

499

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра теории
электрических цепей

**ЛАБАРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
ЧАСТЬ 1**

(в компьютерном классе с использованием
программы Electronics Workbench)

O'QUV ZALI

TATU
KUTUBXONASI

Ташкент 2004

Предисловие

Усилиями многих специалистов персональный компьютер стал незаменимым инструментом в руках человека практически во всех областях знаний. Сегодня стало уже совершенно очевидно, что анализ и экспериментальное исследование процессов в электротехнике и электронике невозможны без применения компьютера.

Существует большое количество программ моделирования электронных систем, отвечающих в той или иной степени задачам анализа их работы. Большинство из них требуют серьёзной предварительной подготовки и наличия специальных знаний. При этом из круга «посвящённых» исключается большое число потенциальных пользователей, перед которыми стоят относительно простые задачи, например, студенты электротехнических вузов.

Значительное расширение круга пользователей возможно лишь тогда, когда процесс моделирования будет максимально приближён к реальному эксперименту. В этом случае человек, выполняя естественную последовательность таких операций, как сборка схемы, подключение к ней измерительных приборов, задание параметров источников входных воздействий и установку режимов работы на панели измерительных приборов, получал бы результаты измерений в привычной для него форме. Отображение на дисплее компьютера знакомых приборов, таких как амперметр, вольтметр, мультиметр, генератор, осциллограф, делает процесс исследования наиболее естественным и понятным.

Изложенными свойствами обладает комплекс программ анализа электронных схем **Elektronis Workbench (EWB)**. Адаптация пользователя к основным операциям **EWB** занимает не более 5 минут. Программа **EWB** существует на семи языках. Она постоянно совершенствуется, появляются новые версии. Отметим, что все версии программы **EWB** доступны пользователям и включены во многие компакт-диски, посвященные проблемам анализа электронных схем. Эту программу используют студенты, преподаватели и инженеры в качестве основного инструмента для проведения исследований и, в частности, в учебном процессе во многих технических вузах.

В ТУИТ в последнее время взят курс на расширение использования компьютерных технологий в учебном процессе. Использование программы **EWB** на кафедре Теории Электрических Цепей (ТЭЦ) наилучшим образом отвечает современным требованиям эффективного обучения.

Данное методическое руководство составлено в соответствии с программой ТЭЦ-1 и ТОЭ-1 для специальностей по направлению В5522200 «телекоммуникации». Оно включает в себя 6 виртуальных лабораторных работ, выполняемых в компьютерных классах. В каждой лабораторной работе содержится краткая теоретическая часть, с помощью которой выполняется предварительный расчёт, а также методика выполнения лабораторной работы на ПЭВМ, методика оформления результатов расчёта и эксперимента. В конце описания каждой лабораторной работы содержатся контрольные работы, а также список

литературы, рекомендуемой для углубленной проработки изучаемого материала.

Все лабораторные работы выполняются в компьютерном классе фронтальным методом.

Учебное пособие подготовлено Козловым В.А., методическое руководство осуществлялось заведующим кафедрой ТЭЦ ТУИТ к.т.н., доц. Зелинским М.М., компьютерная верстка выполнена Немтиновой Н.В., Щеголевым О.Г. и Козловым В.А.

Введение

Домашняя подготовка.

Подготовка к выполнению каждой лабораторной работы должна начинаться за 5-7 дней до выполнения, с тем, чтобы была возможность основательно разобраться в теоретической части материала, правильно и вовремя выполнить предварительный расчёт, а также построить графики по результатам предварительного расчёта. Важной частью подготовки являются ответы на контрольные вопросы.

Правила работы в компьютерном классе

До начала работы в компьютерном классе студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности (ТБ) и в последующем выполнять все изученные положения.

Нельзя работать на неисправной машине. Если на металлических частях ПЭВМ обнаружено напряжение, заземляющий провод оборван, необходимо сообщить об этом преподавателю, ведущему занятие.

Заземляющий контакт розетки питания, в который включается вилка питания, должен быть заземлён. Вблизи персонального компьютера (ПК) не должно быть батарей отопления или водопроводных труб.

В компьютерном классе должна быть чистота, дисциплина и порядок. Необходимо следить за тем, чтобы на системный блок, монитор и клавиатуру не клали посторонние предметы. Не допускать к работе на ПК посторонних лиц.

При завершении работы на ПК необходимо ознакомить преподавателя с результатами работы и получить его подпись, после чего может быть выключен ПК обслуживающим персоналом компьютерного класса. Выключение ПК студентом категорически запрещается, т.к. это может привести к его повреждению.

Выполнение работы

Перед выполнением каждой лабораторной работы необходимо внимательно ознакомиться с соответствующим текстовым файлом, в котором содержится:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- краткие теоретические сведения по изучаемой теме;
- исходные данные для предварительного расчёта;
- порядок выполнения лабораторной работы;
- содержание отчёта;
- контрольные вопросы для подготовки к защите лабораторной работы.

Для выполнения лабораторной работы на ПК необходимо

- 1) Загрузить компьютер программой **Electrons Workbench**. Для этого достаточно один раз щёлкнуть мышкой по пиктограмме



, расположенной на рабочем столе ПК или на нижней

линейке дисплея монитора.

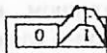
- 2) Загрузить в ПК требуемый схемный файл. Для этого на линейке функциональных клавиш, расположенных в верхней части дисплея ПК, щёлкнуть левой клавишей мышки на пиктограмме



чего открывается меню папок.

Из них выбирается папка **LabTEC** и по ней делается двойной щелчок мышкой. После чего появляется список файлов всех лабораторных работ типа **Lb2-1**, что означает: лабораторная работа №2 и её первый схемный файл. Двойным щелчком мышки на пиктограмме этого файла производится его загрузка, и на экране дисплея монитора появляется требуемая схема. Необходимо учитывать, что в процессе работы схема студентами не должна изменяться. Можно только изменять (переустанавливать) лишь параметры элементов согласно заданию преподавателя или номера варианта.

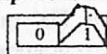
- 3) Выполнение расчёта (моделирование). Для этого надо один раз щёлкнуть мышкой по кнопке выключателя,



расположенной в правом верхнем углу окна **Electronics Workbench**.

Для того чтобы приостановить процесс моделирования, надо сделать один щелчок мышкой по кнопке **Pause**, расположенной ниже кнопки выключателя. Для прекращения моделирования надо однократно

щёлкнуть мышкой на кнопке выключателя



Для продолжения исследований вызывается (загружается в ПК) следующий схемный файл и т.д.

Оформление отчёта и защита выполненной работы

Перед началом выполнения новой лабораторной работы студент должен предоставить преподавателю отчёт о предыдущей работе. На титульном листе должны быть: название министерства или ведомства, к которому относится учебное заведение. (Узбекское агентство связи и информатизации), название университета, кафедры, номер и названия лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, номер группы, фамилия и инициалы преподавателя, проводящего лабораторные занятия, город и год выполнения работы. В отчёте приводится цель работы, исследуемые схемы, расчетные формулы, таблицы с результатами предварительного расчёта и моделирования, графики и выводы из анализа проделанной работы. Защита лабораторной работы осуществляется во время занятия или в специально отведённое для этого время.

Лабораторная работа №1

Исследование источников постоянного напряжения и тока

Цель работы: Изучить внешние характеристики независимых и зависимых (управляемых) источников постоянного напряжения и тока на ПК с помощью программы **Electronics Workbench**

1.1. Теоретические сведения

Элементы электрических цепей (ЭЦ) можно разделить на активные и пассивные. К активным элементам относятся элементы генерирующие электрическую энергию. В ТЭЦ используют идеализированные независимые и зависимые (управляемые) источники напряжения и тока.

Независимыми источниками напряжения (рис.1.1) называют такие источники электрической энергии, напряжение на зажимах которых не зависит от тока, протекающего через них. Внутреннее сопротивление таких источников равно нулю.

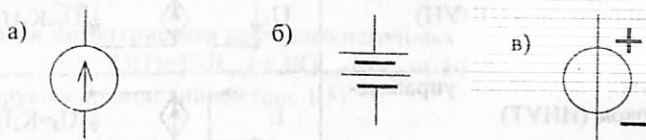


Рис. 1.1. Обозначение независимых источников напряжения.

Стандарт: а) Россия; б) США; в) Германия

Независимыми источниками тока (рис.1.2) называют такие источники электрической энергии, ток которых не зависит от напряжения на его зажимах. Внутреннее сопротивление такого источника равно бесконечности.

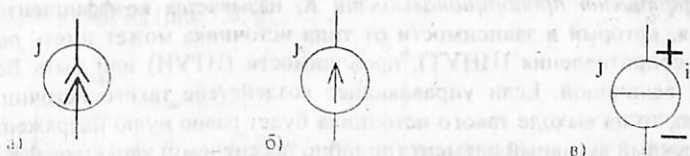


Рис. 1.2. Обозначение независимых источников тока.

Стандарт: а) Россия; б) США; в) Германия

Основной характеристикой источника напряжения и тока является его внешняя характеристика, представляющая зависимость напряжения на его зажимах от протекающего через него тока $U(I)$. Внешние характеристики идеализированных источников напряжения и тока приведены на рис. 1.3.

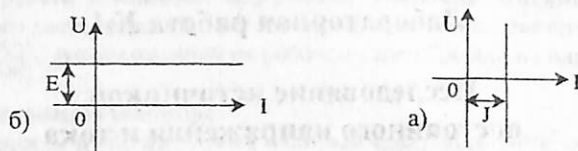
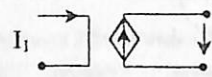


Рис. 1.3. Внешние характеристики источника постоянного:
а - напряжения; б - тока.

В отличие от независимых идеализированные зависимые источники энергии имеют не одну пару зажимов, а две: входную управляющую и выходную, т.е. зависимые источники являются четырёхполюстниками. Различают зависимые источники напряжения и зависимые источники тока (табл.1.1).

Таблица 1.1
Зависимые источники напряжения и тока

п	Наименование	Обозначение	K_i
1	Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)		U_2/U_1
2	Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)		U_2/I_1
3	Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)		I_2/U_1
4	Источник тока, управляемый током		I_2/I_1

Коэффициент пропорциональности K_i называется коэффициентом управления, который в зависимости от типа источника может иметь размерность сопротивления (ИНУТ), проводимости (ИТУН) или быть безразмерной величиной. Если управляющее воздействие такого источника равно нулю, то на выходе такого источника будет равно нулю напряжение или ток. Каждый активный элемент (подобно пассивному) характеризуется только одним параметром – напряжением или током на его выходных зажимах.

С помощью идеализированных активных и пассивных элементов можно промоделировать любой реальный элемент электрической цепи – представить его в виде схемы замещения, которая с достаточной для данного элемента точностью отражает процессы, происходящие в таком элементе.

Реальный источник электрической энергии можно представить двумя схемами замещения: последовательной (рис.1.4, а) и параллельной (рис.1.4, б)

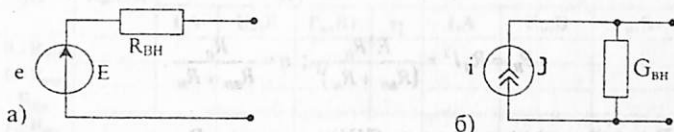


Рис.1.4. Схемы замещения реальных источников

Последовательная схема замещения реального источника (Рис.1.4,а) содержит последовательные соединения источника ЭДС (e, E) и внутреннего сопротивления $R_{вн}$. Параллельная схема замещения реального источника (Рис.1.4,б) содержит параллельное соединение источника тока (i, J) и внутренней проводимости $G_{вн}=1/R_{вн}$. Обе схемы эквивалентны и в конкретных случаях используются той схемой замещения реального источника электрической энергии, которая позволяет проще и быстрее решить поставленную задачу.

Внешняя характеристика реального источника

$$U(I) = E - R_{вн}I = J/G_{вн} - I/G_{вн} = (J - I)/G_{вн}$$

аппроксимируется прямой линией (рис.1.5)

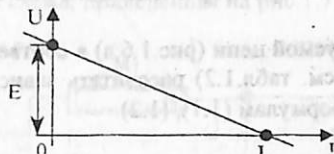


Рис.1.5. Внешняя характеристика реального источника

В простейшем случае к реальному источнику подключается сопротивление нагрузки R_H (рис.1.6, а).

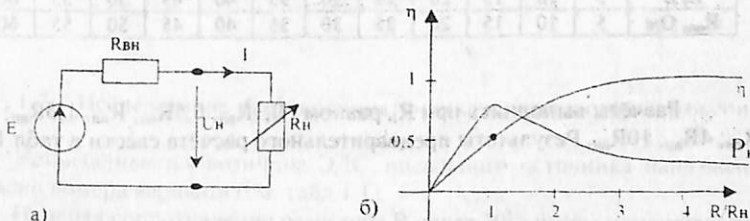


Рис.1.6. Схема нагруженного реального источника (а) и его нагрузочные характеристики (б)

В сопротивлении нагрузки R_H ток I , напряжение U_H , мощность P_H и к.п.д. источника η определяются по формулам

$$I = \frac{E}{R_{BH} + R_H}; \quad U_H = R_H I = E \frac{R_H}{R_{BH} + R_H}; \quad (1.1)$$

$$P_H = R_H I^2 = \frac{E^2 R_H}{(R_{BH} + R_H)^2}; \quad \eta = \frac{R_H}{R_{BH} + R_H}. \quad (1.2)$$

В режиме холостого хода (ХХ) источника $R_H = \infty$ и в режиме короткого замыкания (КЗ) $R_H = 0$ мощность в нагрузке не выделяется ($P_H = 0$). Максимальная мощность в сопротивлении нагрузки выделяется при согласованном режиме работы, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника ($R_H = R_{BH}$).

$$P_{H_{\max}} = \frac{E^2}{4R_H} \quad (1.3)$$

При этом к.п.д. источника будет равен $\eta = 0,5 = 50\%$. В связи с таким низким к.п.д. согласованный режим широко применяется в проводной электросвязи, где используются малые мощности (до 10 Вт). В электротехнических установках большой мощности применяется режим работы, при котором $R_H \gg R_{BH}$, при этом достигается высокий коэффициент полезного действия системы передачи.

2. Предварительный расчёт

Для исследуемой цепи (рис.1.6,а) в соответствии с номером варианта задания (см. табл.1.2) рассчитать зависимости $I(R_H)$, $U_H(R_H)$, $P_H(R_H)$, $\eta(R_H)$ по формулам (1.1), (1.2).

Таблица 1.2

Исходные данные для предварительного расчёта.

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E, В	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
R _{вн} , Ом	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

Расчёты выполнить при R_H равном $0,1R_{BH}$; $0,5R_{BH}$; R_{BH} ; $1,5R_{BH}$; $2R_{BH}$; $4R_{BH}$; $10R_{BH}$. Результаты предварительного расчёта свести в табл.1.3.

Таблица 1.3.

Результаты предварительного расчёта и эксперимента.

№	Задано		E = ...В; R _{нн} = ...Ом.									
	R _н	R _{нн} , Ом	Предварительный расчёт				Результаты измерений					
			I, А	U _{нн} , В	P _{нн} , Вт	η	I, А	U _{нн} , В	P _{нн} , Вт	η		
1	0,1R _{нн}											
2	0,5R _{нн}											
3	R _{нн}											
4	1,5R _{нн}											
5	2 R _{нн}											
6	4 R _{нн}											
7	10R _{нн}											

По результатам предварительного расчёта (см. табл.1.3) построить графики зависимостей $I(R_n)$, $U_{нн}(R_n)$, $P_{нн}(R_n)$, $\eta(R_n)$.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование идеального источника постоянного напряжения

Производится загрузка программы EWB; раскрывается, каталог файлов папки Lab_TEC, загружается файл Lab1_1, при этом на дисплее монитора появляется схема, приведённая на рис.1.7.

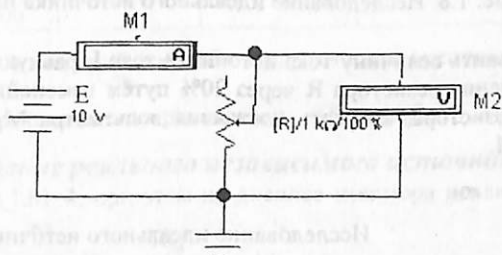


Рис. 1.7. Исследование идеального источника постоянного напряжения

Устанавливается величина ЭДС идеального источника напряжения согласно номера варианта (см. табл.1.1).

Изменяя сопротивление резистора R через 20% путём изменения положения движка этого резистора, записать показания амперметра M₁ и вольтметра M₂. Результат измерений занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Исследование идеального источника напряжения.

п	R, Ом	U, В	I, мА
1	200		
2	400		
3	600		
4	800		
5	1000		

По результатам измерений построить внешнюю характеристику идеального источника напряжения $U(I)$.

3.2. Исследование идеального источника постоянного тока

Загрузить файл Lb1_2, при этом на дисплее монитора появится схема, приведённая на рис.1.8.

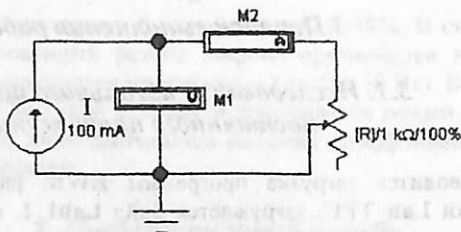


Рис. 1.8. Исследование идеального источника постоянного тока

Установить величину тока источника тока I , равную 100 мА. Изменяя сопротивление резистора R через 20% путём изменения положения движка этого резистора, записать показания вольтметра M_1 и амперметра M_2 в табл. 1.4.

Таблица 1.4.

Исследование идеального источника тока

п	R, Ом	U, В	I, А
1	0		
2	200		
3	400		
4	600		
5	800		
6	1000		

По результатам измерений (см. табл.1.4) построить внешнюю характеристику идеального источника тока $U(I)$.

3.3. Исследование ИНУТ

Загрузить файл Lb1_3, при этом на дисплее монитора появится схема, приведённая на рис.1.9.

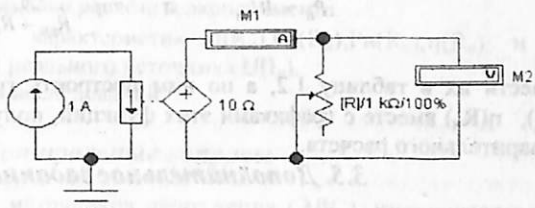


Рис. 1.9. Исследование ИНУТ

Изменяя сопротивление резистора R путём изменения положения движка этого резистора, записать показания амперметра M_1 и вольтметра M_2 в табл.1.5.

Таблица 1.5

Исследование ИНУТ

n	$R, \text{Ом}$	$U, \text{В}$	I, mA	$R_{\text{внр}}, \text{Ом}$
1	200			
2	400			
3	600			
4	800			
5	1000			

По результатам измерений (см. табл.1.5) построить внешнюю характеристику ИНУТ $U(I)$.

Определить управляющее сопротивление $R_{\text{внр}} = U_2 / I_1$.

3.4. Исследование реального независимого источника

Загрузить файл Lb1_4, при этом на дисплее монитора появится схема, приведённая на рис.1.10.

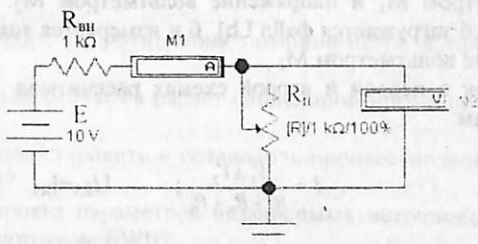


Рис. 1.10. Исследование реального источника

Установить значения сопротивлений резисторов $R_{вн}$ согласно номера варианта (см. табл.1.1). Изменяя значения $R_{н}$, используемые в предварительном расчёте (см. табл. 1.2), записать показания амперметра M_1 и вольтметра M_2 в таблицу 1.2. По результатам измерений I и $U_{н}$ рассчитать значения

$$P_{н} = IU_{н} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{R_{н}}{R_{вн} + R_{н}} \quad (1.4)$$

и занести их в таблицу 1.2, а по ним построить графики $I(R_{н})$, $U_{н}(R_{н})$, $P_{н}(R_{н})$, $\eta(R_{н})$ вместе с графиками этих функций, полученных в результате предварительного расчёта.

3.5. Дополнительное задание

Исследовать неразветвлённую цепь постоянного тока при согласном (рис.1.11,а) и встречном (рис.1.11,б) включении источников E_1, E_2 .

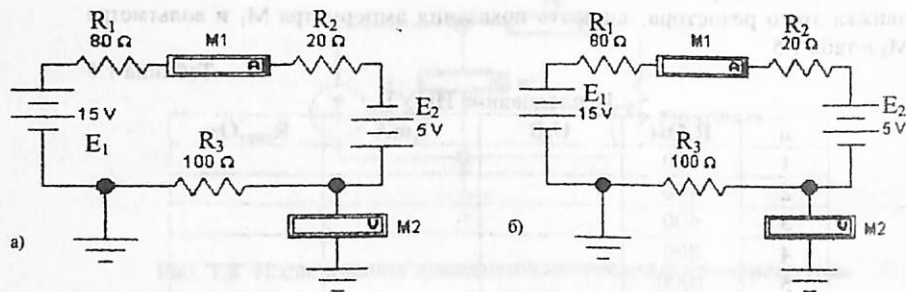


Рис.1.11. Исследование неразветвленной ЛЭЦ постоянного тока с двумя источниками напряжения E_1 и E_2

Для получения схемы рис.1.11,а загружается файл Lb1_5 и измеряются ток амперметром M_1 и напряжение вольтметром M_2 . Для получения схемы рис.1.11,б загружается файл Lb1_6 и измеряется ток амперметром M_1 и напряжение вольтметром M_2 .

Ток в первой и второй схемах рассчитываются соответственно по формулам

$$I = \frac{E_1 \pm E_2}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad U_{R3} = IR_3.$$

Знак «плюс» для первой схемы (рис.1.10,а), знак «минус» для второй схемы R2 (рис.1.10,б).

4. Содержание отчёта

В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Электрические схемы исследуемых цепей.
- 4.3. Расчётные формулы.
- 4.4. Результаты предварительного расчёта и эксперимента.
- 4.5. Графики нагрузочных характеристик $I(R_n), U_n(R_n), P_n(R_n), \eta(R_n)$ и внешняя характеристика реального источника $U(I_n)$.
- 4.6. Выводы по результатам исследований.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Перечислите все типы источников напряжения (ЭДС), имеющиеся в программе Electronics Workbench. Каковы их свойства и условные обозначения?
- 5.2. Перечислите все типы источников тока, имеющихся в программе Electronics Workbench. Каковы их свойства и условные обозначения?
- 5.3. Чему равно внутреннее сопротивление источника напряжения и источника тока?
- 5.4. Чем отличаются неидеальные источники электрической энергии от идеальных?
- 5.5. Как осуществить эквивалентное преобразование неидеального источника напряжения в неидеальный источник тока и обратное преобразование?
- 5.6. Какие режимы работы неидеального источника Вы знаете?
- 5.7. Что такое режим холостого хода и короткого замыкания реального источника?
- 5.8. Что такое согласованный режим реального источника?
- 5.9. При каком сопротивлении нагрузки в ней выделяется максимальная мощность?
- 5.10. Какие типы зависимых источников Вам известны?
- 5.11. Для чего применяются зависимые источники?
- 5.12. Как выполняется изменение параметров резисторов в программе EWB?
- 5.13. Как выполняется изменение сопротивления потенциометра в программе EWB?
- 5.14. Как осуществляется запуск схемы на расчёт (моделирование) в программе EWB?
- 5.15. Каким образом можно приостановить и остановить процесс моделирования в программе EWB?
- 5.16. Как выполняется регулировка параметров независимых источников электрической энергии в программе EWB?
- 5.17. Как выполняется изменение параметров зависимых источников электрической энергии?

Лабораторная работа №2

Проверка законов Кирхгофа для ЛЭЦ постоянного тока

Цель работы: Путём моделирования на ПК с помощью программы Electronics Workbench убедиться в справедливости законов Кирхгофа для разветвлённой ЛЭЦ постоянного тока.

1. Теоретические сведения

Первый закон Кирхгофа (закон Кирхгофа для токов) применяется к узлам электрической цепи (ЭЦ) и вытекает из принципа непрерывности электрического тока. Одна из его формулировок такова: *алгебраическая сумма токов всех ветвей, присоединённых к узлу, равна нулю.*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (2.1)$$

где n – количество ветвей, присоединённых к рассматриваемому узлу.

При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, будем брать со знаком «+», токи, направленные от узла, берутся со знаком «-». Число уравнений по первому закону Кирхгофа на единицу меньше общего числа узлов ЭЦ.

Второй закон Кирхгофа (закон Кирхгофа для напряжений) применяется к контурам ЭЦ. Одна из него формулировок такова: *в любом контуре ЭЦ алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях равна алгебраической сумме ЭДС*

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k, \quad (2.2)$$

где n – количество сопротивлений в контуре;
 m – количество источников ЭДС в контуре.

При составлении уравнений по 2-му закону Кирхгофа обычно со знаком «+» берут те падения напряжений $R_k I_k$, на которых направление обхода контура совпадает с направлением тока I_k , в сопротивлении R_k . В противоположном случае падения напряжения $R_k I_k$ берутся со знаком «-». ЭДС источников E_k берутся со знаком «плюс», если направление обхода контура совпадает с направлением стрелки этого источника.

Число уравнений по 2-му закону Кирхгофа равно числу независимых контуров. Независимыми называются такие контуры, которые отличаются от других контуров хотя бы одной ветвью.

Общее число уравнений по законам Кирхгофа равно числу неизвестных токов в ЭЦ.

В лабораторной работе исследуется схема (рис.2.1,а) с двумя источниками напряжения E_1 и E_2 и схема (рис. 2.1,б) с одним источником напряжения E_1 и одним источником тока J .

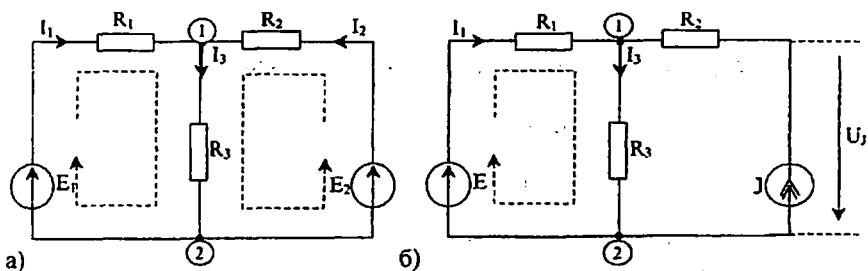


Рис.2.1. Схема с двумя источниками напряжения E_1, E_2 (а) и схема с источником напряжения E и источником тока J

Для схемы рис.2.1,а токи в ветвях I_1, I_2, I_3 могут быть определены из решения системы уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1; \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Откуда

$$I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}; \quad (2.4)$$

$$I_2 = \frac{E_2(R_1 + R_3) - E_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}; \quad (2.5)$$

$$I_3 = I_1 + I_2. \quad (2.6)$$

Напряжения на элементах цепи соответственно равны:

$$U_1 = R_1 I_1; \quad U_2 = R_2 I_2; \quad U_3 = R_3 I_3. \quad (2.7)$$

Для схемы 2.1,б токи в ветвях можно определить из решения системы уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1 - J - I_3 = 0; \\ R_1 I_1 - R_3 I_3 = E. \end{cases} \quad (2.8)$$

Откуда

$$I_1 = \frac{E - R_3 J}{R_1 + R_3}; \quad (2.9)$$

$$I_3 = \frac{E_1 + R_1 J}{R_1 + R_3} \quad (2.10)$$

Напряжение на элементах цепи соответственно равны

$$U_1 = R_1 I_1; \quad U_2 = R_2 J; \quad U_3 = R_3 I_3; \quad (2.11)$$

$$U_J = U_2 + U_3 = R_2 J + R_3 I_3. \quad (2.12)$$

Правильность расчёта токов можно проверить из решения уравнения баланса мощностей.

$$\Sigma P_{пр} = \Sigma P_{ист},$$

где $\Sigma P_{ист}$ – алгебраическая сумма мощностей источников;

$\Sigma P_{пр}$ – сумма мощностей приёмников.

Для первой схемы (см. рис. 2.1,а)
уравнение баланса мощностей имеет вид

$$R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = E_1 I_1 + E_2 I_2. \quad (2.12)$$

Для второй схемы (см. рис. 2.1,б)
уравнение баланса мощностей имеет вид

$$R_1 I_1^2 + R_2 J^2 + R_3 I_3^2 = E_1 I_1 + U_J J. \quad (2.13)$$

2. Предварительный расчёт

Для схемы, приведённой на рис.2.1,а, по заданному варианту исходных данных (см. табл.2.1) рассчитать значения токов в ветвях I_1, I_2, I_3 по формулам (2.4)-(2.6) и напряжение на элементах цепи U_1, U_2, U_3 по формулам (2.7). Проверить правильность расчёта токов из решения уравнения баланса мощностей. (2.12).

Таблица 2.1

Исходные данные для предварительного расчёта

№ вар.	E_1	E_2	J	R_1	R_2	R_3
	В	В	мА	кОм	кОм	кОм
1	3	6	5	0,3	0,5	1,0
2	6	9	4	0,6	2,0	0,5
3	9	12	3	1,3	3,0	1,0
4	12	15	4	0,3	1,0	0,5
5	15	12	5	0,6	0,5	1,0
6	20	9	4	1,3	1,0	3,0
7	25	6	7	1,2	0,5	1,0
8	30	9	6	0,6	1,0	2,0
9	35	15	8	1,2	2,0	2,5
10	40	20	9	0,4	0,5	1,0

Таблица 2.2

Результаты предварительного расчёта и измерений

Вариант №		I_1 , mA	I_2 , mA	I_3 , mA	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В
Схема рис. 2.1, а	Расчитано						
	Измерено						
	б, %						
Схема рис. 2.1, б	Расчитано						
	Измерено						
	б, %						
$E_1 =$ В; $E_2 =$ В; $I =$ mA; $R_1 =$ кОм; $R_2 =$ кОм; $R_3 =$ кОм							

Для схемы рис.2.1, б по заданному варианту исходных данных (см.табл. 2.1) рассчитать токи в ветвях I_1 , I_2 по формулам (2.9), (2.10) и напряжение на элементах U_1 , U_2 , U_3 по формуле (2.11). Проверить правильность расчёта из решения уравнения баланса мощностей (2.13). Результаты предварительного расчёта занести в таблицу 2.2.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование схемы с двумя источниками напряжения (рис.2.1, а).

Производится загрузка программы EWB.

Раскрывается папка файлов Lab_TEC.

Загружается файл Lb2_1, при этом на дисплее монитора появляется схема, приведённая на рис. 2.2.

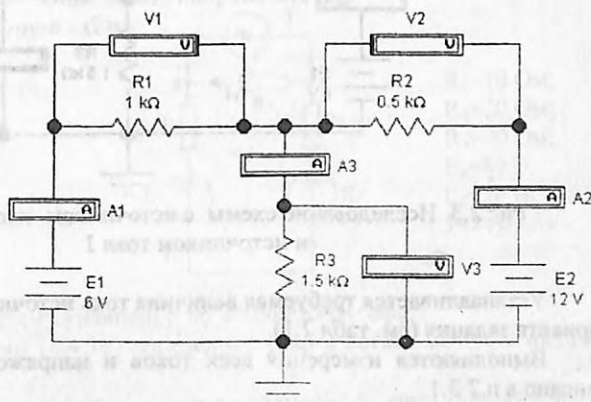


Рис 2.2. Исследование схемы с двумя источниками напряжения E_1 и E_2

Устанавливаются величины напряжений источников постоянного напряжения E_1 , E_2 и величины сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 согласно исходных данных варианта задания предварительного расчёта (см. табл.2.2).

Выполняется пуск на расчёт нажатием мышки выключателя (кнопки в правом верхнем углу), после установления показаний вольтметров и

амперметров останавливается расчёт путём повторного нажатия выключателя.

Значение токов в ветвях I_1, I_2, I_3 определяются по показаниям амперметров A_1, A_2, A_3 . Значения напряжения на элементах U_1, U_2, U_3 определяются по показаниям вольтметров V_1, V_2, V_3 .

Результаты изменений записываются в табл.2.2.

Относительная погрешность измерения соответствующих токов и напряжений определяется по формуле

$$\delta = \frac{A_p - A_n}{A_p}, \quad (2.13)$$

где A_p – рассчитанная величина тока или напряжения;
 A_n – измеренная величина тока или напряжения.

3.2. Исследование схемы с источником напряжения и источником тока (рис.2.3)

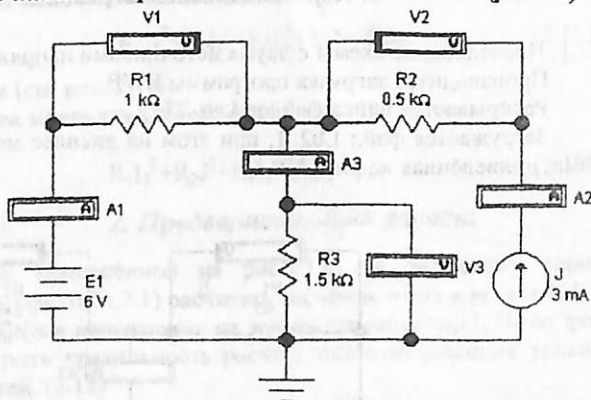


Рис.2.3. Исследование схемы с источником напряжения E_1 и источником тока J

Устанавливается требуемая величина тока источника тока I_1 согласно варианта задания (см. табл.2.1).

Выполняются измерения всех токов и напряжений, как это было описано в п.2.3.1.

Результаты измерений заносятся в таблицу 2.2.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Какие основные топологические понятия используются в ТЭЦ?
- 4.2. Для чего применяются законы Кирхгофа в ЭЦ?
- 4.3. Что называется ветвью, узлом и контуром в ЭЦ?
- 4.4. Как формулируется первый закон Кирхгофа для ЭЦ?

4.5. Сколько уравнений необходимо составить по первому закону Кирхгофа?

4.6. Как формулируется второй закон Кирхгофа?

4.7. Сколько уравнений необходимо составить по второму закону Кирхгофа?

4.8. Какой контур ЭЦ называется независимым?

4.9. Каково общее количество уравнений необходимо составить по законам Кирхгофа?

4.10. Как определяется мощность, отдаваемая источником напряжения?

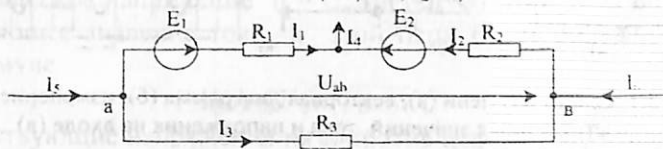
4.11. Как определяется мощность, отдаваемая источником тока?

4.12. Как определяется мощность, потребляемая в сопротивлении?

4.13. Что такое баланс мощностей в ЭЦ?

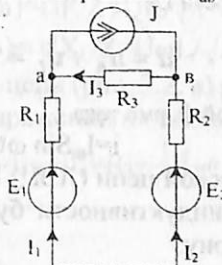
4.14. Для чего используется уравнение баланса мощностей в ЭЦ?

4.15. Для заданной схемы $E_1=10\text{ В}; E_2=20\text{ В};$
 $R_1=10\text{ Ом}; R_2=20\text{ Ом};$
 $I_1=0,7\text{ А}; I_2=1,3\text{ А}.$



Определить напряжение U_{ab} .

4.16. Для заданной схемы:



$R_1=10\text{ Ом};$
 $R_2=20\text{ Ом};$
 $R_3=30\text{ Ом};$
 $E_1=80\text{ В};$
 $E_2=20\text{ В};$
 $J=3\text{ А}.$

Составить систему уравнений по закону Кирхгофа.

4.17. Для схемы (п.4.16) определить токи в ветвях методом наложения.

4.18. Для схемы (п.4.16) составить уравнение баланса мощностей.

4.19. Для схемы (п.4.16) определить напряжение U_{ab} .

4.20. В схеме (п.4.15) определить все токи: $I_s, I_1, I_2, I_3.$

Лабораторная работа №3

Исследование RL - и RC - цепей при гармоническом воздействии

Цель работы: На ПЭВМ с помощью программы Electronics Workbench исследовать поведение RL - и RC -цепей при установившемся гармоническом режиме на разных частотах.

1. Теоретические сведения

В общем случае напряжение на входе RL -цепи (рис 3.1,а).

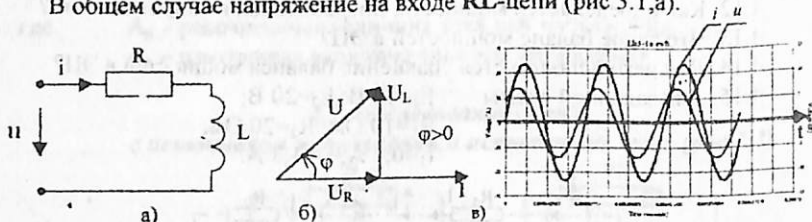


Рис 3.1. Схема RL -цепи (а), векторная диаграмма (б), изменение мгновенных значений тока и напряжения на входе (в).

равно сумме мгновенных значений напряжений на её элементах (сопротивлении R и индуктивности L):

$$u = u_R + u_L = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (3.1)$$

При синусоидальной форме тока

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.2)$$

в линейной электрической цепи (ЛЭЦ) RL (рис.3.1,а) напряжение на сопротивлении и индуктивности будут также изменяться по синусоидальному закону:

$$u_R = Ri = RI_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t, \quad (3.3)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega LI_m \cos \omega t = U_{Lm} \cos \omega t = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (3.4)$$

Видно, что напряжение на сопротивлении u_R совпадает по фазе с током i , напряжение на индуктивности u_L опережает по фазе ток i в нём на 90° (см. рис. 3.1, в). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи RL приведены на рис. 3.1,б.

Напряжение на входе RL -цепи также будет изменяться по синусоидальному закону

$$u = U_{Rm} \sin \omega t + U_{Lm} \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (3.5)$$

где

$$U_{Rm} = RI_m - \dots \quad (3.6)$$

- амплитуда напряжения на сопротивлении R ;

$$U_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m \quad (3.7)$$

– амплитуда напряжения на индуктивности L ;

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2} \quad (3.8)$$

- амплитуда напряжения на входе RL -цепи;

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{\omega L}{R} = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{U_{Lm}}{U_{Rm}} \quad (3.9)$$

- сдвиг фаз между напряжением u и током i на входе RL -цепи.

Разделив левую и правую части уравнений (3.6)-(3.8) на $\sqrt{2}$, получим соответствующие выражения для действующих значений напряжений:

$$U_R = RI; \quad U_L = \omega LI = X_L I; \quad U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad (3.10)$$

где $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление.

Если на входе RL -цепи (Рис.3.1,а) задан не ток (3.2), а гармоническое напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, то в этом случае действующее значение тока в этой цепи будет определяться по формуле

$$I = I(\omega) = U / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3.11)$$

действующие напряжения на сопротивлении и индуктивности будут определяться соответственно по формулам

$$U_R = U_R(\omega) = RI(\omega) = UR/Z = UR / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad (3.12)$$

$$U_L = U_L(\omega) = X_L I(\omega) = UX_L/Z = U\omega L / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (3.13)$$

Напряжение на входе RC -цепи (рис. 3.2, а) равно сумме мгновенных значений напряжений на её элементах

$$u = u_R + u_C = Ri + \frac{1}{C} \int idt. \quad (3.14)$$

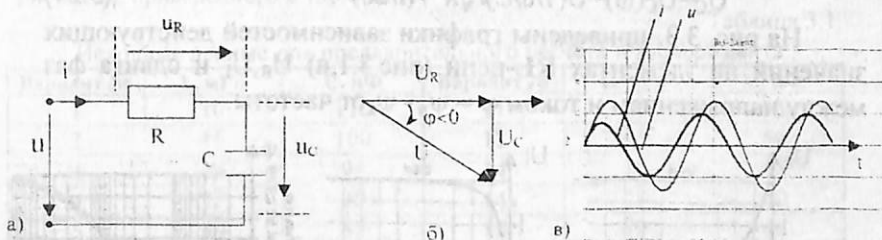


Рис. 3.2. RC -цепь (а), векторная диаграмма напряжений и токов. временная диаграмма напряжения и тока на входе RC -цепи.

При синусоидальном токе (3.2) напряжение на сопротивлении и ёмкости также будут изменяться по синусоидальному закону:

$$u_R = Ri = RI_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t; \quad (3.15)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t = U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (3.16)$$

Видно, что напряжение на сопротивлении U_R совпадает по фазе с током i , а напряжение на ёмкости U_C отстаёт по фазе от тока i на 90° (см. рис. 3.2,б). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи RC приведены на рис. 3.2,б.

Напряжение на входе RC-цепи

$$u = U_{Rm} \sin \omega t - U_{cm} \cos \omega t = U_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (3.17)$$

где $U_{cm} = \frac{1}{\omega C} I_m = X_C I_m$ - амплитуда напряжения на ёмкости; (3.18)

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{cm}^2} - \text{амплитуда напряжения на входе RC-цепи}; \quad (3.19)$$

$$\varphi = -\arctg 1/\omega CR = -\arctg X_C/R = -\arctg(U_{cm}/U_{Rm}). \quad (3.20)$$

Разделив левую и правую части уравнений (3.18), (3.19) на $\sqrt{2}$, получим соответствующие выражения для действующих значений напряжений

$$U_R = RI; \quad U_C = (1/\omega C)I = X_C I; \quad U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}, \quad (3.21)$$

где

$X_C = 1/\omega C$ - ёмкостное сопротивление.

Если на входе RC-цепи (Рис.3.2,а) задан не ток (3.2), а гармоническое напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, то в этом случае действующее значение тока в этой цепи будет определяться по формуле

$$I = I(\omega) = U/Z = U/\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}; \quad (3.22)$$

действующие напряжения на сопротивлении и ёмкости будут определяться соответственно по формулам

$$U_R = U_R(\omega) = UR/Z = UR/\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}; \quad (3.23)$$

$$U_C = U_C(\omega) = U(1/\omega C)/\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}. \quad (3.24)$$

На рис. 3.3. приведены графики зависимостей действующих значений на элементах RL-цепи (рис.3.1,а) U_R, U_L и сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$ от частоты.

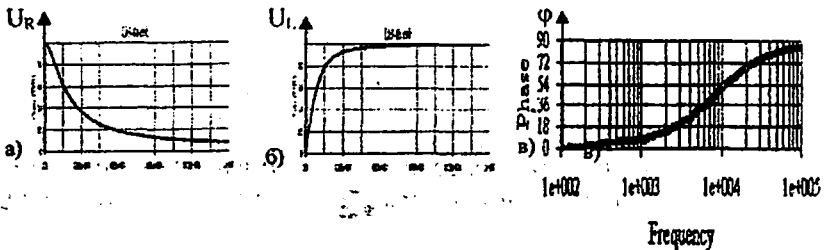


Рис. 3.3. Зависимости $U_R(\omega)$, $U_L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для RL-цепи

На рис. 3.4. приведены графики зависимостей действующих значений напряжений на элементах RC-цепи U_R, U_C и сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$ от частоты.

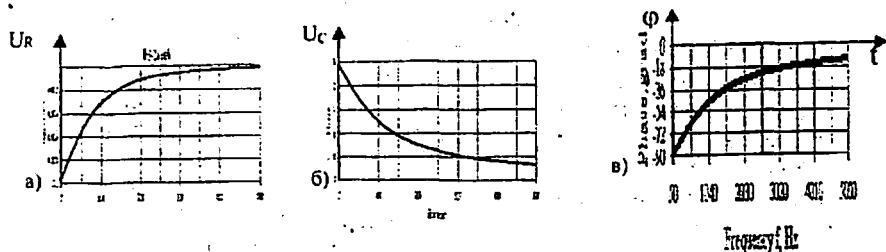


Рис. 3.4. Зависимости $U_R(\omega)$, $U_C(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для RC-цепи

Активная P , реактивная Q и полная S мощности для обеих схем (рис.3.1,а и рис.3.2,а) определяются по формулам

$$P=RI^2=UI \cos \varphi, \text{ Вт,} \quad (3.25)$$

$$Q=XI^2=UI \sin \varphi, \text{ вар,} \quad (3.26)$$

$$S=ZI^2=UI, \text{ ВА.} \quad (3.27)$$

Необходимо учесть, что в формуле (3.26) для RL-цепи реактивное сопротивление $X=X_L=\omega L$. (3.28)

Для RC-цепи реактивное сопротивление

$$X=-X_C=-1/\omega C, \quad (3.29)$$

где $\omega=2\pi f$ – угловая частота.

2. Предварительный расчёт

Для заданного варианта параметров RL- или RC-цепи (рис.3.1,а; рис.3.2,а), приведённого в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Исходные данные для предварительного расчёта и эксперимента

Вариант №	L, мГн	C, нФ	Вариант №	L, мГн	C, нФ
1	10	110	11	60	55
2	15	100	12	65	50
4	20	95	14	70	45
4	25	90	14	75	40
5	40	85	15	80	45
6	45	80	16	85	40
7	40	75	17	90	25
8	45	70	18	95	20
9	50	65	19	100	15
10	55	60	20	110	10

Для RL-цепи (рис.3.1,а) при $R=1$ кОм и действующем значении синусоидального напряжения на входе цепи $U=10$ В выполнить расчёт напряжения на индуктивности U_L и сопротивлении U_R по формулам (3.12), (3.14) на частотах

$$f=(0,2;0,5;1;1,5;2,4)f_r,$$

где $f_r=R/2\pi L$ – частота, на которой индуктивное сопротивление равно сопротивлению резистора ($R=X_L=\omega L=2\pi fL$).

Сдвиг фаз между напряжением и током i рассчитывается по формуле (3.9). Для RC-цепи (рис.3.2,а) рассчитываются действующие значения напряжений на ёмкости U_C и сопротивлении U_R по формулам (3.23), (3.24) на частотах (3.27), где $f_r=1/2\pi RC$ – частота, на которой ёмкостное сопротивление конденсатора равно сопротивлению резистора $X_C=R=1/(\omega_r C)=1/(2\pi f_r C)$.

Сдвиг фаз между напряжением и током определяется по формуле (3.17). Результаты расчёта U_R, U_L, U_C, ϕ на разных частотах заносятся в таблицу 3.2

Таблица 3.2

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

f	f, кГц	Предварительный расчёт				Измерения			
		U _R , В	U _L , В	U _C , В	φ, град	U _R , В	U _L , В	U _C , В	φ, град
0,2 f _r									
0,5 f _r									
1,0 f _r									
1,5 f _r									
2,0 f _r									
4,0 f _r									

По результатам предварительного расчёта построить графики зависимостей соответствующих напряжений от частоты (частотные характеристики): $U_R(f), U_L(f), U_C(f)$, и $\phi(f)$ аналогичные частотным характеристикам, приведённым на рис.3.3 и рис.3.4.

3. Выполнение работы

3.1. Исследование RL-цепи (рис. 3.1,а)

Производится загрузка системы Electronics Workbench.

Раскрывается папка LabRab3

Загружается файл Lb3_1, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис. 3.5.

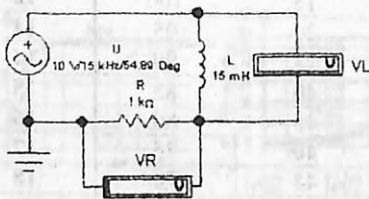


Рис.3.5. Схема исследования RL-цепи

Производится переустановка параметров элементов RL- или RC-цепи согласно требуемого варианта (см. табл.3.1), т.е. устанавливаются параметры цепи, которые использовались в предварительном расчёте. Для переустановки параметров элементов надо дважды щёлкнуть левой клавишей мыши на изображении элемента и затем в раскрывшемся окне установить требуемую величину параметра элемента, после чего щёлкнуть мышью на кнопку «ОК».

Переустановить генератор на требуемую частоту и записать показания вольтметров, подключённых параллельно сопротивлению, индуктивности (ёмкости). Результаты измерений на всех требуемых частотах занести в табл.3.2.

Для измерения сдвига фаз между входным напряжением u и током i RL-цепи загружается файл Lb3_2, в результате чего на экране монитора появляется схема, приведённая на рис 3.6.

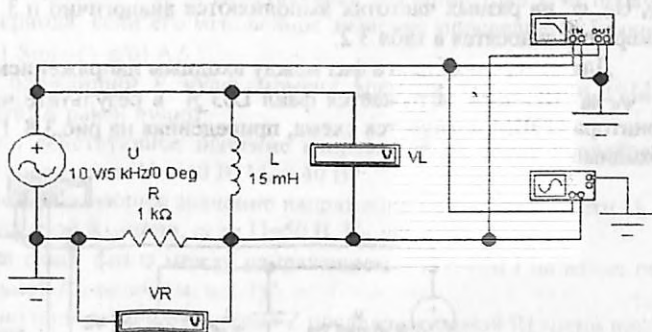


Рис.3.6. Схема для измерения $\varphi(f)$ и мгновенных значений $u(t)$ и $u_R(t)$

Два раза щёлкнув левой клавишей мыши по изображению измерителя частотных характеристик (ИЧХ) мы раскроем его переднюю панель, и на экране монитора ПЭВМ появится частотная характеристика $\varphi = \psi_u - \psi_i$, аналогичная той, которая приведена на рис.3.4.в. Установив курсор слева и нажав левую клавишу мыши на вертикальной оси графика и не отпуская её, перетащить вертикальную линию на ту частоту, на которой требуется выполнить измерение φ .

Далее, сдвигая вертикальную линию вдоль оси частот и устанавливая её в точки, соответствующие требуемым частотам, можно измерить φ на всех нужных частотах. Результаты измерений $\varphi(f)$ заносятся в табл.4.2.

Для измерения мгновенных значений входного напряжения $u(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ закрывается передняя панель ИЧХ и открывается передняя панель двухканального осциллографа, и после установки частоты генератора $f=f_f$ срисовываются осциллограммы $u(t)$ и $u_R(t)$, которые имеют вид, приведённый на рис.3.1.в.

3.2. Исследование RC-цепи (рис.3.2.,а)

Произвести загрузку файла Lb3_3, при этом на экране монитора появится схема, приведённая на рис.3.7. Установка параметров RC-цепи и измерения

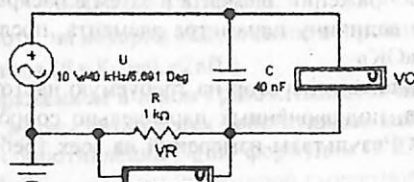


Рис.3.7. Схема исследования RC-цепи

U_R , U_C , φ на разных частотах выполняются аналогично п.3.1. Результаты измерений заносятся в табл.3.2.

Для измерения сдвига фаз между входным напряжением u и током i $\varphi = \psi_u - \psi_i$ RC-цепи загружается файл Lb3_4 в результате чего на экране монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис.3.8. После чего необходимо

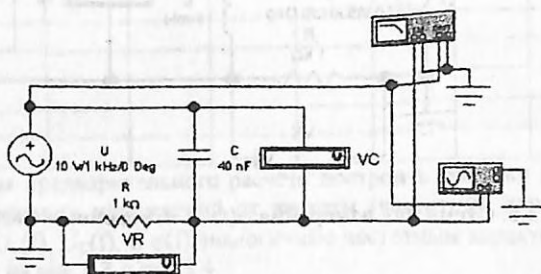


Рис.3.8. Схема измерения сдвига фаз φ между u и i RC-цепи

раскрыть переднюю панель ИЧХ и выполнить измерения $\varphi(f)$ на заданных частотах, аналогично тому, как это было описано в п.3.1.

Исследование мгновенных значений $u = u(t)$ и $u_R = u_R(t)$ выполняются аналогично описанному выше (см. п.3.1)

4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Электрические схемы исследуемых цепей и параметры их элементов.
- 4.3. Предварительный расчёт.
- 4.4. Таблица результатов предварительного расчёта и компьютерного эксперимента.
- 4.5. Графики частотных характеристик $U_R(f)$, $U_L(f)$, $U_C(f)$, и $\varphi(f)$, полученные методом расчёта и моделирования.
- 4.6. Графики мгновенных значений $u(t)$, $u_R(t)$ на частоте f .

- 4.7. Расчёт активной P , реактивной Q и полной мощности S на частоте f .
- 4.8. Выводы из результатов расчёта и моделирования на ПЭВМ.

5. Контрольные вопросы и задачи

- 5.1. Как определяется напряжение U_R на сопротивлении $R=10$ Ом, если через него протекает ток $i=1,41 \sin(\omega t - \pi/6)$ А?
- 5.2. Как определяется напряжение U_L на индуктивности $L=1,0$ мГн, если через неё протекает ток (см. п.5.1) и $\omega = 1000$ рад/с.?
- 5.3. Чему равны комплексные амплитудные и комплексные действующие значения тока I и напряжения на сопротивлении U_R (см. п.5.1) и на индуктивности U_L (см. п.5.2)?
- 5.4. Чему равно напряжение на сопротивлении U_R в момент времени $t = 1$ мс (см. п.5.1), если $\omega = 1000$ рад/с.?
- 5.5. Чему равно среднее $I_{\text{ср}}$ и действующее значение тока I за первую четверть периода, если его мгновенное значение определяется уравнением $i=14,1 \sin(\omega t - \pi/6)$ А?
- 5.6. В какой ближайший к нулю момент времени ток в цепи $i=14,1 \sin(1000t-\pi/6)$ А равен нулю?
- 5.7. Чему равно действующее значение напряжения на входе последовательной RL-цепи, если $U = 40$ В, $U_R = 40$ В?
- 5.8. Чему равно действующее значение напряжения на индуктивности U_L в последовательной RL-цепи, если $U=50$ В, $U_R=40$ В?
- 5.9. Чему равен сдвиг фаз ϕ между напряжением u и током i на входе последовательной RL-цепи (см. п.5.7)?
- 5.10. Чему равно полное сопротивление Z последовательной RL-цепи при $R=40$ Ом, $X_L=40$ Ом?
- 5.11. Комплексные действующие значения тока и напряжения на некотором участке цепи определяются следующими выражениями:

$$\underline{I}=(5+j5) \text{ А} \quad \text{и} \quad \underline{U}=(20-j20) \text{ В}$$
 Написать выражения для мгновенных значений тока и напряжения и найти комплексное сопротивление этого участка цепи.
- 5.12. Комплексный ток и напряжение на зажимах пассивного двухполюсника соответственно равны

$$\underline{I}=(10-j10) \text{ А} \quad \text{и} \quad \underline{U}=(200-j100) \text{ В}.$$
 Определить активную, реактивную и полную мощность.
- 5.13. Чему равен период T , если угловая частота переменного напряжения $\omega = 628$ рад/с.?
- 5.14. Чему равна начальная фаза и период, амплитуда и действующее значение переменного напряжения $u=40 \sin(1000t+\pi/6)$ В?
- 5.15. Чему равно мгновенное значение напряжения $u = 100 \sin(1000t+\pi/4)$ В, в момент времени $t = (1/80)$ с?

Лабораторная работа № 4

Исследование резонанса в последовательном колебательном контуре

Цель работы: Теоретическое и экспериментальное исследование на ПЭВМ частотных характеристик последовательного колебательного контура и влияние на них внутреннего сопротивления генератора и сопротивления нагрузки.

1. Теоретические сведения

Для последовательного колебательного контура (рис 4.1,а) на основании

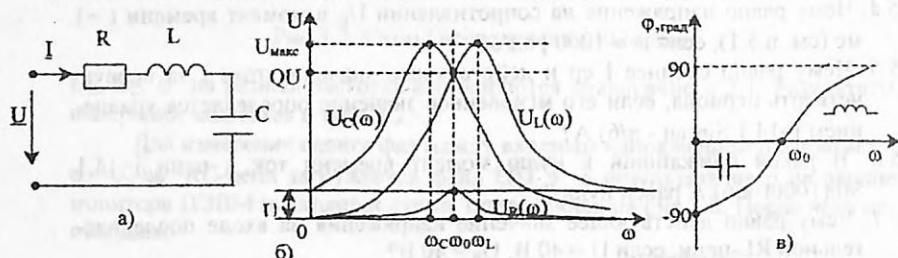


Рис. 4.1. Схема последовательного колебательного контура (а), его АЧХ (б) и ФЧХ (в)

второго закона Кирхгофа для комплексных действующих значений напряжений можно записать

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} - j(1/\omega C)\underline{I} = [R + j(\omega L - 1/\omega C)]\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}.$$

Комплексное действующее значение тока в цепи

$$\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z}, \quad (4.1)$$

где $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I} = R + j(\omega L - 1/\omega C) = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi}$

(4.2) комплексное сопротивление контура;

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}; \quad (4.3)$$

- полное сопротивление контура;

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \arctg X/R = \arctg (X_L - X_C)/R = \arctg (\omega L - 1/\omega C)/R \quad (4.4)$$

- сдвиг фаз между напряжением и током (аргумент комплексного сопротивления).

При резонансе напряжений (РН) $\varphi = 0$, что возможно, когда реактивное сопротивление контура равно нулю

$$X = X_L - X_C = \omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0, \quad (4.5)$$

откуда резонансная угловая частота

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (4.6)$$

Угловой частоте ω_0 соответствует частоте резонанса

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad (4.7)$$

и длине электромагнитной волны $\lambda = c/f_0 = 2\pi c\sqrt{LC}$,

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

На резонансной частоте индуктивное сопротивление равно ёмкостному и равно характеристическому сопротивлению контура

$$X_{L0} = X_{C0} = \omega_0 L = 1 / \omega_0 C = (\sqrt{L/C})^2 = \rho = R_C.$$

Величина $\rho = R_C = \sqrt{L/C}$ носит название характеристического сопротивления колебательного контура.

При РН сопротивление контура носит чисто резистивный характер и имеет минимальное значение $Z_0 = R$, а ток в контуре – максимальное значение $I_0 = U/R$.

Важнейшим параметром последовательного колебательного контура является его добротность

$$Q = \rho/R = \sqrt{L/C}/R. \quad (4.8)$$

Добротность показывает, во сколько раз напряжение на реактивных элементах L и C превышает входное напряжение U на резонансной частоте. Действительно

$$U_{L0}/U = U_{C0}/U = I_0 \omega_0 L/U = I_0 / \omega_0 C U = \rho/R = Q. \quad (4.9)$$

Величина d, обратная добротности, называется затуханием колебательного контура

$$d = 1/Q. \quad (4.10)$$

Зависимость действующего значения тока в контуре от частоты определяется выражением

$$I(\omega) = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}. \quad (4.11)$$

Зависимости $I(\omega)$, $U_R(\omega)$, $U_L(\omega)$ и $U_C(\omega)$ называются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) или резонансными характеристиками. Они определяются по формулам

$$U_R(\omega) = RI(\omega); \quad U_L(\omega) = \omega LI(\omega); \quad U_C(\omega) = (1/\omega C)I(\omega) \quad (4.12)$$

На рис. 4.1,б изображены АЧХ, определяемые выражениями (4.12) и на рис. 4.1,в – ФЧХ $\varphi(\omega)$, определяемая по формуле (4.4).

Анализ зависимости $U_R(\omega)$ показывает, что напряжение на сопротивлении $U_R(\omega)$ имеет максимальное значение на резонансной частоте ω_0 и равно входному напряжению $U_{R0} = U$.

Напряжения индуктивности $U_{L0}(\omega)$ и емкости $U_{C0}(\omega)$ при резонансе равны между собой и в Q раз больше входного напряжения (см. рис. 4.2,б)

$$U_{L0} = U_{C0} = \rho I_0 = U(\rho/R) = UQ. \quad (4.13)$$

Максимальные значения напряжений на ёмкости и индуктивности немного больше резонансного и равны между собой

$$U_{C_{\max}} = U_{L_{\max}} = \frac{QU}{\sqrt{1 - 1/4Q^2}} \quad (4.14)$$

и получаются соответственно на частотах (см. рис. 4.2,б):

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1 - 1/2Q^2}; \quad \omega_L = \omega_0 \sqrt{1 + 1/2Q^2}. \quad (4.15)$$

С увеличением добротности Q частоты ω_C и ω_L приближаются к резонансной частоте ($\omega_C \approx \omega_0 \approx \omega_L$), и максимальные значения напряжения на ёмкости и индуктивности приближаются к их резонансному значению

$$U_{L\max} = U_{C\max} \approx QU. \quad (4.16)$$

Степень отклонения режима колебательного контура от резонанса принято оценивать абсолютной

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0, \quad (4.17)$$

относительной

$$\delta = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0 \quad (4.18)$$

и обобщённой расстройкой

$$\xi = X/R = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = (\omega_0 L/R)(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega) = Q(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega). \quad (4.19)$$

При небольших f , абсолютных расстройках $\Delta f = f - f_0$ обобщённая расстройка может быть определена по приближённой формуле $\xi \approx 2Q\Delta f/f_0$.

Наиболее широко в теоретических исследованиях применяется обобщённая расстройка ξ , т.к. её использование существенно упрощает расчёт. Например, выражение для АЧХ тока (4.11) и сдвига фаз между напряжением и током можно записать через обобщённую расстройку в виде.

$$I = \frac{U}{R\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1+\xi^2}}; \quad (4.20)$$

$$\varphi = \arctg \xi.$$

Важной характеристикой колебательного контура является его полоса пропускания (ПП), под которой понимается область частот вблизи резонанса, где ток в контуре имеет значение не меньше $1/\sqrt{2}$ максимального значения I_0 (рис.4.2). На граничных частотах ПП выполняется условие:

$$n(\xi) = I/I_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (4.21)$$

откуда

$$\xi_{1,2} = X/R = \pm 1.$$

Таким образом, на границах ПП реактивное сопротивление по абсолютной величине равно активному сопротивлению.

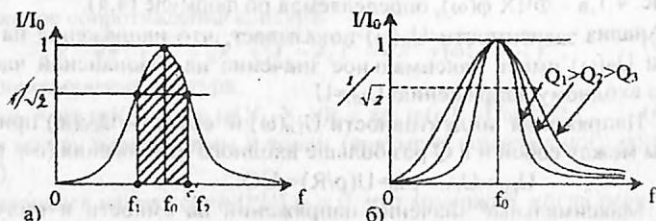


Рис.4.2. К определению ПП колебательного контура (а), зависимость формы резонансной кривой от добротности (Q).

Из решения уравнения $\xi_{1,2} = Q(f/f_0 - f_0/f) = \pm 1$ получим формулы для определения граничных частот ПП f_1 и f_2 .

$$f_{1,2} = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} \mp \frac{1}{2Q} \right) \approx f_0 (1 \pm 1/2Q). \quad (4.22)$$

Абсолютная ширина ПП (см. рис. 4.2.) колебательного контура

$$S_n = f_2 - f_1 = f_0/Q = df_0, \quad (4.23)$$

относительная ширина ПП.

$$S_0 = (f_2 - f_1)/f_0 = 1/Q = d. \quad (4.24)$$

Уравнение (4.23) используется для экспериментального определения добротности колебательного контура по экспериментально измеренным значениям резонансной частоты f_0 и абсолютной ширине ПП $f_2 - f_1$.

$$Q = f_0/(f_2 - f_1). \quad (4.25)$$

Добротность контура снижает внутреннее сопротивление источника (генератора) сигнала R_i (рис. 4.3) и сопротивление нагрузки R_n , подключённая параллельно ёмкости (рис.4.3), либо индуктивности.

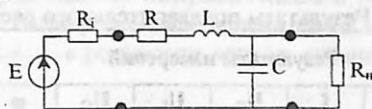


Рис. 4.3. Схема подключения колебательного контура к источнику E , R_i и нагрузке R_n

При $R_n \gg \rho$ эквивалентная добротность колебательного контура с учётом влияния R_i и R_n определяется по формуле

$$Q_3 = \rho / (R + R_i + \rho^2 / R_n) \quad (4.26)$$

2. Предварительный расчёт

2.1. Для заданных параметров колебательного контура (рис.4.1,а) (см. табл. 4.1) рассчитать резонансную частоту f_0 , характеристическое сопротивление ρ , добротность Q , затухание d и абсолютную ширину ПП. Результаты расчёта занести в табл. 4.2

Таблица 4.1

Исходные данные для предварительного расчёта и моделирования

Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом	Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом
1	10	50	10	11	15	40	30
2	20	60	20	12	25	50	35
3	30	70	30	13	35	60	40
4	40	80	40	14	45	70	45
5	50	90	50	15	55	80	50
6	60	100	60	16	65	90	60
7	70	40	70	17	75	60	70
8	80	30	80	18	85	40	80
9	90	20	90	19	95	30	90
10	100	10	100	20	110	20	100

Таблица 4.2

Параметры колебательного контура

L=.....;	C=.....;	R=.....;
f_0 =.....;	ρ =.....;	Q=.....;
d=.....;	$S_n=f_2-f_1$ =.....;	
При $R_i=0.5R$;	$R_n=50 \text{ кОм}$;	Q_3 =.....; d_3; S_{n3};

2.2. Рассчитать эквивалентную добротность Q_0 , эквивалентное затухание d , и абсолютную ширину ПП $S_{\text{лю}}$ колебательного контура, если он подключен к генератору с внутренним сопротивлением R_i , и параллельно емкости подключена нагрузка с сопротивлением $R_H=50$ кОм (см. рис. 4.2). Результаты расчёта занести в табл. 4.2.

Рассчитать частотные характеристики $U_R(f)$, $U_L(f)$, $U_C(f)$, $\varphi(f)$ по формулам (4.4), (4.12) на частотах $f = f_0 \pm k\Delta f$, где $\Delta f = f - f_0 = f_0/2Q$, где $\Delta f = f_0/2Q$; $k=0;1;2;3$. Результаты расчёта занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

№	Результаты измерений					Результаты предварительного расчёта			
	f	U _R	U _L	U _C	φ	U _R	U _L	U _C	φ
	кГц	В	В	В	град.	В	В	В	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. Выполнение работы

3.1. Исследование RLC-цепи (рис. 4.1,а)

Производится загрузка системы Electronics Workbench. Раскрывается папка Lab_ТЕС. Загружается файл Lb4_1, при этом на дисплее монитора ПЭВМ

появляется схема, приведённая на рис. 4.4.

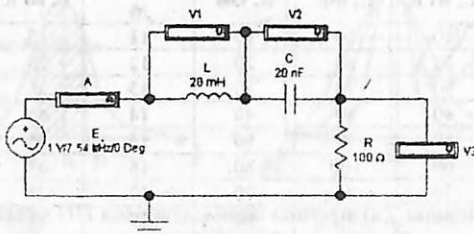


Рис. 4.4. Схема исследования последовательного RLC-контура на разных частотах

Производится переустановка параметров элементов RLC-цепи согласно требуемого варианта (см. табл.4.1), т.е. устанавливаются параметры цепи, которые использовались в предварительном расчёте. Для переустановки параметров элементов надо дважды щёлкнуть левой клавишей мыши на

изображении этого элемента и затем в раскрывшемся окне установить требуемую величину параметра элемента, после чего щёлкнуть мышью на кнопку «ОК» или клавишу «Enter», т.е. «Ввод».

Переустановить генератор на требуемую частоту, напряжение и записать показания амперметра А и вольтметров V1, V2, V3, подключённых параллельно соответственно к индуктивности L, ёмкости C и сопротивлению R. Результаты измерений на всех требуемых частотах занести в табл.4.3.

3.2. Измерение сдвига фаз между напряжением и током

Для измерения сдвига фаз между входным напряжением u и током i RLC-цепи загружается файл Lb4_2, в результате чего на экране монитора появляется схема, приведённая на рис 4.5.

Два раза щёлкнув левой клавишей мыши по изображению измерителя частотных характеристик (ИЧХ) «Plotter», мы раскроем его переднюю панель, и на экране монитора ПЭВМ появится частотная характеристика

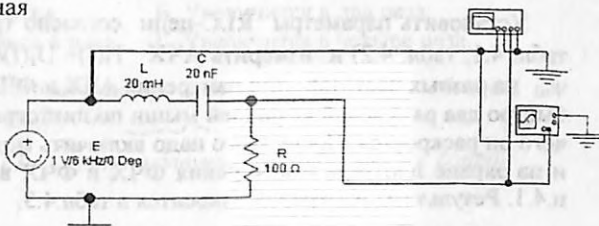


Рис.4.5. Схема для измерения $\varphi(f)$ и мгновенных значений $u(t)$ и $u_R(t)$

$\varphi = \psi_u - \psi_i$, аналогичная той, которая приведена на рис.4.1,в. Установив курсор слева и нажав левую клавишу мыши на вертикальной оси графика и не отпуская её, перетащить вертикальную линию на ту частоту, на которой требуется выполнить измерение φ . Необходимо учесть, что в исследуемой схеме (рис.4.5) знак φ получается противоположный истинному знаку.

Далее, сдвигая вертикальную линию вдоль оси частот и устанавливая её в точки, соответствующие требуемым частотам, измерить φ на всех заданных частотах. Результаты измерений $\varphi(f)$ заносятся в табл.4.2.

Для измерения мгновенных значений входного напряжения $u(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ закрывается передняя панель ИЧХ и и открывается передняя панель двухканального осциллографа, и после установки частоты генератора $f=f_0$ срисовываются осциллограммы $u(t)$ и $u_R(t)$, которые имеют вид, приведённый на рис.4.1,в.

3.3. Исследование влияния внутреннего сопротивления генератора и нагрузки на резонансные (частотные) характеристики RLC-цепи (рис.4.3)

Произвести загрузку файла Lb4_3, при этом на экране монитора появится схема, приведённая на рис.4.6.

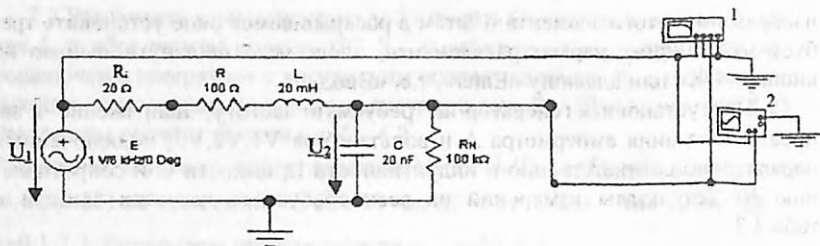


Рис.4.6.Схема исследования влияния внутреннего сопротивления генератора R_i и нагрузки R_n на резонансные характеристики RLC контура.

Установить параметры RLC-цепи согласно требуемого варианта (см. табл. 4.1, табл. 4.2) и измерить АЧХ $H(f) = U_2(f)/U_1(f)$ и ФЧХ $\varphi(f) = \psi_{u2} - \psi_{u1}$ на разных частотах. Для измерения АЧХ и ФЧХ необходимо щелкнуть быстро два раза левой клавишей мыши по пиктограмме плоттера «1», после чего он раскроется. После этого надо включить моделирование (эмуляцию), и на экране плоттера и измерения ФЧХ и ФЧХ выполняются аналогично п.4.1. Результаты измерений заносятся в табл.4.3.

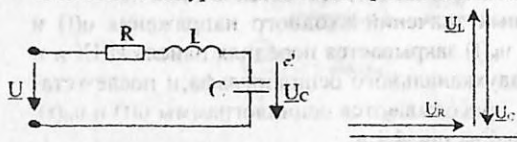
4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Схемы измерения частотных характеристик.
- 4.3. Графики частотных характеристик $U_{Rn}(f)$, $U_L(f)$, $U_C(f)$, $\varphi(f)$, построенных по результатам предварительного расчёта и эксперимента.
- 4.4. По графику $U_{Rn}(f)$ определить абсолютную полосу пропускания и сравнить полученное значение с предварительным расчетом.
- 4.5. Графики зависимостей $S_A(R)$, $Q_3(R)$ (дополнительное задание).

Выводы по результатам исследований.

4. Контрольные вопросы и задачи

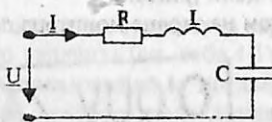
5.1. При каком условии векторная диаграмма последовательного колебательного контура имеет вид, приведённый на рисунке?



Ответы:

- А. $X_L > X_C$;
- Б. $X_C < X_L$;
- В. $X_L = X_C$;
- Г. $X_L > R$, $X_C < R$.

5.2. Как изменится характеристическое сопротивление контура, если L и C увеличить в 4 раза?



Ответы:

- А. Увеличится в два раза.
- Б. Увеличится в четыре раза.
- В. Не изменится.
- Г. Уменьшится в два раза.

5.3. Как нужно изменить частоту приложенного напряжения, чтобы в контуре наступил резонанс напряжений, если на данной частоте $X_L > X_C$?

5.4. Определите напряжение на ёмкости при резонансе, если $U=10$ В, $R=10$ Ом, $X_{L0}=20$ Ом.

Ответы: А. 10 В. Б. 20 В. В. 100 В. Г. 200 В.

5.5. Определите ток в колебательном контуре, если $U=200$ В, $R=100$ Ом, $X_L=X_C=100$ Ом.

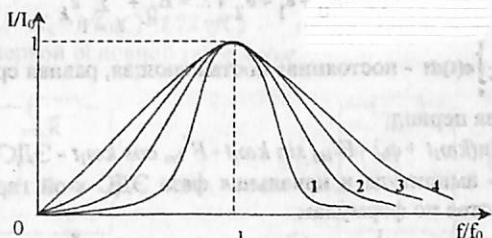
Ответы: А. 0,66 А. Б. 1 А. В. 2 А. Г. 4 А.

5.6. Как изменится абсолютная полоса пропускания колебательного контура, если увеличить его активное сопротивление в два раза?

Ответы: А. Не изменится. Б. Увеличится в два раза.
В. Уменьшится в два раза. Г. Увеличится в четыре раза.

5.7. Выберите R , L , C колебательного контура так, чтобы обеспечить $f_0=5$ кГц при добротности $Q=50$.

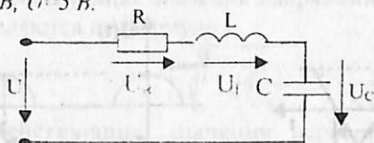
5.8. Укажите график I/I_0 , соответствующий наибольшему сопротивлению нагрузки R .



5.9. Как изменится ток в колебательном контуре при резонансе, если уменьшить его индуктивность и увеличить ёмкость в три раза?

Ответы: А. Уменьшится. Б. Увеличится в три раза.
В. Уменьшится в три раза. Г. Увеличится в девять раз.

5.10. Определите напряжение на индуктивности, если $U_R=40$ В, $U_C=30$ В, $U=5$ В.



Ответы:

А. 40 В;
Б. 60 В;
В. 30 В;
Г. 50 В.

Лабораторная работа № 5

Исследование ЛЭЦ при периодическом несинусоидальном воздействии

Цель работы: Исследование на ПЭВМ с помощью программы *Elektronics Workbench* влияние параметров последовательной *RL*- и *RC*-цепи на форму тока и напряжения на элементах при периодических несинусоидальных воздействиях; определение действующих значений тока и напряжений на элементах цепи.

1. Теоретические сведения

Периодическая несинусоидальная ЭДС $e(t)=e(t+nT)$, где T – период функции $e(t)$, может быть представлена в виде постоянной ЭДС E_0 и суммы гармонических ЭДС с помощью тригонометрического ряда Фурье

$$e(t) = E_0 + e_1 + e_2 + \dots = E_0 + \sum_{k=1}^{\infty} e_k$$

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:

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

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

В работе используются периодические несинусоидальные ЭДС $e(t)$, приведенные на (рис.5.1).

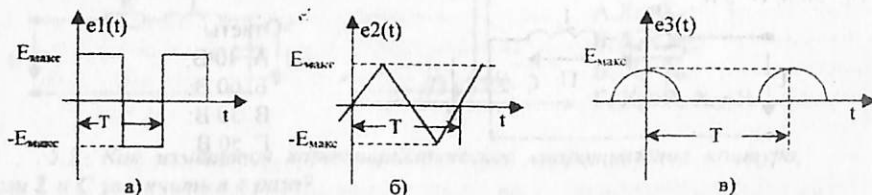


Рис. 5.1. Формы сигналов на входе ЭЦ

Разложения в ряд Фурье ЭДС $e(t)$, представленных на рис. 5.1, имеют вид

$$e_1(t) = E_{1m} \sin \omega_1 t + E_{3m} \sin 3\omega_1 t + E_{5m} \sin 5\omega_1 t + \dots, \quad (5.1)$$

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

$$e_2(t) = E_{1m} \sin \omega_1 t - E_{3m} \sin 3\omega_1 t + E_{5m} \sin 5\omega_1 t + \dots, \quad (5.2)$$

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

$$e_3(t) = E_0 + E_{1m} \cos \omega_1 t + E_{2m} \cos 2\omega_1 t + E_{4m} \cos 4\omega_1 t + \dots, \quad (5.3)$$

где $E_0 = E_{\max} / \pi$; $E_{1m} = E_{\max} / 2$; $E_{2m} = 2E_{\max} / \pi$; $E_{4m} = 2E_{\max} / 15\pi$.

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

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

Для схем, приведённых на рис. 5.2, амплитудные значения токов k -ой гармоники определяются из выражений

$$I_{km} = E_{km} / Z_k = E_{km} / \sqrt{R^2 + (kX_L)^2}; \quad (5.4)$$

$$I_{km} = E_{km} / Z_k = \frac{E_{km}}{\sqrt{R^2 + (X_C/k)^2}}, \quad (5.5)$$

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

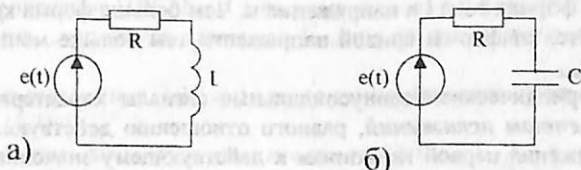


Рис. 5.2. Исследуемые RL- и RC-цепи.

Амплитудные значения напряжений на элементах цепи (рис. 5.2) на k -ой гармонике

$$U_{Rm}^{(k)} = R I_{km}; \quad U_{Lm}^{(k)} = k X_L I_{km}; \quad U_{Cm}^{(k)} = (X_C/k) I_{km} \quad (5.6)$$

Действующие значения напряжений на элементах схем (рис. 5.2) определяются по формуле

$$U = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots} \quad (5.7)$$

Действующие значения периодических несинусоидальных ЭДС разной формы (см. рис. 5.1) определяются из выражений

$$E = E_{\max}; \quad (рис. 5.1, а); \quad (5.9)$$

$$E = E_{\max} / \sqrt{3}; \quad (рис. 5.1, б); \quad (5.10)$$

$$E = E_{\max} / 2; \quad (рис. 5.1, в); \quad (5.11)$$

где E – действующее значение периодической несинусоидальной ЭДС.

Активная мощность периодического несинусоидального сигнала равна сумме активных мощностей отдельных гармоник

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} P_k, \quad (5.12)$$

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

Реактивная Q и полная мощность S цепи определяются по формулам

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k, \quad (5.13)$$

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 I_k^2}. \quad (5.14)$$

В отличие от гармонических сигналов для периодических негармонических сигналов

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_{иск}^2}. \quad (5.15)$$

Величина $P_{иск} = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$

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 $P_{иск}$.

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

$$K_{и} = U_1 / U = U_1 / \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \quad (5.16)$$

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

$$K_{г} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}. \quad (5.17)$$

2. Предварительный расчёт

2.1. Рассчитать амплитуды ЭДС первых трёх гармоник согласно варианту задания (см. табл. 5.1) по формулам (5.1) - (5.3) с учётом (5.9) - (5.11).

Таблица 5.1

Параметры цепи для предварительного расчета

Вариант №	Вид воздействия (рис. 5.1)	Схема рис. 5.2	Параметры элементов цепи		
			L, мГн	C, нФ	R, Ом
1	e1(t)	RL	40		200
2	e2(t)	RC		30	5000
3	e3(t)	RL	30		100
4	e1(t)	RC		20	10 000
5	e2(t)	RL	50		200
6	e3(t)	RC		30	4 000
7	e1(t)	RL	50		300
8	e2(t)	RC		30	3 000
9	e3(t)	RL	60		200
10	e1(t)	RC		200	1 000

При выполнении предварительного расчета необходимо учесть, что параметры элементов источников периодических несинусоидальных напряжений $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$ (см. рис.1.1) установлены таким образом, что действующее значение ЭДС E каждого из этих источников одинаковы и равны $E=5$ В. С учетом этого, используя формулы (5.9)-(5.11), можно определить максимальное значение ЭДС E_{\max} , а по нему, используя формулы (5.1)-(5.3), определить амплитуды гармоник E_{km} при разной форме сигнала (см. рис.5.1)

Записать выражение ЭДС $e(t)$ в виде суммы гармонических составляющих (5.1)-(5.3).

2.2. Рассчитать амплитудные значения токов $I_0, I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}$ в заданной цепи, вызванных ЭДС каждой гармоники в отдельности по формулам (5.4).

2.3. Рассчитать амплитудные значения напряжения на элементах цепи от тока каждой гармоники в отдельности по формуле (5.6).

2.4. Рассчитать результирующие действующие значения напряжений на элементах цепи по формуле (5.7).

Результаты расчёта занести в таблицы 5.2, 5.3.

Таблица 5.2

Результаты предварительного расчёта

Схема рис. 5.2; сигнал рис. 5.1; $f=2$ кГц; $E=5$ В;

$E_m=...В$; $R=...В$; $L=...мГн$; $C=...нФ$.

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	В		Ом		А		В	

Действующие значения напряжения

	Предварительный расчёт	Результат измерения	Относительная погрешность
$U_R, \text{В}$			
$U_L, U_C, \text{В}$			

Дополнительное задание

2.5. Рассчитать активную P , реактивную Q и полную мощность S исследуемой цепи по формулам (5.12) – (5.14).

2.6. Рассчитать коэффициент искажений $K_{\text{и}}$ и коэффициент гармоник $K_{\text{Г}}$ по формулам (5.16) – (5.17).

3. Выполнение работы

Производится загрузка системы Electronics Workbench.

Раскрывается папка Lab_ТЭС Загружается файл Lb5_1, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис. 5.3.

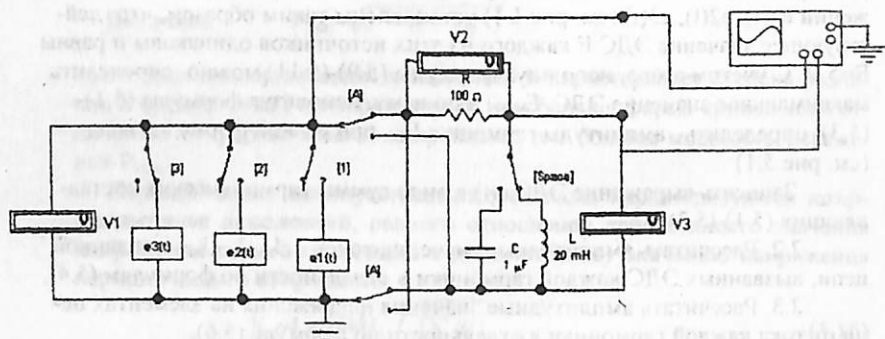


Рис.5.3. Исследование RL- и RC-цепи при воздействии периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$.

Схема рис.5.3 позволяет исследовать RL- и RC-цепь при воздействии на них периодической несинусоидальной ЭДС, имеющей форму

- 1) Периодической последовательности биполярных прямоугольных импульсов $e_1(t)$ (см. рис.5.1,а). Её включение и отключение осуществляется путем нажатия на клавишу «1».
- 2) Периодической последовательности биполярных пилообразных импульсов $e_2(t)$ (см. рис.5.1,б). Её включение и выключение осуществляется путём нажатия на клавишу «2».

3) Периодической последовательности однополярных синусоидальных импульсов $e_3(t)$ (см. рис.5.1,б). Её включение и выключение осуществляется путем нажатия на клавишу «3».

Включение емкости C или индуктивности L осуществляется путем однократного нажатия на клавишу «Space», т.е. «Пробел».

Действующее значение напряжения E периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$ измеряется вольтметром $V1$, действующее напряжение на сопротивлении U_R измеряется вольтметром $V2$, действующее значение напряжения на индуктивности U_L или емкости U_C измеряется вольтметром $V3$.

Для исследования формы напряжения на индуктивности $u_L(t)$ или емкости $u_C(t)$ на экране модели осциллографа контакт переключателя [A] должен находиться в верхнем положении, для наблюдения формы напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ контакт переключателя [A] должен находиться в нижнем положении. Изменение состояния указанного переключателя осуществляется путем нажатия на клавишу «A».

Передняя панель осциллографа раскрывается путем быстрого двукратного нажатия левой клавишей мышки на пиктограмме (маленьком изображении) осциллографа.

3.1. Измерение действующих значений напряжений на элементах цепи

Согласно с номером варианта (см. табл.5.1.) с помощью клавиши «Space», т.е. «Пробел», установить требуемый тип реактивного элемента (индуктивность L или емкость C) (см. схема рис.5.3.).

Установить параметры элементов (величины сопротивления, индуктивности и ёмкости):

Согласно с номером варианта (см. табл.5.1.) с помощью клавиши «1», «2», «3» установить требуемый вид источника периодического несинусоидального воздействия (см. рис.5.1).

Включить режим моделирования и после установления процесса записать показания вольтметров $V1$, $V2$ и $V3$. Результаты измерений занести в табл.5.2.

3.2. Исследование формы напряжения на элементах цепи

Два раза щелкнуть левой клавишей мышки по пиктограмме осциллографа. В результате чего раскроется передняя панель осциллографа. Запустить эмуляцию (моделирование) на экране осциллографа, щелкнув левой клавишей мышки по кнопке включить-выключить (расположена в верхнем правом углу экрана дисплея ПЭВМ и обозначена «I-0»). После чего увидим на экране модели осциллографа

изображение напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ или напряжения на индуктивности $u_L(t)$ или емкости $u_C(t)$. Установив с помощью клавиш [A] и [Space], т.е. [Пробел], требуемую схему цепи, аккуратно срисовать с экрана модели осциллографа изображение соответствующего напряжения.

3. Содержание отчёта

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

4.2. Предварительный расчёт, результаты которого заносятся в таблицы 5.2, 5.3.

4.3. Результаты измерений действующих значений напряжения на элементах модели цепи (заносятся в табл. 5.3).

4.4. Осциллограммы напряжений на элементах модели цепи.

4. Контрольные вопросы и задачи

5.1. Укажите полное сопротивление RL-цепи (рис.5.2,а) на 3-ей гармонике, если на первой гармонике $R=10 \text{ Ом}$; $X_L=3,333 \text{ Ом}$.

Ответы:

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

5.2. Укажите полное сопротивление RC-цепи (рис.5.2,б) на 3-ей гармонике, если на первой гармонике $R=10 \text{ Ом}$; $X_C=20 \text{ Ом}$.

Ответы:

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

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

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

5.4. Укажите правильное выражение мгновенного значения напряжения, если постоянная составляющая U_0 и амплитуды гармоник U_{km} имеют значения.

$$U_0=3,5 \text{ В}; \quad U_{1m}=6,5 \text{ В}; \quad U_{2m}=3,1 \text{ В}.$$

Ответы:

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

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

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

5.5. Укажите правильное выражение мгновенного значения тока, если постоянная составляющая I_0 и действующие значения гармоник тока имеют значения. $I_0=1,5 \text{ А}$; $I_1=2,3 \text{ А}$; $I_4=1,2 \text{ А}$.

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.

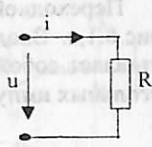
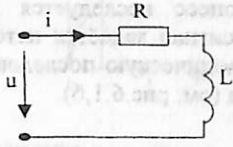
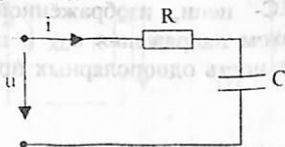
5.6. Укажите цепь, через которую протекает ток,

$$i(t) = 2 \sin(\omega_1 t - 45^\circ) + 0,5 \sin(2\omega_1 t - 63^\circ) \text{ А,}$$

если напряжение на её зажимах

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

Ответы:



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

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

Ответы: А) $P = 2,5$ Вт; Б) $P = 1,5$ Вт; В) $P = 6,75$ Вт.

5.8. Укажите правильное значение коэффициента искажений K_n для периодического напряжения:

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

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

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

Ответы: А) $K_1 = 0,2$; Б) $K_1 = 0,1$; В) $K_1 = 0,3$.

Лабораторная работа №6

Исследование переходных процессов в RC и RL- цепях

Цель работы: Исследование на ПЭВМ путём моделирования с помощью программы Electronics Workbench переходных процессов в последовательных RL- и RC- цепях; изучение влияния параметров этих цепей на характер переходного процесса.

1. Теоретические сведения

Переходной процесс исследуется в RC- цепи, изображённой на рис.6.1,а. Входной сигнал задаётся источником напряжения $u_{вх}$ и представляет собой периодическую последовательность однополярных прямоугольных импульсов (см. рис.6.1,б).

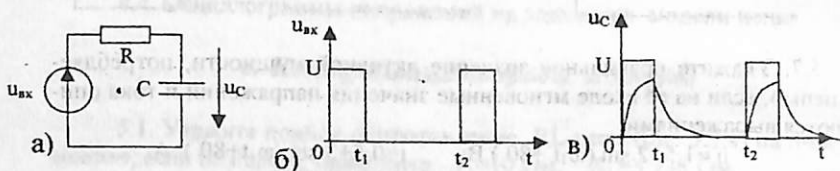


Рис. 6.1. Исследуемая RC-цепь (а), входное напряжение (б), напряжение на ёмкости (в).

Напряжение на входе RC- цепи (рис. 6.1,а) $u_{вх} = u_R + u_C$. Если учесть, что $u_R = Ri$ и $i = C du_C/dt$, то переходной процесс в цепи описывается дифференциальным уравнением

$$u_{вх} = RC(du_C/dt) + u_C, \quad (6.1)$$

которому на первом интервале времени ($0 \leq t \leq t_1$) соответствует решение

$$u_C = U(1 - e^{-t/\tau}), \quad u_R = U e^{-t/\tau}, \quad (6.2)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи, которая равна времени, в течении которого свободная составляющая тока или напряжения в цепи уменьшается по сравнению с его начальным значением в $e = 2,73$ раза. Постоянную времени τ можно найти графически как длину подкасательной, проведённой в любой точке свободного процесса, и в частности, через начальную точку графика (рис. 6.2,а).

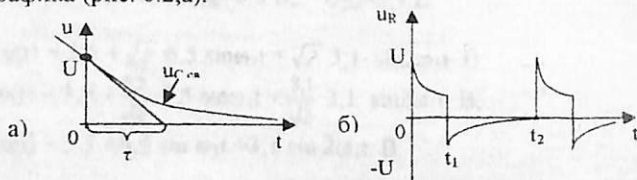


Рис. 6.2. Свободная составляющая напряжения на ёмкости (а), напряжение на сопротивлении (б)

Реакция на выключение импульса ($t_1 \leq t \leq t_2$), т.е. при $u_{вх} = 0$ описываемый выражениями

$$u_C = U(1 - e^{-t_1/\tau})e^{-(t-t_1)/\tau} = U(e^{t_1/\tau} - 1)e^{-t/\tau}; \quad u_R = -u_C. \quad (6.3)$$

Графики напряжений на емкости u_C и сопротивлении u_R согласно (6.3), показаны на рис.6.1,в. и рис.6.2,б.

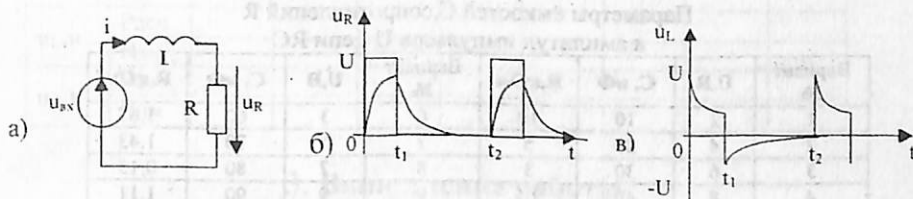


Рис.6.3. Цепь RL (а), напряжение на сопротивлении (б), напряжение на индуктивности (в)

На входе RL-цепи (рис. 6.3,а) действует тот же самый сигнал, что и раньше (рис. 6.1,б). Переходной процесс в такой цепи описывается дифференциальным уравнением

$$u_{вх} = u_R + u_L = Ri + Ldi/dt,$$

которому соответствует характеристическое уравнение $R + Lp = 0$

$$\text{и его корень} \quad p_1 = -R/L = -1/\tau,$$

где $\tau = L/R$ - постоянная времени RL - цепи.

При $0 \leq t \leq t_1$ напряжение на сопротивлении u_R и индуктивности u_L описываются выражениями

$$u_L = Ue^{-t/\tau}; \quad u_R = U(1 - e^{-t/\tau}). \quad (6.4)$$

Реакция на прекращение импульса на входе (что эквивалентно короткому замыканию цепи в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$) ($u_{вх} = 0$) описывается выражениями

$$u_R = U(1 - e^{-t_1/\tau})e^{-(t-t_1)/\tau} = U(e^{t_1/\tau} - 1)e^{-t/\tau}; \quad u_L = -u_R. \quad (6.5)$$

Графики u_R , u_L , описываемые выражениями (6.4), (6.5), представлены на рис. 6.3,б,в.

Необходимо учитывать, что приведенные выше формулы расчета напряжений на емкости u_C , индуктивности u_L и сопротивлении u_R справедливы для цепей, у которых постоянная времени $\tau \leq T/(3 \div 5)$, так что к приходу следующего прямоугольного импульса переходной процесс практически закончится.

Лабораторная работа №6

Исследование переходных процессов в RC и RL- цепях

Цель работы: Исследование на ПЭВМ путём моделирования с помощью программы Electronics Workbench переходных процессов в последовательных RL- и RC- цепях; изучение влияния параметров этих цепей на характер переходного процесса.

1. Теоретические сведения

Переходной процесс исследуется в RC- цепи, изображённой на рис.6.1,а. Входной сигнал задаётся источником напряжения $u_{вх}$ и представляет собой периодическую последовательность однополярных прямоугольных импульсов (см. рис.6.1,б).

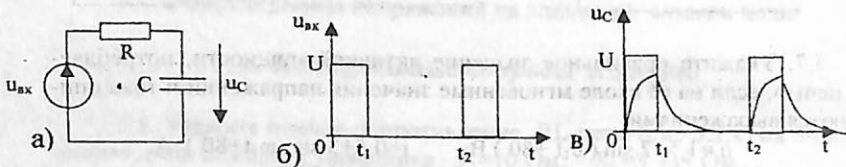


Рис. 6.1. Исследуемая RC-цепь (а), входное напряжение (б), напряжение на ёмкости (в).

Напряжение на входе RC- цепи (рис. 6.1,а) $u_{вх} = u_R + u_C$. Если учесть, что $u_R = Ri$ и $i = C du_C/dt$, то переходной процесс в цепи описывается дифференциальным уравнением

$$u_{вх} = RC(du_C/dt) + u_C, \quad (6.1)$$

которому на первом интервале времени ($0 \leq t \leq t_1$) соответствует решение

$$u_C = U(1 - e^{-t/\tau}), \quad u_R = U e^{-t/\tau}, \quad (6.2)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи, которая равна времени, в течение которого свободная составляющая тока или напряжения в цепи уменьшается по сравнению с его начальным значением в $e = 2,73$ раза. Постоянную времени τ можно найти графически как длину подкасательной, проведённой в любой точке свободного процесса, и в частности, через начальную точку графика (рис. 6.2,а).

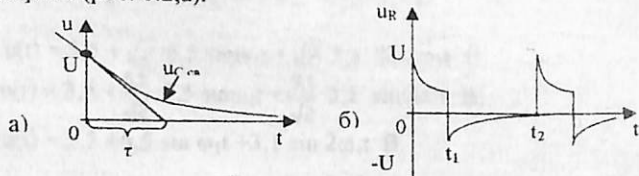


Рис. 6.2. Свободная составляющая напряжения на ёмкости (а), напряжение на сопротивлении (б)

Реакция на выключение импульса ($t_1 \leq t \leq t_2$), т.е. при $u_{вх} = 0$ описываемый выражениями

$$u_C = U(1 - e^{-t_1/\tau})e^{-(t-t_1)/\tau} = U(e^{t_1/\tau} - 1)e^{-t/\tau}; \quad u_R = -u_C. \quad (6.3)$$

Графики напряжений на емкости u_C и сопротивлении u_R согласно (6.3), показаны на рис.6.1,в. и рис.6.2,б.

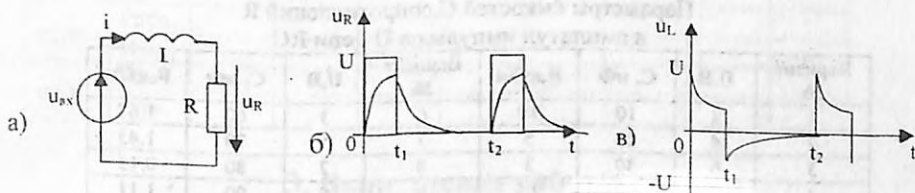


Рис.6.3. Цепь RL (а), напряжение на сопротивлении (б), напряжение на индуктивности (в)

На входе RL-цепи (рис. 6.3,а) действует тот же самый сигнал, что и раньше (рис. 6.1,б). Переходной процесс в такой цепи описывается дифференциальным уравнением

$$u_{вх} = u_R + u_L = Ri + Ldi/dt,$$

которому соответствует характеристическое уравнение $R + Lp = 0$

$$\text{и его корень} \quad p_1 = -R/L = -1/\tau,$$

где $\tau = L/R$ - постоянная времени RL - цепи.

При $0 \leq t \leq t_1$ напряжение на сопротивлении u_R и индуктивности u_L описываются выражениями

$$u_L = Ue^{-t/\tau}; \quad u_R = U(1 - e^{-t/\tau}). \quad (6.4)$$

Реакция на прекращение импульса на входе (что эквивалентно короткому замыканию цепи в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$) ($u_{вх} = 0$) описывается выражениями

$$u_R = U(1 - e^{-t_1/\tau})e^{-(t-t_1)/\tau} = U(e^{t_1/\tau} - 1)e^{-t/\tau}; \quad u_L = -u_R. \quad (6.5)$$

Графики u_R , u_L , описываемые выражениями (6.4), (6.5), представлены на рис. 6.3,б,в.

Необходимо учитывать, что приведенные выше формулы расчета напряжений на емкости u_C , индуктивности u_L и сопротивлении u_R справедливы для цепей, у которых постоянная времени $\tau \leq T/(3 \div 5)$, так что к приходу следующего прямоугольного импульса переходной процесс практически закончится.

2. Предварительный расчёт

2.1. Рассчитать постоянную времени τ цепи RC (рис. 6.1,а) по формуле $\tau=RC$. Значение C и R определяется номером варианта в соответствии с табл. 6.1,а.

Таблица 6.1

Параметры ёмкостей C, сопротивлений R и амплитуд импульсов U цепи RC

Вариант №	U,В	C, нФ	R,кОм	Вариант №	U,В	C, нФ	R,кОм
1	2	10	10	6	3	60	1.67
2	4	20	5	7	5	70	1.43
3	6	30	3	8	7	80	0.13
4	8	40	2.5	9	9	90	1.11
5	10	50	2	10	12	100	1.00

2.2. Рассчитать постоянную времени τ цепи RL (рис. 6.3) по формуле $\tau=L/R$. Значение L и R определяется номером варианта в соответствии с таблицей 6.2,а.

Параметры индуктивностей L, сопротивлений R и амплитуд импульсов U цепи RL

Таблица 6.2

Вариант №	U,В	L, мГн	R,Ом	Вариант №	U,В	L, мГн	R,Ом
1	10	10	100	6	12	60	600
2	8	20	200	7	9	70	700
3	6	30	300	8	7	80	800
4	4	40	400	9	5	90	900
5	2	50	500	10	3	100	1000

2.3. Для RC-цепи (см.рис.6.1,а) при параметрах R, C и U, взятых из табл. 6.1, при частоте следования прямоугольных импульсов $f = 2$ кГц и скважности

$q = T/t_n = 5$ рассчитать временные зависимости напряжения на ёмкости $u_C(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$, для $t = 0; 0.1T; 0.2T; 0.4T; 0.6T; 0.8T; T$. Результаты расчета занести в табл.6.3.

2.4. Для RL-цепи (см.рис.6.3,а) для R и L и U, взятых из табл. 6.2, при частоте следования прямоугольных импульсов (см.рис.6.1,б) $f = 2$ кГц, амплитуде $U = 10$ В и скважности $q = T/t_n = 5$ рассчитать временные зависимости напряжения на индуктивности $u_L(t)$ напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ для $t = 0; 0.1T; 0.2T; 0.4T; 0.6T; 0.8T; T$. Результаты расчетов свести в табл.6.3.

Таблица 6.3

Результаты предварительного расчета и измерений (моделирования)

Формулы		RC(6.2);		RL(6.4)		RC(6.3);		RL(6.5)	
t		0	0.1T	0.2T	0.2T	0.4T	0.6T	0.8T	T
t, мкс									
u _R , В	Расч.								
	Изм.								
u _L , В	Расч.								
	Изм.								
u _C , В	Расч.								
	Изм.								

3. Выполнение работы

Производится загрузка программы Electronics Workbench.

Раскрывается папка Lab_TEC. Загружается файл Lb_6_1, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис.6.4.

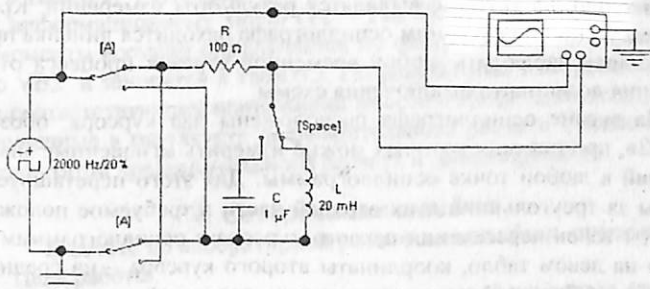


Рис.6.4. Исследование переходных процессов в RL- и RC-цепях.

Схема рис.6.4 позволяет исследовать RL- и RC-цепь при воздействии на них периодической последовательности однополярных прямоугольных импульсов с различной скважностью $q = T/t_{\text{и}}$.

Включение емкости C или индуктивности L осуществляется путем нажатия на клавишу «Space», т.е. «Пробел».

Для наблюдения на экране модели осциллографа напряжения на емкости $u_C(t)$ или индуктивности $u_L(t)$ контакты переключателя [A] (см. рис.6.4) должны находиться в верхнем положении, для наблюдения напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ – в нижнем положении. Переключение контактов [A] осуществляется путем однократного нажатия клавиши A.

3.1. Измерение постоянной времени цепи

С помощью ключа [A] устанавливается требуемая цепь RL или RC, в левом положении контакта ключа [Space] образуется RC-цепь, в правом – RL-цепь. С помощью переключателя [A] устанавливается элемент, с которого снимается напряжение на вход модели осциллографа.

Устанавливаются параметры для элементов ЭЦ (R,L,C) и требуемое значение амплитуды положительного импульса U для заданного варианта (табл. 6.2. и табл. 6.3).

Раскрывается передняя панель модели осциллографа и осуществляется запуск моделирования. После чего на экране осциллографа появляется коробка из картинок (рис. 6.1, 6.2, 6.3)

Периодически щёлкая левой клавишей «мышки» на кнопку «Resume», которая находится в правом верхнем углу дисплея монитора, остановиться на наиболее приемлемом варианте изображения процесса.

Найти на панели осциллографа кнопку [Expand] и щёлкнуть по ней левой клавишей мышки. После чего образуется расширенная передняя панель осциллографа, которая займёт почти весь экран дисплея монитора.

Панель управления расширенной модели осциллографа в отличие от простой модели расположена под экраном и дополнена тремя информационными табло, на которые выводятся результаты измерений. Кроме того, непосредственно под экраном осциллографа находится линейка прокрутки, позволяющая наблюдать любой временной отрезок процесса от момента включения до момента выключения схемы.

На экране осциллографа расположены два курсора, обозначенные «1» и «2», при помощи которых можно измерить мгновенные значения напряжений в любой точке осциллограммы. Для этого перетащите мышкой курсоры за треугольники в их верхней части в требуемое положение. Координаты точек пересечения первого курсора с осциллограммами отображаются на левом табло, координаты второго курсора – на среднем табло. На правом табло отображаются значения разностей между соответствующими координатами первого и второго табло.

Чтобы вернуться к прежнему изображению осциллографа, нажмите клавишу REDUCE.

С помощью мышки установить курсор на красный треугольник с цифры «1» внутри и, нажав левую клавишу мышки, переместить вертикальную красную прямую линию курсора в точку для $t \geq t_1$ осциллограммы, а лучше всего в точку $t=t_1$, т.е. в самый ближайший момент после прекращения импульса, где свободная составляющая переходного процесса имеет максимальное значение.

Например, $u_1(t_1) = 4,1 \text{ В}$.

Далее с помощью мышки установить курсор на синий треугольник «2» и тянуть курсор осциллографа с помощью мышки и его вертикальную линию в точку, где величина напряжения уменьшается в $e = 2,7182818 \approx 2,72$ раза, т.е. $u_1(t_2) = u_1(t_1) / e = 4,1 / 2,72 = 1,5 \text{ В}$. Записать из правого табло значение постоянного времени, например,

$$\tau_{\text{п.в.}} = T_2 - T_1 = 200 \text{ с.}$$

Сравнить измеренное значение постоянной времени $\tau_{изм}$ с рассчитанным τ и определить относительную погрешность измерения постоянной времени.

$$\delta = 100[(\tau - \tau_{изм}) / \tau] \%$$

Если погрешность измерения не превышает 5 %, то можно приступить к выполнению следующего пункта программы.

3.3. Измерение переходного напряжения на сопротивлении $u_R(t)$, индуктивности $u_L(t)$, или ёмкости $u_C(t)$

При измерении переходного напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ индуктивности $u_L(t)$ и ёмкости $u_C(t)$ используется расширенная модель осциллографа. Для этого после получения на экране расширенной модели осциллографа соответствующей осциллограммы красный курсор осциллографа «1» устанавливается в начале прямоугольного положительного импульса. Эта точка принимается за начало отсчёта времени ($t=0$). При дальнейших измерениях расположение этого курсора не изменяется.

Синий курсор «2» экрана расширенной модели осциллографа устанавливаются поочередно в точки, расположенные от первого курсора «1» на расстоянии, соответствующем требуемым моментам времени, для которых был выполнен предварительный расчёт, т.е. значениям t , приведенным в табл.6.3. Установка требуемых значений t контролируется по правому информационному табло (T2 – T1). Величина напряжения в указанные моменты времени определяется по центральному информационному табло VB2 и заносится в табл.6.3. По результатам измерений строятся графики соответствующих напряжений вместе с графиками этих напряжений, полученные в результате предварительного расчёта. Делаются выводы из результатов предварительного расчёта и моделирования.

4. Содержание отчёта

В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены.

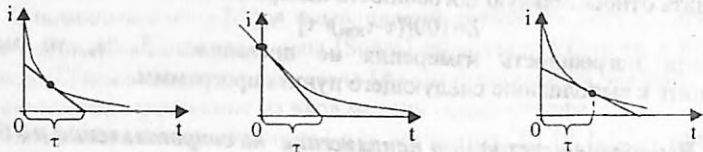
1. Цель работы.
2. Электрическая схема исследуемой цепи и её исходные данные.
3. Расчётные формулы и результаты предварительного расчёта и моделирования.
4. Графики, полученные в результате моделирования (осциллограммы).
5. Выводы по результатам исследований.

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 ;

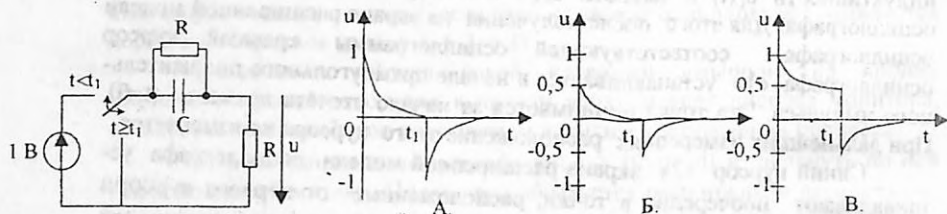
5.3. Графическое определение τ ведётся согласно рисунку

Ответы:



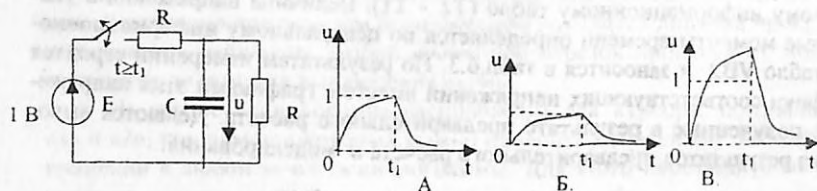
5.4. График переходного напряжения u на выходе цепи

Ответы:

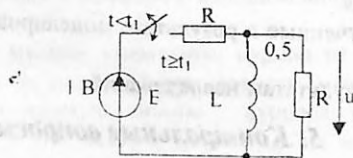


5.5. График переходного напряжения u на выходе цепи

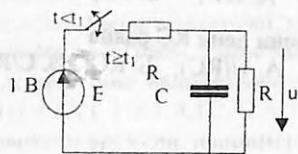
Ответы:

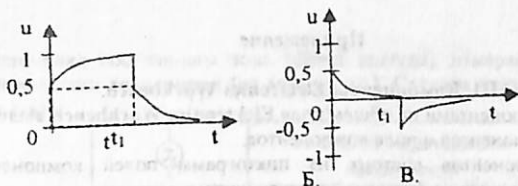


5.6. Используя ответы задания 5.4, указать график переходного напряжения u для цепи.

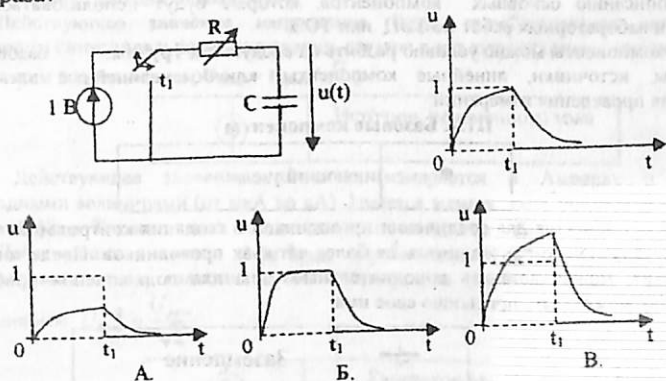


5.7. Указать график переходного напряжения на выходе цепи

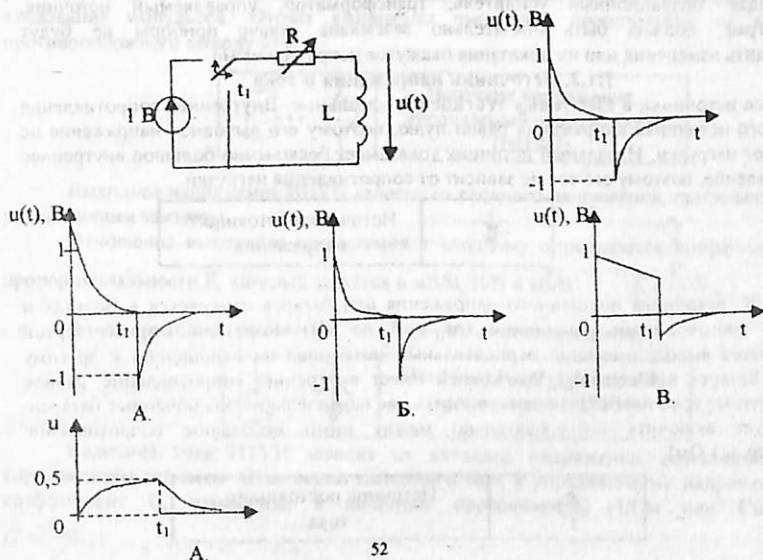




5.8. Цепи RC соответствует выходное напряжение вида $u(t)$. Как изменится форма этого напряжения при уменьшении R в 2 раза?



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



Приложение

П1. Компоненты Electronics Workbench.

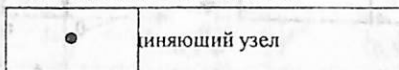
Для операций с компонентами на общем поле **Elektronics Workbench** выделены две области: панель компонентов и поле компонентов.

Панель компонентов состоит из пиктограмм полей компонентов. Поле компонентов - из условных изображений компонентов.

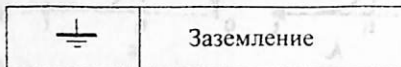
Щелчком линии на одной из одиннадцати пиктограмм полей компонентов, расположенных на панели, можно открыть соответствующее поле. Расположение элементов в полях ориентировано на частоту использования компонента. Перейдем теперь к описанию основных компонентов, которые будут использоваться при выполнении лабораторных работ по ТЭЦ или ТОЭ.

Все компоненты можно условно разбить на следующие группы: базовые компоненты, источники, линейные компоненты, ключи, нелинейные элементы, приборы для проведения измерений.

П1.1. Базовые компоненты



Узел применяется для соединения проводников и создания контрольных точек. К каждому узлу можно присоединить не более четырех проводников. После того как схема собрана, можно вставить дополнительные узлы для подключения приборов. Каждому узлу может быть присвоено свое имя.

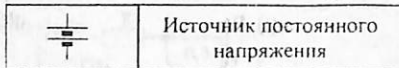


Компонент «заземление» имеет нулевое напряжение и таким образом обеспечивает исходную точку для отсчета потенциалов.

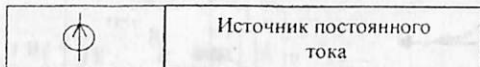
Не все схемы нуждаются в заземлении для моделирования, однако любая схема, содержащая операционный усилитель, трансформатор, управляемый источник, осциллограф, должна быть обязательно заземлена, иначе приборы не будут производить измерения или их показания окажутся неправильными.

П1.2. Источники напряжения и тока

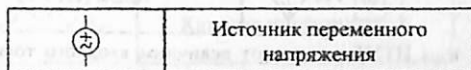
Все источники в **Electronics Workbench** идеальные. Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, поэтому его выходное напряжение не зависит от нагрузки. Идеальный источник тока имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление, поэтому его ток не зависит от сопротивления нагрузки.



ЕДС источника постоянного напряжения или батареи измеряется в Вольтах и задается производными величинами (от мкВ до кВ). Короткой жирной чертой обозначается вывод, имеющий отрицательный потенциал по отношению к другому выводу. Батарея в **Electronics Workbench** имеет внутреннее сопротивление, равное нулю, поэтому если необходимо использовать две параллельно подключенные батареи, то следует включить последовательно между ними небольшое сопротивление (например, в 1 Ом).

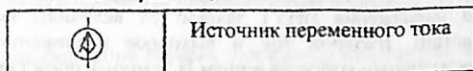


Ток источника постоянного тока (**direct current**) измеряется в Амперах и задаётся производными величинами (от мкА до кА). Стрелка указывает направление тока (от «+» к «-»).



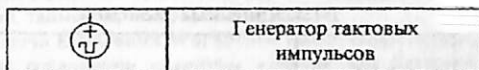
Действующее значение (**root-mean-square-RMS**) напряжений источника измеряется в Вольтах и задаётся производными величинами (от мкВ до кВ). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы. Напряжение источника отсчитывается от вывода со знаком «-».

Действующее значение напряжения U_{RMS} , вырабатываемое источником переменного синусоидального напряжения, связано с его амплитудным значением U_{peak} следующим соотношением $U_{RMS} = U_{peak} / \sqrt{2}$,

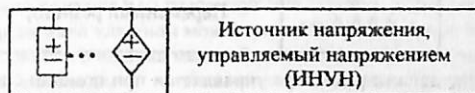


Действующее значение источника измеряется в Амперах и задаётся производными величинами (от мкА до кА). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы. Ток источника отсчитывается от вывода со знаком «-».

Действующее значение тока I_{RMS} , вырабатываемое источником переменного синусоидального тока, связано с его амплитудным значением I_{peak} следующим соотношением $I_{RMS} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}$.



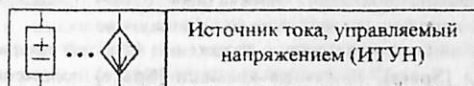
Генератор вырабатывает периодическую последовательность прямоугольных импульсов. Можно регулировать амплитуду импульсов, коэффициент заполнения (скважность импульсов $q = T/t_n$, где T – период, t_n – длительность импульсов) и частоту следования импульсов. Отсчёт амплитуды импульсов производится от вывода, противоположного выводу «+».



Выходное напряжение ИНУН зависит от входного напряжения, приложенного к управляющим зажимам.

Отношение выходного напряжения к входному определяется коэффициентом пропорциональности E , который задаётся в мВ/В, В/В и кВ/В $E = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$,

где V_{OUT} – выходное напряжение, V_{IN} – входное напряжение.



Величина тока ИТУН зависит от входного напряжения, приложенного к управляющим зажимам. Отношение выходного тока к управляющему напряжению – коэффициент G , измеряется в единицах проводимости (1/Ом или Сименс):

$$G = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}}$$

где I_{OUT} – выходной ток источника,

Приложение

П1. Компоненты Electronics Workbench.

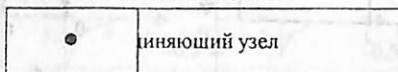
Для операций с компонентами на общем поле **Elektronics Workbench** выделены две области: панель компонентов и поле компонентов.

Панель компонентов состоит из пиктограмм полей компонентов. Поле компонентов - из условных изображений компонентов.

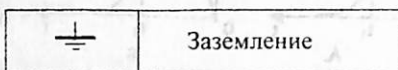
Щелчком линии на одной из одиннадцати пиктограмм полей компонентов, расположенных на панели, можно открыть соответствующее поле. Расположение элементов в полях ориентировано на частоту использования компонента. Перейдем теперь к описанию основных компонентов, которые будут использоваться при выполнении лабораторных работ по ТЭЦ или ТОЭ.

Все компоненты можно условно разбить на следующие группы: базовые компоненты, источники, линейные компоненты, ключи, нелинейные элементы, приборы для проведения измерений.

П1.1. Базовые компоненты



Узел применяется для соединения проводников и создания контрольных точек. К каждому узлу можно присоединить не более четырех проводников. После того как схема собрана, можно вставить дополнительные узлы для подключения приборов. Каждому узлу может быть присвоено своё имя.

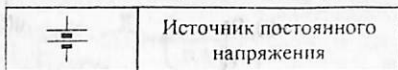


Компонент «заземление» имеет нулевое напряжение и таким образом обеспечивает исходную точку для отсчёта потенциалов.

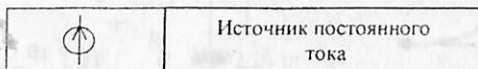
Не все схемы нуждаются в заземлении для моделирования, однако любая схема, содержащая операционный усилитель, трансформатор, управляемый источник, осциллограф, должна быть обязательно заземлена, иначе приборы не будут производить измерения или их показания окажутся неправильными.

П1.2. Источники напряжения и тока

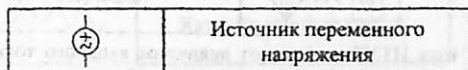
Все источники в **Electronics Workbench** идеальные. Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, поэтому его выходное напряжение не зависит от нагрузки. Идеальный источник тока имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление, поэтому его ток не зависит от сопротивления нагрузки.



ЕДС источника постоянного напряжения или батареи измеряется в Вольтах и задаётся производными величинами (от мкВ до кВ). Короткой жирной чертой обозначается вывод, имеющий отрицательный потенциал по отношению к другому выводу. Батарея в **Electronics Workbench** имеет внутреннее сопротивление, равное нулю, поэтому если необходимо использовать две параллельно подключённые батареи, то следует включить последовательно между ними небольшое сопротивление (например, в 1 Ом).

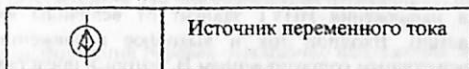


Ток источника постоянного тока (**direct current**) измеряется в Амперах и задаётся производными величинами (от мкА до кА). Стрелка указывает направление тока (от «+» к «-»).



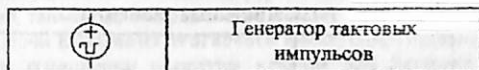
Действующее значение (**root-mean-square-RMS**) напряжений источника измеряется в Вольтах и задаётся производными величинами (от мкВ до кВ). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы. Напряжение источника отсчитывается от вывода со знаком «-».

Действующее значение напряжения U_{RMS} , вырабатываемое источником переменного синусоидального напряжения, связано с его амплитудным значением U_{peak} следующим соотношением $U_{RMS} = U_{peak} / \sqrt{2}$,

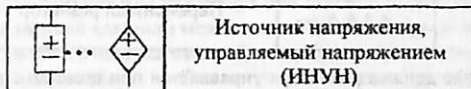


Действующее значение источника измеряется в Амперах и задаётся производными величинами (от мкА до кА). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы. Ток источника отсчитывается от вывода со знаком «-».

Действующее значение тока I_{RMS} , вырабатываемое источником переменного синусоидального тока, связано с его амплитудным значением I_{peak} следующим соотношением $I_{RMS} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}$.



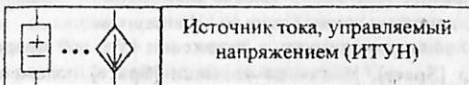
Генератор вырабатывает периодическую последовательность прямоугольных импульсов. Можно регулировать амплитуду импульсов, коэффициент заполнения (скважность импульсов $q = T/t_n$, где T – период, t_n – длительность импульсов) и частоту следования импульсов. Отсчёт амплитуды импульсов производится от вывода, противоположного выводу «+».



Выходное напряжение ИНУН зависит от входного напряжения, приложенного к управляющим зажимам.

Отношение выходного напряжения к входному определяется коэффициентом пропорциональности E , который задаётся в мВ/В, В/В и кВ/В $E = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$,

где V_{OUT} – выходное напряжение, V_{IN} – входное напряжение.

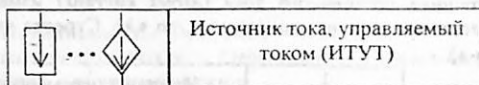


Величина тока ИТУН зависит от входного напряжения, приложенного к управляющим зажимам. Отношение выходного тока к управляющему напряжению – коэффициент G , измеряется в единицах проводимости (1/Ом или Сименс):

$$G = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}}$$

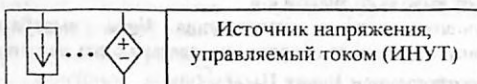
где I_{OUT} – выходной ток источника,

V_{IN} – напряжение, приложенное к управляющим зажимам источника.



Величина тока ИТУТ зависит от величины входного тока (тока управляющей ветви). Входной и выходной токи связаны с коэффициентом пропорциональности F , который определяет отношение выходного тока к току в управляющей ветви. Коэффициент F задается в мА/А, А/А и кА/А. $F = I_{OUT}/I_{IN}$,

где I_{OUT} – выходной ток источника, I_{IN} – входной ток источника.

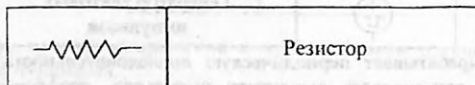


Величина напряжения ИНУТ зависит от величины входного тока (тока в управляющей ветви). Входной ток и выходное напряжение образуют параметр, называемый передаточным сопротивлением H , который представляет собой отношение выходного напряжения к управляющему току. Передаточное сопротивление имеет размерность сопротивления и задается в Ом, кОм, МОм. $H = \frac{V_{OUT}}{I_{IN}}$, где V_{OUT} –

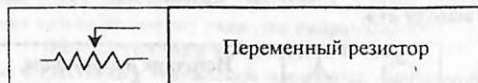
выходное напряжение источника, I_{IN} – входной ток источника.

При подключении управляемых источников нужно соблюдать полярность и направление токов в подключаемых цепях. Стрела указывает направление тока от «+» к «-», знаком «+» указан положительный вывод источника напряжения.

П1.3. Линейные элементы



Сопротивление резистора измеряется в Омах и задается производными величинами (от Ом до МОм).

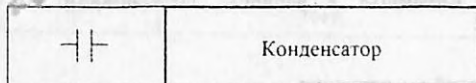


Положение движка резистора управляется при помощи специального элемента – стрелочки-регулятора. В диалоговом окне можно установить сопротивление, начальное положение движка (в процентах) и шаг приращения (также в процентах). Имеется возможность изменять положение движка при помощи клавиш-ключей, которые обозначаются в квадратных скобках.

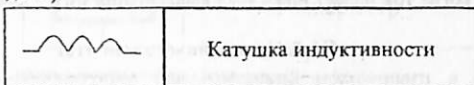
Используемые клавиши-ключи: буквы от А до Z, цифры от 0 до 9, клавиша Enter на клавиатуре, клавиша «пробел» [Space].

Для изменения положения движка необходимо нажать клавишу-ключ. Для увеличения значения положения движка необходимо одновременно нажать [Shift] и клавишу-ключ, для уменьшения – только клавишу-ключ.

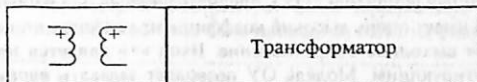
Пример: движок установлен в положении 45%, шаг приращения – 5%, клавиша-ключ – пробел [Space]. Нажатием клавиши [Space] положение движка становится равным 40%. При каждом последующем нажатии на клавишу [Space] значение уменьшается на 5%. Если нажать [Space]+[Shift], то положение движка потенциометра увеличится на 5%.



Ёмкость конденсатора измеряется в Фарадах и задается производными величинами (от пФ до Ф).



Индуктивность катушки (дросселя) измеряется в Генри и задается производными величинами (от мкГн до Гн).



Трансформатор используется для преобразования переменного напряжения V1 в напряжение V2.

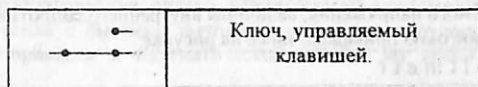
Коэффициент трансформации N равен отношению напряжения V1 на первичной обмотке к напряжению на вторичной обмотке. Параметр N может быть установлен в диалоговом окне свойств модели трансформатора.

Схема, содержащая трансформатор, должна быть заземлена.

П1.4. Ключи

Ключи имеют два состояния: выключенное (разомкнутое) и включённое (замкнутое). В выключенном состоянии они представляют собой бесконечно большое сопротивление, во включённом состоянии их сопротивление равно нулю. Ключи могут управляться клавишей, таймером, напряжением, током.

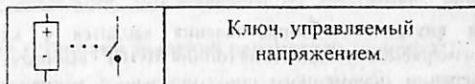
Так как замкнутые ключи Electronics Workbench имеют сопротивление, равное нулю, то при параллельном соединении с другим ключом или батареей рекомендуется последовательно ввести в цепь резистор с сопротивлением в 1 Ом.



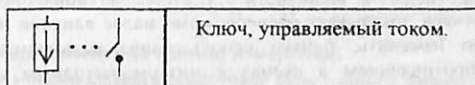
Ключ может быть замкнут или разомкнут при помощи управляющих клавиш на клавиатуре. Имя управляющей клавиши можно ввести с клавиатуры в диалоговом окне, появляющемся после двойного щелчка мышкой на изображении ключа.

Пример: Если необходимо, чтобы состояние ключа изменялось клавишей 'пробел' [Space], то следует ввести текст «Space» в диалоговое окно и нажать ОК.

Используемые клавиши-ключи: буквы от A до Z, цифры от 0 до 9, клавиша Enter на клавиатуре, клавиша пробел [Space].

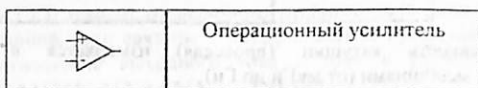


Ключ, управляемый напряжением, имеет два управляющих параметра: включающее (V_{ON}) и выключающее (V_{OFF}) напряжение. Он замыкается, когда управляющее напряжение больше или равно включающему напряжению V_{ON} , и размыкается, когда оно равно или меньше, чем включающее V_{on} .



Ключ, управляемый током, работает аналогично ключу, управляемому напряжением. Когда ток через управляющие выводы превышает ток включения I_{ON} , ключ замыкается; когда ток падает ниже тока выключения I_{OFF} – ключ размыкается.

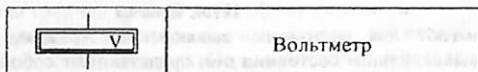
П1.5. Нелинейные элементы



Операционный усилитель (ОУ), предназначенный для работы с обратной связью (ОС). Он обычно имеет очень высокий коэффициент усиления по напряжению, высокое входное и низкое выходное сопротивление. Вход «+» является не инвертирующим, а вход «-» - инвертирующим. Модель ОУ позволяет задавать параметры: коэффициент усиления напряжения, напряжение смещения, входные токи, входное и выходное сопротивление.

П1.6. Приборы для проведения измерений напряжения и тока

Простейшими приборами в **Electronics Workbench** являются вольтметр и амперметр, расположенные в поле индикаторов (**Indic**), они не требуют настройки, автоматически изменяя диапазон измерения. В одной схеме можно применять несколько таких приборов одновременно, наблюдая токи в различных ветвях и напряжения на различных элементах.

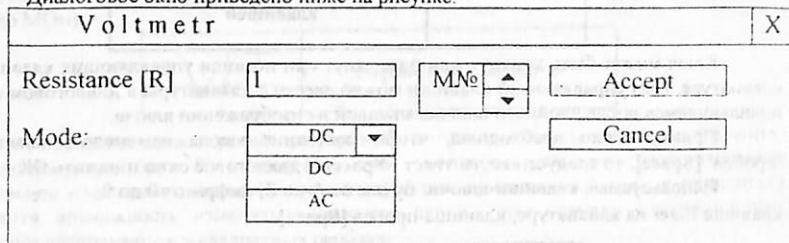


Вольтметр используется для измерения постоянного напряжения. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающегося вольтметр, соответствует отрицательной схеме.

Двойным щелчком мышки на изображении вольтметра открывается диалоговое окно для изменения параметров вольтметра:

вид измеряемого напряжения; величины внутреннего сопротивления

Диалоговое окно приведено ниже на рисунке:



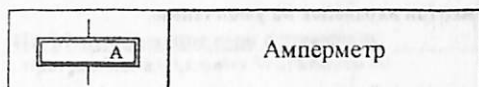
Величина внутреннего сопротивления вводится с клавиатуры в строке **Resistance**, вид измеряемого напряжения (опция **MODE**) выбирается из списка.

При измерении переменного синусоидального напряжения (AC) вольтметр будет показывать действующее значение напряжения U_d , определяемое по формуле $U_d = U_m / \sqrt{2}$.

где U_m – амплитудное значение напряжения.

Внутреннее сопротивление вольтметра 1 МОм, установленное по умолчанию, в большинстве случаев показывает пренебрежимо малое влияние на работу схемы. Его значение можно изменить, однако использование вольтметра с очень высоким внутренним сопротивлением в схемах с низким выходным импедансом может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы.

В качестве вольтметра можно использовать мультиметр.



Амперметр используется для измерений постоянного и переменного тока. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающего амперметр, соответствует отрицательной клемме.

Двойным щелчком мышки на изображении амперметра открывается диалоговое окно для изменения параметров амперметра: вида измеряемого тока; величины внутреннего сопротивления. Диалоговое окно приведено ниже на рисунке

A m p e r m e t r		X
Resistance [R]	<input type="text" value="1"/>	MN ₀ <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/>
Mode:	DC <input type="button" value="▼"/> DC AC	<input type="button" value="Accept"/> <input type="button" value="Cancel"/>

Resistance, вид измеряемого тока (опция **MODE**) выбирается из списка. При измерении переменного синусоидального тока (AC) амперметр будет показывать действующее значения $I = I_m / \sqrt{2}$, где I_m – амплитуда переменного тока. Внутреннее сопротивление амперметра 1мОм (миллиОм), устанавливаемое по умолчанию, в большинстве случаев показывает пренебрежимо малое влияние на работу схемы. Можно снизить это сопротивление, однако использование амперметра с очень низким сопротивлением в схемах с высоким выходным импедансом (относительно выводов амперметра) может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы.

III.7. Установка значений элементов и приборов

Простые аналоговые элементы, такие, как различные источники, конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы, имеют один или несколько параметров. Сложные элементы имеют несколько взаимосвязанных параметров, которые вместе формируют модель конкретного элемента. Кроме заземления и соединяющего узла (которые не имеют параметров), все элементы имеют определенные значения параметров, установленные по умолчанию, и которые можно при необходимости изменить. Значения параметров элементов, установленные по умолчанию, приведены ниже в таблице.

Для установки значений параметров элемента:

- Двойным щелчком мышки по изображению элемента открыть диалоговое окно свойств элемента (это также можно сделать с помощью пункта **Preferences** меню **Circuit**) при этом элемент должен быть выделен).
- В появившемся окне изменить значение параметров элемента
- Установив новые значения, нажать кнопку **Accept** для подтверждения и возврата к схеме.

Для изменения единиц измерения:

- Двойным щелчком мышки вызвать диалоговое окно свойств элемента.
- При помощи кнопок «стрелка вверх» и «стрелка вниз» изменить единицы измерения.
- Установив единицы измерения, нажать клавишу **Accept**.

п	Тип компонента	Параметр измерения	Величина параметра по умолчанию
1	Источник постоянного напряжения (DC)	Вольт (V)	12 В
2	Источник постоянного тока (DC)	Ампер (A)	1 А
3	Источник переменного напряжения (AC)	Вольт (V)	1 В
		Частота (Hz)	1 Гц
4	Источник переменного тока (AC)	Фаза (Grag)	0 град
		Вольт (V)	1 В
		Частота (Hz)	1 Гц
5	ИНУН	Коэффициент пропорциональности (E)	1 В/В
6	ИНУТ	Проводимость (G)	1/Ом
7	ИТУТ	Коэффициент пропорциональности (F)	1 А/А
8	ИТУН	Передающее сопротивление (H)	1 Ом
9	Резистор	Сопротивление (R)	1 кОм
10	Конденсатор	Емкость (C)	1 мкФ
11	Катушка взаимной индуктивности	Коэффициент $n=W_1/W_2$	2
		Индуктивность рассеивания (L_e)	0.000001 Гн
		Индуктивность намагничивания (L_m)	0.0001 Гн
		Сопротивление первичной обмотки (L_p)	0 Ом
		Сопротивление вторичной обмотки (L_s)	0 Ом
12	Ключ, управляемый напряжением	Напряжение включения (V_{ON})	1 В
		Напряжение отключения (V_{OFF})	0 В
13	Ключ, управляемый током	Ток включения (I_{ON})	1 А
		Ток отключения (I_{OFF})	0 А

П1.8. Контрольные вопросы

- 1) Какие базовые элементы программы EWB Вы знаете и какими свойствами они обладают?
- 2) Какие независимые источники напряжения и тока имеет программа EWB; как они обозначаются и какими свойствами обладают?
- 3) Какие зависимые источники напряжения и тока содержатся в программе EWB, как они обозначаются и какими свойствами они обладают?
- 4) Какие линейные элементы содержатся в программе EWB, как они обозначаются и какими свойствами обладают?
- 5) Какие ключи содержатся в программе EWB, как они обозначаются и какими свойствами обладают?
- 6) Какие нелинейные элементы содержатся в программе EWB, как они обозначаются и какими свойствами обладают?
- 7) Какие приборы для проведения измерений напряжения и тока содержит программа EWB, как они обозначаются и какими свойствами обладают?
- 8) Как производится установка значений параметров элементов и приборов в программе EWB?

П2. Моделирование схем с помощью программы Electronics Workbench

Комплекс программ анализа электронных схем **Electronics Workbench (EWB)** позволяет строить аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы различной степени сложности.

Исследуемая схема собирается на рабочем поле дисплея при одновременном использовании «мышки» и клавиатуры. Применение в работе только клавиатуры невозможно. При построении и редактировании схем выполняются следующие операции:

- выбор компонента из библиотеки компонентов;
- выделение объекта;
- копирование объектов;
- удаление объектов;
- соединение компонентов схемы проводниками;
- установки значений компонентов;
- подключение приборов.

Если схема не помещается на схеме монитора, любой её участок можно просмотреть при помощи линеек прокрутки, расположенных справа и над рабочим полем.

После построения схемы и подключения приборов анализ её работы начинается после нажатия любой клавиши «мышки» и выключателя в правом верхнем углу окна программы.

Сделать паузу при работе можно нажатием клавиши F9 на клавиатуре. Возобновить процесс можно повторным нажатием клавиши F9. Сделав паузу в моделировании можно также путём однократного нажатия левой клавиши «мышки» и клавиши PAUSE, повторное нажатие которой приводит к продолжению расчёта.

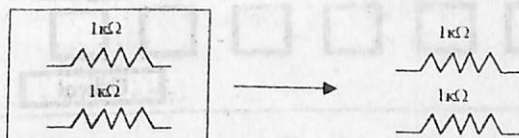
Повторное нажатие выключателя с помощью левой клавиши «мышки» приводит к прекращению работы схемы.

П2.1 Выбор компонента из библиотеки компонентов

Выбор нужного компонента производится из поля компонентов. Нужное поле компонентов выбирается нажатием левой кнопки «мышки» на одной из пиктограмм панели компонентов. При этом в поле компонентов появляются изображения соответствующих компонентов. После выбора поля компонентов нужный компонент при помощи «мышки» перетаскивается на рабочем поле.

П2.2. Выделение объекта и его перемещение

Выделение объекта осуществляется при помощи «мышки» (под объектом подразумевается как один компонент, так и группа компонентов) При выборе компонента нужно установить указатель «мышки» на нужный компонент и щёлкнуть левой кнопкой «мышки». Для выбора группы компонентов нужно установить указатель мышки в один из углов прямоугольной области, содержащей группу, и, нажав левую клавишу «мышки», растянуть рамку до необходимых размеров, после чего отпустить кнопку. Выбранный объект изменяет свой цвет на красный. Снять выделение можно щелчком мышки в любой точке рабочего поля.



На приведенном выше рисунке показано выделение компонентов.

Перемещение объекта производится при помощи «мышки» или стрелок на клавиатуре. Для перемещения объект нужно предварительно выделить, а затем при помощи «мышки» или стрелок на клавиатуре переместить в нужное место. При перемещении «мышкой» установите указатель «мышки» на объект и, нажав левую кнопку «мышки» перетащите объект.

Объект можно поворачивать на угол, кратный 90° . Для этого объект нужно предварительно выделить, а затем выбрать команду **Rotate** из меню **Circuit** или нажать **Ctrl+R**. При этом объект повернется на 90° по часовой стрелке. При повороте группы компонентов на 90° поворачивается каждый компонент, а не вся группа целиком.

П2.3 Копирование и удаление объектов

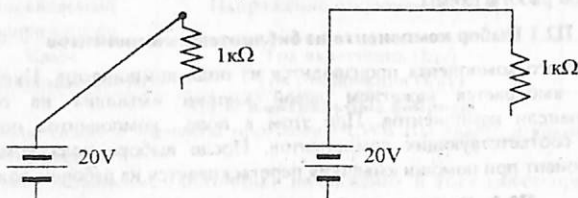
Копирование объектов осуществляется при помощи команды **Copy** из меню **Edit** или нажатием **Ctrl+C**. Перед копированием объект нужно выделить.

После выполнения команды **Copy** выделенный объект копируется в буфер. Для вставки содержимого буфера на рабочее поле нужно выбрать команду **Paste** из меню **Edit** или нажать **Ctrl+V**. После выполнения команды содержимое буфера появится на рабочем поле и будет выделено цветом (обычно красным).

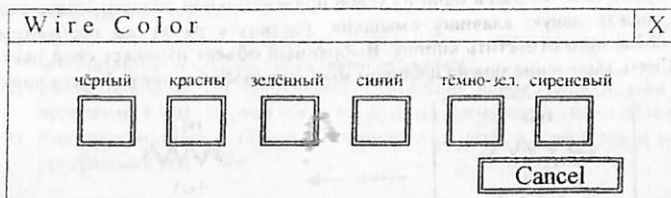
Удаление объекта осуществляется командами **Cut** и **Delete**. Отличие состоит в том, что при выполнении команды **Cut** объект удаляется в буфер и может быть затем вставлен обратно на рабочее поле, а при выполнении команды **Delete** объект удаляется совсем. Перед удалением объект также должен быть выделен.

П2.4. Соединение компонентов схемы проводниками

Для соединения компонентов проводниками нужно подвести указатель «мышки» к выводу компонента. При этом на выводе компонента появится большая черная точка (см. рисунок ниже). Нажав левую кнопку мыши, переместите её указатель к выводу компонента, с которым нужно соединиться, и отпустите кнопку «мышки», выводы компонентов соединятся проводником.



Все проводники в **Electronics Workbench** по умолчанию черного цвета, но цвет проводника можно изменить. Для этого нужно двойным щелчком на изображении проводника открыть окно, приведенное на рисунке, и в окне мышкой выбрать требуемый цвет.



Если в схеме компоненты размещены неаккуратно, то можно потребовать спрямить проводники, соединяющие компоненты. Это можно сделать переместив компоненты так, чтобы проводники отображались прямыми линиями.

П2.5. Установка значений параметров компонентов

Установка значений параметров компонентов производится в диалоговом окне свойств компонента, которое открывается двойным щелчком «мыши» по изображению компонента или командой **Value** из меню **Circuit** (при этом компонент должен быть выделен). В диалоговом окне при помощи клавиатуры и «мыши» нужно ввести требуемое значение параметров компонента и нажать **Accept** или **Cancel** для подтверждения или отмены установки значений.

Выбор модели компонента осуществляется в диалоговом окне выбора модели компонента, которое открывается двойным щелчком «мыши» по изображению компонента или командой **Model** из меню **Circuit**. В диалоговом окне можно выбрать модель компонента и отредактировать значения её параметров. Для редактирования значений параметров модели нужно нажать кнопку **Edit**. При этом откроется окно свойств модели, в котором при помощи «мыши» и клавиатуры можно изменить значения её параметров. Сохранить введённые значения параметров можно нажатием кнопки **Accept**. После этого происходит возврат к предыдущему окну.

После построения схемы можно каждому компоненту присвоить позиционное обозначение или просто какое-либо имя. Это можно сделать при помощи команды **Label** из меню **Circuit** или нажатием **Ctrl+I**, предварительно выделив компонент. После этого откроется диалоговое окно, в котором нужно ввести обозначение или имя компонента и нажать клавишу **Enter**.

П2.6. Подключение приборов

В **Elektronics Workbench** имеется семь приборов, формирующих различные воздействия и анализирующие реакцию схемы. Эти приборы представлены в виде пиктограмм, расположенных на панели инструментов.

Мультиметр



Функциональный генератор



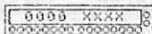
Оциллограф



Боде-плоттер



Генератор слов



Логический анализатор



Логический преобразователь



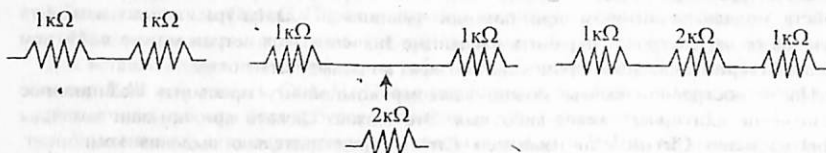
Для подключения прибора к схеме нужно «мышью» перетащить прибор с панели инструментов на рабочее поле и подключить выводы прибора к исследуемым точкам схемы. Некоторые приборы нужно заземлять, иначе их показания будут неверными.

Расширенное изображение прибора выводится в окне, которое появляется после двойного щелчка «мышью» по уменьшенному изображению прибора или после выполнения команды **Zoom** из меню **Circuit**. Закрыть это окно можно командой **Close** из меню, появляющегося при щелчке на кнопке в левом верхнем углу окна. Так же можно использовать комбинацию клавиш **Alt+F4**.

Настройка приборов будет описана в следующем разделе.

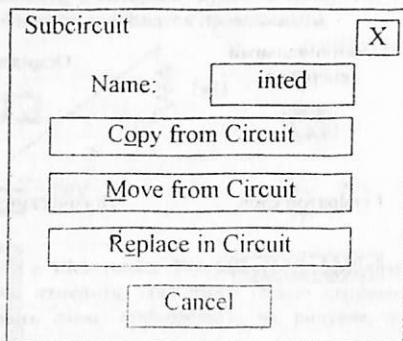
П2.7. Вставка компонента в цепь

После того, как схема построена, можно вставить в неё дополнительные компоненты. Для этого нужно мышью переместить компонент в требуемую точку схемы и, поместив его над проводником, отпустить кнопку мыши. Компонент автоматически вставится в цепь, как показано на рисунке:



П2.8. Создание субблоков

Elektronics Workbench позволяет объединять участки в субблоки (подсхемы). Для этого необходимо выделить участок схемы, который нужно объединить в субблок. После выделения нужно выбрать пункт **Subcircuit** в меню **Circuit**. На экране появится диалоговое окно, приведённое ниже на рисунке.

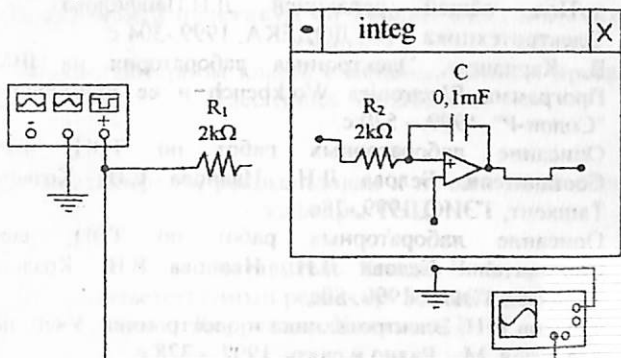


В строке **Name** нужно ввести имя субблока, затем нужно нажать одну из четырёх кнопок:

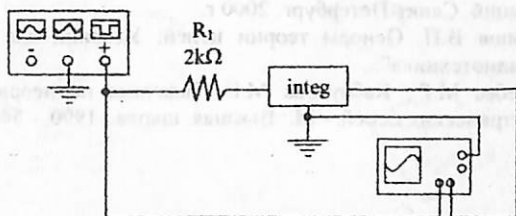
- **Copy From Circuit** (Скопировать из схемы);
- **Move From Circuit** (Выделить из схемы);
- **Replace in Circuit** (Заменить в схеме);
- **Cancel** (Отмена).

При нажатии кнопки «Copy From Circuit» схема остаётся без изменения, а в поле компонентов Custom появляется субблок с присвоенным ему именем.

При нажатии кнопки «Move From Circuit» выделенный участок схемы на рабочем поле вырезается из схемы и помещается в окно с именем, присвоенным субблоку, как показано на рисунке. В поле компонентов Custom появляется изображение субблока с присвоенным ему именем.



При нажатии на кнопку «Replace in Circuit» выделенный участок схемы замещается в схеме субблоком, как показано ниже. При этом также, как и в предыдущем случае, открывается окно с именем, присвоенным субблоку, и в поле компонентов Custom появляется субблок с этим именем.



П2.9 Контрольные вопросы

1. Как осуществляется выбор компонента из библиотеки компонентов?
2. Как осуществляется выделение объекта?
3. Как выполняется копирование объектов?
4. Как осуществляется удаление объектов?
5. Как осуществляется соединение компонентов схемы проводниками?
6. Как осуществляется установка значений параметров компонентов?
7. Как осуществляется подключение измерительных приборов?
8. Как осуществляется создание субблоков?

Литература

1. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т. Под общей редакцией Д.И.Панфилова. – Т.1: Электротехника. - М.: ДОДЕКА, 1999.-304 с.
2. В. Карлашук. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М., "Солон-Р", 1999. - 520 с.
3. Описание лабораторных работ по ТЭЦ, часть 1. Составители: Белова Л.Н., Иванова Е.В., Козлов В.А. Ташкент, ТЭИС. 1999.-78с.
4. Описание лабораторных работ по ТЭЦ, часть 2. Составители: Белова Л.Н., Иванова Е.В., Козлов В.А. Ташкент, ТЭИС. 1999.-80с.
5. Ушаков В.Н. Электротехника и электроника. Учеб. пособие для вузов. М.,: Радио и связь. 1997. - 328 с.
6. Бакалов В.П., Воробийенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей: Учебник для вузов. 1998. - 462с.
7. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1989. - 525 с.
8. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. Курс лекций. Санкт-Петербург. 2000 г.
9. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. "Радиотехника".
10. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая. школа., 1990. - 544 с.

Лабораторный практикум по Теории электрических цепей,
часть 1
(в компьютерном классе с использованием программы
Electronics Workbench)

Рассмотрен и рекомендован к печати на заседании
кафедры ТЭЦ.

Составитель Козлов В. А.
Ответственный редактор Зелинский М. М.
Корректор Халимова Р. С.

Бумага офсетная. Заказ №342.
Тираж 150
Отпечатано в типографии ТУИТ
700084 Ташкент, ул. Амир Темур 108 .