздействует внешняя сила, прекращаются. Результирующая амплитудно-частотная зависимость вынужденных колебаний при измерениях, согласно рис.4.1, будет иметь вид, как показано на рис.4.2.

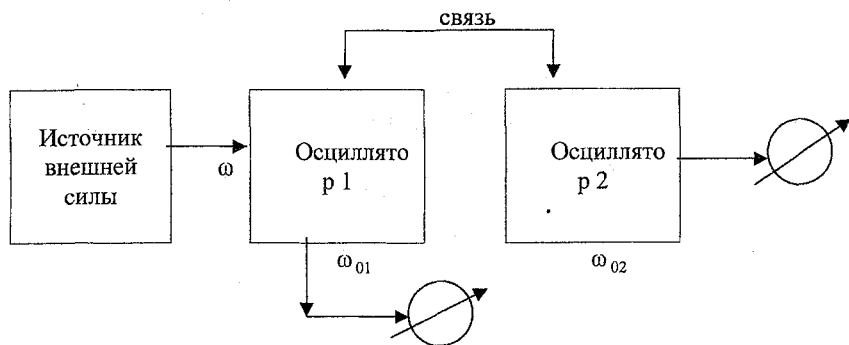


Рис. 4.1 Схема измерений.

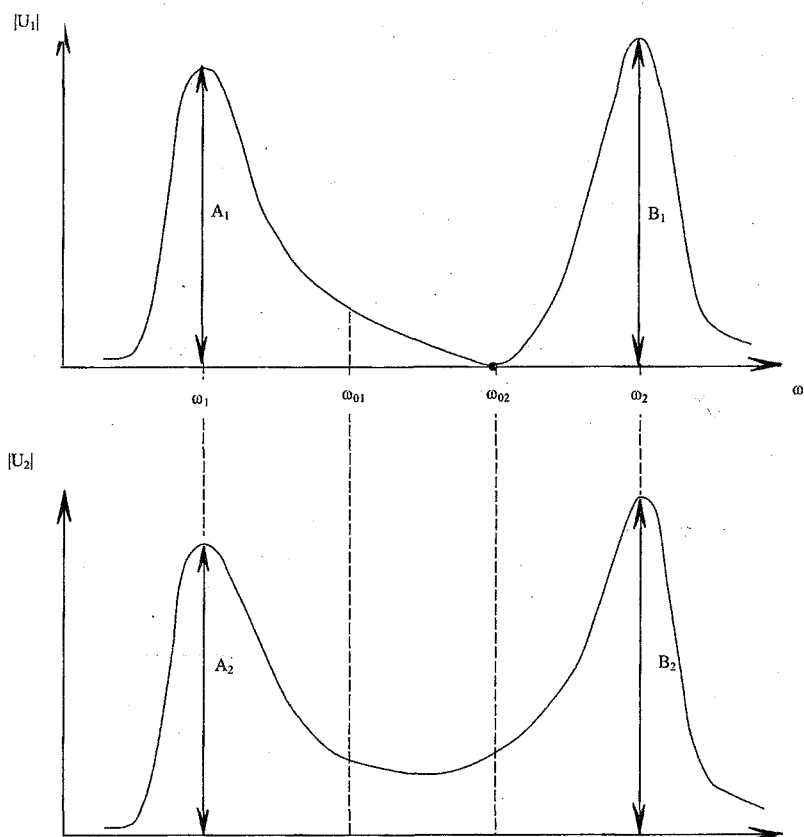


Рис. 4.2. АЧХ системы.

✓ ω — частота внешнего воздействия;
✓ ω_{01} и ω_{02} — собственные частоты отдельных осцилляторов (парциальных систем)

✓ ω_1 и ω_2 — частоты собственных колебаний (мод) колебательной системы с двумя степенями свободы;

✓ $|U_1|$ и $|U_2|$ — амплитуды вынужденных колебаний в парциальных системах;

✓ A_1, A_2, B_1, B_2 — амплитуды резонансных колебаний;

Задание на исследование

1. Собрать схему колебательной системы с двумя степенями свободы по заданию преподавателя.

2. Снять амплитудно-частотные зависимости вынужденных колебаний при воздействии внешней силы попеременно на каждый осциллятор.

3. Зарисовать форму вынужденных колебаний на произвольной частоте.

4. По результатам измерений определить собственные частоты ω_1 и ω_2 , парциальные частоты ω_{01} и ω_{02} , коэффициенты распределения амплитуд собственных колебаний k_1 и k_2 .

Рекомендации по выполнению задания

По п.2.

а) Внешнее воздействие и измерения произвести согласно схеме, представленной на рис. 4.1.

б) Поменять местами внешнее воздействие и приборы измерений.

По п.4.

а) Частоты $\omega_1, \omega_2, \omega_{01}, \omega_{02}$ определяются по построенным амплитудно-частотным зависимостям.

б) Коэффициенты распределения амплитуд k_1 и k_2 определяются из соотношений:

$$k_1 = \frac{A_1}{B_1}; k_2 = \frac{A_2}{B_2}.$$

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ (СВЯЗАННЫЕ СИСТЕМЫ)

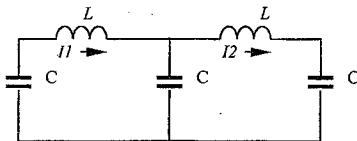
Цель работы. Исследование колебательных процессов в системе с двумя степенями свободы на примере двух связанных LC -контуров.

Общие сведения. Все системы с двумя степенями свободы обладают двумя так называемыми главными колебаниями, которые, комбинируясь в различных фазах и с различными амплитудами, определяют все возможные колебательные состояния системы.

Простым примером колебательной системы с двумя степенями свободы может служить система, состоящая из двух связанных колебательных устройств, обладающих одной степенью свободы, например, из двух обычных маятников или двух одиночных LC -контуров.

Связью в системе может служить любое влияние одного контура на другой. Наиболее часто применяется индуктивная или трансформаторная связь, или же какая-либо другая связь, при которой оба колебательных контура имеют общий участок цепи (индуктивность, емкость, омическое сопротивление или же любую их комбинацию).

В общем случае движение системы с двумя степенями свободы может иметь очень сложный вид, непохожий на простое гармоническое движение. Так, для системы, представленной на рисунке, уравнения движения имеют вид:



$$\left. \begin{aligned} L \frac{d^2 I_1}{dt^2} &= -\frac{I_1}{C} + \frac{I_2 - I_1}{C}, \\ L \frac{d^2 I_2}{dt^2} &= -\frac{I_2 - I_1}{C} - \frac{I_2}{C}. \end{aligned} \right\}$$

Решение этой системы дает две моды:

$$\text{мода 1: } I_1 = I_2, \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$\text{мода 2: } I_1 = -I_2, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{3}{LC}}.$$

Задание на исследование

1. Измерить моду 1 и моду 2. Исследовать влияние параметров системы (C) на моды 1 и 2 при $L = \text{const} = 26 \text{ мГн}$.

2. Исследовать явление биений, определяемое выражением

$$A_0 \sin \omega_1 t + A_0 \sin \omega_2 t = 2A_0 \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$$

Изучить влияние параметров системы на характер биений (суммарное движение двухмодовой системы).

4. Исследовать характер вынужденных колебаний двухмодовой колебательной системы.

Рекомендации по проведению исследования

По п.1. Устанавливаются одинаковые емкости C первого и второго контуров. Непосредственное измерение f_1 и f_2 производится анализатором спектра.

По п.2. Подбором $\tilde{N}_1$ и $\tilde{N}_2$ и выравниванием амплитуд на экране осциллографа регистрируется исходное явление биений. Изменением $\tilde{N}_1$ и $\tilde{N}_2$ (3 значения) устанавливаются частота биений $f = \frac{f_1 - f_2}{2}$ и амплитуда. Строятся соответствующие графики и зарисовываются осциллограммы.

По п.3. Изменением емкостей $\tilde{N}_1$ и $\tilde{N}_2$ исследуется динамика резонансной характеристики от случая наличия двух отдельных резонансов до случая их сближения по частоте.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд, состоящий из лабораторного макета и измерительных приборов, предназначен для проведения исследования колебаний в двух связанных LC -контурах.

На лицевой панели лабораторного макета показаны элементы контуров (R, L, C), гнезда X и переключатели Π_1 и Π_2 . Дискретное изменение значений C осуществляется переключателями Π_1 и Π_2 . Переключение режима колебаний "собственные" — "вынужденные" осуществляется тумблером ВК, включающим напряжение питания электронного ключа АК.

Для исследования параметров колебательной системы применяются внешний генератор, осциллограф, вольтметр.

Для выполнения п.п.1–2 задания необходимо включить активный режим макета и подключить анализатор спектра.

В системе контуров наблюдаются колебания, возбуждаемые короткими импульсами тока.

Для наблюдения биений по п.2 необходимо включить внешний генератор, настроив его на частоту второго контура, в то время как частота внутреннего генератора совпадает с частотой первого контура.

Если $f_{\text{внеш}} = f_{\text{внут}}$ – биений нет, картинка – синусоида. Изменяя собственную частоту контуров с помощью Π_1 и Π_2 , можно получить биения синусоидальной формы. Меняя амплитуду сигнала внешнего генератора, можно изменить амплитуду биений при сохранении частоты биений.

Для выполнения п.3 задания необходимо: включить активный режим, осциллограф и внешний генератор оставить подключенными к тем же гнездам, вольтметр подключить к гнезду X_3 , установить Π_1 в крайнее левое положение.

Исследование характера вынужденных колебаний в связанных контурах осуществляется перестройкой частоты внешнего генератора. Наблюдается изменение интенсивности колебаний при относительном смещении внешней частоты $f_{\text{вн}}$ и частоты $f_{\text{н}}$ настройки контуров.

Целесообразно при фиксированной емкости одного контура менять емкость другого. Измеряя несколько значений амплитуд слева и справа от резонансов, можно построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ).

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ СО МНОГИМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Цель работы. Исследование многомодовых колебаний на математической модели, ознакомление с методикой моделирования колебаний.

Общие сведения. Колебательная система, состоящая из ряда связанных маятников, или электрическая цепь, составленная из многих контуров,

представляют собой примеры систем со многими степенями свободы. Колебательные системы, обладающие N степенями свободы, имеют соответственно N независимых друг от друга основных колебаний (их называют «нормальные моды» или «простые моды»). Когда число степеней свободы стремится к бесконечности, образуется система с бесконечным числом степеней свободы, а сама колебательная система оказывается непрерывной.

Моды непрерывных систем называются *стоячими волнами*. Каждая мода обладает своей собственной частотой и «формой», определяемой отношением амплитуд $A: B: C: D: \dots$ и т.д. (Эти амплитуды соответствуют степеням свободы a, b, c и т.д.). Все движущиеся элементы при данной моде колебаний одновременно проходят положение равновесия, т.е. движение, соответствующее каждой степени свободы, происходит с одинаковой фазовой постоянной, которая определяется начальными условиями. Так как для данной моды колебания всех степеней свободы происходят с одинаковой частотой, то каждому движущемуся элементу соответствует одинаковая восстанавливающая сила, приходящаяся на единицу смещения и единицу инерционного элемента (например, массы).

При изучении колебаний в системе со многими степенями свободы (в пределе — с бесконечным их числом) практически приходится иметь дело с небольшим числом первых мод (от единиц до десятков тысяч в зависимости от конкретного вида колебательной системы), т.е. первые моды ведут себя так, как если бы система была непрерывной.

Общее движение системы может быть описано как суперпозиция всех ее мод с амплитудами и фазовыми постоянными, определяемыми из начальных условий. В этом общем случае поведение колеблющейся системы будет казаться очень сложным, так как трудно различать отдельно каждую моду.

Частным случаем непрерывной системы с бесконечным числом степеней свободы, очень важным в теоретическом и практическом плане, является натянутая струна с закрепленными концами.

Если сила натяжения T_0 , а плотность струны $\rho_0 = \frac{\Delta m}{\Delta x}$, где Δm – масса элемента струны длиной Δx , то, как известно, движение струны описывается волновым уравнением вида

$$\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial t^2} - \frac{T_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} = 0,$$

где функция $A(x)$ является решением этого уравнения и представляет собой общее выражение для стоячей волны частоты ω :

$$U(x,t) = A(x) \cos(\omega t + \varphi).$$

Непрерывная функция $A(x)$ характеризует "геометрию" конкретной моды. Каждой моде (стоячей волне) соответствует своя форма, описываемая своей функцией $A(x)$.

Функция $A(x)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2 A(x)}{dx^2} + \omega^2 \frac{\rho_0}{T_0} A(x) = 0.$$

Это уравнение совпадает с уравнением гармонического осциллятора, если в последнем заменить время t на координату x . В этом случае решение уравнения для такого "гармонического осциллятора в пространстве" можно записать в виде

$$A(x) = A \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} + B \cos 2\pi \frac{x}{\lambda},$$

где λ – длина волны конкретной моды.

Отношение $\frac{2\pi}{\lambda} = K$ называется угловым волновым числом и характеризует колебания в пространстве, как угловая частота ω – колебания во времени.

Использование граничных условий $U(0,t) = U(L,t) = 0$ (где L – длина струны) при фиксированном моменте времени t (можно положить $t = 0$, что соответствует начальному моменту движения струны) определяет форму струны в следующем виде:

$$U(x,0) = A(x) = \sum_{n=1}^N A_n \sin nk_1 x \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$ – длина волны 1-й гармоники, A_n – максимальное отклонение n -й моды.

Результирующая форма струны в процессе колебаний определяется суперпозицией форм отдельных стоячих волн.

Задание на выполнение работы

1. Исследовать форму колебаний закрепленной с двух концов струны при суперпозиции различного числа мод с произвольными максимальными отклонениями (A_n) и моментами их включения (ϕ). Варианты набора гармоник формирования и их параметры задаются преподавателем. Получаемые формы зарисовать.

2. Исследовать процесс формирования волны прямоугольной формы.

3. Исследовать форму струны при одном раскрепленном конце струны со стороны возбуждающей силы. Результаты сравнить с результатами п.1.

Выполнение задания на математической модели колебаний

1. Перед началом работы на ЭВМ представить преподавателю математическую запись формы исследуемых многомодовых колебаний и в указанном преподавателем каталоге, например *sn1.exs*, выбрать необходимую программу, например WOLNA.

2. Запустить программу, нажав клавишу Enter.

3. Ознакомиться с меню программы "Исследование колебаний со многими степенями свободы", например:

Программа WOLNA

Вид функции: $F(t) = A(N) * \sin(2\pi f(N)t + faza(N))$

Таблица 6.1

Исходные данные

N	$A(N)$	$f(N), \text{кГц}$	$Faza(N),$ рад
1	0,76	200	3,015929
2	0,1	100	1,979203
3	0,14	100	0,596903
...	...	...	...
10	0,80	600	0,471239

Варианты набора гармоник и комбинаций параметров:

- 1) амплитуды, фазы и частоты произвольны;
- 2) все амплитуды равны единице;
- 3) все фазы нулевые;
- 4) соотношения амплитуд и фаз установлены для получения прямоугольного колебания.

Выполнить варианты задания по указанию преподавателя.

Примечание. После обработки любого из вариантов 1–4 ЭВМ возвращается к меню программы. Для выхода из программы ввести цифру 5.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ АКВАТОРИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Цель работы. Исследование и расчет основных элементов движения бегущих монохроматических волн на морской поверхности при различных соотношениях между длиной волны и глубиной акватории

Общие сведения. Свободная монохроматическая волна частоты ω_1 , распространяющаяся в направлении x , описывается выражением

$$U = U_0 \cos(\omega t - kx),$$

где U_0 – амплитуда волны, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны.

Основной особенностью распространения свободных монохроматических волн на водной поверхности является то обстоятельство, что частота волны ω и ее волновое число k не могут быть произвольными, а связаны между собой так называемым дисперсным соотношением, которое в общем случае имеет, следующий вид:

$$\omega^2 = gk \operatorname{th}(kh) \quad (7.1)$$

где $\operatorname{th}(kh) = \frac{e^{kh} - e^{-kh}}{e^{kh} + e^{-kh}}$ – гиперболический тангенс, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ

– длина волны, h – глубина акватории, $g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения.

Соотношение (1) устанавливает взаимную связь между частотой волны ω и волновым числом k для любых соотношений между глубиной акватории h и длиной волны λ . Это соотношение носит название закона дисперсии волн на воде.

Отношение частоты волны к ее волновому числу характеризует фазовую скорость монохроматических волн $C_\phi = \frac{x}{t} = \frac{\omega}{k}$, определяющую перемещение горба или любой другой точки волны в направлении x . Из закона дисперсии (7.1) получается следующее выражение для фазовой скорости в общем случае:

$$C_\phi = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \operatorname{th}(kh)} \quad (7.2)$$

Из этого выражения следует важный вывод: чем волна длиннее, тем больше скорость ее движения. Это обстоятельство определяет динамику произвольных начальных возмущений морской поверхности.

Ввиду сложной зависимости в общем случае фазовой скорости от параметра kh на практике целесообразно рассматривать дисперсионные зависимости в двух предельных случаях: глубокая вода и мелкая вода.

Приближение глубокой воды реализуется при $kh \gg 1$ или $h \gg \lambda$. При этом приближении формулы (7.1) и (7.2) упрощаются и принимают следующий вид:

$$\omega^2 = gk \quad (7.3)$$

$$C_\phi = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (7.4)$$

В этом случае в волновом движении участвует приповерхностный слой воды.

Приближение мелкой воды реализуется при $kh \ll 1$ или $h \ll \lambda$. В этом случае формулы (7.1) и (7.2) также упрощаются и принимают вид

$$\omega^2 = ghk^2 \quad (7.5)$$

$$C_\phi = \sqrt{gh} \quad (7.6)$$

В приближении мелкой воды в волновом движении принимает участие вся морская толща, и фазовая скорость зависит только от глубины акватории и не меняется с изменением длины волны.

Задание на исследование.

1. Рассчитать и изобразить графически дисперсионные зависимости $\omega(k)$, соответствующие соотношениям (1), (3), (5). Считая максимально допустимой относительную ошибку 10%, оценить по результатам расчетов пределы применимости (диапазон длин волн и частот) формул соответствующих приближений.

Ориентировочные исходные данные для расчетов взять из таблицы.

2. Рассчитать и построить для этих же данных графики фазовой скорости, используя формулы (2), (4), (6).

Определить максимальную ошибку, вносимую в определение этих скоростей при использовании приближенных формул в рамках определенных выше диапазонов.

Таблица 7.1

Таблица данных для расчетов

Прибли жение	Вар иант	h, м	λ, м			Примечани е
$kh \gg 1$ $(h \gg \lambda)$ глубокая вода	I	5,0	0,03	0,5	1,0	$g=9,8 \text{ м/с}^2$ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ $\pi=3,14$ рад.
	II	10,0	0,2	0,5	1,5	
	III	50,0	1,5	4,0	7,0	
	IV	100,0	2,0	5,0	12,0	
$kh \ll 1$ $h \ll \lambda$ мелкая вода	I	5,0	10,0	25,0	50,0	
	II	10,0	200,0	400, 0	1000, 0	
	III	50,0	500,0	100 0,0	1500, 0	
	IV	100,0	1500, 0	600 0,0	1000 0,0	

НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Цель работы. Ознакомление с некоторыми видами несинусоидальных колебаний, методами их наблюдения и измерения параметров.

Общие сведения. По определению, любое колебание, отличающееся по форме от синусоиды и конечное во времени, может быть названо несинусоидальным. Попытка представить колебание в виде суммы синусоид или других элементарных функций приводит к задаче определения теоретической возможности и точности такого представления. На практике достаточно легко генерировать, наблюдать и оценивать параметры различных видов несинусоидальных колебаний.

Рассмотрим одиночное импульсное колебание $U(t)$ прямоугольной формы. Аналитическая запись имеет вид $U(t) = A[1(t) - 1(t - \tau_u)]$, где τ_u — длительность, A — амплитуда,

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \text{ — функция Хэвисайда.}$$

Графики $U(t)$ и единичной функции $1(t)$ — на рис.8.1.

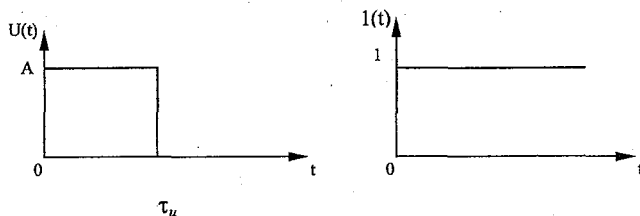


Рис.8.1 Графики $U(t)$ и единичной функции $1(t)$.

Представление $U(t)$ в виде суммы гармоник с различными фазами и амплитудами (ряд Фурье) называется спектром $S^*(j\omega)$, модуль его $S(f)$ — амплитудный спектр, фаза $\varphi(f)$ — фазовый спектр.

Для случая прямоугольного импульса:

$$S(f) = \frac{A}{\tau_u} \left| \frac{\sin \frac{\omega \tau_u}{2}}{\frac{\omega \tau_u}{2}} \right|; \varphi(f) = -\frac{\omega \tau_u}{2}.$$

Для одиночного импульса спектр сплошной. Если $U(t)$ периодически повторяется, т.е. $U(t) = U(t+T)$, то спектр становится линейчатым. Колебание может быть представлено счетным числом гармоник с определенными амплитудами и фазами (см. работу 3). Соотношение между τ и T определяет положение экстремумов функции $\frac{\sin X}{X}$ на оси частот. Форму $S(f)$ можно наблюдать с помощью специального прибора – спектроанализатора, однако по форме импульсов на экране осциллографа и по соотношению $\frac{T}{\tau} = Q$ тоже можно оценить отсутствие или ослабление гармоник. Например, при $Q = 2$ четные гармоники имеют $A = 0$, а нечетные расположены в точках $\frac{n}{T}$ при $n = 1, 2, 5 \dots$ (рис.8.2).

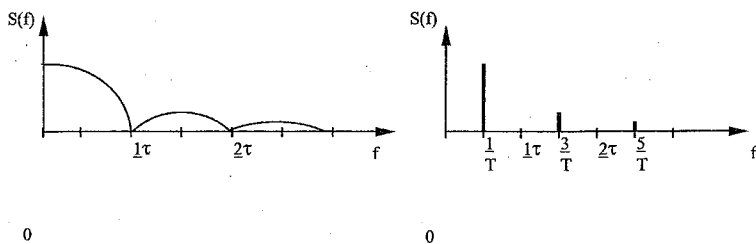


Рис. 8.2 Спектры одиночного прямоугольного импульса и периодической последовательности одиночных импульсов $S(f)$ при скважности $Q=2$.

На рис.8.3 показаны изменения формы прямоугольного импульса, по которым можно судить об обеднении спектра колебания.

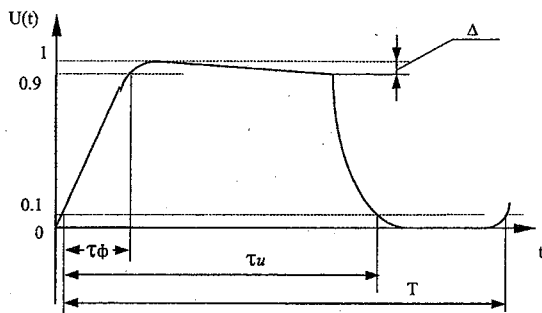


Рис. 8.3 Искажения формы прямоугольного импульса. Δ – спад вершины импульса; τ_ϕ – фронт импульса (время нарастания); τ_u – длительность импульса; T – период колебания.

Наблюдение и измерения параметров с помощью осциллографа в режиме синхронизации возможны благодаря периодичности колебаний. Вследствие "сглаживания" формы отсчеты τ_ϕ и τ_u производятся по уровням 0,1 и 0,9 от максимума. Спад Δ вершины импульса свидетельствует об ослаблении низкочастотных составляющих A_0 и A_1 . Появление интервала $\tau_\phi = t_f$ свидетельствует об ослаблении амплитуды высокочастотных гармоник спектра.

Регулярные импульсные колебания (последовательности) отличаются разнообразием форм импульсов (пилообразная, треугольная и др.) и допускают множество комбинаций положения импульсов в периоде (пачки, кодированные последовательности и др.). Они наблюдаемы, если известна их структура и есть возможность синхронизации. В противном случае последовательности превращаются в случайный поток колебаний. Если импульсы и по природе их источников не связаны друг с другом, то наблюдается импульсный шум – случайные колебания.

На рис. 8.4 показан шум (аналитической записи для которого нет) при наличии развертки во времени и при ее отключении. В последнем случае видно распределение яркости Y амплитуд выбросов по вертикали.

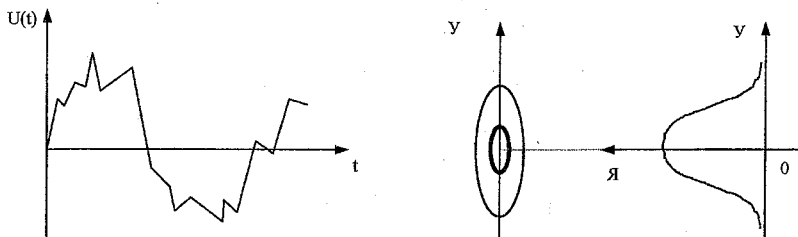


Рис.8.4 Изображение шума на экране осциллографа.

Задание на выполнение работы

1. Исследовать с помощью осциллографа формы колебаний на выходе генератора импульсов специальной формы. Получаемые формы зарисовать, измерить геометрические размеры фигур и рассчитать τ_u и T .
2. Исследовать форму колебаний на выходе узкополосного усилителя, обедняющего спектр прямоугольных импульсов. Формы зарисовать, провести замеры и расчет параметров τ_{δ} , Δ , T , τ_u .
3. Исследовать с помощью осциллографа форму колебаний на выходах генератора шума и генератора псевдослучайных последовательностей. Результаты наблюдений сравнить.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Измерения параметров колебаний и колебательных систем	4
Лабораторная работа № 1. Изучение характеристик собственных колебаний линейного осциллятора с помощью моделирования	9
Лабораторная работа № 2. Изучение характеристик вынужденных колебаний линейного осциллятора с помощью моделирования	14
Лабораторная работа № 3. Исследование колебаний системы с одной степенью свободы	16
Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик вынужденных колебаний колебательной системы с двумя степенями свободы на модели.	20
Лабораторная работа № 5. Исследование колебаний системы с двумя степенями свободы (связанные системы)	23
Лабораторная работа № 6 Исследование колебаний в системе со многими степенями свободы	26
Лабораторная работа № 7 Исследование влияния глубины акватории на характеристики движения свободных поверхностных волн	30
Лабораторная работа № 8. Несинусоидальные колебания	33

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Игорь Рустиславович Рябухов
Юрий Михайлович Шапаренко

Теория колебаний и волн
Лабораторный практикум

Редактор И.Г. Максимова

Подписано в печать 11.12.01.

Формат 60х90/16

Бумага книжно-журнальная

Печ.л. 2,3.

Тир.100 экз.

РГТУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр. 98

19p. 70K.