



**Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Национальный исследовательский университет
Высшая школа экономики"
Московский институт электроники и математики**

Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций

**ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ
СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН**

**Методические указания к лабораторному практикуму
по дисциплинам «Схемотехника электронных средств», «Схемотех-
ника телекоммуникационных устройств», «Электротехника и элек-
троника», «Электроника и схемотехника», часть 1.**

Москва 2013

Составители: к.т.н., доцент Т.М.Андреевская

ст. преподаватель К.А.Богачев

УДК 621.3.01

Методические указания к лабораторному практикуму по дисциплинам «Схемотехника электронных средств» направления 211000.62 «Конструирование и технология электронных средств, 210200.62 «Проектирование и технология электронных средств, «Схемотехника телекоммуникационных устройств» и «Электротехника и электроника» направления 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Электроника и схемотехника» направления 0903301 «Компьютерная безопасность». Часть 1. //Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Сост.: Т.М Андреевская., К.А. Богачев. М., 2013. - 27с.
Ил. 17.

Приводится описание лабораторных работ и рабочего места при их проведении, даются основные рекомендации по математическому, схемотехническому моделированию, необходимые для выполнения экспериментальной части лабораторных работ.

ISBN 5-94506-133-6

Оглавление

Общие указания	4
Использование систем математического и схемотехнического моделирования при проведении лабораторного практикума по электронным дисциплинам	4
Описание измерительных приборов, используемых при проведении данного цикла лабораторных работ	5
1. Генератор сигналов функциональный Г6-46.	5
2. Осциллограф двухлучевой С1-55.....	6
3. Вольтметры цифровые универсальные В7-16 и В7-16А.....	7
4. Генератор сигналов высокочастотный Г4-102А.	7
Лабораторная работа №1.	9
Лабораторная работа №2. Электрические цепи постоянного тока. Делитель постоянного напряжения.	16
Лабораторная работа №3. Исследование разветвленной цепи постоянного тока.....	20
Работа №4 Исследование разветвленной цепи гармонического тока.....	24

Общие указания

1. Перед началом цикла лабораторных занятий на кафедре «Радиоэлектроника» каждый студент обязан ознакомиться с **правилами техники безопасности** и в дальнейшем их исполнять. При выполнении работы необходимо быть внимательным, сосредоточенным и аккуратным. В лаборатории и дисплейном классе необходимо соблюдать тишину. Разговоры, связанные с выполнением работы, допускаются только в полголоса. Во время выполнения работы хождение без дела по лаборатории запрещено. Входить и выходить из нее следует только с разрешения преподавателя. Не разрешается оставлять без присмотра включенную установку. При возникновении каких-либо неясностей при выполнении работы следует обратиться за разъяснением к преподавателю или лаборанту. Запрещается проводить эксперименты, не связанные с заданием на выполняемую по плану работу. **При обнаружении каких-либо неисправностей в экспериментальной установке, а также при появлении запаха горелых проводов или задымления в аудитории, работа немедленно прекращается, лабораторная установка или компьютер выключается, об этом немедленно сообщается лаборанту и преподавателю, под руководством которых немедленно приступают к тушению возгорания. При несчастном случае с Вами или Вашим товарищем немедленно сообщите преподавателю.**

2. К работе в лаборатории допускаются студенты, выполнившие задания и представившие отчет по предварительной подготовке (если таковая предусмотрена заданием) и получившие допуск преподавателя к экспериментальной части.

3. Отчет выполняется **каждым** студентом и должен содержать:

а) название работы;

б) материал, полученный в результате математического и схемотехнического моделирования заданий работы;

г) схему каждого эксперимента и запись параметров схемы и сигналов на ее входе;

д) таблицы и графики снятых данных; зарисовки осциллограмм. Все полученные данные, в том числе и на осциллограммах, должны быть выражены в соответствующих единицах или в определенном масштабе (B , A , $\Gamma\text{ц}$, c);

е) по каждому эксперименту должны быть представлены выводы или комментарии к полученным результатам.

4. Работа выполняется **бригадой, состоящей не более чем из двух студентов**, один из которых является «старшим по бригаде». Он контролирует выполнение эксперимента, наблюдает за порядком на рабочем месте и за выполнением правил техники безопасности.

Использование систем математического и схемотехнического моделирования при проведении лабораторного практикума по электронным дисциплинам

В большинстве учебных заведений при изучении таких учебных курсов, как «Электротехника», «Электроника», «Схемотехника», «Основы электрических цепей», «Основы радиоэлектроники и связи» и т.п., предусмотрен лабораторный практикум, позволяющий учащимся получить более глубокое представление о дисциплине. Однако даже хорошо оснащенные лаборатории не могут охватить всего объема курсов, что приводит к появлению пробелов в практическом обучении.

В этой сложной ситуации можно рекомендовать включение в учебный процесс различных систем компьютерного моделирования, позволяющих наглядно представлять

различные физические явления. Максимальный интерес при изучении вышеуказанных курсов представляют системы математического и схемотехнического моделирования. Они позволяют проводить предварительный расчет электрических и электронных схем, а использование достаточно сложных математических моделей электронных компонентов позволяет получить хорошее соответствие параметров схемы с реальными макетами. Предварительные расчеты и построение графиков удобно проводить с помощью программы MathCad или других программ математического моделирования.

Из всего многообразия систем схемотехнического моделирования большое распространение получила система MicroCAP, поскольку при небольшом занимаемом объеме и небольшим требованиям к вычислительной мощности, позволяет проводить графический ввод схем, моделирование электрических процессов, а также графический вывод результатов. Библиотека стандартных компонентов, кроме зарубежной элементной базы, содержит отечественные аналоговые и цифровые элементы.

Для учебного процесса максимальный интерес представляют расчет схемы по постоянному току (DC - анализ), расчет временных процессов (TRANSIENT - анализ) и частотный расчет (AC - анализ).

Описание измерительных приборов, используемых при проведении данного цикла лабораторных работ.

1. Генератор сигналов функциональный Г6-46.

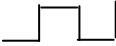
Генератор представляет собой источник сигналов синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной форм в диапазонах частот от 0,1 Гц до 1 МГц с разделением на декадные поддиапазоны. В пределах поддиапазонов осуществляется непрерывная перестройка частоты.

Заданная частота высвечивается на индикаторе частотомера.

Амплитуда сигналов составляет не менее 5 В при работе на согласованную нагрузку 600 Ом и не менее 10 В на ненагруженном выходе. Имеется дискретное ослабление сигналов на -20 и -40 дБ и плавное ослабление в пределах 20 дБ.

Органы управления, перестройки и подключения приведены в таблице.

Наименование	Назначение
Ручка «ГРУБО»	Для грубой перестройки частоты
Ручка «ПЛАВНО»	Для плавной перестройки частоты
Переключатель «ЧАСТОТА»	Для выбора поддиапазона
Ручка «АМПЛИТУДА»	Для плавного ослабления величины выходного сигнала генератора
Переключатель «АТТЕНЮАТОР, дБ»	Для ступенчатого ослабления величины выходного сигнала генератора
	Для включения режима генерации сигнала гармо-

	нической формы.
	Для включения режима генерации сигнала прямоугольной формы.
	Для включения режима генерации сигнала пилообразной формы
Переключатель «СМЕЩ»	Для включения режима смещения формируемого сигнала
Ручка «СМЕЩ»	Для плавного смещения формируемого сигнала
Гнездо «ВЫХОД»	Для подключения к внешним исследуемым цепям
Гнездо «ВХОД ЧМ»	Для управления частотой генератора внешним сигналом (частотная модуляция)
Выключатель «СЕТЬ», находится на задней панели слева	Для включения генератора в рабочее состояние

2. Осциллограф двухлучевой С1-55.

Осциллограф предназначен для одновременного наблюдения и исследования формы одного или двух электрических процессов путем визуального наблюдения и измерения их временных и амплитудных значений.

Осциллограф состоит из двух идентичных каналов вертикального отклонения луча (YI и YII), блока развертки и синхронизации.

Блоки вертикального отклонения луча включают в себя:

- гнездо «ВХОД 1 МОм 40 Пф», расположенное на передней панели прибора;
- тумблер переключения открытого (∞) или закрытого входа ($\approx$);
- аттенюатор «Усиление, вольт/деление» со ступенчатой и плавной регулировкой; **Внимание:** при измерениях по вертикальной шкале плавный регулятор должен быть повернут вправо до щелчка.
- выведенные под шлиц регуляторы каналов («корр.», «баланс»).

Блок разверток включает в себя:

- ступенчатый и плавный регулятор периода развертки («Длительность», «время/делен»); **Внимание:** при измерении длительности плавный регулятор развертки должен находиться в крайнем правом положении.
- множитель длительности развертки ($\times 1$, $\times 0.2$).

Синхронизировать развертку в большинстве случаев наиболее удобно исследуемым сигналом. Для этого ручку «Синхронизация» нужно установить в положение «Внутр. I» или «Внутр. II» в зависимости от того, сигналом какого канала желательно за-синхронизировать развертку (лучше синхронизировать тем сигналом, который больше по амплитуде).

Кроме того, режим развертки можно установить ручкой «Стаб»: для получения устойчивой картины на экране ручку «Стаб» повернуть влево до исчезновения неустойчи-

вой осциллограммы, затем попытаться получить картинку с помощью ручки плавной синхронизации. При необходимости ручку «Стаб» повернуть немного вправо.

Подготовка осциллографа к проведению измерений.

Включить питание осциллографа («Вкл. питание»). Должна загореться сигнальная лампочка.

Через 2—3 минуты ручками «Яркость», «Фокус», «Астигм.» отрегулировать появившиеся две линии разверток. Если лучей на экране не будет, то необходимо переместить лучи в пределы рабочей области экрана при помощи ручек $\leftrightarrow$ и $\updownarrow$. Если лучей на экране все же не будет, повернуть вправо ручку «Стаб» до появления лучей.

Установить ручки «Вольт\дел» каждого канала в положение 0.5.

Ручкой «Шкала» устанавливают яркость подсвета делений, необходимую для проведения измерений.

3. Вольтметры цифровые универсальные В7-16 и В7-16А.

Предназначены для измерения напряжений постоянного и переменного тока (до 20 КГц), а также величины активных сопротивлений. В данном лабораторном практикуме вольтметр используется для измерений **только постоянных напряжений**.

При включении тумблера «Сеть» должны загореться: один из знаков «+», «-» или «~», одна из размерностей «mV», «V», «Ω», «KΩ», «MΩ», несколько ламп цифрового табло.

Подготовка к работе и установка нуля.

а) Вольтметр типа В7-16:

- подключить кабель к разъему « $\simeq$ 1-100V,R»;
- включить тумблер «сеть»;
- установить тумблер « /  » в положение «  »;
- установить ручку «ВР.ИНД.» в крайнее левое положение;
- установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «0» (установка нуля);
- ручкой «0» установить показания прибора «0000»;
- установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «» и ручкой «» установить на табло показание, равное значению, указанному на шильдике прибора;
- установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «U_0.1s» или «U_1s». Ручкой «0» установить показания «0000».
- Установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в режим измерений постоянного напряжения.

б) Вольтметр типа В7-16А.

- подключить кабель к разъему « $\simeq$ 100V,R», ручкой «0» установить показания прибора «0000»;
- установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «» и ручкой «» установить на табло показание, равное значению, указанному на шильдике прибора;
- Установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в режим измерений постоянного напряжения.

4. Генератор сигналов высокочастотный Г4-102А.

Данный генератор используется как источник высокочастотных (от 100 кГц до 50 МГц) гармонических и амплитудно-модулированных гармонических колебаний (гнездо «μV»), а также почти прямоугольных высокочастотных колебаний с нерегулируемой амплитудой (гнездо «1В»).

Частота колебаний устанавливается нажатием соответствующей кнопки выбора диапазона и ручкой плавной установки частоты по шкале «Установка частоты, МГц». С гнезда «mV» снимаются гармонические колебания, эффективное значение амплитуды которых определяется в микровольтах произведением значения множителя ступенчатого аттенюатора и значения плавного аттенюатора в соответствии с цветом установки ступенчатого делителя. При необходимости получения на выходе «mV» амплитудно-модулированных колебаний используют либо внутреннюю АМ с частотой 1 КГц, при этом должен быть включен тумблер «Внутр», либо внешнюю АМ (тумблер «Внешн») при подаче на вход генератора низкочастотного сигнала от внешнего генератора.

Лабораторная работа №1. Изучение системы схемотехнического моделирования MicroCAP.

Программа схемотехнического анализа MicroCap пользуется достаточно большой популярностью. Это связано с тем, что она имеет удобный, дружественный интерфейс и предъявляет достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам персонального компьютера. Однако предоставляемые при этом возможности достаточно велики. MicroCap позволяет анализировать не только аналоговые, но и цифровые устройства. В последних версиях программы возможно также и смешанное моделирование аналого-цифровых электронных устройств. Опытные пользователи могут также в нестандартной ситуации создавать собственные макромодели, облегчающие имитационное моделирование без потери существенной информации о поведении системы.

Основные возможности программы.

Графические возможности:

- Построение принципиальных и функциональных электрических схем при помощи встроенного графического редактора с использованием библиотеки условных графических обозначений (УГО) электронных компонентов.
- Изменение УГО компонентов в соответствии с ГОСТом (разработчики программы используют американский стандарт).
- Создание собственных УГО с помощью встроенного редактора УГО Shape Editor.
- Нанесение текстовых надписей на поле принципиальной схемы, в том числе и текстовых обозначений основных узлов (для удобства моделирования). Возможность включения-отключения отображения текстовых надписей на принципиальной схеме.
- Добавление к принципиальной схеме рамки и штампа с основными сведениями о схеме.
- Построение различных геометрических фигур (прямоугольники, круги, линии), используемых для выделения законченных функциональных блоков.
- Вставка и размещение на поле принципиальной схемы графического файла со вспомогательной информацией в любом из общепринятых графических форматов.
- Размещение на поле принципиальной схемы (или в специальном текстовом окне) текстовых директив управления моделированием, задания параметров моделей, задания глобальных параметров моделирования.
- Отображение номеров узлов принципиальной схемы, присваиваемых графическим редактором при вводе схемы.
- Возможность выбора показываемых атрибутов компонента электронной схемы: номинального значения, наименования выводов, позиционного обозначения, параметров и имени макромодели и пр. - путем установки/снятия флагов в окне задания параметров соответствующего компонента.
- Возможность включения-отключения показа всех разрешенных текстовых атрибутов электронных компонентов схемы.
- Использование координатной сетки с различным шагом, показ которой можно включать/отключать.
- Возможность использования «растягивающихся проводов», не нарушающих электрические соединения при перемещении компонентов принципиальной схемы.
- Масштабирование изображения принципиальной схемы на экране (увеличение, уменьшение).
- Возможность поиска компонента на принципиальной схеме по заданному признаку.
- Навигация по схеме с помощью линейек прокрутки и протяжки правой клавиши мыши.
- Расстановка меток (флагов) на принципиальной схеме большого размера для быстрой навигации по схеме.
- Возможность показа концов выводов компонентов для выявления отсутствия соедине-

ния между ними.

- Возможность изменения цветовых и шрифтовых параметров отображения элементов схем отдельно по элементам или перед началом ввода для всей принципиальной схемы.
- Операции с выделенным блоком принципиальной схемы (копирование, отражение, размножение и т. д.).

Моделирование:

- Моделирование режимов работы электронных устройств, заданных с помощью принципиальных и функциональных схем.
- Анализ переходных процессов в схемах при подаче напряжения питания и (или) воздействия (воздействий) произвольной формы с построением графиков переменных состояния схемы и их функций: зависящих от времени; зависящих друг от друга; разложенных в ряд Фурье по гармоническим составляющим.
- Анализ малосигнальных частотных характеристик схемы (линеаризованной в окрестности режима по постоянному току) при воздействии на нее одного или нескольких источников гармонического сигнала с постоянной амплитудой и меняющейся частотой. При этом возможен вывод следующих графиков: зависимости комплексных значений переменных состояния (амплитуда, фаза, групповая задержка) от частоты в линейном, логарифмическом, полулогарифмическом (логарифмическом по оси X или по частоте и линейным по оси Y) масштабах; зависимости составляющих комплексных величин переменных состояния друг от друга (например, построение годографа радиус-вектора переменной состояния при использовании в качестве переменной X частотно-зависимой действительной части, в качестве переменной Y - частотно-зависимой мнимой части); зависимости спектральных плотностей напряжений шума, приведенных к указанным входному и выходному узлам, от частоты.
- Анализ передаточных характеристик по постоянному току. Возможно проведение анализа при изменении двух входных переменных, что позволяет строить на графике семейства характеристик устройства (как, например, семейство выходных характеристик биполярного транзистора IC(UCE) при различных значениях тока базы IB). При этом возможен вывод следующих графиков: зависимости выбранных переменных состояния от изменяемой входной переменной I (DCINPUT1); зависимости переменных состояния схемы друг от друга.
- Динамический анализ схемы по постоянному току с отображением на схеме (по выбору) напряжений, токов, мощностей, состояний полупроводниковых приборов при изменении с помощью движковых регуляторов - SLIDERS-величин источников ЭДС, тока, сопротивлений резисторов.
- Динамический малосигнальный анализ схемы по переменному току (линеаризованной в окрестности рабочей точки по постоянному току) с показом на схеме величин комплексных переменных состояния схемы при различных частотах (задаваемых списком) при изменении величин пассивных компонентов (резисторы, индуктивности, конденсаторы) с помощью движковых регуляторов - SLIDERS.
- Расчет чувствительностей в режиме по постоянному току. В этом режиме рассчитываются чувствительности одной или нескольких выходных переменных к изменению одного или нескольких входных параметров (частные производные по входным параметрам). В качестве входных изменяемых параметров для этого вида анализа могут выступать все параметры моделей, величины пассивных компонентов, символьные параметры.
- Расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току. Рассчитывается отношение измеренного изменения заданного пользователем выходного выражения к вызвавшему это изменение малому возмущению заданного пользователем входного источника постоянного напряжения (тока). При этом автоматически рассчитываются входное (относительно клемм входного источника) и выходное (относительно узлов вы-

ходного напряжения) сопротивления схемы на постоянном токе.

- Расчет нелинейных искажений усилительных схем с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа.

- Многовариантный анализ внутри основных трех режимов моделирования: переходных процессов, малосигнальных частотных характеристик и передаточных характеристик по постоянному току. При этом могут изменяться номиналы простых компонентов, величины параметров моделей компонентов, значения символьных переменных с линейным и логарифмическим шагом с возможностью выбора одновременного изменения до 20 параметров или организации до 20 вложенных циклов. Имеется возможность автоматической подписи на выходных графиках каждого варианта анализа. При использовании многовариантного анализа актуально 3D-моделирование, вызываемое из меню применяемого вида анализа. При этом по оси z откладывается значение варьируемого параметра (или номера варианта при статистическом анализе Монте-Карло) и в пространстве строится поверхность, на которой лежат все кривые многовариантного анализа.

- Параметрическая оптимизация схемы для основных трех режимов анализа: переходных процессов, малосигнальных частотных характеристик, передаточных характеристик по постоянному току. Оптимизируемая функция выбирается из меню PERFORMANCE, включающего большой набор стандартных параметров графиков (типа длительного нарастания/спада, глобального максимума/минимума и т. п.).

- Анализ Монте-Карло - многовариантный анализ при статистическом разбросе параметров компонентов в каждом из трех основных режимов моделирования. Внутри этого анализа возможен вывод гистограмм распределения заданной функции (например, длительность фронта, глобального максимума) по интервалам значений.

- Использование графического постпроцессора PROBE при анализе переходных процессов, малосигнальном частотном анализе и анализе передаточных характеристик по постоянному току. После запуска одного из указанных видов анализа пользователь получает дополнительные удобства для вывода графиков интересующих переменных состояния схемы. Например, нужное напряжение выводится в специальном окне слева от принципиальной схемы после двойного клика мышью в интересующем узле принципиальной схемы.

МЫ.

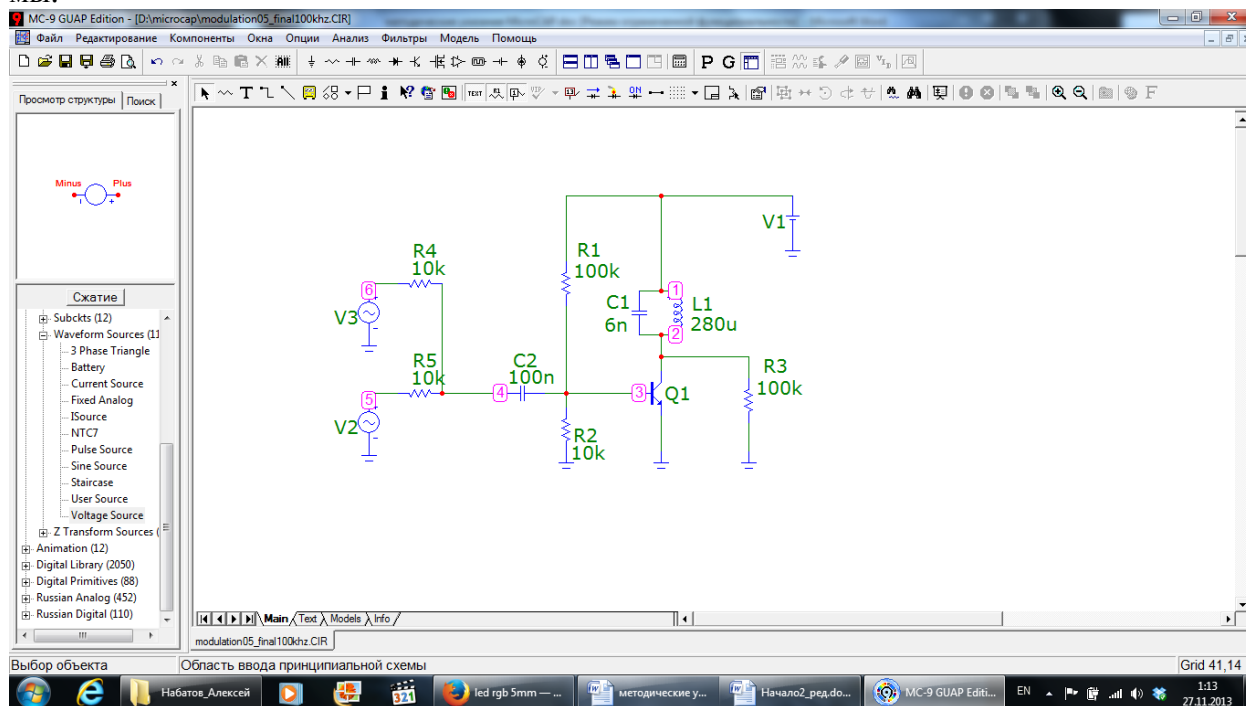


Рис. 1.1. Внешний вид программы MicroCAP. Графический ввод схемы.

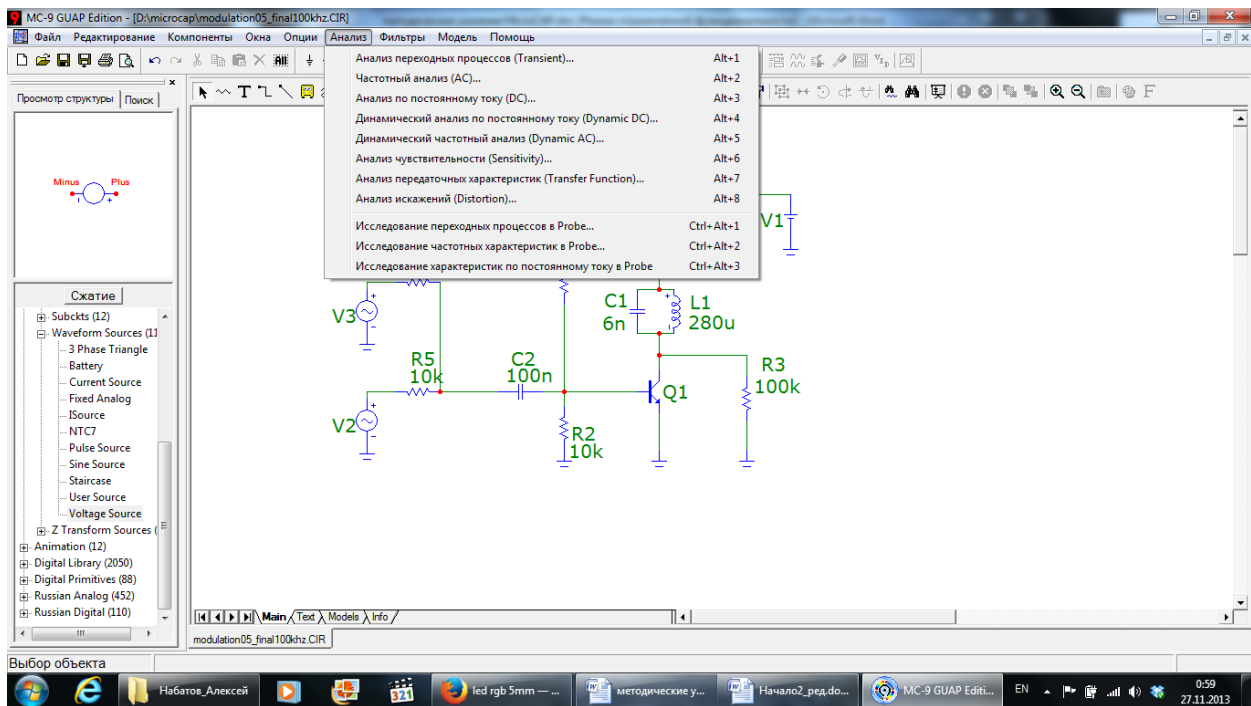


Рис.1.2. Внешний вид программы MicroCAP. Выбор типа расчета (задание на моделирование).

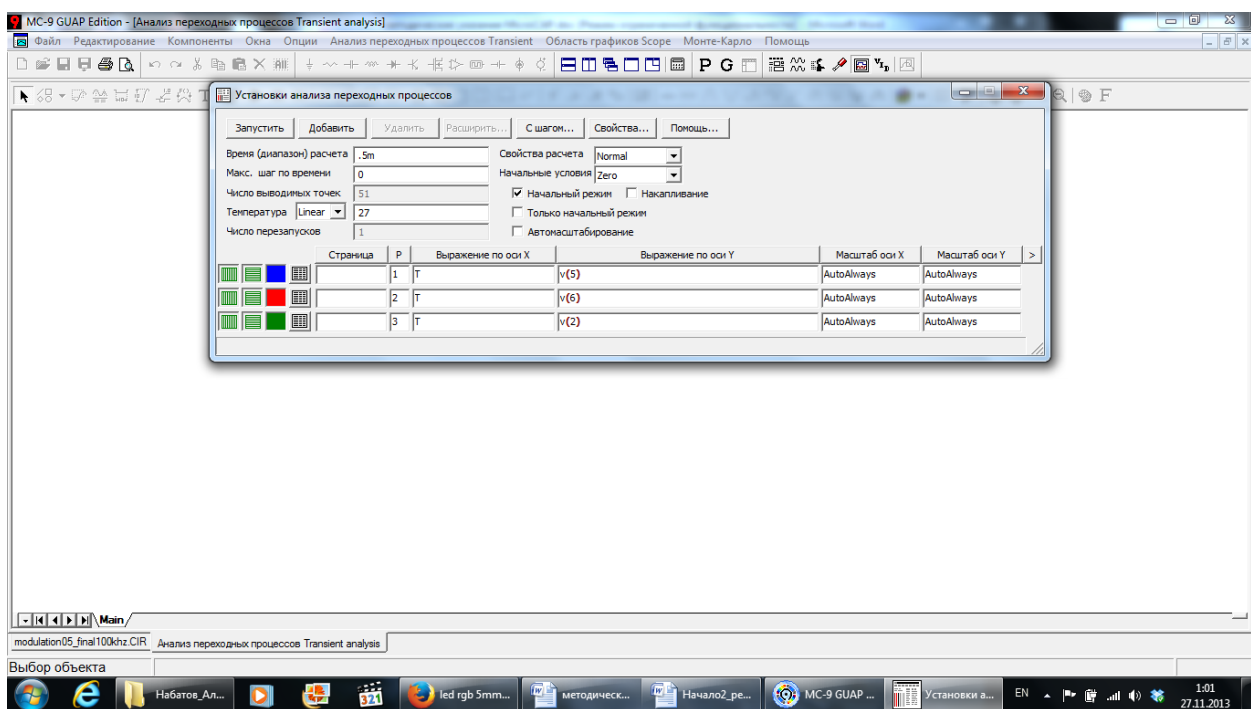


Рис.1.3. Внешний вид программы MicroCAP. Установки расчета временных процессов.

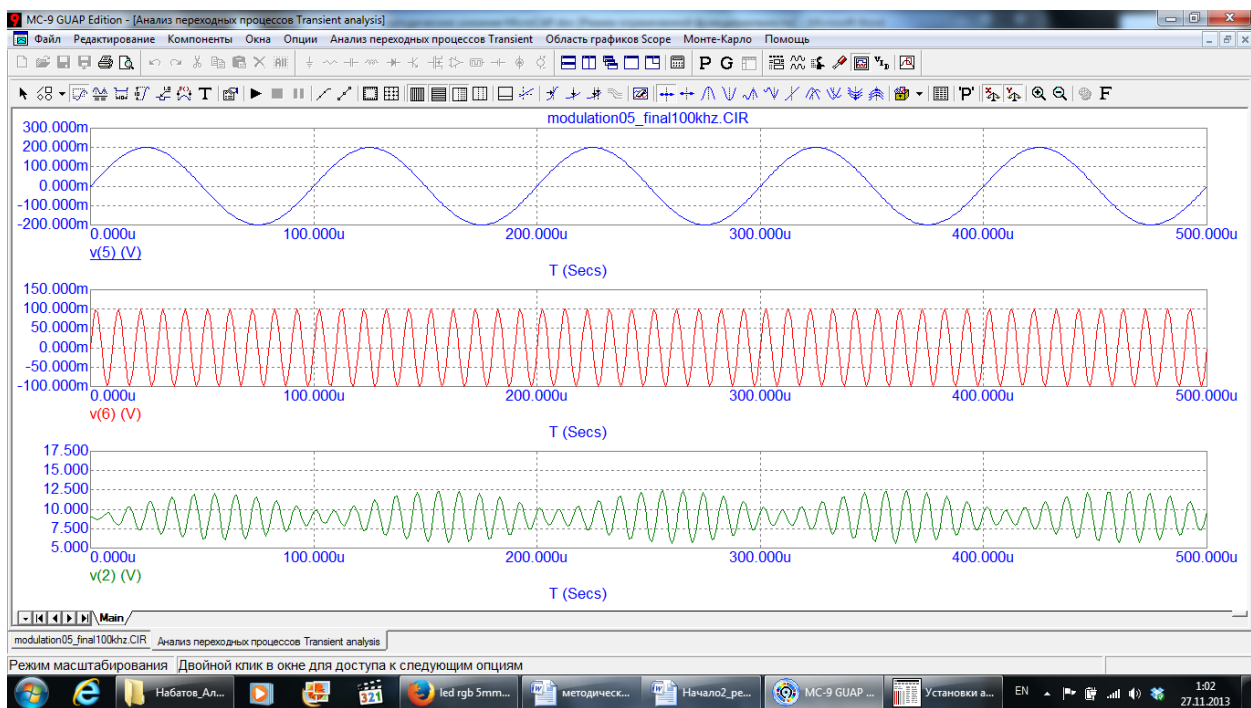


Рис.1.4. Внешний вид программы MicroCAP. Графический вывод результатов моделирования (временной расчет схемы).

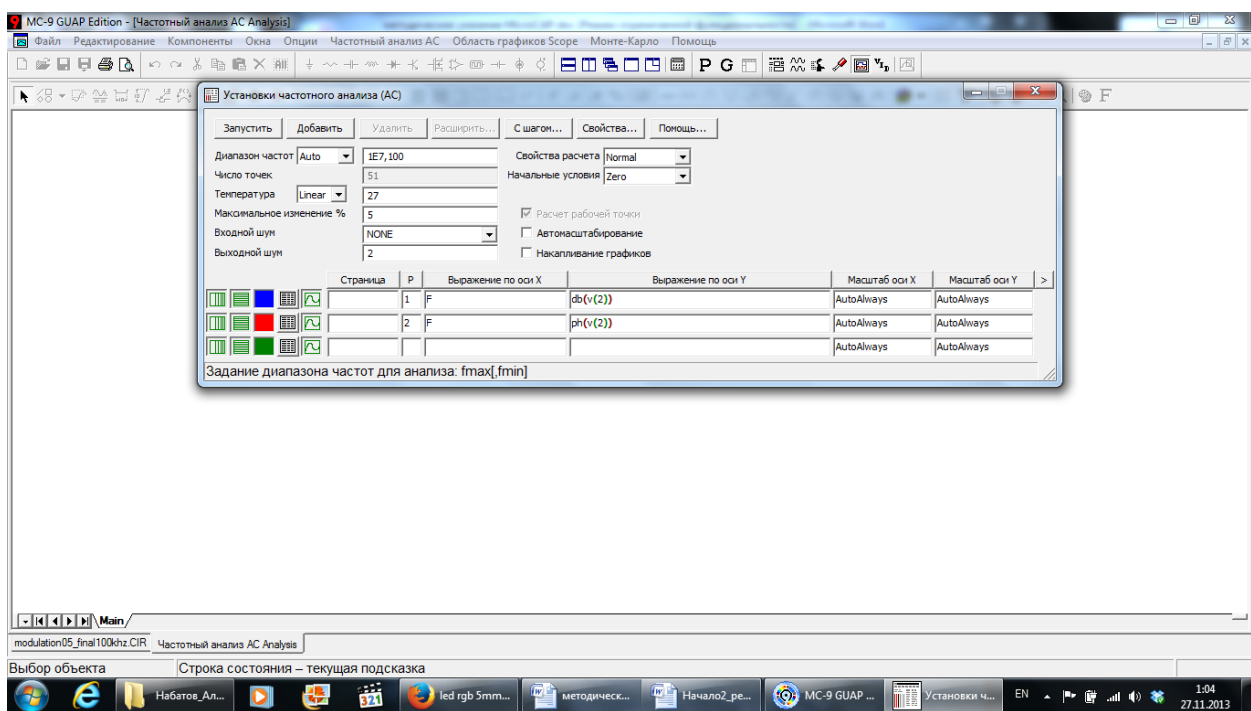


Рис.1.5. Внешний вид программы MicroCAP. Установки частотного анализа схемы.

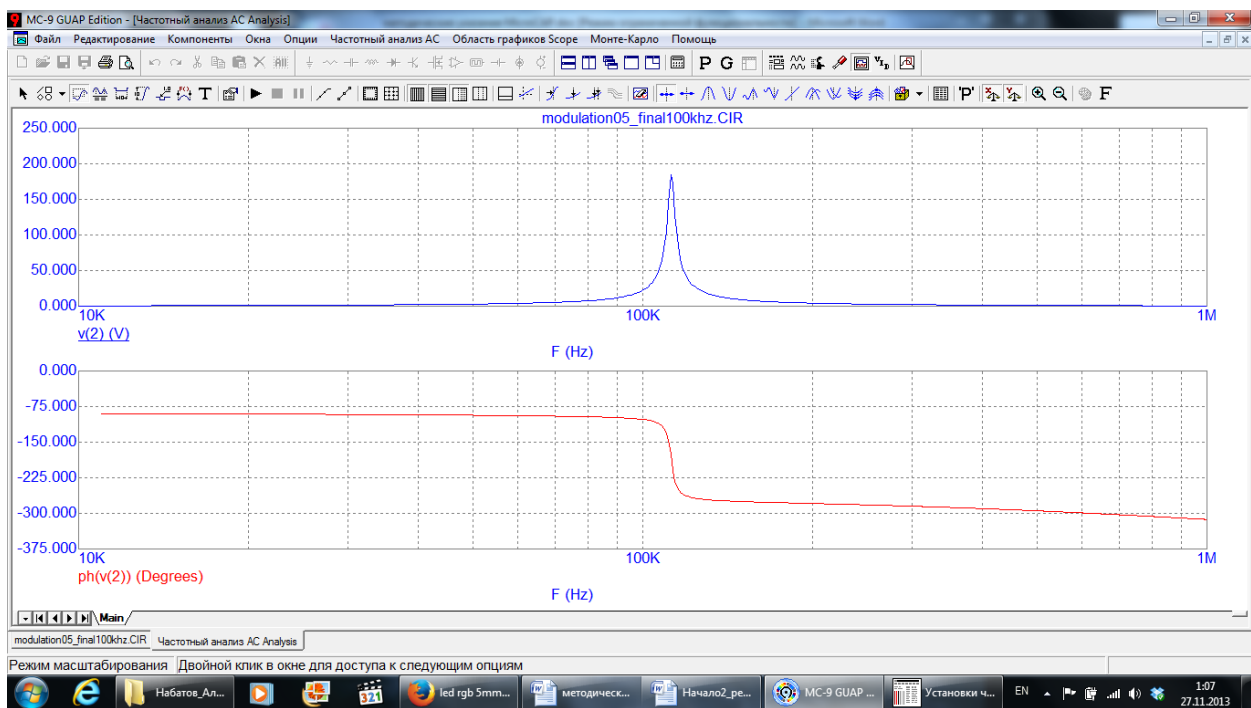


Рис.1.6. Внешний вид программы MicroCAP. Результаты частотного анализа.

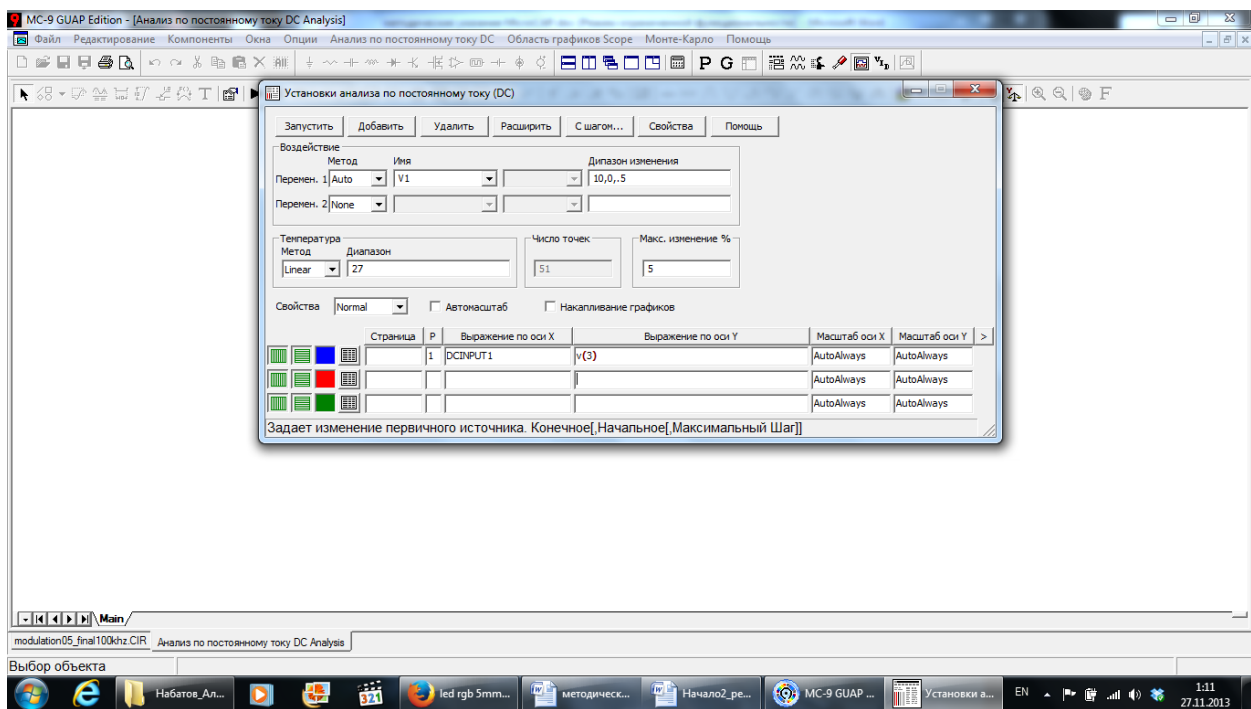


Рис.1.7. Внешний вид программы MicroCAP. Установки анализа схемы по постоянному току.

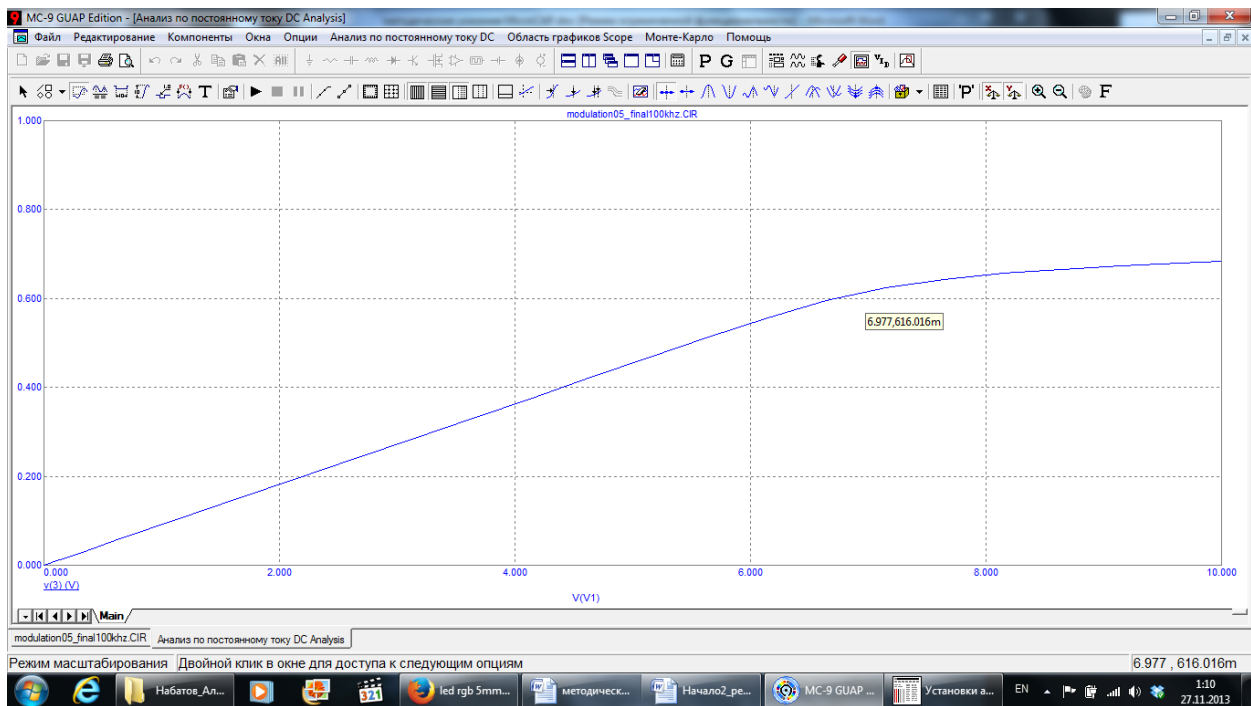


Рис.1.8. Внешний вид программы MicroCAP. Результат расчета по постоянному току.

Лабораторная работа №2. Электрические цепи постоянного тока. Делитель постоянного напряжения.

Цель работы: Исследование схемы делителя напряжения при различных значениях сопротивления нагрузки.

Исследуемая схема делителя напряжения имеет вид, представленный на рис.2.1:

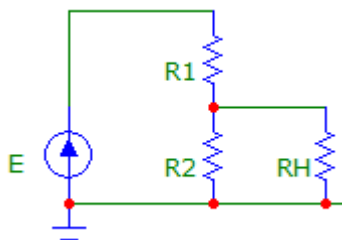


Рис.2.1.

Для схемы рис.2.1 и параметров схемы, указанных в таблице 2.1 для каждой бригады, вывести формулы для токов, и напряжений, коэффициента деления. Результаты свести в таблицу 2.2. Построить графики от токов, напряжений от R_H . Определить область значений сопротивления нагрузки, в которой делитель работал с неизменным коэффициентом деления.

Рис.2.1.

Таблица 2.1.

Номер бригады	E	R1 Ом	R2 Ом	R_H Ом
1.	6	100	240	$\infty, 51, 510, 1000$
2.	5,5	240	510	$\infty, 51, 100, 1000$
3.	5	510	240	$\infty, 51, 100, 1000$
4.	4,5	1000	510	$\infty, 100, 240, 2400$
5.	-6	240	1000	$\infty, 100, 510, 2400$
6.	-5,5	2400	1000	$\infty, 240, 510, 10000$
7.	-5	1000	2400	$\infty, 240, 510, 27000$
8.	4	510	1000	$\infty, 240, 510, 100$
9.	-5	510	510	$\infty, 240, 510, 1000$
10.	2	1000	1000	$\infty, 240, 510, 100$

а) Математическое моделирование.

Проводится либо вручную, либо с помощью одной из программ математического моделирования (например, MathCad-15). Рассчитываются значения токов и напряжений в основных узлах схемы, приводятся графики тех величин, которые указаны в задании. Ниже приведен фрагмент примера расчёта и построения графика зависимости коэффициента деления от сопротивления нагрузки делителя напряжения с помощью MathCad-15.

Делитель напряжения.

Параметры примера схемы делителя напряжения:

$$E := 5 \quad R1 := 510 \quad R2 := 240$$

В режиме холостого хода ($R_H = \infty$) ток и напряжение на выходе в цепи делителя равны

$$I_{xx} := \frac{E}{R1 + R2} = 6.667 \times 10^{-3} \quad U_{2xx} := I_{xx} \cdot R2 = 1.6 \quad U_{1xx} := I_{xx} \cdot R1 = 3.4$$

Коэффициент передачи делителя (коэффициент деления напряжения) равен

$$K_{dxx} := \frac{U_{2xx}}{E} = 0.32$$

В режиме подключения нагрузки параллельное соединение $R2$ и R_H и коэффициент деления равны

$$R_{\text{экв}}(R_H) := \frac{R2 \cdot R_H}{R2 + R_H} \quad K_d(R_H) := \frac{R_{\text{экв}}(R_H)}{R1 + R_{\text{экв}}(R_H)}$$

При холостом ходе примем R_H равным 1 МОм

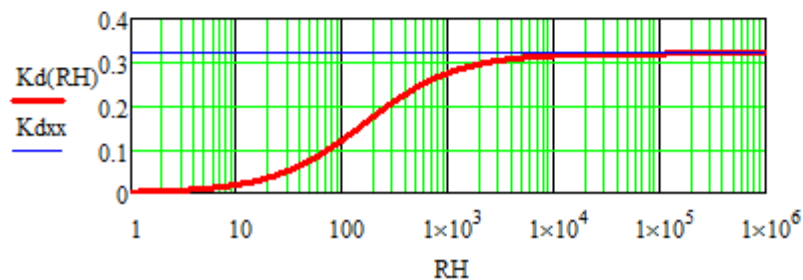


Рис.2.2

б) Схемотехническое моделирование.

Для анализа возможности использования в учебной практике систем схемотехнического моделирования, проведем анализ схемы по постоянному току.

На рис.2.3. представлена схемотехническая модель делителя напряжения.

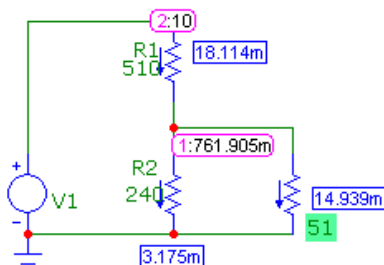


Рис.2.3

На схеме отображены значения номиналы резисторов, напряжений в узловых точках и токов в ветвях при $V_1=10$ В и сопротивлении нагрузки, равном 51 Ом.

Ниже на рис.2.4 и 2.5 показаны зависимости, полученные в системе MicroCap при различных значениях напряжения источника ЭДС на холостом ходу и при $R_H=51$ Ом.

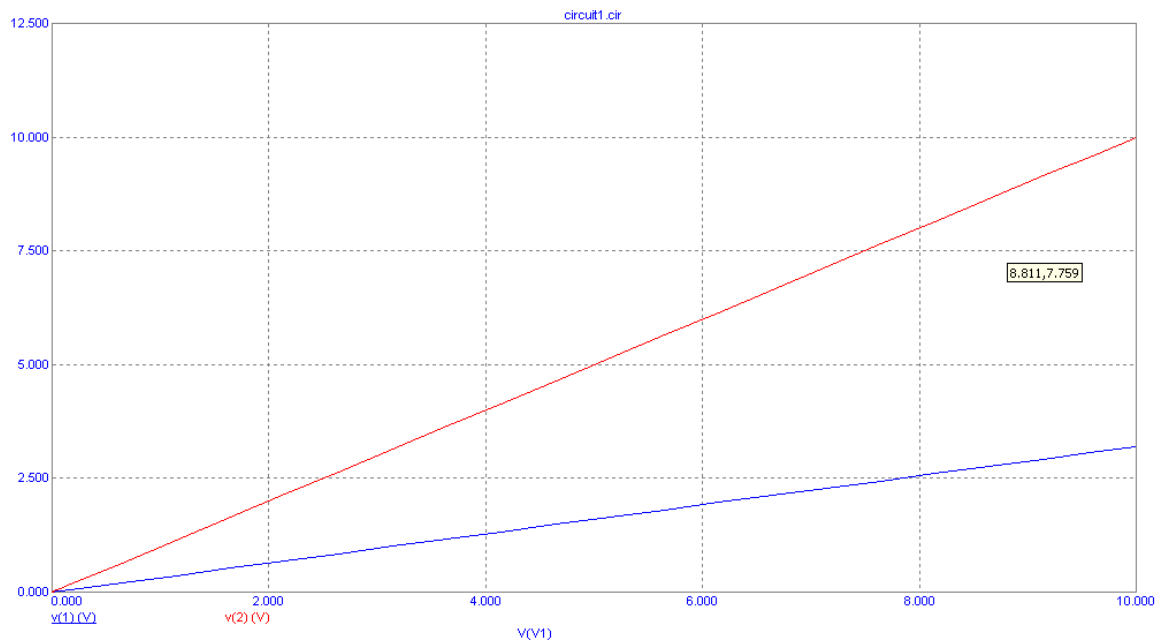


Рис.2.4

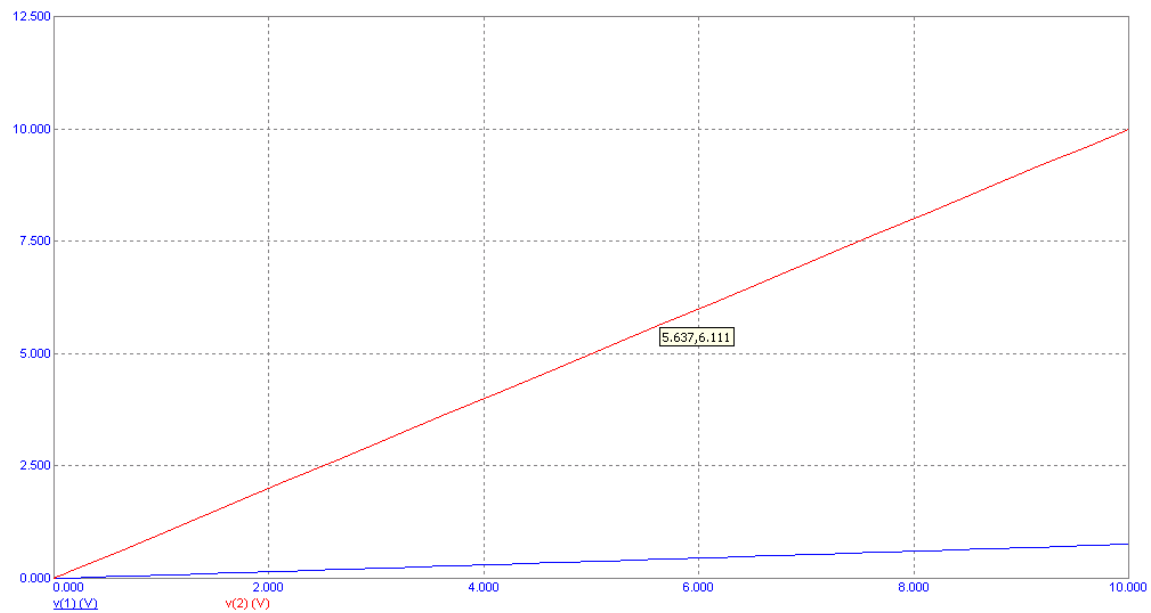


Рис.2.5

В результате математического и схемотехнического моделирования должны быть заполнены строки таблицы 2.2 и построены необходимые графики, сделаны выводы по результатам.

Таблица 2.2.

Бригада №		E=						
R_H	$R2_{экв}$	$R2_{экв} + R1$	U_H	U_{R1}	I_{R1}	I_{R2}	I_H	$K_{дел} = \frac{U_H}{E}$
∞								

Экспериментальное исследование.

1. Собрать схему рис.2.3 без подключения нагрузки R_H (вариант $R_H = \infty$), со значениями резисторов и ЭДС в соответствии с номером бригады и таблицей 1. Значение источника E измерить вольтметром до присоединения к схеме. Измерить напряжения на источнике (U_{R1}) и резисторе $R2$ (U_H). Записать значения в таблицу 2.3. Рассчитать токи в цепи, падение напряжения на резисторе $R1$ и коэффициент деления. Записать в таблицу 2.3.
2. Подключая поочередно сопротивление нагрузки из таблицы 2.1, измерять напряжение на источнике и на нагрузке. Рассчитать ток в цепи источника ЭДС, токи через $R2$ и R_H , падение напряжения на резисторе $R1$ и коэффициент деления. Результаты по пп1,2 занести в таблицу 2.3.
3. Построить графики напряжения на нагрузке и коэффициента деления от R_H .
4. Оформить отчет. **В отчете должны быть представлены таблицы предварительных расчетов и результатов эксперимента.**

Таблица 2.3

Бригада №		Em=					
R_H	U_H	U_{R1}	I_{R1}	I_{R2}	I_H	$K_{дел} = \frac{U_H}{E}$	
∞							

Лабораторная работа №3. Исследование разветвленной цепи постоянного тока.

Цель работы: изучить распределение токов и напряжений в разветвленной цепи.

Математическое моделирование.

Для схемы рис. 3.1 рассчитать токи и напряжения в ветвях одним из методов МТиНВ, МКТ, МУН или методом наложения, используя матричные формы записи систем уравнений, если заданы напряжения регулируемых источников V1, V2, V3, V4, а также сопротивления резисторов (см. таблицу 3.1). Заполнить соответствующие столбцы таблицы 3.2-1 для рассчитанных значений.

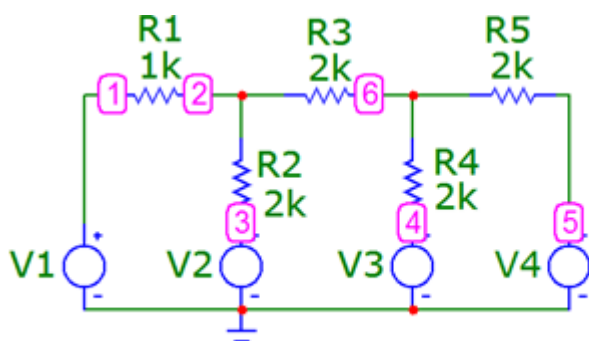
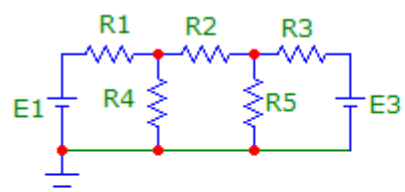


Рис.3.1.

Таблица 3.1

№ бриг	V1	V2	V3	V4	R1	R2	R3	R4	R5
1	+3.5	+12	-6	-5.4	240	510	1000	2400	5100
2	+6	-6.8	-12	+4.3	510	1000	240	5100	2400
3	+5	-1	+12	-6	240	2400	510	1000	5100
4	+6	+2	-12	+6	510	1000	240	2400	5100
5	-3	+6	-6	-5.4	240	2400	510	5100	1000
6	-4	+5	-12	+4.3	510	240	5100	2400	1000
7	-5	+3	+12	-6	240	510	2400	1000	5100
8	+3	+5	-12	+6	5100	2400	1000	1000	510
9	+2	+1	-12	+6	2400	1000	510	510	240
10	+2	-3	-6	-5.4	1000	240	240	2400	5100

На рис.3.2. дан фрагмент программы MathCad расчета токов и напряжений ветвей методом узловых напряжений.



Метод узловых потенциалов

V1 - потенциал между R1 и R2

V2 - потенциал узла между R2 и R3

```

ORIGIN := 1
k := 1..2      число узлов
n := 1..5      число ветвей
m := 1..3      число контуров

E_n := 0
E_1 := -0.85    E_3 := 4.5      матрица ЭДС ветвей
R_n,n := 0

R1 := 240    R2 := 510    R3 := 1000
R4 := 2400    R5 := 5100      Матрица сопротивлений ветвей

Матрица проводимостей ветвей

G1 := 1/R1    G2 := 1/R2    G3 := 1/R3    G4 := 1/R4    G5 := 1/R5

Диагональная матрица проводимостей ветвей  G_n,n := 0
G_1,1 := G1    G_2,2 := G2    G_3,3 := G3    G_4,4 := G4    G_5,5 := G5

Узловая матрица
A_1,1 := -1    A_1,2 := 1    A_1,3 := 0    A_1,4 := 1    A_2,2 := -1    A_2,3 := -1    A_2,5 := 1

A = (-1  1  0  1  0
     0 -1 -1  0  1)      Матрица узловых токов от ЭДС ветвей      JEu := -A·G·E

Матрица узловых проводимостей
Gu_1,1 := G1 + G2 + G4    Gu_1,2 := -G2    Gu_2,1 := -G2    Gu_2,2 := G2 + G3 + G5

Решение системы матричных уравнений для узловых потенциалов  V := Gu^-1 · JEu

V = (-0.14
     1.338)  +
  
```

Напряжения ветвей $U_w := A^T \cdot V$

$$U_w = \begin{pmatrix} 0.14 \\ -1.479 \\ -1.338 \\ -0.14 \\ 1.338 \end{pmatrix}$$

Падения напряжения на резисторах $U_{Rw} := U_w + E$

$$U_{Rw} = \begin{pmatrix} -0.71 \\ -1.479 \\ 3.162 \\ -0.14 \\ 1.338 \end{pmatrix}$$

токи в ветвях $I := G \cdot U_{Rw}$

$$I = \begin{pmatrix} -2.958 \times 10^{-3} \\ -2.899 \times 10^{-3} \\ 3.162 \times 10^{-3} \\ -5.841 \times 10^{-5} \\ 2.624 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Проверка 1-го Закона Кирхгофа

$$-I_1 + I_2 + I_4 = 0 \quad -I_2 - I_3 + I_5 = 0$$

Рис.3.2 Расчет токов и напряжений ветвей методом узловых потенциалов.

Схемотехническое моделирование.

В системе МикроКап провести схемотехническое моделирование схемы рис.3.1 с параметрами, указанными в таблице 3.1 для соответствующей бригады. Определить токи и напряжения в элементах схемы. Записать значения в соответствующие столбцы таблицы 3.2-2.

Экспериментальное исследование

1. Собрать схему рис.3.1. Установить требуемые напряжения источников.
2. Измерить напряжения в узлах схемы. Значения записать в таблицу 3.2-3. Рассчитать токи и падения напряжения на резисторах. Значения записать в таблицу 3.2-3

Таблица 3.2-1 (матем.модел)

V1	V2	V3	V4	U1	U2	I1	I2	I3	I4	I5	U _{R1}	U _{R2}	U _{R3}	U _{R4}	U _{R5}

Таблица 3.2-2(схем.модел.)

V1	V2	V3	V4	U1	U2	I1	I2	I3	I4	I5	U _{R1}	U _{R2}	U _{R3}	U _{R4}	U _{R5}

Таблица 3.2-3 (эксперимент)

V1	V2	V3	V4	U1	U2	I1	I2	I3	I4	I5	U _{R1}	U _{R2}	U _{R3}	U _{R4}	U _{R5}

Оформить отчет. В отчете должны быть представлены таблицы предварительных расчетов и результатов эксперимента, сравнительный анализ.

Работа №4 Исследование разветвленной цепи гармонического тока

Цель работы: изучить распределение токов и напряжений в разветвленной цепи переменного тока.

Математическое моделирование.

Для схемы рис. 4.1 рассчитать комплексные амплитуды токов $\underline{I_m, i}$ и падений напряжения $\underline{U_m, i}$ в ветвях, если амплитуда напряжения на выходе генератора гармонических колебаний $\underline{E_m}$, а значения сопротивлений резисторов и емкостей соответствуют таблице 4.1. Записать полученные значения в таблицу 4.2-1. Построить график АЧХ и ФЧХ напряжения в узле 2.

Таблица 4.1.

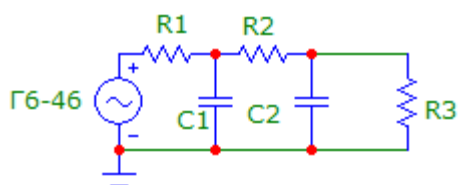


Рис.4.1

№ бригады	E_m В	F кГц	$R1$ Ом	$R2$ Ом	$R3$ Ом	$C1$ пФ	$C2$ пФ
1	2	2	240	510	1000	2400	1000
2	4	4	510	1000	240	1000	2400
3	5	5	240	2400	510	470	1000
4	6	6	510	1000	240	2400	240
5	3	3	240	2400	510	1000	470
6	4	4	510	240	5100	470	470
7	5	5	240	510	2400	240	2400
8	1	1	510	2400	240	1000	1000
9	2	2	240	1000	510	2400	470
10	5	5	1000	510	240	470	2400

На рис.4.2. представлен фрагмент программы MathCad расчета токов и напряжений ветвей методом узловых напряжений.

Решение системы матричных уравнений для узловых потенциалов

$$\underline{V} = \underline{G}^{-1} \cdot \underline{J} \cdot \underline{E}_u$$

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} 2.436 + 4.037i \\ 1.782 + 2.555i \end{pmatrix}$$

Падения напряжения на резисторах

$$UR_w := U_w + E$$

$$UR_w = \begin{pmatrix} 0.064 + 0.293i \\ 0.654 + 1.481i \\ -1.782 - 2.555i \\ 2.436 + 4.037i \\ 1.782 + 2.555i \end{pmatrix}$$

токи в ветвях

$$I := G \cdot UR_w$$

$$I = \begin{pmatrix} 2.665 \times 10^{-4} + 1.223i \times 10^{-3} \\ 1.281 \times 10^{-3} + 2.905i \times 10^{-3} \\ -1.782 \times 10^{-3} - 2.555i \times 10^{-3} \\ -1.015 \times 10^{-3} - 1.682i \times 10^{-3} \\ -5.01 \times 10^{-4} + 3.495i \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Проверка 1-го Закона Кирхгофа

$$-I_1 + I_2 + I_4 = 0$$

$$-I_2 - I_3 + I_5 = 0$$

Схемотехническое моделирование.

В системе МикроКап провести схемотехническое моделирование схемы рис.4.1 с параметрами, указанными в таблице 4.1 для соответствующей бригады. Определить комплексные амплитуды токов и напряжений в элементах схемы. Записать значения в соответствующие столбцы таблицы 4.2-2.

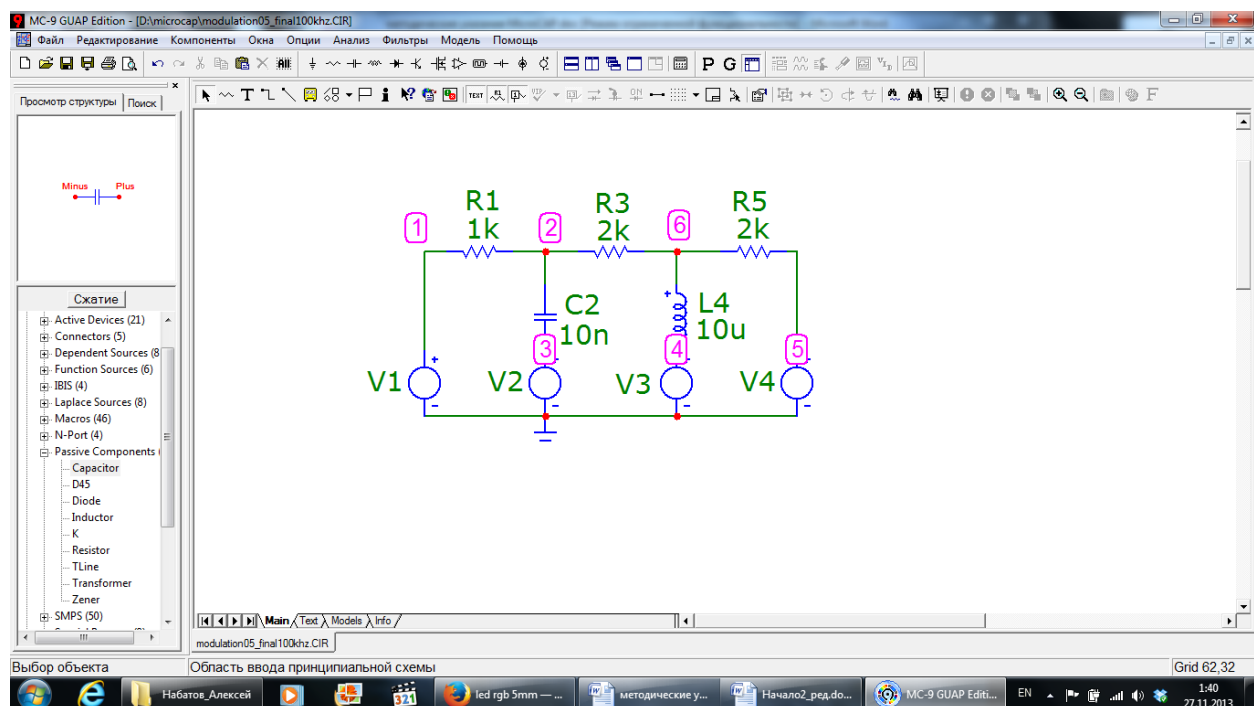


Рис.4.3. Разветвленная цепь с реактивными элементами.

По исходным данным указать номиналы элементов схемы. Провести временной расчет разветвленной цепи на фиксированной частоте источника сигнала. Провести частотный анализ в узле 2.

Пример частотного анализа показан на рис.4.4.

Экспериментальное исследование.

1. Собрать схему рис.4.1. Установить частоту гармонических колебаний $F=30$ кГц и требуемую амплитуду напряжения от генератора Г6-46.
2. Измерить напряжения в узлах схемы. Значения записать в таблицу 4.2.
3. Зарисовать осциллограммы входного напряжения и напряжений в ветвях. Отметить амплитуды и разность фаз относительно входного напряжения.
4. Рассчитать амплитуды токов и падения напряжений на элементах схемы.
5. Сравнить полученные значения с рассчитанными при предварительной подготовке.

Таблица 4.2.

Мат.модел.	E_m	U_1	U_2	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{C1}	U_{C2}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
$F=10$ кГц													
$F=100$ кГц													
$F=1000$ кГц													
Схем.мод.	E_m	U_1	U_2	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{C1}	U_{C2}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
$F=10$ кГц													
$F=100$ кГц													
$F=1000$ кГц													
Эксперим.	E_m	U_1	U_2	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{C1}	U_{C2}	I_1	I_2	I_3	I_4	
$F=10$ кГц													
$F=100$ кГц													
$F=1000$ кГц													

Оформить отчет. В отчете должны быть представлены таблицы математического и схемотехнического моделирования, экспериментальные данные, сравнительный анализ.

Одобрено на заседании кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций от 31.10.2013 (протокол №5) и рекомендовано к изданию.

Заведующий кафедрой РЭТ

/С.У.Увайсов/

Учебное издание

ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Составители:

АНДРЕЕВСКАЯ Татьяна Михайловна

БОГАЧЕВ Константин Александрович

Редактор Е.С.Резникова

Технический редактор О.Г.Завьялова

Подписано в печать

Формат 60х84/16

Бумага офсетная №2. Ризография. Усл.печ. 2,5

уч.-изд.л.

Изд.№

Тираж 50 экз.

Заказ -

Бесплатно

Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ.

109028, Москва, Б.Трехсвятительский пер.,3/12.

Издательский дом МИЭМ ВШЭ

113054, Москва, ул. М.Пионерская,12.