

**УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Кафедра «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ
«ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»**

(часть 1)

для студентов, обучающихся по направлениям
5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)»,
5522000 «Радиотехника»,
5522100 «Телевидение, радиосвязь и радиовещание»,
5522200 «Телекоммуникация»,
5524400 «Мобильная связь»

ТАШКЕНТ 2010

ВВЕДЕНИЕ

Методическое руководство составлено в соответствии с программой дисциплины «Теория электрических цепей» (ТЭЦ) для студентов Ташкентского университета информационных технологий, где для проведения лабораторного практикума выделяется до 32 часов аудиторных занятий, включая время на допуск, выполнение лабораторной работы, оформление результатов лабораторного исследования и защиту лабораторной работы.

Экспериментальные исследования в работах позволяют наблюдать электрические процессы и измерять на практике их параметры в достаточно простых электрических цепях и в отдельных компонентах цепей (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности, нелинейных компонентах, колебательных контурах). Однако проведение этих исследований принесет студентам ощутимую пользу только в том случае, если соответствующие электрические устройства и процессы в них предварительно изучены теоретически. Поэтому исследованиям в лаборатории должны предшествовать самостоятельные занятия студента с конспектом лекций и учебной литературой, на которую приводятся ссылки в описаниях лабораторных работ.

Студент может быть допущен к выполнению лабораторной работы только при условии, если он отчетливо понял суть и задачи лабораторного исследования очередной работы. Он должен сформулировать название и цель исследования письменно.

Особое внимание студенту необходимо обратить в каждой из работ на контрольные вопросы. Эти вопросы в будущем могут встретиться студентам при подготовке к текущим, промежуточным и итоговым контролям по дисциплине ТЭЦ. Студент должен знать ответы на эти вопросы. Только при этом условии он может быть допущен к выполнению очередной лабораторной работы.

Во время домашней самостоятельной подготовки к лабораторной работе студент должен провести предварительные расчеты, которые указаны в разделе самостоятельной подготовки студентов или в контрольных вопросах.

Для допуска к выполнению лабораторной работы следует нарисовать все необходимые измерительные схемы, которые придется собрать на лабораторном стенде при ее выполнении. При выполнении лабораторных работ студент должен собирать измерительные электрические цепи по нарисованным им дома схемам, не обращая к учебной литературе. Поэтому подготовленные измерительные схемы должны быть достаточно полными и точными.

Во время подготовки к допуску по многим из приведенных работ необходимо также подготовить таблицу по заданной в описаниях работ форме, в графах которой будут размещаться результаты измерений и последующих расчетов.

Помимо экспериментальных навыков, студент должен научиться составлять отчет по работе. В нем должны быть отражены все записи, которые необходимо произвести при подготовке к работе, во время ее выполнения в лаборатории и, наконец, во время последующей обработки результатов проведенных исследований. В отчете все измеренные и рассчитанные величины должны быть представлены в соответствии с Государственным стандартом O'z DSt 8/012:2005 «Государственная система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан. ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН» (Основные величины, используемые в ТЭЦ, приведены в приложении 1). Отчет следует представлять перед допуском к выполнению и при защите очередной лабораторной работы. В конце семестра он сдается преподавателю для подсчета набранных баллов и получения допуска к итоговым контролям. Отчет должен быть аккуратно заполнен. Приводимые в нем схемы нужно вычерчивать с учетом известных стандартов. В нем могут быть аккуратные исправления допущенных ошибок.

Отчет должен иметь титульный лист (образец титульного листа приведен в приложении 2), на котором указываются наименование университета, факультета, номер группы, фамилия и инициалы студента, название работы. При отсутствии отчета с правильно записанными письменными ответами на контрольные вопросы очередной (согласно календарному плану группы) лабораторной работы студент к занятию не допускается.

Все лабораторные работы выполняются на универсальных лабораторных стендах.

При выполнении лабораторных работ должны строго соблюдаться меры безопасности. Нельзя отходить от включенного стенда. Включение стенда производится только после получения разрешения преподавателя. По окончании эксперимента необходимо, не разбирая цепи, предъявить преподавателю результаты измерений. Закончив работу, студенты должны выключить приборы, разобрать электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Изучение лабораторного стенда

Цель работы: изучить лабораторный стенд и научиться пользоваться его элементами.

Для выполнения лабораторных работ по дисциплине ТЭЦ используется универсальный специализированный стенд ТЭЦ (рис. 1.1).

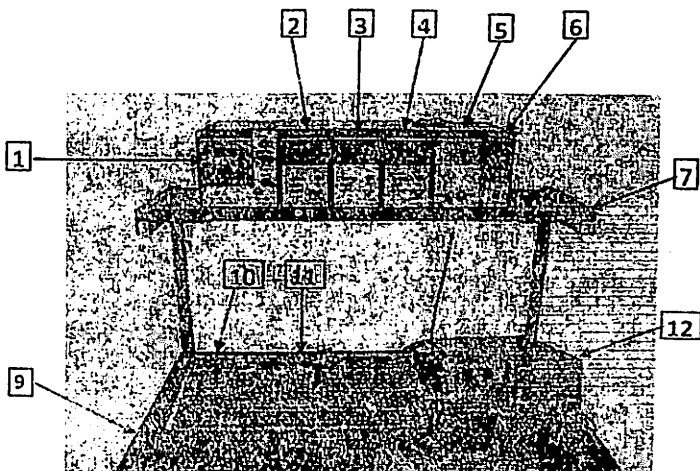


Рис. 1.1. Лабораторный стенд ТЭЦ

1.1 ГЕНЕРАТОРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

предназначен для совместной работы с лабораторным модулем установки по дисциплине ТЭЦ. Электропитание модуля осуществляется от сети переменного напряжения 220 В.

Модуль включает в себя следующие составные части:

1. Генератор НЧ со встроенным индикатором частоты.
2. Вольтметр постоянного – переменного напряжения (3 шт.).
3. Фазометр.
4. Панель сопряжения с компьютером.
5. Платы питания (3 шт.).

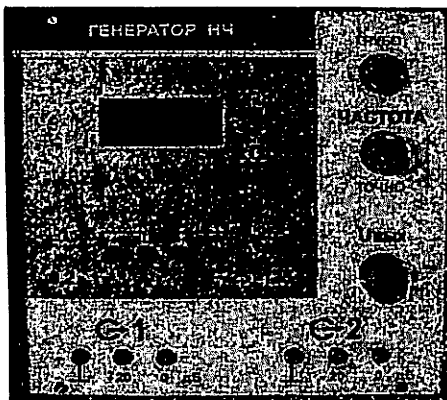
На полке 7 (рис. 1.1) расположен инструментальный (измерительный) блок, содержащий следующие приборы:

- генератор гармонического регулируемого по частоте и уровню напряжения 1;
- три цифровых вольтметра постоянного и переменного напряжения 2, 3, 4;

- фазометр [5];
- устройство согласования измеряемых напряжений с персональным компьютером (ПК) [6].

1.1. Генератор НЧ

Блок генератора синусоидальных колебаний размещен в левой верхней части стенда (рис.1.2). Он вырабатывает синусоидальное напряжение в 4-х частотных диапазонах:



- 0,2 кГц – 1 кГц;
- 1 кГц – 5 кГц;
- 5 кГц – 25 кГц;
- 25 кГц – 125 кГц.

В пределах диапазонов изменение частоты производится переменными резисторами «ЧАСТОТА -ГРУБО» и «ЧАСТОТА-ПЛАВНО». Диапазоны имеют некоторое перекрытие по частоте.

В панель генератора встроены 4-значный индикатор частоты с автоматическим переключением указателей единиц измерения

Рис. 1.2. Генератор НЧ частоты.

Выходное напряжение генератора регулируется переменным резистором «U_{вых}». Генератор имеет следующие выходы:

«G1 - 0 дБ» - напряжение от 0 В до 1 В, выходное сопротивление 5 Ом;

«G1 - 20 дБ» - напряжение от 0 В до 0,1 В, выходное сопротивление 0,5 Ом;

«G2-0 дБ» -напряжение от 0 В до 5 В, выходное сопротивление 600 Ом;

«G2-20 дБ» -напряжение от 0 В до 0,5 В, выходное сопротивление 600 Ом.

Гнезда «L» выходов G1 и G2 соединены с корпусом установки.

На панели находится цифровой частотомер с переключателями диапазонов частот и регуляторами «ЧАСТОТА» - «ПЛАВНО» и «ГРУБО».

1.2. Вольтметр

Лабораторный стенд содержит три одинаковых цифровых вольтметра (рис.1.3), измеряющих действующее значение напряжения синусоидальной формы и постоянное напряжение.

В генераторно-измерительный модуль встроены 3 вольтметра (рис.1.3), позволяющие измерять как постоянные напряжения, так и

действующие значения переменных напряжений частотой от 200 Гц до 125 кГц.

Вход вольтметра гальванически не связан с корпусом установки, поэтому в режиме измерения постоянных напряжений вольтметры могут быть подключены к любым точкам исследуемой цепи.

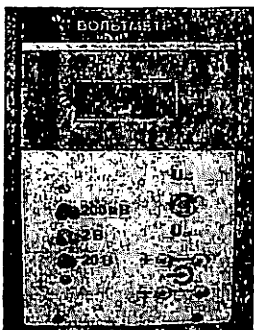


Рис. 1.3. Вольтметр

Однако, следует учесть, что гнездо «-» входа вольтметра связано с общей шиной схемы вольтметра и имеет значительную емкость относительно корпуса установки. Поэтому при измерении переменных напряжений частотой выше 5 кГц во избежание существенных ошибок показаний следует подключать гнездо «-» входа вольтметра к точкам исследуемой цепи, соединенным с гнездами «L» или находящимся под меньшим переменным напряжением относительно «L».

Вольтметр имеет 3 предела измерения: 200 мВ; 2 В; 20 В.

Относительная погрешность измерения постоянного напряжения - не более 2 % от измеряемой величины при условии $0,1 U_{\text{пн}} < U_{\text{изм}} < U_{\text{пн}}$, где $U_{\text{пн}}$ - предел измерения; $U_{\text{изм}}$ - измеряемое напряжение.

Относительная погрешность измерения переменного гармонического напряжения частотой от 200 Гц до 125 кГц - не более 3 % от измеряемой величины при условии $0,1 U_{\text{пн}} < U_{\text{изм}} < U_{\text{пн}}$.

Входное сопротивление вольтметра - 1 МОм.

Входная емкость - не более 20 пФ.



Рис. 1.4. Фазометр

1.3. Фазометр

Фазометр (рис.1.4) позволяет измерять фазовый сдвиг между двумя синусоидальными напряжениями, поданными на входы А и Б: $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B$.

Характеристики фазометра:

- пределы измерения фазового сдвига -180 град. $< \varphi < +180$ град.;

- индикация - цифровая трехразрядная (отрицательные значения фазового сдвига индицируются со знаком «-»);

- минимальное напряжение на входах фазометра, при котором обеспечивается его устойчивая работа - 100 мВ;
- максимальное напряжение на входах фазометра, при котором обеспечивается его устойчивая работа 2,0 В;
- частотный диапазон устойчивой работы фазометра 200 Гц - 100 кГц;

- погрешность измерения фазового сдвига в диапазоне $|4 \text{ град.} < \varphi < 176 \text{ град.}|$ при обеспечении устойчивой работы фазометра не более 1 град.;
- входное сопротивление фазометра не менее 1 МОм;
- входная емкость не более 20 пФ;
- одно из гнезд каждого входа соединено с корпусом установки.

Во избежание неустойчивой работы фазометра и связанных с этим ошибок измерения, рекомендуется контролировать величину его входных напряжений с помощью вольтметров, подключаемых параллельно его входам.

Фазометр (рис.1.4) измеряет разность фаз двух напряжений гармонической формы. Напряжение, относительно которого измеряется сдвиг фаз, подключается к клемме «Вход Б», а напряжение, фазу которого необходимо измерить, - к клемме «Вход А». На фазометре имеется индикатор, указывающий характер исследуемой цепи – индуктивный или емкостной. Загорание индикатора соответствует отрицательному значению угла сдвига фаз.

1.4. Панель сопряжения с компьютером

Панель предназначена для вывода на компьютер напряжений из двух различных точек исследуемой цепи с целью их последующей обработки и анализа с помощью различных программ ПК.

Соединение входов А и Б, расположенных на панели №6 генераторно-измерительного модуля, с ПК производится экранированным проводом на задней панели модуля через штеккер-соединитель.

Для защиты ПК от высоких входных напряжений, производится их понижение в 10 раз (по входу «1:1») и в 100 раз (по входу 1:10).

Входные сопротивления: по входу 1:1 - 100 кОм; по входу 1:10 - 1 МОм.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ МОДУЛЬ ПО КУРСУ ТЭЦ

Лабораторный модуль установки по курсу ТЭЦ расположен на лабораторном столе 9 (рис. 1.1).

Фотография лабораторного модуля установки по курсу ТЭЦ представлена на рис.1.5.

На лабораторном столе 9 под номером 10 (рис.1.1) расположен источник напряжения, который содержит:

- источник регулируемого постоянного напряжения E_1 ;
- источник нерегулируемого синусоидального напряжения E_2 ($f = 50 \text{ Гц}$, $U = 1 \text{ В}$),

а также источник импульсов, который содержит:

- источник напряжения периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов, регулируемых по амплитуде и частоте;
- источник периодической последовательности биполярных треугольных импульсов с постоянной амплитудой и регулируемой частотой;

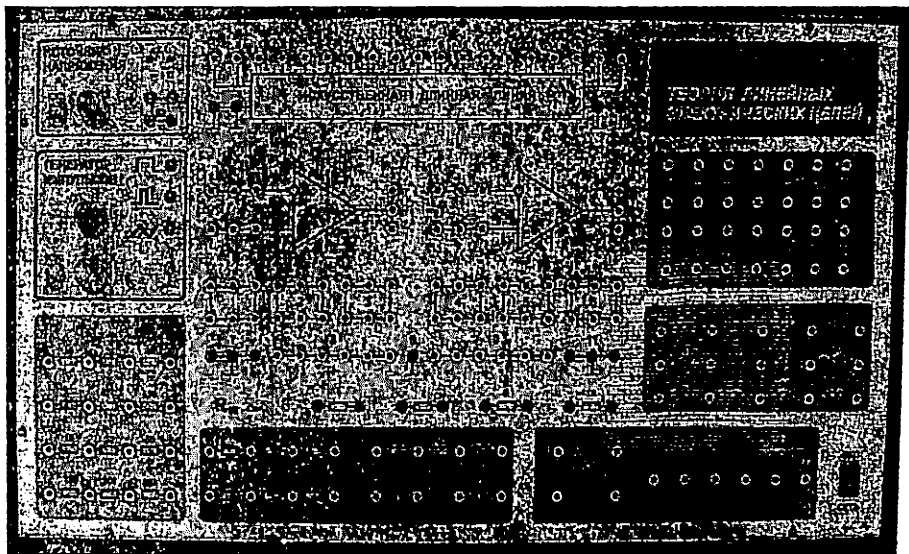


Рис.1.5. Лабораторный модуль установки по курсу ТЭЦ

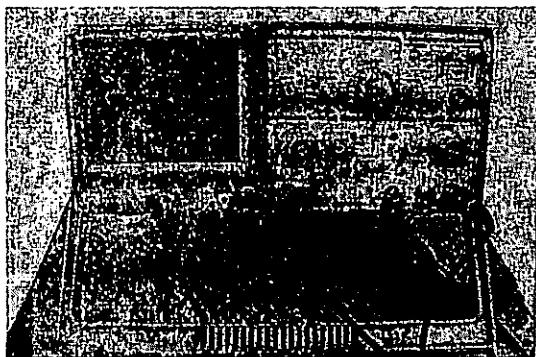


Рис. 1.6. Осциллограф

- два операционных усилителя (ОУ).

- источник очень коротких положительных импульсов, регулируемых как по амплитуде, так и по частоте. На лабораторном столе под номером **11** (рис.1.1) расположены:

- блок пассивных элементов (резисторов R , емкостей C и индуктивностей L);

- модель искусственной линии;

На лабораторном столе под номером **12** (рис.1.1) расположен двухканальный осциллограф (рис.1.6).

3. ОСЦИЛЛОГРАФ

Прибор (рис.1.6), с помощью которого можно наблюдать форму напряжений и выполнять различные измерения, называется осциллографом. В данном лабораторном стенде используется двухканальный осциллограф типа С1-220, с помощью которого можно одновременно наблюдать и сравнивать форму двух напряжений.

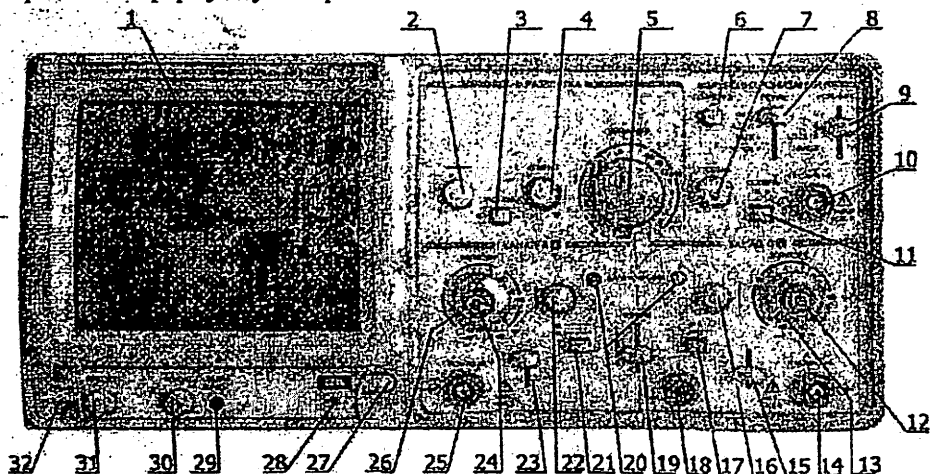


Рис.1.7. Передняя панель осциллографа

3.1. Расположение и назначение органов управления передней панели осциллографа

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Экран | 11. Полярность синхронизации |
| 2. Смещение луча по горизонтали | 12. Регулировка усиления канала В |
| 3. Кнопка растяжки развертки в 10 раз | 13. Переключатель «ВОЛЬТ/ДЕЛ.» канала В |
| 4. Время развертки плавно | 14. Вход канала В |
| 5. Переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ.» | 15. Переключатель -L - канала В |
| 6. Синхронизация поочередная | 16. Вертикальное смещение канала. Инвертирование канала В |
| 7. Уровень синхронизации | 17. Клемма «Земля» |
| 8. Режим запуска развертки | 18. Переключатель «РЕЖИМ» каналов |
| 9. Источник синхронизации | 19. Балансировка каналов А и В |
| 10. Вход внешней синхронизации | 20. Полярность синхронизации |

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 21. Кнопка «последовательно попеременно» | 27. Кнопка «СЕТЬ» |
| 22. Вертикальное смещение канала А | 28. Индикатор кнопки «СЕТЬ» |
| 23. Переключатель JL ~ канала А | 29. Поворот луча |
| 23. Регулировка усиления канала А | 30. Фокус |
| 24. Вход канала А | 31. Яркость |
| 25. Переключатель JL ~ канала А | 32. Выход встроенного калибратора |

3.2. Органы управления ЭЛТ

(27) СЕТЬ. Когда этот выключатель включен, загорается индикатор (28).

(31) ЯРКОСТЬ. Регулирует яркость изображения.

(30) ФОКУС. Регулировка фокуса изображения.

(29) ПОВОРОТ ЛУЧЕЙ. Регулировка угла наклона линий развертки, параллельно линиям шкалы.

(32) Выход сигнала калибратора амплитудой 2 В и частотой 1 кГц.

Органы управления усилителей вертикального отклонения:

(25) Вход канала А. В режиме X-Y, входной канал X-оси.

(14) Вход канала В. В режиме X-Y, входной канал Y-оси.

(18) Гнездо подключения заземления.

(15)(23) ~, -L — Переключатель режима входов.

(13)(26) ВОЛЬТ/ДЕЛ. Переключатели чувствительности каналов вертикального отклонения от 5 мВ /дел до 5 В /дел в 10 диапазонах.

(12)(24) ПЛАВНО x5 РАЗ. Плавное изменение коэффициентов усиления каналов с перекрытием не менее чем в 2,5 раза в каждом положении переключателей Вольт/Дел. Когда ручка вытянута, происходит увеличение амплитуды в 5 раз.

(20) БАЛАНСИРОВКА - Балансировка каналов А и В.

(22)(16) t ■ регулировка положения развертки каналов А и В по вертикали.

(17) Кнопка инвертирования сигнала в канале В.

(19) РЕЖИМ. Переключатель режима работы усилителей каналов, имеющий следующие положения:

А: на экране наблюдается сигнал канала А.

В: на экране наблюдается сигнал канала В.

А, В: на экране наблюдаются изображения сигналов обоих каналов.

А+В: на экране наблюдается алгебраическая сумма или разность (при нажатии кнопки в) сигналов каналов А и В.

(21) ~*~*~ Кнопка управления работой коммутатора в двухканальном режиме. Когда кнопка отжата, то коммутатор устанавливает

последовательный режим отображения каналов. При нажатии на кнопку коммутатор устанавливает попеременный режим отображения информации.

3.3 Органы управления синхронизации

(9) ИСТОЧНИК. Выбирает источник внутренней и внешней синхронизации.

А: Развертка синхронизируется сигналом с канала А.

В: Развертка синхронизируется сигналом с канала В.

ОТ СЕТИ: Развертка синхронизируется от сети.

ВНЕШ.: Развертка синхронизируется внешним сигналом.

(10) Вход внешней синхронизации. Чтобы использовать этот вход, выберете переключателем «ИСТОЧНИК» (9) положение ВНЕШ.

(6) ПООЧЕРЕД: Развертка поочередно синхронизируется сигналом с каналов А и В.

(11) ПОЛЯРН. Переключатель полярности синхронизирующего сигнала.

«+»: развертки синхронизируются положительным перепадом исследуемого сигнала.

«-»: развертки синхронизируются отрицательным перепадом исследуемого сигнала.

(7) УРОВЕНЬ. Выбирает уровень исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развертки.

(8) РЕЖИМ. Выбирает режим работы запуска развертки.

АВТО. Автоматический запуск развертки при отсутствии сигнала синхронизации или при частоте сигнала меньше 25 Гц.

ЖДУЩ. Развертка запускается только при наличии входного сигнала.

КАДР. Синхронизация по вертикали (по ТВ-кадрам).

СТРОК. Синхронизация по горизонтали (по ТВ-строкам). В двух последних режимах полярность сигнала должна быть отрицательной.

Органы управления разверткой:

(5) ВРЕМЯ/ДЕЛ. Устанавливает коэффициент развертки от 0,2 мкс/дел до 0,5 с/дел 20 ступенями. При переводе в положение Х-У обеспечивается наблюдение фигур Лиссажу.

(4) РАЗВЕРТКА ПЛАВНО. Обеспечивает плавную регулировку времени развертки с перекрытием 2,5 раза в каждом положении переключателя ВРЕМЯ/ДЕЛ.

(2) <-> Перемещает развертку по горизонтали.

(3) РАСТЯЖКА. Длина луча увеличивается в 10 раз при нажатии кнопки.

3.4. Назначение конструктивных элементов задней панели

Рис.1.8. Расположение и назначение разъемов и конструктивных элементов



(33) Сетевой разъем для подключения шнура питания.

(34) Предохранитель.

(35) Выход сигнала канала А для подключения частотомера или другого измерительного прибора, с напряжением приблизительно 20 мВ/дел при нагрузке 50 Ом.

(36) Z-ВХОД. Вход для подачи сигнала модулирующего яркость луча.

(37) Ножки осциллографа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Исследование независимых источников напряжения

Цель работы: изучение внешних характеристик независимых источников напряжения.

1. Краткие пояснения

Реальный источник электрической энергии можно представить двумя схемами замещения:

- 1) последовательной, содержащий источник напряжения с неизменной ЭДС, численно равной напряжению источника в режиме холостого хода, и внутреннее сопротивление источника $R_{вн}$ (рис. 2.1, а);
- 2) параллельной, содержащей источник тока J , численно равным

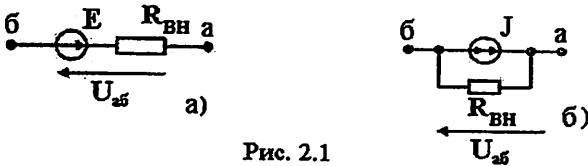


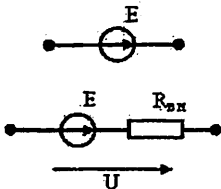
Рис. 2.1

току короткого замыкания, и внутреннее сопротивление $R_{вн}$ (рис. 2.1, б).

Переход от последовательной схемы замещения к параллельной осуществляется по формулам:

$$J = E / R_{вн}; \quad E = R_{вн} \cdot J.$$

Источники напряжения (тока) могут быть независимыми или зависимыми (управляемыми). Независимыми называют источники напряжения (тока), величина напряжения (тока) которых не зависит от напряжения (тока) на других участках цепи. Зависимым (управляемым) является такой источник, ЭДС или ток которого меняет своё значение в зависимости от напряжения на некоторых участках цепи или токов, протекающих в определенных ветвях цепи. Независимый источник напряжения может быть представлен двумя схемами:

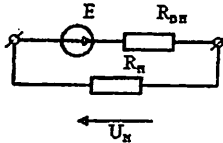


- идеальный источник напряжения
(внутреннее сопротивление $R_{вн} \rightarrow 0$);

- реальный источник напряжения,
где ($R_{вн} \neq 0$).

$$U = E - R_{вн} \cdot I$$

Для исследования источника ЭДС используется следующая схема:



Для определения напряжения источника и его внутреннего сопротивления используются формулы:

$$U_n = \frac{E \cdot R_n}{R_n + R_{вн}}; \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{при } R_n \rightarrow \infty \text{ (обрыв)}; U_K \rightarrow E \\ \text{при } R_n = R_{вн}; U_K = \frac{E}{2} \end{array} \right.$$

При $R_n = R_{вн}$ цепь работает в согласованном режиме.

График зависимости U_n (R_n) называется нагрузочной характеристикой (рис. 2.2).

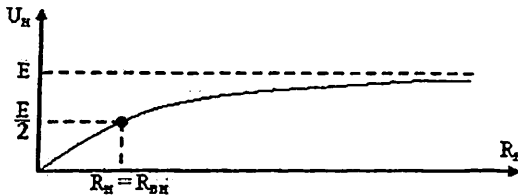


Рис. 2.2

В работе исследуется независимый источник напряжения.

2. Предварительный расчет

Для исследуемой цепи (рис.2.1) в соответствии с вариантом задания (табл. 2.1) рассчитать и построить графики следующих функций:

- ток в цепи $I = E / (R_{вн} + R_n) \Rightarrow I = f(R_n)$;
- напряжение на нагрузке $U_n = I \cdot R_n \Rightarrow U = f(R_n)$;
- мощность на нагрузке $P_n = I^2 \cdot R_n \Rightarrow P = f(R_n)$;
- коэффициент полезного действия $\eta = R_n / (R_n + R_{вн}) \Rightarrow \eta = f(R_n)$.

Результаты расчета занести в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчета

№ стенда	E_2	R_H	R_H	R_H	R_H
	[V]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
1	2	10	50	200	500
2	3	20	50	500	1000
3	4	10	50	100	200
4	5	20	50	1000	2000
5	6	10	50	500	1000
6	7	20	50	100	500
7	7,5	10	50	600	1000
8	8	20	50	300	500
9	8,5	10	50	1000	2000
10	9	20	50	700	1000

3. Порядок выполнения работы

Подготовка стенда к работе

3.1. Собрать схему (рис. 2.3). Для всех вариантов $R_{вн} = 50 \Omega$.

3.2. Включить питание: тумблер “Сеть” – отжать.

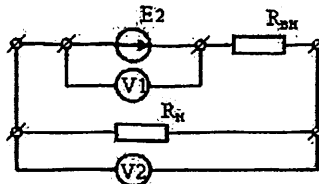


Рис.2.3.

3.3. Последовательность измерений:

- вольтметр V_1 подключить к источнику E_2 и с помощью ручек регулировки выходного напряжения установить напряжение источника E_2 (табл. 2.1);

- подключить вольтметр V_2 к резистору R_n ;

- меняя значение R_n , измерить напряжение U_{R_n} .

3.4. Измерение нагрузочной характеристики источника ЭДС.

При заданном значении ЭДС источника E_2 и различных значениях сопротивления нагрузки R_n (согласно данным табл. 2.1) измерить напряжение U_n . Результаты измерений и дальнейших расчетов записать в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Задано		$E_1 = V; R_{вн} = \Omega$								
R_n, Ω		Получено экспериментально	Расчёт по экспериментальным данным				Предварительный расчет			
		U_n	I	$P_{ист}$	P_n	η	I	U_n	P_n	η
[Ω]		[V]	[A]	[W]	[W]	-	[A]	[V]	[W]	-
1										
2										
3										
4										

4. Обработка результатов измерений

4.1. Зная сопротивление R_n и напряжение U_n , для схемы (рис.2.1) рассчитать:

- ток $I = U_n/R_n$;
- мощность в нагрузке $P_n = I^2 \cdot R_n$;
- КПД $\eta = P_{ист}/P_{нагр}$, где $P_{ист} = E \cdot I = I^2 (R_n + R_{вн})$

Результаты расчета занести в табл. 2.2.

4.2. Построить графики зависимостей $I = f(R_n)$; $U_n = f(R_n)$; $P_n = f(R_n)$; $\eta = f(R_n)$.

5. Содержание отчета

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены:

5.1. Цель работы.

5.2. Электрическая схема исследуемой цепи и её исходные данные.

5.3. Расчетные формулы.

5.4. Таблицы с результатами предварительного расчета и эксперимента.

5.5. Графики функций $I = f(R_n)$; $U_n = f(R_n)$; $P_n = f(R_n)$; $\eta = f(R_n)$.

5.6. Выводы по результатам исследований.

6. Контрольные вопросы

6.1. Как формулируется закон Ома для пассивного участка цепи?

6.2. Как формулируется закон Ома для активного участка цепи?

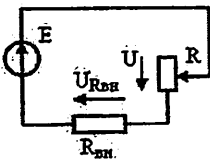
6.3. Как формулируется закон Ома для замкнутого контура?

6.4. Перечислите виды источников энергии, применяемые в ТЭЦ.

6.5. Как выглядят схемы замещения идеального и реального источника напряжения?

6.6. Как выглядят схемы замещения идеального и реального источника тока?

6.7. Каково соотношение между U , $U_{R_{вн}}$ и E для приведенной схемы?

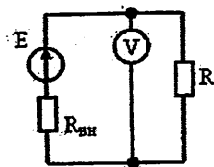


Ответы:

А. $U_{R_{вн}} = 0$; $E = UR$ Б. $U_{R_{вн}} = E$; $U = 0$

В. $U_{R_{вн}} = U$; $E = 0$ Г. $U_{R_{вн}} = 0,5 E$; $U = 0,5 E$.

6.8. Как изменится показание вольтметра при условии, если R и $R_{вн}$ увеличить в 2 раза?



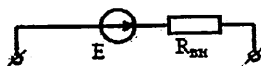
Ответы:

А. Увеличится в 2 раза

Б. Уменьшится в 2 раза

В. Не изменится

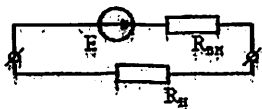
6.9. При каком сопротивлении нагрузки R_n реальный источник ЭДС можно считать идеальным?



Ответы:

А. $R_n = R_{вн}$ Б. $R_n \gg R_{вн}$ В. $R_n \ll R_{вн}$

6.10. Определить напряжение на сопротивлении R_2 в данной цепи при согласованном режиме работы



Дано: $E = 20 \text{ V}$; $R_{вн} = 20 \text{ }\Omega$.

Ответы: А. 10 V . Б. 20 V . В. 5 V .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Экспериментальная проверка законов Кирхгофа в резистивных цепях

Цель работы: экспериментально убедиться в справедливости законов Кирхгофа в резистивных цепях, содержащих источники тока и напряжения.

1. Краткие пояснения

Распределение токов и напряжений в электрических цепях подчиняются законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа – алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \text{ где } n - \text{ количество ветвей, сходящихся в узле.} \quad (3.1)$$

Токи, направленные к узлу, условно принимаются положительными, а от узла – отрицательными.

Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях этого контура

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k, \quad (3.2)$$

где n – количество источников напряжений; m – число резистивных элементов в замкнутом контуре.

Обход контура совершается в произвольно выбранном направлении. При этом соблюдается следующее правило знаков для ЭДС и падений напряжений: ЭДС и падения напряжения, совпадающие по направлению с обходом контура, берутся со знаком «+», а не совпадающие – со знаком «-».

2. Предварительный расчет

2.1. Рассчитать в соответствии с законом Ома падения напряжения на резисторах R_1 , R_2 , R_3 в схеме (рис. 3.1).

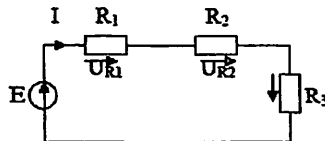


Рис. 3.1

Ток в цепи равен

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3},$$

Падения напряжений на резисторах определяются по формулам

$$U_{R1} = I \cdot R_1 = \frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$U_{R2} = I \cdot R_2 = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$U_{R3} = I \cdot R_3 = \frac{E \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Данные для расчета взять из таблицы выбора вариантов значений (табл. 3.1).

Результаты вычислений занести в таблицу результатов вычислений и измерений (табл. 3.2).

2.2. Для подтверждения второго закона Кирхгофа исследуем двухконтурную цепь, содержащую источник напряжения и три резистора (рис. 3.2).

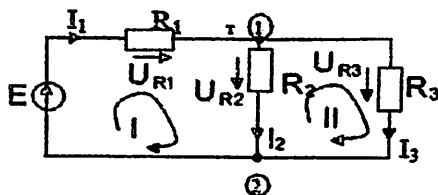


Рис. 3.2

Формулы для вычисления токов ветвей и падений напряжений на резисторах определяются на основании законов Ома и Кирхгофа:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}; \quad I_2 = \frac{E - I_1 R_1}{R_2}; \quad I_3 = \frac{E - I_1 R_1}{R_3};$$

$$U_{R1} = I_1 \cdot R_1; \quad U_{R2} = I_2 \cdot R_2; \quad U_{R3} = I_3 \cdot R_3.$$

Проверка правильности расчета производится на основании законов Кирхгофа:

I закон Кирхгофа: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ (для узла 1).

II закон Кирхгофа:

для I контура: $E = I_1 R_1 + I_2 R_2$

для II контура: $I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0$

Данные для расчета взять из таблицы выбора вариантов значений (табл. 3.1).

Результаты вычислений занести в таблицу (табл. 3.3).

Таблица 3.1

Таблица выбора вариантов значений

№ стенда	E	R ₁	R ₂	R ₃
	[V]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
1	2	100	200	1000
2	2,5	200	100	500
3	3	300	500	1000
4	3,5	400	200	100
5	4	500	100	200
6	4,5	600	500	100
7	5	700	200	500
8	5,5	800	200	500
9	6	900	500	100
10	7	1000	200	100

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать цепь (рис. 3.3), в соответствии с вариантом исходных данных (табл. 3.1).

3.2. Последовательность измерений:

- вольтметр V_1 подключить к источнику E_2 и с помощью ручек регулирования выходного напряжения установить напряжение источника E_2 (табл. 3.1);

- вольтметр V_2 поочередно подключается к резисторам R_1 , R_2 , R_3 , показания вольтметра записать в табл. 3.2.

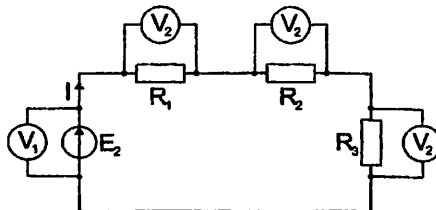


Рис. 3.3

Таблица 3.2

Результаты вычислений и измерений

Вариант №	E_2	I	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}
	[V]	[A]	[V]	[V]	[V]
Предварительный расчет					
Эксперимент					

3.3. Собрать цепь (рис. 3.4) в соответствии с вариантом исходных данных (табл. 3.1).

3.4. Последовательность измерений:

- вольтметр V_1 подключить к источнику E_2 и с помощью ручек регулирования выходного напряжения установить напряжение источника E_2 (табл. 3.1);

- затем вольтметр V_2 поочередно подключается к резисторам R_1 , R_2 , R_3 , показания вольтметра записать в табл. 3.3.

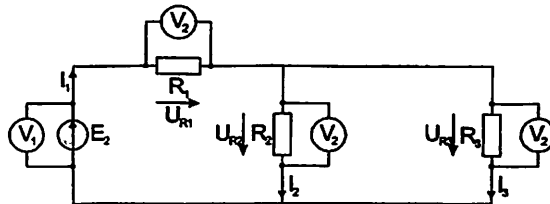


Рис 3.4

Таблица 3.3

Результаты вычислений и измерений

Вариант №	E_2	I_1	I_2	I_3	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}
	[V]	[A]	[A]	[A]	[V]	[V]	[V]
Предварительный расчет							
Эксперимент							

4. Обработка результатов измерений

4.1. Рассчитать ток (рис. 3.3):

$$I = \frac{UR_1}{R_1}; \quad I = \frac{UR_2}{R_2}; \quad I = \frac{UR_3}{R_3}.$$

Значения тока I должно быть одно и тоже.

4.2. Рассчитать токи в ветвях (рис. 3.4):

$$I_1 = \frac{UR_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{UR_2}{R_2}; \quad I_3 = \frac{UR_3}{R_3}.$$

5. Содержание отчета

5.1. Цель работы.

5.2. Электрические схемы исследуемых цепей и их исходные данные.

5.3. Расчетные формулы.

5.4. Таблицы с результатами предварительного расчета и эксперимента.

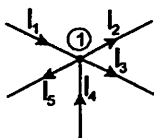
5.5. Выводы по результатам исследований.

6. Контрольные вопросы

6.1. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.

6.2. Какие существуют особенности при составлении уравнений по законам Кирхгофа при наличии в цепи источника тока?

6.3. Выберите уравнение, соответствующее первому закону Кирхгофа для узла 1.



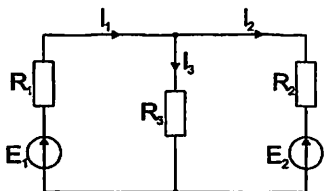
Ответы: А. $I_1 - I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0$

Б. $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0$

В. $I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$

Г. $-I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0$.

6.4. Укажите уравнение, составленное неверно, применительно к данной цепи



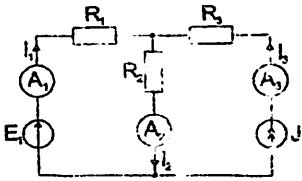
Ответы: А. $R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1$

Б. $R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2$

В. $R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 - E_2$

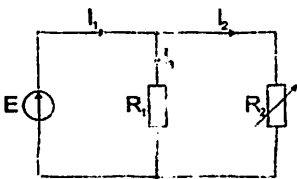
Г. $I_1 - I_2 - I_3 = 0$.

6.5. Как изменятся показания приборов, если зашунтировать сопротивление R_3 ? В ответах обозначено: \uparrow - увеличение, \downarrow - уменьшение.



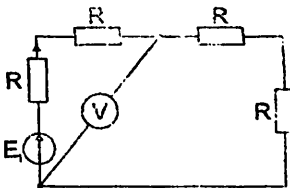
- Ответы: А. $I_1 \uparrow$; $I_2 \uparrow$; $I_3 \downarrow$;
 Б. $I_1 \uparrow$; $I_2 \uparrow$; $I_3 \uparrow$;
 В. $I_1 \downarrow$; $I_2 \downarrow$; $I_3 \uparrow$;
 Г. $I_1, I_2, I_3 = \text{const}$

6.6. Как изменятся токи в ветвях при уменьшении сопротивления R_2 при $E = \text{const}$?



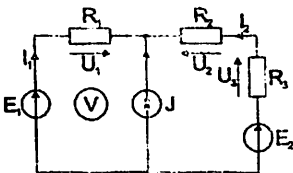
- Ответы: А. $I_1 = \text{const}$; $I_2 \uparrow$; $I_3 \downarrow$;
 Б. $I_1 \downarrow$; $I_2 \downarrow$; $I_3 \downarrow$;
 В. $I_1 \uparrow$; $I_2 \uparrow$; $I_3 \uparrow$;
 Г. $I_1 \uparrow$; $I_2 \downarrow$; $I_3 = \text{const}$.

6.7. Определите показания вольтметра V, если $R=10 \Omega$, $E_1 = 30 \text{ V}$, $E_2 = 10 \text{ V}$



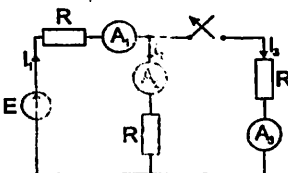
- Ответы: А. 30 В.
 Б. 10 В.
 В. 20 В.
 Г. 40 В.

6.8. Укажите уравнение, составленное неверно применительно к данной цепи.



- Ответы: А. $I_1 + J + I_2 = 0$.
 Б. $-U_1 + U_2 + U_3 = E_2 - E_1$.
 В. $-I_1 - J - I_2 = 0$.
 Г. $U_1 - U_2 + U_3 = E_1 - E_2$.

6.9. Как изменятся показания приборов для размыкания ключа при $E = \text{const}$?

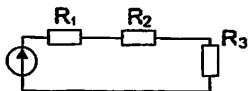


- Ответы: А. $I_1 \downarrow$; $I_2 \downarrow$; $I_3 = 0$;
 Б. $I_1 \downarrow$; $I_2 \downarrow$; $I_3 \downarrow$;
 В. $I_1 \uparrow$; $I_2 \downarrow$; $I_3 \downarrow$;
 Г. $I_1 \downarrow$; $I_2 \uparrow$; $I_3 = \text{const}$.

6.10. Изменяются ли величины токов в схеме рис. 3.2, если сопротивление R_3 замкнуть накоротко?

6.11. Для полной проверки законов Кирхгофа можно ли было обойтись схемой с одним источником?

6.12. Определите напряжение на резисторе R_3 , если $E = 10 \text{ V}$, $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$.



Ответы: А. 10 V;

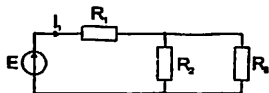
Б. 1 V;

В. 6 V;

Г. 4 V;

Д. 2 V.

6.13. Определить ток I_1 , если $E = 10 \text{ V}$; $R_1 = 6 \Omega$; $R_2 = R_3 = 8 \Omega$.



Ответы: А. 1 A;

Б. 2 A;

В. 0,5 A;

Г. 4 A;

Д. 10 A.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование RL - и RC -цепей при гармоническом воздействии

Цель работы: научиться экспериментально определять действующие значения напряжений, а также сдвиг фаз между током и напряжениями RC - и RL -цепей на разных частотах; познакомиться с работой фазометра и его применением для измерения разности фаз между двумя гармоническими величинами.

1. Краткие пояснения

Пусть через некоторый пассивный элемент протекает ток

$$i = I_m \cos(\omega t + \Psi). \quad (4.1)$$

Найдем соотношение между амплитудами и начальными фазами гармонических колебаний напряжения и тока в элементе, при согласном выборе их положительных направлений. В резисторе

$$u_R = R \cdot i = RI_m \cos(\omega t + \Psi) = U_{Rm} \cos(\omega t + \Psi). \quad (4.2)$$

Отсюда следует, что соотношение между амплитудами тока и напряжения на резистивном сопротивлении будут $U_{Rm} = RI_m$. Фазы этих колебаний совпадают. Другими словами, колебания тока и напряжения в резисторе находятся в фазе. Их векторная диаграмма приведены на рис.4.1.

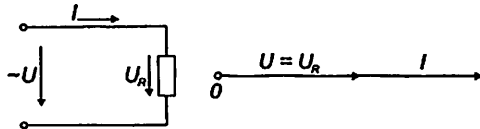


Рис.4.1. Схема резистивной цепи и ее векторная диаграмма

При протекании через индуктивную катушку электрической цепи гармонического тока (4.1) напряжение на индуктивности будет изменяться по закону

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -\omega LI_m \sin(\omega t + \Psi) = \omega LI_m \cos(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}). \quad (4.3)$$

Следовательно, между амплитудами гармонических колебаний напряжения и тока в индуктивности существует зависимость

$$U_{mL} = \omega LI_m. \quad (4.4)$$

Сравнение выражений (4.1) и (4.3) показывает, что гармонические колебания тока отстают по фазе от колебания напряжения в индуктивности

на угол $\varphi = \pi/2$ или гармонические колебания напряжения опережают по фазе колебания тока в индуктивности на угол $\pi/2$.

Если в электрических цепях (рис. 4.2) содержатся последовательно соединенные резистивное и индуктивное сопротивления (сокращенно RL -цепи), ток будет отставать от напряжения на угол $0 < \varphi < \pi/2$. Ток I , напряжения на резисторе U_R и на индуктивности U_L , сдвиг фаз между приложенным напряжением и током $\varphi = \Psi_U - \Psi_I$ определяются из выражений:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \quad (4.5)$$

$$U_R = RI = U \frac{R}{z} = \frac{RU}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \quad (4.6)$$

$$U_L = \omega LI = U \frac{\omega L}{z} = \frac{\omega LU}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \quad (4.7)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} = \arctg \frac{U_L}{U_R}. \quad (4.8)$$

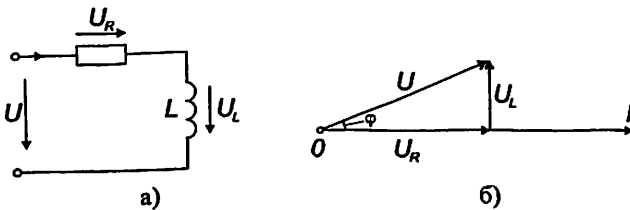


Рис. 4.2. а) схема последовательной RL - цепи; б) векторная диаграмма

При гармоническом напряжении $u = U_m \cos(\omega t + \Psi)$ ток на емкости:

$$i_C = C \frac{du}{dt} = -\omega C U_m \sin(\omega t + \Psi) = \omega C U_m \cos(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}), \quad (4.9)$$

следовательно, кривая напряжения отстает от кривой тока на угол $\pi/2$.

Связь между амплитудами гармонических колебаний напряжения и тока в емкости определяется соотношением

$$I_{mC} = \omega C U_m.$$

В схемах со смешанными параметрами – при наличии резистора и емкости (рис.4.3), напряжение отстает от тока на угол $-\pi/2 < \varphi < 0$. Величины тока и напряжения на элементах RC – цепи определяются из выражений:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad (4.10)$$

$$U_R = RI = U \frac{R}{z} = \frac{RU}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad (4.11)$$

$$U_C = \frac{I}{\omega C} = \frac{U}{\omega C z} = \frac{U}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad (4.12)$$

$$\varphi = -\arctg \frac{1}{\omega CR} = -\arctg \frac{U_C}{U_R}. \quad (4.13)$$

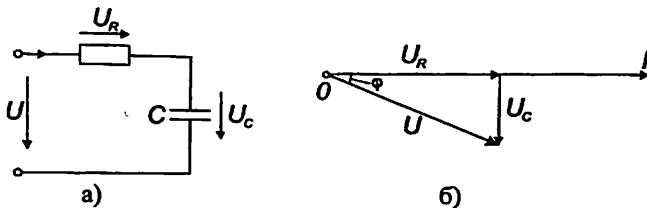


Рис. 4.3. а) схема последовательной RC -цепи; б) векторная диаграмма

На рис. 4.4 приведены графики зависимостей действующих значений напряжений от частоты на реактивных элементах схем рис. 4.2 и 4.3.

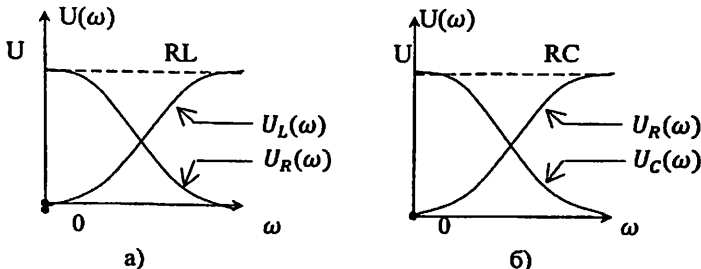


Рис. 4.4

На рис. 4.5 (кривые 1 и 2) приведены графики зависимости угла сдвига фаз между приложенным напряжением и током для RL – цепи (рис. 4.2, а) и RC – цепи (рис. 4.3, а).

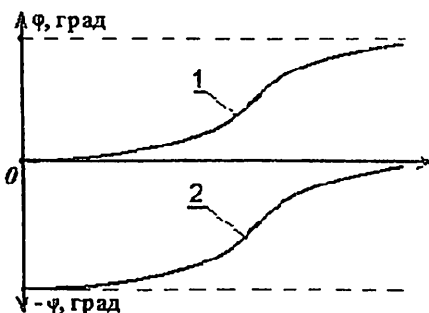


Рис.4.5

Активная P , реактивная Q и полная S мощности для обеих схем определяются по формулам:

$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \text{ W}; \quad (4.14)$$

$$Q = X \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \sin \varphi, \text{ V} \cdot \text{Ar}; \quad (4.15)$$

$$S = Z \cdot I^2 = U \cdot I, \text{ V} \cdot \text{A}. \quad (4.16)$$

2. Предварительный расчёт

2.1. Для исследуемой RL – цепи (рис.4.2, а) при $U = 2\text{V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ и L (см. табл. 4.1) рассчитать по формулам (4.6) - (4.8) и построить графики $U_R(f)$, $U_L(f)$, $\varphi(f)$ на частотах $f = (0,2; 0,5; 1; 1,5; 2) f_r$, где $f_r = \frac{R}{2\pi L}$. Результаты расчётов занести в табл.4.2.

Для исследуемой RC – цепи (рис.4.3,а) при $U = 2\text{V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ и C (см. табл.4.1) рассчитать по формулам (4.11) - (4.13) и построить графики $u_R(f)$, $u_C(f)$, $\varphi(f)$ на частотах $f = (0,2; 0,5; 1; 1,5; 2) f_r$, где $f_r = \frac{1}{2\pi RC}$. Результаты расчётов занести в табл.4.2.

2.2. Построить векторную диаграмму тока и напряжений на элементах на частоте f_r .

Дополнительное задание

2.3. Рассчитать активную, реактивную и полную мощности на частоте $f = f_r$, построить треугольник мощностей.

Таблица 4.1

Значения параметров элементов

Номер стенда	L	C	Номер стенда	L	C
	mHн	nF		-	mHн
1	L = 10	----	6	----	C = 50
2	----	C = 10	7	L = 30	----
3	L = 50	----	8	----	C = 30
4		C = 20	9	L = 50	----
5	L = 20	----	10	----	C = 50

3. Выполнение работы

Собрать схему, приведённую на рис. 4.6.

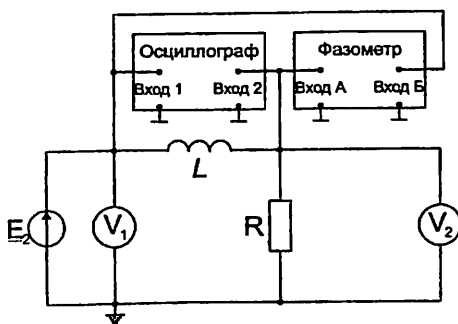


Рис. 4.6. Исследуемая схема RL -цепи

При сборке схемы в качестве e_2 используется выход «G→2» генератора частот. С помощью регулятора напряжения на блоке генератора « $U_{вых}$ » установить напряжение $U = 2V$. Контроль за уровнем входного напряжения осуществлять с помощью вольтметра V_1 и поддерживать его постоянным на всех частотах. Измерить напряжение на сопротивлении U_R (вольтметром V_2) и угол сдвига фаз φ между входным напряжением и током с помощью фазометра на частотах, рассчитанных в п. 2.1. Напряжение на индуктивности определяется по формуле

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2}.$$

Результаты измерений заносятся в табл. 4.2. На частоте $f = f_T$ срисовать с экрана осциллографа кривые напряжений $u(t)$ – канал А и $u_R(t)$

– канал Б. Для получения устойчивого изображения кривых на экране осциллографа поставить положения регуляторов в следующие положения: «ВОЛЬТ/ДЕЛ» - 2 В/дел; «ВРЕМЯ/ДЕЛ» - 1 мс/дел

Для исследования цепи RC в схеме, приведённой на рис. 4.5, индуктивность заменяется на ёмкость, и выполняются измерения u_R и φ так же, как и при исследовании RL – цепи. Напряжение на ёмкости определяется по формуле

$$U_C = \sqrt{U^2 - U_R^2}$$

Результаты измерений заносятся в табл.4.2 на частоте $f_1 = f_0$. Срисовать с экрана осциллографа кривые u_R и $i(t)$. Ошибка! Закладка не определена (i) и $u(t)$.

Таблица 4.2

Результаты расчёта и измерения

	f	0,2 f _r	0,5 f _r	f _r	1,5 f _r	2 f _r
	f, kHz					
Расчитано	U_R , [V].					
	φ , [град]					
	U_L или U_C , [V].					
Измерено	U_R , [V].					
	φ , [град].					
	U_L или U_C , [V].					

4. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 4.1. Наименование, цель работы.
- 4.2. Схемы измерений.
- 4.3. Формулы расчёта.
- 4.4. Таблица с результатами предварительного расчёта и измерений.
- 4.5. Графики частотных характеристик $u_R(f)$, $u_L(f)$ или $u_C(f)$, $\varphi(f)$.
- 4.6. Графики мгновенных значений входного напряжения и тока на частоте $f = f_r$.
- 4.7. Векторные диаграммы тока и напряжений на элементах цепи на частоте $f = f_r$.

Дополнительно

4.8. Результаты теоретического и экспериментального определения активной, реактивной и полной мощности на частоте $f = f_r$.

4.9. Краткие выводы из сравнения результатов предварительного расчёта и эксперимента.

5. Контрольные вопросы

5.1. Какие токи и напряжения называются гармоническими? Какими параметрами они характеризуются?

5.2. Что называют действующим значением периодического колебания и как оно определяется?

5.3. Какими соотношениями связаны амплитуды (действующие значения) гармонического тока и напряжения на резистивном сопротивлении, индуктивности, ёмкости?

5.4. Что называется углом сдвига фаз?

5.5. Как сдвинут по фазе ток и напряжение на резистивном сопротивлении, индуктивности, ёмкости?

5.6. Как определяется активное, реактивное и полное сопротивления для RL и RC цепей?

5.7. Как определяется активная, реактивная и полная мощности?

5.8. Что называется векторной диаграммой?

5.9. Нарисуйте векторную диаграмму для последовательной RLC цепи для случаев: а) $X_L < X_C$ б) $X_L > X_C$.

5.10. Как изменяются напряжения на элементах цепей рис. 4.1 и рис. 4.2 при увеличении частоты входного напряжения?

5.11. Как будет изменяться активная мощность, выделяемая в цепях (рис. 4.1 и рис. 4.2), при увеличении частоты f и неизменном значении напряжения U ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование последовательного колебательного контура

Цель работы: экспериментальное исследование частотных характеристик последовательного колебательного контура.

1. Краткие теоретические понятия

Схема электрической цепи, содержащей элементы резистивного сопротивления R , индуктивности L и емкости C , соединенные последовательно, приведена на рис.5.1. Такую электрическую цепь называют последовательным RLC -контуром, или, *последовательным колебательным (резонансным) контуром*. Если на вход контура подведено

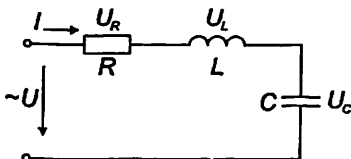


Рис.5.1

напряжение $u = U_m \cos \omega t$, то потребуется найти гармонический ток (установившийся спустя достаточно большое время после приложения гармонического воздействия) в контуре $i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$, т.е. найти амплитуду I_m и начальную фазу φ тока.

При согласном выборе положительных направлений напряжений на элементах контура $u = u_R + u_L + u_C$, используя соотношения токов и напряжений в элементах цепи, приведенных в работе №4, можно записать:

$$RI_m \cos(\omega t + \varphi) + (\omega L - \frac{1}{\omega C})I_m \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) = U_m \cos \omega t. \quad (5.1)$$

Складывая две гармонические функции одинаковой частоты, получим

$$Z \cdot I_m \cos(\omega t + \Psi) = U_m \cos \omega t, \quad (5.2)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ - модуль входного полного комплексного сопротивления цепи.

Комплексное сопротивление $Z = R + j(X_L - X_C)$, где R - активное сопротивление резистора; $jX_L = j\omega L$ - комплексное индуктивное сопротивление; $-jX_C = \frac{1}{j\omega C}$ - комплексное емкостное сопротивление.

Сравнение амплитуд и начальных фаз левой и правой частей равенства (5.1) позволяет найти амплитуду тока контура

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (5.3)$$

и начальную фазу $\varphi = -\arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ искомого гармонического тока.

Векторная диаграмма напряжений на элементах контура приведена на рис.5.2.

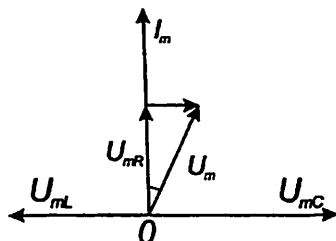


Рис.5.2. Векторная диаграмма

На векторной диаграмме вектор тока повернут относительно вектора питающего напряжения на угол $\varphi > 0$, так как $\omega L < 1/\omega C$. Векторы напряжений емкости U_{mC} и индуктивности U_{mL} повернуты относительно вектора тока I_m на углы, соответственно - $\pi/2$ и $+\pi/2$, так как колебания напряжения на зажимах емкости отстают, а на индуктивности опережают по фазе на угол $\pi/2$ от колебаний проходящего через них тока. При $\omega L = 1/\omega C$ модули напряжений на реактивных элементах будут равны $U_{mL} = U_{mC}$ и сдвиг фаз $\varphi = 0$. Этому будет соответствовать резонансный режим, при котором частота ω питающего напряжения будет равна резонансной частоте

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. При этой частоте сопротивление контура становится чисто

активным $Z_0 = R$ и минимальным, а ток контура растет до возможного своего максимального значения. Зависимость $I(\omega)$ с изменением ω при постоянной ω_0 и $U = const$ приобретает экстремальный характер. Гармонические напряжения на индуктивности и емкости при резонансной частоте компенсируют друг друга. Поэтому принято считать, что в контуре имеет место *резонанс напряжений*.

Колебательный RLC -контур характеризуется следующими вторичными параметрами:

$$R_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} - \text{характеристическое сопротивление;}$$

$$Q = \frac{\omega C}{R} = \frac{\omega L_0}{U} = \frac{U_{C0}}{U} - \text{добротность контура}; \quad (5.4)$$

$S_A = \frac{f_0}{Q}$ - абсолютная полоса пропускания.

Для последовательного RLC-контура на резонансной частоте справедливы следующие соотношения:

$$I_0 = \frac{U}{R}; \quad U_{R0} = U; \quad U_{C0} = U_{L0} = I_0 \cdot R_C = Q \cdot U. \quad (5.5)$$

Зависимости $I(\omega)$, $U_R(\omega)$, $U_C(\omega)$, $U_L(\omega)$ называются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ), а $\varphi(\omega)$ - фазо-частотной характеристикой (ФЧХ). Их можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} I(\omega) &= \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}; & U_R(\omega) &= I(\omega) \cdot R; \\ U_L(\omega) &= I(\omega) \cdot \omega L; & U_C(\omega) &= I(\omega) \cdot \frac{1}{\omega C}; \\ \varphi(\omega) &= \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

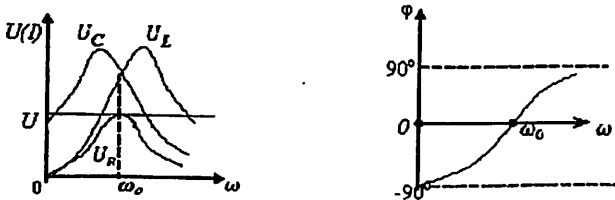


Рис. 5.3

Полосой пропускания колебательного контура называется область частот вблизи резонанса, на границах которой ток снижается в $\sqrt{2}$ раз относительно своего максимального значения I_0 (рис. 5.4). Абсолютная полоса пропускания определяется по формуле:

$$S_A = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q}. \quad (5.7)$$

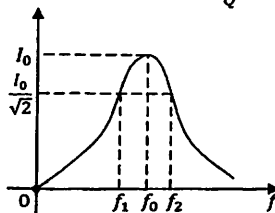


Рис. 5.4

2. Предварительный расчёт

2.1. Для схемы рис. 5.4 в соответствии с вариантом исходных данных табл. 5.1 рассчитать АЧХ и ФЧХ $U_{R0}(f)$, $U_L(f)$, $U_C(f)$, $\varphi(f)$ при $U = 2$ В, $R = 100$ Ω на частотах:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$$

$$f_0 \pm \Delta f, f_0 \pm 2\Delta f, f_0 \pm 3\Delta f, \text{ где } \Delta f = 200 \text{ Гц}$$

Расчёт провести по формулам (5.6). Результаты расчёта свести в табл. 5.2.

2.2. Рассчитать абсолютную полосу пропускания S_A и добротность контура по формулам (5.4).

Таблица 5.1

Исходные данные для расчёта и эксперимента

№ стенда	L	C	№ стенда	L	C
	мНп	нF		мНп	нF
1	5	100	6	30	50
2	10	50	7	70	100
3	20	50	8	15	20
4	35	20	9	35	50
5	85	10	10	55	10

3. Выполнение работы

3.1. Исследовать частотные характеристики $U_R(f)$ и $\varphi(f)$ последовательного колебательного контура. Собрать схему рис. 5.4 с параметрами контура согласно варианту (табл. 5.1).

Установить $R = 100$ Ω , напряжение на выходе генератора «Г1 - 0 дБ» $U = 1$ В. Изменяя частоту генератора, настроить контур на резонансную частоту f_0 . Фиксацию f_0 производить по максимальному значению вольтметра V_2 или по фазометру, показание которого на резонансной частоте равно нулю. Показания вольтметра занести в табл. 5.2.

Поддерживая выходное напряжение постоянным $U=1$ В, измерить напряжение U_R и угол сдвига фаз φ на частотах: $f_0 \pm \Delta f$, $f_0 \pm 2\Delta f$, $f_0 \pm 3\Delta f$, где $\Delta f = 200$ Гц. Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

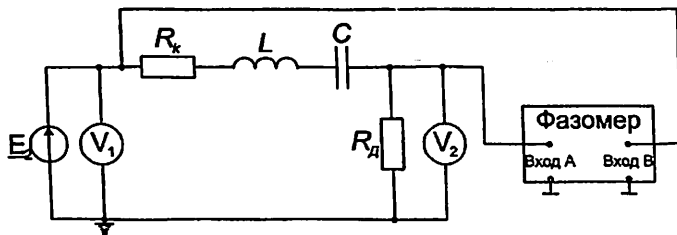


Рис. 5.4

3.2. Исследовать частотную характеристику напряжения на индуктивности. Собрать схему рис. 5.5. Параметры элементов набираются такими же, что и в п. 3.1. Измерение $U_L(f)$ производится на тех же частотах, что и при напряжении $U_R(f)$ (см. п. 3.1.). Результаты измерений занести в табл. 5.2.

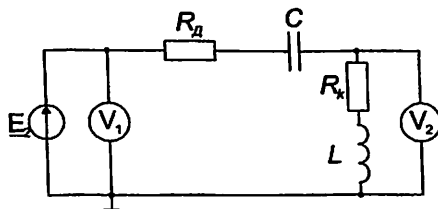


Рис. 5.5

Таблица 5.2

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

№	Результаты измерений						Результаты предварительного расчёта			
	f	f , kHz	U_{R_d} , V	U_L , V	U_C , V	φ , град	U_{R_d} , V	U_L , V	U_C , V	φ , град
1	$f_0 - 3\Delta f$									
2	$f_0 - 2\Delta f$									
3	$f_0 - \Delta f$									
4	f_0									
5	$f_0 + \Delta f$									
6	$f_0 + 2\Delta f$									
7	$f_0 + 3\Delta f$									

3.3. Исследовать частотную характеристику напряжения на ёмкости. Собрать схему рис. 5.6.

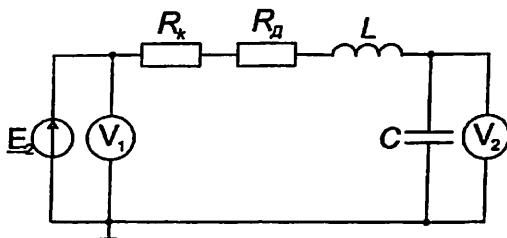


Рис. 5.6

Измерения $U_C(f)$ выполняются аналогично п. 3.2. Результаты измерений занести в табл. 5.2.

Дополнительное задание

Исследовать зависимость ширины полосы пропускания и добротности от сопротивления нагрузки.

Измерения выполнить по схеме рис. 5.4, подключив параллельно ёмкости сопротивления нагрузки R_H . При значениях $R_H = 10, 20, 30 \text{ к}\Omega$ измерить граничные частоты полосы пропускания f_1 и f_2 по уровню $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ максимального значения V_2 . Результаты измерений занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Влияние величины сопротивления нагрузки на ширину полосы пропускания и добротность контура

$R_H, \text{к}\Omega$	f_1, kHz	f_2, kHz	S_A, kHz	$Q_s = \frac{f_0}{S_A}$
10				
20				
30				

4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Схемы измерения частотных характеристик.
- 4.3. Графики частотных характеристик $U_{RD}(f)$, $U_L(f)$, $U_C(f)$, $\varphi(f)$, построенных по результатам предварительного расчёта и эксперимента.
- 4.4. По графику $U_{RD}(f)$ определить абсолютную полосу пропускания и сравнить полученное значение с предварительным расчётом.
- 4.5. Графики зависимостей $S_A(R_H)$, $Q_s(R_H)$ (дополнительное задание).

Выводы по результатам исследований.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Запишите условие резонанса напряжений.
- 5.2. Почему резонанс в последовательном колебательном контуре называется резонансом напряжений?
- 5.3. Что называется добротностью контура и что она характеризует?
- 5.4. Что такое полоса пропускания колебательного контура?
- 5.5. Каковы свойства колебательного контура на границах полосы пропускания?
- 5.6. Какими свойствами обладает колебательный контур при резонансе?
- 5.7. Как изменится характеристическое сопротивление контура, если L и C увеличить в 4 раза?
- 5.8. Как нужно уменьшить частоту приложенного напряжения, чтобы в контуре наступил резонанс напряжений, если на данной частоте $X_L > X_C$?
- 5.9. Как изменится полоса пропускания колебательного контура, если увеличить его активное сопротивление в 2 раза?
- 5.10. Определите напряжение на емкости при резонансе (рис.5.1), если $U=10\text{ V}$, $R=10\ \Omega$, $X_{L0} = 20\ \Omega$.
- 5.11. Определите ток в колебательном контуре, если $U=200\text{ V}$, $R=100\ \Omega$, $X_L = X_C = 100\ \Omega$.
- 5.12. Как влияет величина сопротивления нагрузки R_n , подключенного параллельно ёмкости, на избирательные свойства контура?
- 5.13. Нарисуйте векторную диаграмму колебательного контура при резонансе и при $X_L < X_C$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование параллельного колебательного контура

Цель работы: экспериментальное исследование частотных характеристик параллельного RLC контура и влияния на них внутреннего сопротивления источника и нагрузки.

1. Теоретические сведения

Многие устройства, предназначенные для формирования и обработки сигналов, а также в силовой электронике содержат параллельный колебательный контур (ПРКК), схема которого приведена на рис. 6.1,а.

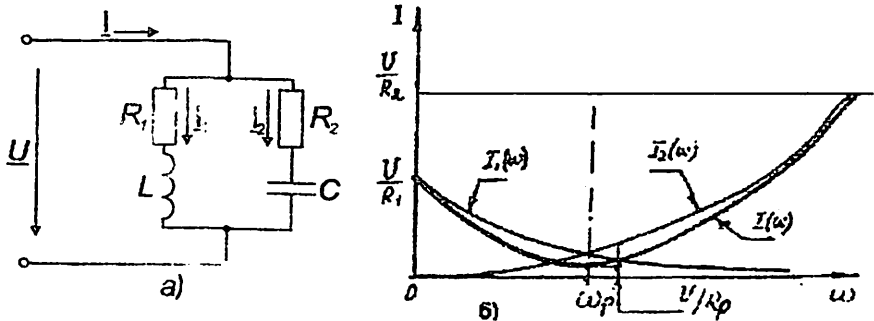


Рис. 6.1

Входной комплексный ток ПРКК равен сумме токов RL и RC – ветвей

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$$

Комплексные токи в ветвях

$$I_1 = Y_1 U = \frac{U}{Z_1} = \frac{U e^{j\psi_u}}{R_1 + j\omega L} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z_1 e^{j\varphi_1}} = I_1(\omega) e^{j(\psi_u - \varphi_1)};$$

$$I_2 = Y_2 U = \frac{U}{Z_2} = \frac{U e^{j\psi_u}}{R_2 - j/\omega C} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z_2 e^{j\varphi_2}} = I_2(\omega) e^{j(\psi_u - \varphi_2)},$$

где $I_1(\omega) = U/Z_1$, $I_2(\omega) = U/Z_2$ - действующие значения токов ветвей;

$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}$, $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (1/\omega C)^2}$, - полные сопротивления ветвей;

$\varphi_1 = \arctg(\omega L / R_1)$; $\varphi_2 = -\arctg(1/\omega RC)$ - аргументы (углы) комплексных сопротивлений ветвей;

ψ_u - начальная фаза входного напряжения.

Комплексная проводимость ПРКК равна сумме комплексных проводимостей ветвей:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_1 + j\omega L} + \frac{1}{R_2 - j \frac{1}{\omega C}} = g - jb,$$

где $g = g_1 + g_2 = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L)^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}$ - активная проводимость;

$b = b_1 + b_2 = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} - \frac{1/\omega C}{R_2^2 + (1/\omega C)^2}$ - реактивная проводимость.

При резонансе токов (РТ) $\omega = \omega_p$ реактивная проводимость равна нулю ($b = 0$)

$$\frac{\omega_p L}{R_1^2 + (\omega_p L)^2} - \frac{1/\omega_p C}{R_2^2 + (1/\omega_p C)^2} = 0, \quad (6.1)$$

что является условием РТ. Из решения уравнения (6.1) получим формулу для определения резонансной частоты

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}, \quad (6.2)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ - характеристическое сопротивление ПРКК.

Входное сопротивление ПРКК при РТ ($\omega = \omega_p$) R_p обратно активной проводимости g_p имеет максимальное значение и определяется по формуле

$$R_p = \frac{1}{g_p} = \frac{\rho^2 + R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (6.3)$$

Добротность ПРКК $Q = \rho / (R_1 + R_2) = \rho / R$, где $R = R_1 + R_2$ - общее сопротивление потерь ПРКК.

В технике связи обычно используют ПРКК с малыми потерями, у которых $R_1^2 \ll \rho^2$; $R_2^2 \ll \rho^2$. Входное сопротивление таких контуров при РТ

$$R_p \approx \frac{\rho^2}{R} = Q\rho = Q^2 R. \quad (6.4)$$

Резонансная частота ПРКК с малыми потерями определяется по формуле

$$\omega_p \approx \omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad f_0 \approx \omega_0/2\pi = 1/2\pi \cdot \sqrt{LC}.$$

При РТ токи в каждой из ветвей ПРКК примерно одинаковы ($I_{1p} \approx I_{2p}$) и каждый из них больше тока в неразветвленной части цепи I_p в Q раз

$$I_{1p}/I_p \approx I_{2p}/I_p \approx Q.$$

Частотные характеристики токов $I(\omega)$, $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$ ПРКК (схема рис. 6.1,а) приведены на рис. 6.1,б.

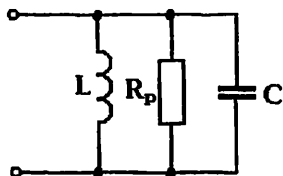


Рис.6.2

ПРКК с малыми потерями (см. рис. 6.1,а) может быть заменен схемой замещения (рис. 6.2), на которой все элементы контура соединены параллельно. Сопротивление R_p отражает суммарные потери энергии в катушке индуктивности и в конденсаторе.

Комплексная проводимость такого

контура равна сумме комплексных проводимостей ветвей

$$Y(j\omega) = \frac{1}{R_p} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = \frac{1}{R_p} + j\omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = \frac{1}{R_p} \left[1 + j\omega_0 C R_p \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] =$$

$$= \frac{1}{R_p} \left[1 + j \frac{R_p}{\rho} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] = \frac{1}{R_p} \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] = \frac{1}{R_p} (1 + j\xi),$$

здесь $Q = R_p/\rho$ – собственная добротность ПРКК;

$\rho = \sqrt{L/C} = 1/\omega_0 C$ – характеристическое сопротивление ПРКК;

$$\xi = Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = Q \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right) = Q\nu - \text{обобщенная расстройка};$$

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \Omega - \frac{1}{\Omega} - \text{нормированная расстройка};$$

$\Omega = \omega/\omega_0 = f/f_0$ – относительная частота.

Комплексное сопротивление ПРКК обратно комплексной проводимости

$$Z(j\omega) = \frac{1}{Y(j\omega)} = \frac{R_p}{1 + j\xi} = R(\omega) + jX(\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (6.5)$$

где $R(\omega) = \text{Re} Z(j\omega) = \frac{R_p}{\sqrt{1+\xi^2}}$; $X(\omega) = \text{Im} Z(j\omega) = -j \frac{\xi R_p}{\sqrt{1+\xi^2}}$ – действительная (реальная) и мнимая части комплексного сопротивления;

$$Z(\omega) = \frac{R_p}{\sqrt{1+\xi^2}}; \varphi(\omega) = -\text{arctg} \xi - \quad (6.6)$$

- модуль и аргумент (угол) комплексного сопротивления ПРКК.

На рис. 6.3 приведены АЧХ $Z(f)$ и ФЧХ $\varphi(f)$ комплексного сопротивления ПРКК при $R_p = 10 \text{ кОм}$ и $Q = 2$ и 5 . Из ФЧХ $\varphi(f)$ видно, что на частотах, меньших резонансной ($f < f_0$), сопротивление контура имеет резистивно-индуктивный, на частотах, больших резонансной ($f > f_0$) – резистивно-емкостной характер.

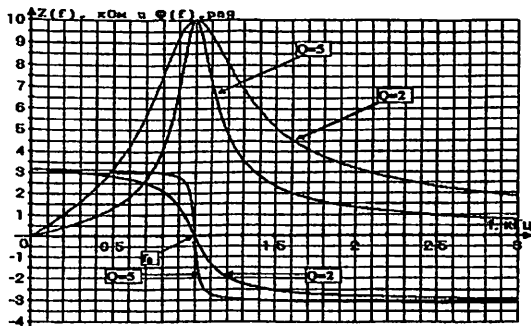


Рис. 6.3

На практике для получения хорошей избирательности ПРКК его подключают к источнику и нагрузке с максимально большими сопротивлениями R_H , R_H (см. рис.6.4,а). Заменяв источник ЭДС E с внутренним сопротивлением R_H эквивалентным источником тока $J=E/R_H$ с параллельно присоединённым сопротивлением R_H получим схему рис.6.4,б. Три параллельно соединённых сопротивления R_H , R_p и R_H (рис. 6.4,б) можно заменить одним эквивалентным сопротивлением, определяемым по формуле

$$R_{pз} = \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_H} \right)^{-1}, \quad (6.7)$$

в результате чего получим схему рис. 6.4, в.

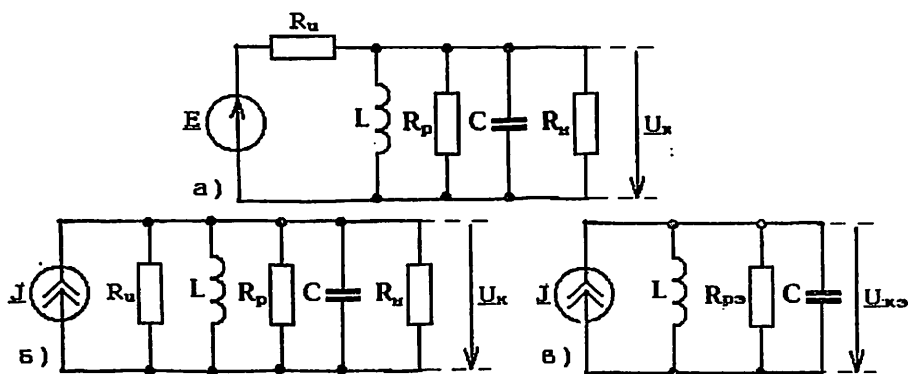


Рис. 6.4

При измерении частотных характеристик напряжения на ПРКК с помощью вольтметра с входным сопротивлением R_B в схеме рис.6.4,в результирующее резонансное эквивалентное сопротивление ПРКК определяется по формуле

$$R_{pз} = \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_B} \right)^{-1}. \quad (6.8)$$

Эквивалентная добротность ПРКК определяется по формуле

$$Q_3 = R_{pз} / \rho. \quad (6.9)$$

Эквивалентная обобщенная расстройка равна

$$\xi_3 = Q_3 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = Q_3 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) = Q_3 \nu, \quad (6.10)$$

Напряжение на ПРКК определяется по формуле

$$U_K = JZ_3(\omega) = \frac{JR_{pз}}{\sqrt{1 + \xi_3^2}} = \frac{U_{Kpз}}{\sqrt{1 + \xi_3^2}}, \quad (6.11)$$

где $U_{Kpз} = JR_{pз} = ER_{pз}/R_H$ - напряжение на ПРКК при резонансе.

Важной характеристикой ПРКК является его полоса пропускания (ПП), под которой понимается диапазон частот возле резонансной частоты, где напряжение на ПРКК не меньше $1/\sqrt{2}$ максимального (резонансного) значения (рис. 6.5). Граничные частоты ПП определим из равенства

$$U_{КЭ}(f) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{КЭ}; \quad \frac{U_{КЭ}}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{U_{КЭ}}{\sqrt{2}}; \quad 1+\xi^2 = 2; \quad \xi^2 = 1.$$

Следовательно, на граничных частотах ПП обобщённая расстройка $\xi_{1,2} = \pm 1$ (см. рис. 6.5,а).

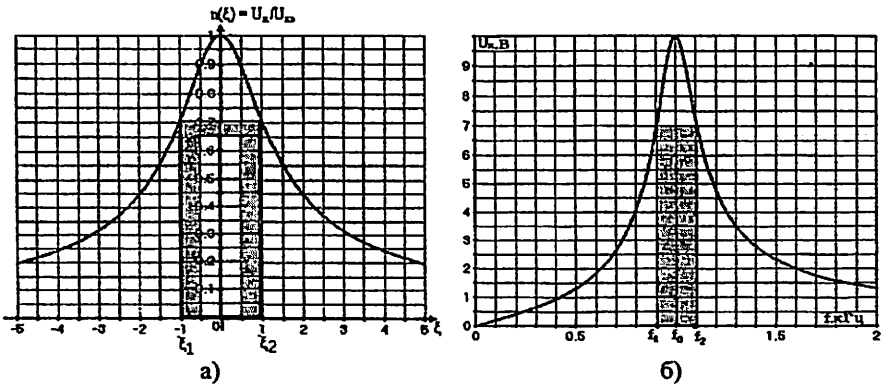


Рис. 6.5.

Если учесть, что $\xi_2 = Q_3 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$, то из решения уравнения

$$Q_3 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) = \pm 1$$

получим формулы для расчёта граничных частот ПП

$$f_{1,2} = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q_3^2}} \mp \frac{1}{2Q_3} \right) \approx f_0 \left(1 \mp \frac{1}{2Q_3} \right) \quad (6.12)$$

Абсолютная ширина ПП ПРКК (см. рис. 6.5,б)

$$\Pi_3 = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q_3} = d_3 f_0. \quad (6.13)$$

$$\text{Относительная ширина ПП } S_{03} = \frac{\Pi_3}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{1}{Q_3} = d_3, \quad (6.14)$$

где $d_3 = 1/Q_3$ - эквивалентное ослабление ПРКК.

Из (6.14) получим

$$Q_3 = f_0 / (f_2 - f_1). \quad (6.15)$$

Формула (6.15) используется для экспериментального определения эквивалентной добротности колебательного контура Q_3 по измеренным величинам резонансной частоты f_0 и ширине ПП $\Delta f_3 = f_2 - f_1$.

2. Предварительный расчет

2.1. Для заданных параметров колебательного контура (см. табл. 6.1) рассчитать: резонансную частоту $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, характерное сопротивление $\rho = \sqrt{L/C}$, собственную добротность $Q \approx \rho/R_l$, где R_l - сопротивление потерь катушки индуктивности (берётся из табл. 6.1), сопротивление контура при резонансе $R_p = Q\rho$. Результаты расчета занести в табл. 6.2.

2.2. По заданному значению внутреннего сопротивления источника ($R_n = 50 \text{ кОм}$) при сопротивлении нагрузки R_n (см. табл. 6.1) рассчитать эквивалентное сопротивление R_{p3} по формуле (6.7), эквивалентную добротность ПРКК Q_3 по формуле (6.9). Результаты расчета занести в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Параметры элементов ПРКК и нагрузки

№ стенда	$L, \text{ мГм}$	$C, \text{ нФ}$	$R_l, \text{ Ом}$	$R_n, \text{ кОм}$
1	20	100	20	10
2	25	70	25	10
3	30	60	30	15
4	35	50	35	15
5	50	40	50	30
6	60	30	60	30
7	70	25	70	30
8	80	20	80	30
9	95	10	95	50
10	100	5	100	50

Таблица 6.2

Параметры колебательного контура

$R \approx R_l = \dots$	$L = \dots$	$C = \dots$	
$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} = \dots$	$\rho = \sqrt{L/C} = \dots$	$Q = \rho/R_l = \dots$	$R_p = Q\rho = \dots$
$R_n = 50 \text{ кОм}$	$R_n =$	$R_{p3} = (R_p^{-1} + R_n^{-1} + R_n^{-1})^{-1} = \dots$	$Q_3 = R_{p3}/\rho = \dots$

2.3. Рассчитать частотную характеристику напряжения $U_k(f)$ на ПРКК (см. рис. 6.3) по формуле (6.11) при $E = 5 \text{ В}$ и сдвиг фаз между напряжением и током $\varphi(f)$ по формуле (6.6).

Расчеты выполнить на частотах: $f = f_0, f_0 \pm \Delta f, f_0 \pm 2\Delta f, f_0 \pm 4\Delta f$, где $\Delta f = 0.5f_0/Q_3$ - половина абсолютной ширины ПП ПРКК.

Результаты расчета АЧХ и ФЧХ занести в табл. 6.3. Расчет $U_k(f)$ и $\varphi_k(f)$ можно выполнить на ПК с помощью программы EXCEL, MathCAD 2001 и др.

Таблица 6.3

Результаты предварительных расчётов и измерений

n	Результаты расчёта						Результаты измерений		
	f	$f, \text{кГц}$	$v = f/f_0 - f_0/f$	$\xi = Q/v$	$U_0, \text{В}$	$\varphi, \text{град}$	$U_1, \text{В}$	$U_0, \text{В}$	$\varphi, \text{град}$
1	$f_0 - 4\Delta f$								
2	$f_0 - 2\Delta f$								
3	$f_0 - \Delta f$								
4	f_0								
5	$f_0 + \Delta f$								
6	$f_0 + 2\Delta f$								
7	$f_0 + 4\Delta f$								

$f_0 = \dots \text{кГц};$ граничные частоты ПП: $f_1 = \dots, f_2 = \dots; Q_0 = \dots; \Delta f = 0.5f_0/Q_0 = \dots$

3. Выпелнение работы

3.1. Исследование ПРКК с учётом влияния сопротивления источника

Собрать схему, приведённую на рис. 6.6. На схеме рис. 6.6 справа от катушки индуктивности обозначено сопротивление R_1 , учитывающее потери энергии в ней.

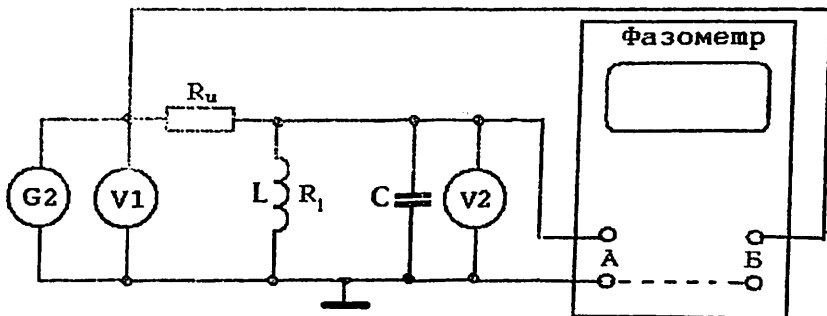


Рис. 6.6

Плавно изменяя частоту генератора измерить резонансную частоту f_0 ПРКК по максимуму показания вольтметра V_2 , равному резонансному напряжению на колебательном контуре $U_{кр}$. Записать значения резонансной частоты f_0 и напряжения вольтметров V_1 и V_2 . Плавно изменяя частоту генератора G_2 найти граничные частоты ПП f_1 и f_2 , на которых $U_k = 0,7U_{кр}$.

Результирующее резонансное сопротивление ПРКК определяется по формуле $R_p = R_{II} \frac{U_2}{U_1 - U_2}$.

Определить сопротивление потерь катушки индуктивности R_l (потерями в конденсаторе пренебрегаем, т.к. они обычно на порядок меньше потерь в катушке индуктивности). Для этого сначала определяем собственную добротность ПРКК $Q = R_p / \rho$, а затем сопротивление потерь в катушке индуктивности $R_l = \rho / Q$. Сравнить измеренное и заданное значение R_l (см. табл. 6.1).

Определяем эквивалентное резонансное сопротивление контура с учётом влияния сопротивления источника R_{II} по формуле $R_{p2} = R_{II} R_p / (R_{II} + R_p)$ и эквивалентную добротность контура $Q_{21} = R_{p2} / \rho$. Эквивалентную добротность контура также определить по формуле $Q_{22} = f_0 / (f_2 - f_1)$ и найти среднее арифметическое значение эквивалентной добротности $Q_2 = (Q_{21} + Q_{22}) / 2$.

Измерение АЧХ и ФЧХ напряжения на ПРКК $U_K(f)$ и сдвига фаз между напряжением и током $\varphi(f) = \psi_{ик} - \psi_l$ выполнить на тех же частотах, на которых был выполнен предварительный расчёт. ФЧХ $\varphi(f)$ измеряется фазометром (см. рис. 6.6). Т.к. сопротивление источника R_{II} выбирается много больше входного сопротивления ПРКК ($R_{II} \gg Z(f)$), то фаза входного тока практически совпадает с фазой входного напряжения u_1 . Результаты измерений заносятся в табл. 6.3.

Зарисовать с экрана осциллографа графики мгновенных значений напряжения и тока на входе колебательного контура $U_K(f)$, $i_K(f)$ на частоте меньше резонансной ($f = f_0 - \Delta f$), резонансной ($f = f_0$) и больше резонансной ($f = f_0 + \Delta f$).

3.2. Исследование ПРКК с учётом влияния сопротивления источника и нагрузки

В схеме рис. 6.6 подключить параллельно конденсатору с ёмкостью C сопротивление нагрузки R

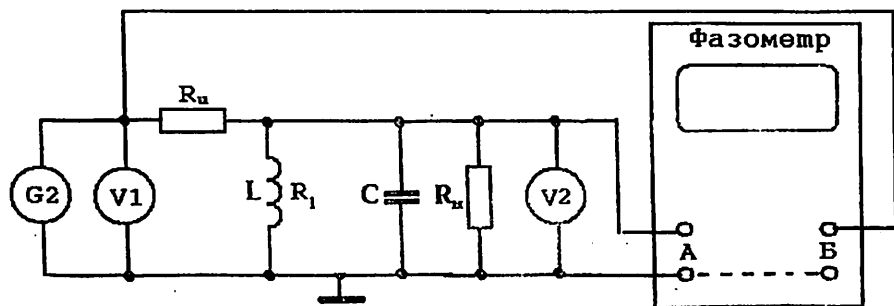


Рис. 6.7

4. Обработка результатов измерений

По результатам предварительного расчета и измерений (см. табл. 6.2) построить графики частотных характеристик $U_K(f)$, и $\varphi(f)$.

5. Содержание отчета

- 5.1. Название и цель работы.
- 5.2. Результаты предварительного расчета и эксперимента.
- 5.3. Схемы измерений.
- 5.4. Частотные характеристики $U_K(f)$, и $\varphi(f)$.
- 5.5. Графики мгновенных значений напряжения $u_K(t)$ и тока $i(t)$ на частотах $f < f_0$ ($f = f_0 - \Delta f$), $f = f_0$ и $f > f_0$ ($f = f_0 + \Delta f$).
- 5.6. Выводы из анализа результатов расчета и эксперимента.

6. Контрольные вопросы и задачи

- 6.1. Какой вид имеет схема параллельного колебательного контура?
- 6.2. Как определяется комплексная \underline{Y} проводимость параллельного колебательного контура?
- 6.3. Каково условие резонанса в параллельном колебательном контуре?
- 6.4. Как определяется резонансная частота f_p параллельного колебательного контура?
- 6.5. Как определяется сопротивление R_p параллельного колебательного контура при резонансе?
- 6.6. Дайте определение параллельного колебательного контура с малыми потерями. Как определяется резонансная частота f_0 и резонансное сопротивление R_p этого контура?
- 6.7. Какой вид имеет частотная характеристика полного сопротивления $Z(\omega)$ параллельного колебательного контура?
- 6.8. Каков характер сопротивления параллельного колебательного контура на частотах $f < f_0$, $f = f_0$ и $f > f_0$?
- 6.9. Что такое обобщенная расстройка и как она определяется?
- 6.10. Как влияет внутреннее сопротивление источника и нагрузка на избирательность параллельного колебательного контура?
- 6.11. Определить резонансную частоту f_0 колебательного контура с малыми потерями с параметрами $L = 100 \text{ мкГн}$, $C = 400 \text{ пФ}$.
- 6.12. Определить характеристическое сопротивление ρ , добротность Q и резонансное сопротивление R_p параллельного колебательного контура с параметрами $L = 100 \text{ мкГн}$, $C = 400 \text{ пФ}$, $R = 5 \text{ Ом}$.
- 6.13. Определить ширину полосы пропускания параллельного колебательного контура, имеющего f_0 и $Q_0 = 100$.

6.14. ПРКК с $f_0 = 500$ кГц, $Q = 100$ и $\rho = 500$ Ом подключен к источнику с $R_u = 50$ кОм. Определить R_n , чтобы ширина ПП контура стала 20 кГц.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование ЛЭЦ при периодическом несинусоидальном воздействии

Цель работы: исследование на влияния параметров последовательной RL - и RC -цепей на форму тока и напряжения на элементах электрических цепей (ЭЦ) при периодических несинусоидальных воздействиях; определение действующих значений тока и напряжений на элементах цепи.

1. Краткие пояснения

Периодическая несинусоидальная ЭДС $e(t) = e(t + nT)$, где T – период функции $e(t)$, может быть представлена, с использованием метода суперпозиции, в виде постоянной ЭДС E_0 и суммы гармонических ЭДС с применением тригонометрического ряда Фурье, где $E_0 = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt$ – постоянная составляющая, равная среднему значению функции за период; $e_k = E_{km} \sin(k\omega_1 t + \varphi_k) = E'_{km} \sin k\omega_1 t + E''_{km} \cos k\omega_1 t$ – ЭДС k -ой гармоники; E_{km} , φ_k – амплитуда и начальная фаза ЭДС k -ой гармоники, которые определяются по формулам:

$$E'_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T e(t) \sin k\omega_1 t dt; \quad E''_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T e(t) \cos k\omega_1 t dt;$$

$$E_{km} = \sqrt{(E'_{km})^2 + (E''_{km})^2}; \quad \psi_k = \arctg \frac{E''_{km}}{E'_{km}}; \quad \omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T}$$

В работе используются периодические несинусоидальные ЭДС $e(t)$, приведенные на рис. 7.1.

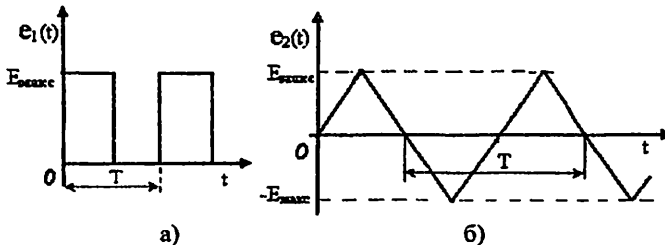


Рис. 7.1. Формы сигналов на входе ЭЦ

Разложение в ряд Фурье ЭДС $e(t)$, представленных на рис. 7.1, имеет вид

$$e_1(t) = E_0 + E_{1m} \sin \omega_1 t + E_{3m} \sin 3\omega_1 t + E_{5m} \sin 5\omega_1 t + \dots, \quad (7.1)$$

где $E_0 = E_{\max} / 2$; $E_{km} = 2E_{\max} / k\pi$; $k = 1, 3, 5, \dots$

$$e_2(t) = E_{1m} \sin \omega_1 t - E_{3m} \sin 3\omega_1 t + E_{5m} \sin 5\omega_1 t + \dots \quad (7.2)$$

где $E_{km} = 4E_{\max} / k^2 \pi$; $k = 1, 3, 5, \dots$

Для определения мгновенных значений токов (напряжений) нужно определить мгновенные значения токов (напряжений), вызванных ЭДС каждой гармоникой в отдельности, а затем их сложить

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} i_k \neq I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega_1 t + \psi_{ik}); \quad (7.3)$$

Для схем, приведённых на рис.7.2, амплитудные значения токов k -й гармоники определяются из выражений:

$$I_{km} = \frac{E_{km}}{Z_k} = \frac{E_{km}}{\sqrt{R^2 + (kX_L)^2}}; \quad (7.4)$$

$$I_{km} = \frac{E_{km}}{Z_k} = \frac{E_{km}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{X_C}{k}\right)^2}}; \quad (7.5)$$

где $X_L = \omega L = 2\pi fL$; $X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC)$ - индуктивное и ёмкостное сопротивления на первой основной гармонике.

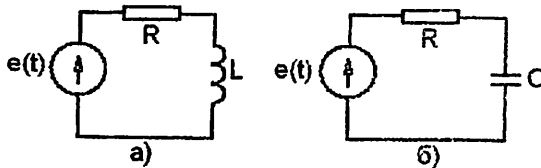


Рис. 7.2. Исследуемые RL - и RC -цепи

Амплитудные значения напряжений на элементах цепи (рис. 7.2) на k -й гармонике

$$U_{Rm}^{(k)} = R I_{km}; \quad U_{Lm}^{(k)} = k X_L I_{km}; \quad U_{Cm}^{(k)} = (X_C/k) I_{km}. \quad (7.6)$$

Действующие значения напряжений на элементах схем (рис.7.2) определяются по формуле

$$U = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots} \quad (7.7)$$

Действующие значения периодических несинусоидальных ЭДС разной формы (см. рис. 7.1) определяются из выражений

$$E = E_{\max} / \sqrt{2}; \quad (\text{рис. 7.1, а}); \quad (7.8)$$

$$E = E_{\max} / \sqrt{3}; \quad (\text{рис. 7.1, б}); \quad (7.9)$$

где E - действующее значение периодической несинусоидальной ЭДС.

Активная мощность периодического несинусоидального сигнала равна сумме активных мощностей отдельных гармоник

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} R I_k^2 = \sum_{k=0}^{\infty} P_k, \quad (7.10)$$

где U_k, I_k - действующие значения напряжения и тока на входе цепи, φ_k - фазовый сдвиг между напряжением и током на k -й гармонике.

Реактивная Q и полная мощность S цепи определяются:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k = \sum_{k=1}^{\infty} x_k I_k^2 = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k, \quad (7.11)$$

где реактивное сопротивление $x_k = kx_L$ для RL-цепи и $x_k = -x_C/k$ для RC-цепи,

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 I_k^2}. \quad (7.12)$$

В отличие от гармонических сигналов для периодических негармонических сигналов

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{иск}}^2} \quad (7.13)$$

Величина $P_{\text{иск}} = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$ носит название *мощности искажений* и характеризует степень различия в формах тока i и напряжения u . Чем больше форма кривой тока отличается от формы кривой напряжения тем больше мощность искажения $P_{\text{иск}}$.

Периодические несинусоидальные сигналы характеризуются *коэффициентом искажений*, равного отношению действующего значения напряжения первой гармоники к действующему значению напряжения периодического напряжения:

$$K_n = \frac{U_1}{U} = U_1 / \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \quad (7.14)$$

и *коэффициентом гармоник*, равного отношению действующего значения высших гармоник (начиная со второй) к действующему значению первой гармоники:

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}. \quad (7.15)$$

2. Предварительный расчёт.

2.1. Рассчитать амплитуды ЭДС первых трёх гармоник согласно варианту задания (см. табл. 7.1) по формулам (7.1) – (7.2) с учётом (7.8) – (7.9). При расчётах необходимо учесть, что частота периодического несинусоидального напряжения $f = 500$ Hz, что соответствует длительности периода $T = 1/f = 1/500 = 2$ ms = 2000 μ s.

Таблица 7.1

Параметры элементов цепей для предварительного расчета

Вариант №	Вид воздействия (рис.7.1)	Схема рис 7.2	Параметры элементов цепи			
			E, V	L, мГн	C, нФ	R, кΩ
1	$e_1(t)$	RL	0,6	70		0,2
2	$e_2(t)$	RC	0,95		10	20
3	$e_1(t)$	RC	1		20	10
4	$e_1(t)$	RL	0,7	50		0,1
5	$e_2(t)$	RC	0,95		50	5
6	$e_1(t)$	RL	1	70		0,2
7	$e_1(t)$	RL	0,8		100	0,3
8	$e_2(t)$	RC	0,95	85		2
9	$e_1(t)$	RL	0,5	30		0,2
10	$e_1(t)$	RL	0,9	50		0,2

При выполнении предварительного расчета и измерениях необходимо:

- установить действующее значение ЭДС E источника периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов напряжения $e_1(t)$ (см. рис.7.1,а) согласно номеру варианта (см. табл. 7.1). Номер варианта соответствует номеру персонального компьютера.

- действующее значение источника ЭДС E треугольных биполярных импульсов $e_2(t)$ не регулируется и равно $E=0,95$ V, внутреннее сопротивление этого источника $R_{вн} = 800 \Omega$.

Используя формулы (7.8)-(7.9), определить максимальное значение ЭДС E_{\max} , а по нему, используя формулы (7.1)-(7.2), определить амплитуды гармоник E_{km} при заданной форме воздействия (см. рис.7.1).

Записать выражение ЭДС $e(t)$ в виде суммы гармонических составляющих (7.1)-(7.2).

2.2. Рассчитать амплитудные значения токов $I_0, I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}$ в заданной цепи, вызванные ЭДС каждой гармоники в отдельности по формулам (7.4-7.5).

2.3. Рассчитать амплитудные значения напряжения на элементах цепи от тока каждой гармоники в отдельности по формуле (7.6).

2.4. Рассчитать результирующие действующие значения напряжений на элементах цепи по формуле (7.7).

Результаты расчёта занести в таблицы 7.2, 7.3.

Таблица 7.2

Результаты предварительного расчёта

Схема рис.7.2 ...; Сигнал рис.7.1....; $f = 500 \text{ Hz}$; $E = \dots \text{ V}$; $E_m = \dots \text{ V}$; $R = \dots \Omega$; $L = \dots \text{ mH}$; $C = \dots \text{ nF}$.									
k	$k\omega$	E_{km}	$X_L^{(k)}$	$X_C^{(k)}$	$Z^{(k)}$	I_{km}	$U_{Rm}^{(k)}$	$U_{Lm}^{(k)}$	$U_{Cm}^{(k)}$
	1/c	V	Ω			A	V		
0									
1									
3									
5									

Таблица 7.3

Действующие значения напряжения

	Предварительный расчет	Результаты измерений	Относительная погрешность
$U_R, \text{ V}$			
$U_L/U_C, \text{ V}$			

Дополнительное задание

2.5. Рассчитать активную P , реактивную Q и полную S мощности исследуемой цепи по формулам (7.11) – (7.13).

2.6. Рассчитать коэффициент искажений K_n и коэффициент гармоник K_r по формулам (7.14) - (7.15).

3. Выполнение работы

3.1. Измерение действующих значений напряжений

Для исследования RL -цепи собрать схему, приведённую на рис. 7.3.

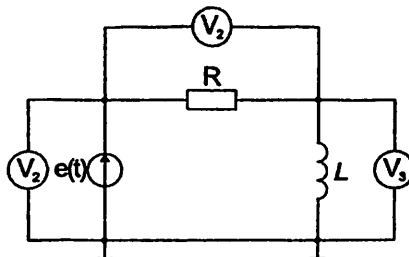


Рис.7.3. Исследование RL - цепи при воздействии периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$

Параметры элементов цепи рис.7.3 устанавливаются согласно номеру варианта (см. табл. 7.1.).

Вольтметр V_1 измеряет действующее значение E периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$, вольтметр V_2 – действующее значение напряжения на сопротивлении U_R , вольтметр V_3 – действующее значение напряжения на индуктивности U_L .

Для исследования RC -цепи в схеме рис.7.3 индуктивность заменяется ёмкостью. Результаты измерений напряжений заносятся в таблицу 7.3.

3.2. Исследование формы напряжения на элементах цепи с помощью осциллографа

Для исследования формы напряжения на индуктивности собрать схему, приведённую на рис. 7.4.

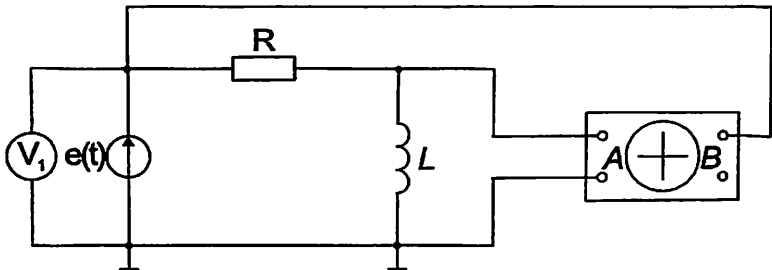


Рис.7.4. Исследование формы напряжения на индуктивности RC -цепи при воздействии периодической несинусоидальной ЭДС

На схеме рис.7.4 на вход A осциллографа подаётся напряжение источника периодического несинусоидального напряжения $u(t)=e(t)$. На вход B осциллографа подаётся напряжение на индуктивности $u_L(t)$.

Настройки осциллографа. Включаем осциллограф и, регулируя усиление и скорость развёртки осциллографа, получить на экране осциллографа изображения двух периодов ($2T$) $e(t)$ и $u_L(t)$. После чего необходимо аккуратно срисовать осциллограммы $e(t)$ и $u_L(t)$.

Для получения формы напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ необходимо в схеме рис.7.4 поменять местами сопротивление R и индуктивность L .

Для исследования формы напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ и ёмкости $u_C(t)$ необходимо в схеме рис.7.4. заменить индуктивность L на ёмкость C и установить параметры элементов цепи согласно требуемому варианту (см. табл.7.1).

4. Содержание отчёта

4.1. Электрическая схема, параметры её элементов и график входного воздействия.

4.2. Предварительный расчёт, результаты которого заносятся в таблицы 7.2, 7.3.

4.3. Результаты измерений действующих значений напряжения на элементах модели цепи (заносятся в таблицу 7.3).

4.4. Осциллограммы напряжений на элементах цепи.

5. Контрольные вопросы и задачи

5.1. Укажите полное сопротивление RL -цепи (рис.7.2,а) на 3-й гармонике, если на первой гармонике $R=10 \Omega$; $X_L=3,333 \Omega$.

Ответы: А) $Z^{(3)}=20 \Omega$; Б) $Z^{(3)}=14,1 \Omega$; В) $Z^{(3)}=12,1 \Omega$.

5.2. Укажите полное сопротивление RC -цепи (рис.7.2,б) на 3-й гармонике, если на первой гармонике $R=10 \Omega$; $X_C=20 \Omega$.

Ответы: А) $Z^{(3)}=12,1 \Omega$; Б) $Z^{(3)}=20 \Omega$; В) $Z^{(3)}=14,1 \Omega$.

5.3. Укажите действующее значение периодического несинусоидального тока $i(t)=2+4 \sin \omega_1 t+2,83 \sin 2\omega_1 t$ А.

Ответы: А) $I=8,83$ А; Б) $I=8$ А; В) $I=4$ А; Г) $I=5$ А.

5.4. Укажите правильное выражение мгновенного значения напряжения, если постоянная составляющая U_0 и амплитуды гармоник U_{km} имеют значения: $U_0=3,5$ V; $U_{1m}=6,5$ V; $U_{2m}=3,1$ V.

Ответы:

А) $u(t) = 3,5 + \sqrt{2} \cdot 6,5 \sin \omega_1 t + \sqrt{2} \cdot 3,1 \sin 2\omega_1 t$ V;

Б) $u(t) = 3,5 + \frac{6,5}{\sqrt{2}} \sin \omega_1 t + \frac{3,1}{\sqrt{2}} \sin 2\omega_1 t$ V;

В) $u(t) = 3,5 + 6,5 \sin \omega_1 t + 3,1 \sin 2\omega_1 t$ V.

5.5. Укажите правильное выражение мгновенного значения тока, если постоянная составляющая I_0 и действующие значения гармоник тока имеют значения: $I_0=1,5$ А; $I_1=2,3$ А; $I_2=1,2$ А.

Ответы:

А) $i(t) = 1,5 + \frac{2,3}{\sqrt{2}} \sin 2\omega_1 t + \frac{1,2}{\sqrt{2}} \sin 4\omega_1 t$ А;

Б) $i(t) = 1,5 + \sqrt{2} \cdot 2,3 \sin 2\omega_1 t + \sqrt{2} \cdot 1,2 \sin 4\omega_1 t$ А;

В) $i(t) = 1,5 + 2,3 \sin 2\omega_1 t + 1,2 \sin 4\omega_1 t$ А.

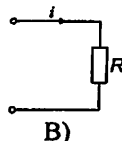
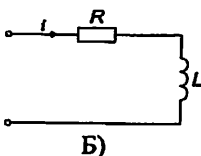
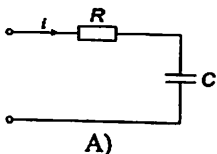
5.6. Укажите цепь, через которую протекает ток

$$i(t) = 2 \sin(\omega_1 t - 45^\circ) + 0.5 \sin(2\omega_1 t - 63^\circ) \text{ A,}$$

если напряжение на её зажимах

$$u(t) = 28,2 \sin \omega_1 t + 11,2 \sin 2\omega_1 t \text{ V.}$$

Ответы:



5.7. Укажите правильное значение активной мощности, потребляемой цепью, если на её входе мгновенные значения напряжений и тока описываются выражениями

$$u = 1,5 + 2 \sin(\omega_1 t + 80^\circ) \text{ V; } i = 0,5 + 3 \sin(\omega_1 t + 80^\circ) \text{ A.}$$

Ответы: А) $P = 2,5 \text{ W}$; Б) $P = 1,5 \text{ W}$; В) $P = 3,75 \text{ W}$.

5.8. Укажите правильное значение коэффициента искажений K_n для периодического напряжения

$$u = 3 + 5 \sin \omega_1 t + 2 \sin 2\omega_1 t + \sin 3\omega_1 t + 0,5 \sin 4\omega_1 t \text{ V.}$$

Ответы: А) $K_n = 0,52$; Б) $K_n = 0,72$; В) $K_n = 0,82$.

5.9. Укажите правильное значение коэффициента гармоник для напряжения

$$u = 5 \sin \omega_1 t + 0,5 \sin 2\omega_1 t + 0,1 \sin 3\omega_1 t \text{ V.}$$

Ответы: А) $K_r = 0,2$; Б) $K_r = 0,1$; В) $K_r = 0,3$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

Исследование переходных процессов в RC и RL- цепях

Цель работы: исследование переходных процессов в последовательных RL- и RC- цепях; изучение влияния параметров этих цепей на характер переходного процесса.

1. Краткие пояснения

Переходной процесс исследуется в RC- цепи, изображённой на рис.8.1,а. Входной сигнал задаётся источником напряжения $u_{вх}$ и представляет собой периодическую последовательность однополярных прямоугольных импульсов (см. рис.8.1,б).

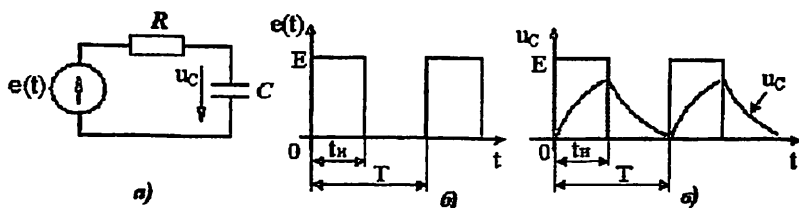


Рис. 8.1. Исследуемая RC-цепь (а), входное напряжение (б), напряжение на ёмкости (в)

Напряжение на входе RC- цепи (рис. 8.1,а) $e(t) = E = u_R + u_C$. Если учесть, что $u_R = Ri$ и $i = Cdu_C/dt$, то переходной процесс в RC-цепи описывается дифференциальным уравнением

$$E = RC(du_C/dt) + u_C, \quad (8.1)$$

которому соответствует решение

$$u_C = u_{Cнр} + u_{Cсв} = E - E \exp(-t/\tau), \quad u_R = E \exp(-t/\tau), \quad (8.2)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи, которая равна времени, в течение которого свободная составляющая тока или напряжения в цепи уменьшится по сравнению с его начальным значением в $e = 2,73$ раза. Постоянную времени τ можно найти графически как длину подкасательной, проведённой в любой точке графика свободного процесса, и в частности через начальную точку графика (рис. 8.2, а).

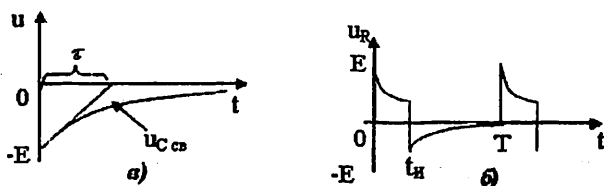


Рис. 8.2. Свободная составляющая напряжения на ёмкости (а), напряжение на сопротивлении (б)

Реакция на прекращение импульса в интервале $t_H \leq t \leq T$, т.е. при $u_{вх} = 0$ описывается выражениями

$$u_C = u_C(t_H) \exp(-(t - t_H)/\tau); \quad u_R = -u_C, \quad (8.3)$$

где $u_C(t_H) = E(1 - \exp(-t_H/\tau))$.

Графики напряжений на емкости u_C и сопротивлении u_R согласно (8.3) показаны на рис.8.1,в и рис.8.2,б.

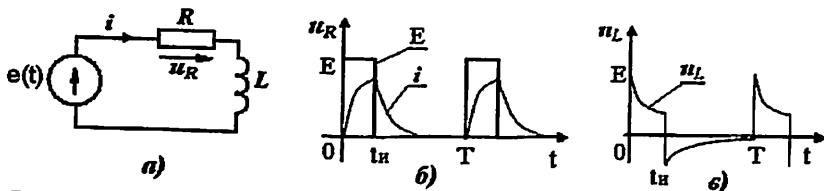


Рис.8.3. RL-цепь (а), напряжение на сопротивлении (б), напряжение на индуктивности (в)

На входе RL-цепи (рис. 8.3,а) действует тот же самый сигнал, что и раньше (рис. 8.1,б). Переходной процесс в такой цепи описывается дифференциальным уравнением $u_{вх} = u_R + u_L = Ri + Ldi/dt$, которому соответствует характеристическое уравнение $R + Lp = 0$ и его корень $p_1 = -R/L = -1/\tau$, где $\tau = L/R$ - постоянная времени RL - цепи.

При $0 \leq t \leq t_H$ напряжение на сопротивлении u_R и индуктивности u_L описываются выражениями, соответствующими прекращению импульса, эквивалентному короткому замыканию цепи на входе

$$u_L = E \exp(-t/\tau); \quad u_R = E - u_L = E(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (8.4)$$

в интервале $t_H \leq t \leq T$ ($u_{вх} = 0$) и описывается выражениями

$$u_R = u_R(t_H) \exp(-(t - t_H)/\tau); \quad u_L = -u_R, \quad (8.5)$$

где $u_R(t_H) = E(1 - \exp(-t_H/\tau))$.

Графики u_R , u_L описываемые выражениями (8.4) и (8.5) представлены на рис. 8.3, б и в.

Необходимо учитывать, что приведённые выше формулы расчета напряжений на ёмкости u_C , индуктивности u_L и сопротивлении u_R справедливы для цепей, у которых постоянная времени $\tau \leq T/6$, при которой к приходу следующего прямоугольного импульса переходной процесс практически закончится.

Для периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов, у которых $t_H = T/2$, при $\tau \leq T/6$ $u_C(t_H) \cong E$ в RC-цепи и $u_R(t_H) \cong E$ в RL-цепи, к моменту окончания импульса переходной процесс практически заканчивается. При этом существенно упрощаются расчётные формулы:

для RC-цепи при $t_H \leq t \leq T$

$$u_C = E \exp(-(t - t_H)/\tau); \quad u_R = -u_C, \quad (8.6a)$$

для RL-цепи при $t_H \leq t \leq T$

$$u_R = E \exp(-(t - t_H)/\tau); \quad u_L = -u_R. \quad (8.7a)$$

Если за начало отсчёта времени в интервале $t_H \leq t \leq T$ принять $t_H = 0$, то расчётные формулы (8.6), (8.7) упрощаются:

для RC-цепи

$$u_C = E \exp(-t/\tau); \quad u_R = -u_C, \quad (8.6b)$$

для RL-цепи

$$u_R = E \exp(-t/\tau); \quad u_L = -u_R. \quad (8.7b)$$

2. Предварительный расчёт

2.1. Рассчитать постоянную времени τ цепи RC (рис. 8.1,а) по формуле $\tau = RC$. Значения C и R определяется номером варианта (см. табл. 8.1).

Таблица 8.1

Параметры элементов RC - цепи

Вариант №	E, V	C, nF	R, kΩ	Вариант №	E, V	C, nF	R, kΩ
1	0,2	10	20	6	0,3	50	7
2	0,4	20	10	7	0,5	60	5
3	0,6	30	7	8	0,7	70	3
4	0,8	40	5	9	0,9	80	2
5	1,0	50	3	10	1,0	100	1

2.2. Рассчитать постоянную времени τ цепи RL (рис. 8.3) по формуле $\tau = L/R$. Значение L и R определяется номером варианта в соответствии с табл. 8.2.

Таблица 8.2

Параметры элементов RL - цепи

Вариант №	E, V	L, mHn	R, Ω	Вариант №	E, V	L, mHn	R, Ω
1	0,2	10	100	6	0,3	35	300
2	0,4	20	200	7	0,5	50	500
3	0,6	30	300	8	0,7	70	700
4	0,8	35	400	9	0,9	80	800
5	1,0	50	500	10	1,0	85	1000

2.3. Для RC-цепи (см. рис.8.1,а) при параметрах R, C и E, взятых из табл. 8.1, при частоте следования прямоугольных импульсов $f = 500 \text{ Hz}$ и скважности $q = T / t_n = 2$ рассчитать временные зависимости напряжения на ёмкости $u_C(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$, для $t = 0; 0,1T; 0,2T; 0,5T; 0,6T; 0,7T; T$. Результаты расчёта занести в табл. 8.3.

2.4. Для RL-цепи (см. рис.8.3,а) для значений R, L и E, взятых из табл. 8.2, при частоте следования прямоугольных импульсов (см. рис.8.1,б) $f = 500 \text{ Hz}$, и скважности $q = T / t_n = 2$ рассчитать временные зависимости напряжения на индуктивности $u_L(t)$, напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ для $t = 0; 0,1T; 0,2T; 0,5T; 0,6T; 0,7T; T$.

Результаты расчётов свести в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Результаты предварительного расчёта и измерений

Формулы для расчёта		RC(8.2); RL(8.4)				RC(8.3); RL(8.5)			
		0	0,1T	0,2T	0,5T	0,5T	0,6T	0,7T	T
t									
t, мкс									
$u_R, \text{В}$	Расч.								
	Изм.								
$u_L, \text{В}$	Расч.								
	Изм.								
$u_C, \text{В}$	Расч.								
	Изм.								

3. Выполнение работы

3.1. Исследование переходного процесса в RL-цепи

Собрать схему, приведённую на рис.8.4.

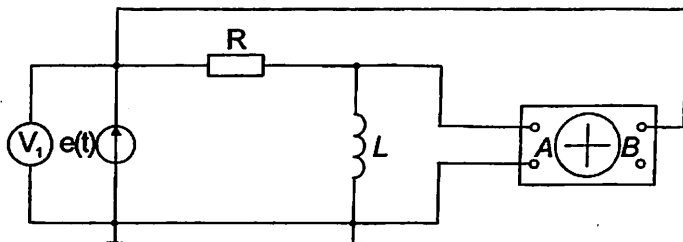


Рис.8.4. Исследование переходного процесса в RL-цепи

Установить параметры элементов цепи согласно требуемому номеру варианта (см. табл. 8.3).

Схема рис. 8.4 позволяет исследовать переходной процесс в RL- цепи при включении её на постоянное напряжение E (интервал $0 \leq t \leq t_n$) и при коротком замыкании цепи RL (интервал $t_n \leq t \leq T$). В данном случае на

экране осциллографа можно наблюдать осциллограммы напряжения на индуктивности $u_L(t)$ и входного напряжения $u_{вх}(t) = e(t)$. Для получения осциллограммы напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ необходимо в схеме рис.8.4 индуктивность и сопротивление поменять местами.

Изменяя скорость развёртки и усиление А и В каналов осциллографа выполнить его настройку таким образом, чтобы было удобно срисовать с его экрана осциллограммы с соблюдением масштаба и выполнить по ним необходимые измерения. Результаты измерений заносятся в табл. 8.3.

3.2. Исследование переходного процесса в RC-цепи

Для исследования переходного процесса в RC - цепи в схеме рис. 8.4. достаточно индуктивность L заменить на ёмкость C. Параметры элементов новой схемы устанавливаются согласно требуемому номеру варианта (см. табл. 8.1).

Изменяя скорость развёртки и усиление А и В каналов осциллографа выполнить его настройку таким образом, чтобы было удобно срисовать с его экрана осциллограммы с соблюдением масштаба и выполнить по ним необходимые измерения. Результаты измерений заносятся в табл. 8.3.

4. Содержание отчёта

В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены:

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Электрическая схема исследуемой цепи и её исходные данные.
- 4.3. Расчётные формулы и результаты предварительного расчёта и измерений.
- 4.4. Графики, полученные в результате измерений (осциллограммы).
- 4.5. Выводы по результатам исследований.

5. Контрольные вопросы

5.1. Постоянная времени цепи RL равна:

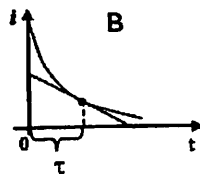
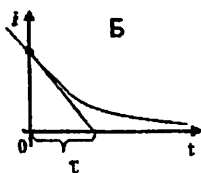
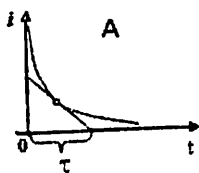
Ответы: А) L/R Б) LR В) R/L

5.2. Постоянная времени цепи RC равна:

Ответы: А) $1/(RC)$ Б) RC В) C/R

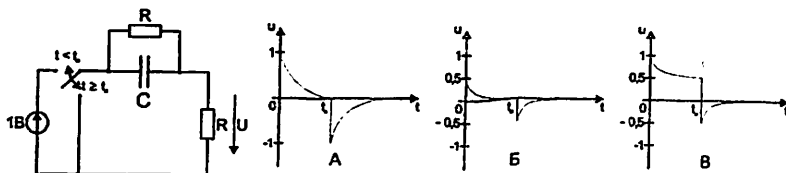
5.3. Графическое определение τ ведётся согласно рисунку:

Ответы:



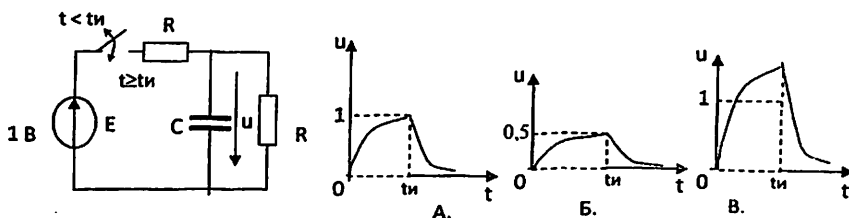
5.4. График переходного напряжения u на выходе цепи:

Ответы:

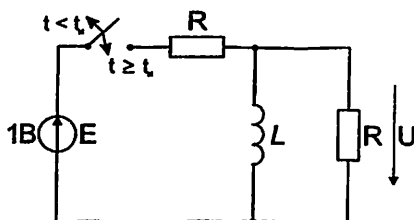


5.5. График переходного напряжения u на выходе цепи:

Ответы:

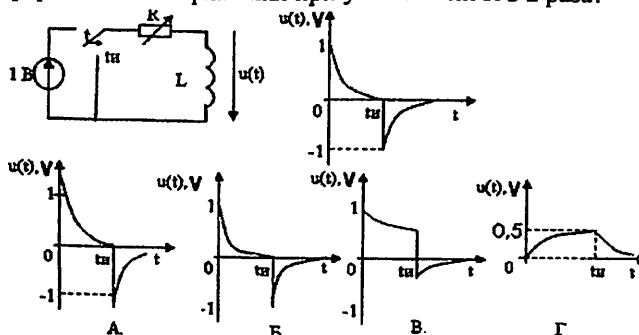


5.6. Используя ответы задания 5.4, указать график переходного напряжения u для цепи:



5.7. Цепи RC соответствует выходное напряжение вида $u(t)$. Как изменится форма этого напряжения при уменьшении R в 2 раза?

5.8. Цепи RL соответствует выходное напряжение вида $u(t)$. Как изменится форма этого напряжения при увеличении R в 2 раза?



Литература

1. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.Н., Страхов С.В.- М.: Энергоатомиздат, 1989. –528 с.
2. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей: Учебник для вузов.- М.: Радио и связь, 1986.- 544 с.
3. Шебес М.Р. Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1990.- 544с.
4. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.Е. Основы теории цепей: учебник для вузов.-М.: Радио и связь, 2000.-592 с.
5. Фриск В.В. Основы теории цепей. Учебное пособие. - М.: ИП РадиоСофт, 2002.- 288 с.
6. Баскаков С.И. Радиотехнических цепи и сигналы. Учебник для вузов по спец. «Радиотехника» - М.: Высшая школа, 2002. - 448с.
7. Попов В.П. Основы теории цепей, Учебник для вузов спец. «Радиотехника» - М.: Высшая школа, 2003.- 496с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Государственный стандарт Республики Узбекистан O'z DSt 8/012:2005
«Государственная система обеспечения
единства измерений Республики Узбекистан. ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН»

Таблица 1.

Основные единицы Международной системы единиц (SI)

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Определение
Длина	<i>L</i>	Метр	m	Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458\text{ s}$ [XVII ГКМВ (1983 г.), резолюция]
Масса	<i>M</i>	Килограмм	kg	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1989г.) и III ГКМВ (1991г.)]
Время	<i>T</i>	Секунда	S	Секунда есть время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.), резолюция]
Электрический ток (Сила электрического тока)	<i>I</i>	Ампер	A	Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади круглого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 m один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 m силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}\text{ N}$ [МКМВ (1946 г.), резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948г.)]

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Таблица 2.

Производные единиц СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием наименований и обозначений основных единиц СИ

Величина		Единица	
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение
Площадь	L^2	Квадратный метр	m^2
Объем, вместимость	L^3	Кубический метр	M^3
Скорость	LT^{-1}	Метр в секунду	m/s
Ускорение	LT^{-2}	Метр на секунду в квадрате	m/s^2
Плотность	ML^{-3}	Килограмм на кубический метр	kg/m^3
Волновое число	L^{-1}	Метр в минус первой степени	m^{-1}
Удельный объем	$M^{-1} L^3$	Кубический метр на килограмм	m^3/kg
Плотность электрического тока	$L^{-2} I$	Ампер на квадратный метр	A/m^2
Напряженность магнитного поля	$L^{-1} I$	Ампер на метр	A/m

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Таблица 3.

Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования и обозначения

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражение через основные и производные единицы СИ
Плоский угол	L	РадIAN	<i>rad</i>	$m \cdot m^{-1} = 1$
Частота	T^{-1}	Герц	<i>Hz</i>	s^{-1}
Сила	$LM T^{-2}$	НьюТон	<i>N</i>	$m \cdot k \cdot g \cdot s^{-2}$
Давление	$L^{-1} M T^{-2}$	Паскаль	<i>Pa</i>	$m^{-1} \cdot k \cdot g \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	Джоуль	<i>J</i>	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-2}$
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	Ватт	<i>W</i>	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-3}$
Электрический заряд, количество электричества	TI	Кулон	<i>C</i>	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	Вольт	<i>V</i>	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-3} A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^2 M T^{-3} I^2$	Фарада	<i>F</i>	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-3} A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	Ом	Ω	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-3} A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	Сименс	<i>S</i>	$m^{-2} \cdot k \cdot g^{-1} \cdot s^3 A^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^3 M T^{-2} I^{-1}$	Вебер	<i>Wb</i>	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-2} A^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	Тесла	<i>T</i>	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	Генри	<i>H</i>	$m^2 \cdot k \cdot g \cdot s^{-2} A^{-2}$
Температура Цельсия	θ	Градус Цельсия	$^{\circ}C$	<i>K</i>
Световой поток	J	Люмен	<i>lm</i>	$cd \cdot sr$
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	<i>Lx</i>	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Титульный лист отчета по лабораторной работе (образец)

**УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Кафедра «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

ОТЧЕТ

ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2

«Исследование источников напряжения и тока»

по курсу «Теория электрических цепей»

Выполнил _____

(№ группы Фамилия И.О.)

Принял _____

(Ф.И.О. преподавателя)

Содержание

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Изучение лабораторного стенда	5
Лабораторная работа № 2. Исследование источников напряжения и тока	14
Лабораторная работа № 3. Экспериментальная проверка законов Кирхгофа в резистивных цепях	20
Лабораторная работа № 4. Исследование RL - и RC - цепей при гармоническом воздействии	27
Лабораторная работа № 5. Исследование последовательного колебательного контура.....	34
Лабораторная работа № 6. Исследование параллельного колебательного контура.....	42
Лабораторная работа № 7. Исследование ЛЭЦ при периодическом несинусоидальном воздействии.....	51
Лабораторная работа № 8. Исследование переходных процессов в RL - и RC -цепях	59
Литература	66
Приложения	67

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ
ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

ЧАСТЬ I

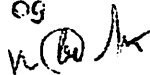
Составители: Алимходжаев К.Т., Белова Л.Н., Иванова Е.В., Козлов В.А.

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры ТЭЦ.

Протокол № 32 от 7.06.09

Ответственный редактор

Корректор



Алимходжаев К.Т.

Хамдам-Зода Л.Х.

Формат 60x84 1/16

Заказ № - 209. Тираж 75

Отпечатано в Издательско полиграфическом
центре «ALLOQASHI» при ТУИТ
Ташкент ул. Амир Темура, 108