

А.П. Саврухин.
Профессор кафедры физики МГУЛ,
с.н.с., к.т.н.

E-mail: savrukhin@ya.ru

Практикум по курсу Физические основы измерений.

Учебное пособие для студентов по специальности
Стандартизация и сертификация

Физические основы измерений

1. Современная физическая картина мира: пространство, время, эфир, элементарные частицы, относительность, кванты.
2. Энтропия, неэнтропия, связь вероятности и энтропии.
3. Однородные величины, шкала реперов, функциональная шкала.
4. Понятие об измерении. Единицы измерений.
5. Хранение, передача, потери информации.
6. Энергия и информация.
7. Порог чувствительности. Мертвое время.
8. Общий закон взаимосвязи параметров измерительных устройств.
9. Пути совершенствования измерительных устройств.
10. Гальваномагнитные явления.
11. Термогальваномагнитные явления.
12. Квантовый эффект Холла.
13. Явление сверхпроводимости.

Практикум

Анализ шумов. Анализ нелинейных искажений. Температурный анализ при измерениях. Параметрические испытания. Предельные испытания (худший случай). Статистические испытания.

Лабораторная работа 1. АНАЛИЗ ШУМОВ

Вступление

Определенность измеряемой величины зависит от энергии ее термодинамических флуктуаций, воспринимаемых как шумы. Чтобы найти их спектр, воспользуемся известными соотношениями.

Прямое преобразование Фурье для функции времени $f(t)$ определяет ее спектр $S(j\omega)$:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (1)$$

Модуль спектра называют спектральной плотностью $S(\omega)$:

$$S(\omega) = |S(j\omega)|. \quad (2)$$

Согласно теореме Рейли, имеет место следующее равенство:

$$\int_0^{\infty} f^2(t) dt = \frac{f}{\pi} \int_0^{\infty} S^2(\omega) d\omega. \quad (3)$$

В частности, если к резистору с сопротивлением 1 Ом приложено напряжение $f(t)$, то левая часть равенства (3) численно определяет энергию, выделяющуюся в нем. Таким образом, площадь квадрата модуля спектра $S(\omega)$, поделенная на π , определяет энергию, рассеиваемую в активном сопротивлении, на которое воздействует $f(t)$. Белый шум (или просто шум) состоит из множества случайным образом следующих друг за другом импульсов, амплитуды которых подчиняются нормальному закону распределения вероятности. Для шума спектральная плотность есть константа $S(\omega) = \text{const}$.

Известно, что если четырехполосник имеет коэффициент передачи $K(\omega)$, то соотношение спектральных плотностей на его выходе и входе равно

$$\frac{S_{\text{вых}}(\omega)}{S_{\text{вх}}(\omega)} = K^2(\omega). \quad (4)$$

В активном сопротивлении величиной R собственные шумы возникают как результат хаотического теплового движения электронов. Их спектральная плотность равна

$$S_{\text{ш}}(\omega) = 2kTR, \quad (5)$$

где T – абсолютная температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана.

Квадрат напряжения $U_{\text{ш}}^2$ эквивалентного источника шума равен

$$U_{\text{ш}}^2 = 4kTR \cdot \Delta f, \quad (6)$$

где Δf – полоса пропускания устройства, на входе которого установлено это сопротивление. В конечном счете именно шумы ограничивают порог чувствительности измерительной аппаратуры. Подобным образом, источником шумов являются полупроводниковые приборы и источники питания. У диодов спектральная плотность напряжения шумов составляет $5-30 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при граничной частоте до 10 МГц. В транзисторах источниками шумов являются сопротивления слоев и дробовые эффекты в $p-n$ переходах.

Описание лабораторной работы

Шумовой анализ в пакете EWB5с заключается в нахождении величины мощности шума на выходе электронных цепей. Все шумовые источники приняты статистически некоррелированными, их значения рассчитаны независимо.

Полный шум вычисляется как среднеквадратичная сумма индивидуальных вкладов. Например, если $V1$ выбран в качестве “входного опорного источника шумов”, а $N1$ – как “выходной узел”, то в $N1$ суммируются вклады всех шумовых операторов. Если полный шум разделить на коэффициент передачи от $V1$ к $N1$, то получим эквивалентный входной шум от $V1$, введенный в бесшумовую цепь. Это полный шум, приведенный ко входному узлу. Для всех компонентов схемы приняты шумовые модели из программы SPICE.

Чтобы установить температуру, при которой вычисляются шумы, нужно раскрыть меню Analysis, выбрать строку Analysis Options, в появившемся диалоговом окне щелкнуть на закладке Global, установить температуру в строке Simulation temperature (TEMP).

Чтобы установить другие параметры моделирования, нужно из меню Analysis выбрать строку Noise (шумы). Появится диалоговое окно (см. рис.1) с позициями:

Позиции	По умолчанию	Заметки
Input noise reference source (входной опорный источник шумов)	Источник вашей цепи	Выберите источник Переменного напряжения
Output node (выходной узел)	Узел цепи	Узел, в котором суммируются вклады всех источников шумов
Reference node (опорный узел)	0 (земля)	Опорное напряжение
Start frequency (начальная частота)	1 Гц	Начальная частота диапазона
End frequency (конечная частота)	10 ГГц	Конечная часть диапазона
Sweep type (тип развертки)	Decade	Декадная, линейная, октавная
Number of points (масштаб развертки по частоте)	100	Для линейной – число точек в диапазоне частот
Vertical scale (масштаб по	Log	Логарифмическая, линейная, децибеллы

вертикали)		
Set points per Summary (выбран элемент суммы)	Не включен	Если включить, на графике будет выведен шумовой вклад избранного компонента
Component		Установить номер компонента, вклад которого выводится

Чтобы произвести моделирование нужно щелкнуть на кнопке Simulate, после чего на экране появится график с результатами анализа в виде трех кривых. Если установить курсор на любую из них, появится надпись с обозначением: входной узел, выходной узел или вклад одного из компонент. Одновременно появляется таблица с показаниями курсора: x – частота, y – величина шума.

Схема исследуемой электрической цепи дана на рис.2 (файл foi2.ewb). Источник синусоидального напряжения U через резистор $R1$ подключен к последовательному контуру $L1—R2—C1$. На резонансной частоте его сопротивление мало, переменное напряжение узла 51 через делитель $R6—R7$ подается на вход операционного усилителя $AR1$, и после усилителя поступает на выходной узел 44. На других частотах напряжение на стабилитронах $D1, D2$ достигает величины 11 В, при которой сопротивление их не превышает значения 0,06 Ом, благодаря чему напряжение в узле 51 приобретает трапецевидную форму.

Порядок выполнения работы–

1. Двойным щелчком на изображении источника U вызвать диалоговое окно и установить частоту 20 Гц.
2. Подобным образом вызвать изображение осциллографа.
3. Просмотреть и зарисовать осциллограммы сигналов в узлах 51 и 44.
4. Прodelать п.1 – п.3 на частоте 1000 Гц и на резонансной частоте (рассчитать предварительно).
5. Установите заданную температуру, по которой производится моделирование. Последовательность операций:

1. Analysis	Меню
2. Analysis Options	Строка меню
3. Global	Закладка
4. TEMP	Строка

6. Вызвать диалоговое окно Analysis (меню) – Noise (строка меню).
7. Установить номер выбранного выходного узла Output node.
8. Установить название компонента, индивидуальный вклад которого нужно оценить.
9. Щелкнуть на Simulate.

Если нужно снять температурную зависимость, следует повторить пункты 5 – 9.

10. Оформить результаты моделирования в виде графиков и таблицы.

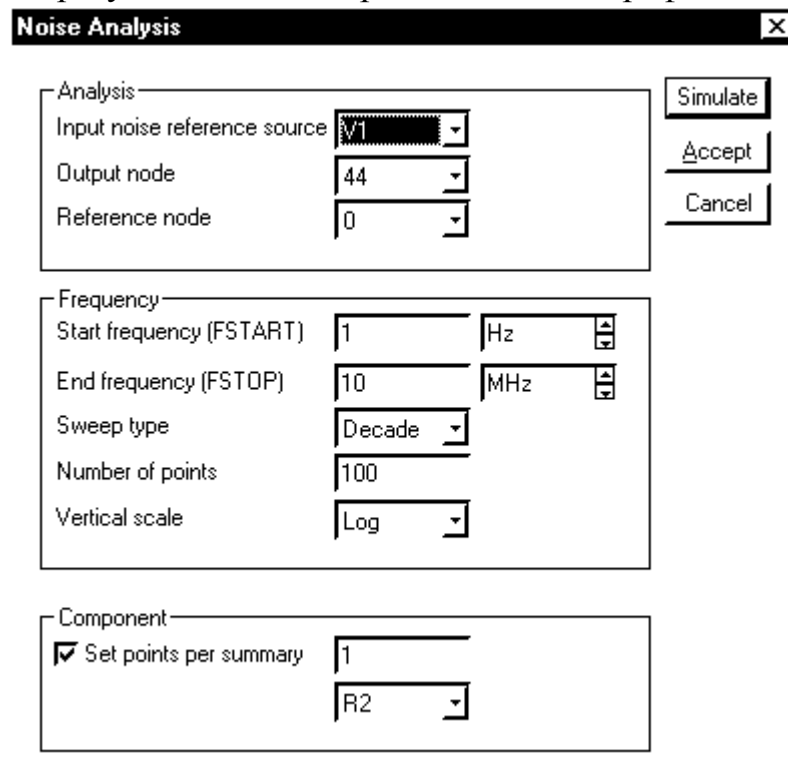


Рис. 1. Диалоговое окно анализатора шума

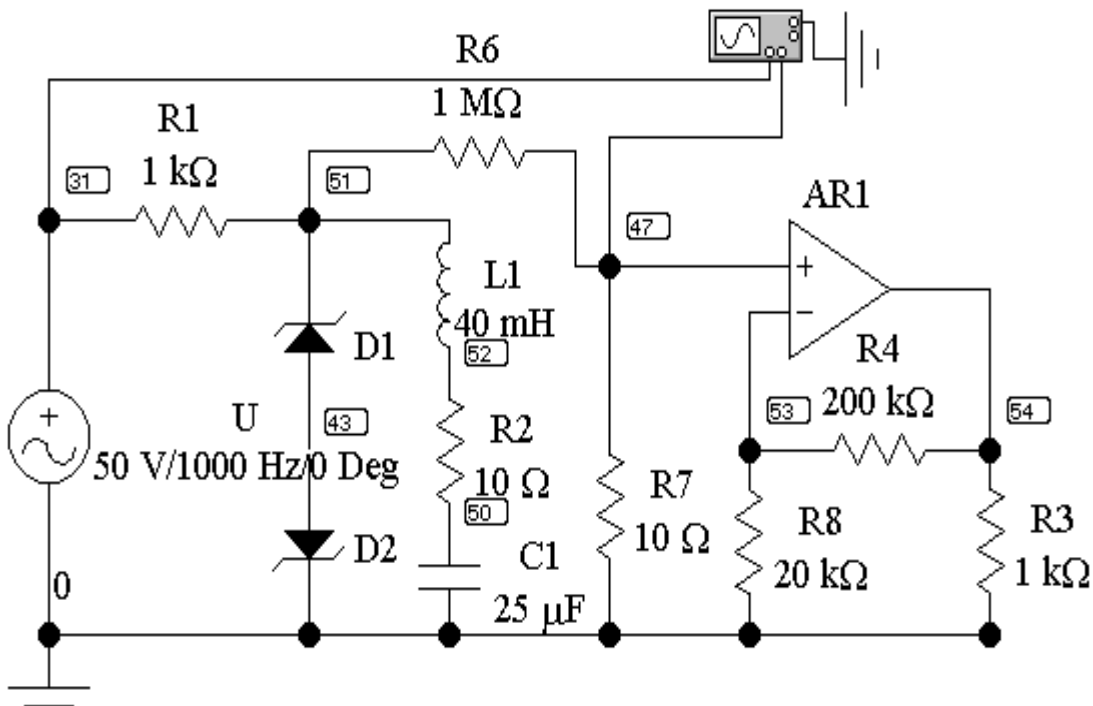


Рис. 2. Схема для измерения шумов

Лабораторная работа 2 по курсу «Физические основы измерений»

АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ

Если на входе электрической цепи сигнал гармонический, а на выходе форма сигнала отличается от синусоидальной, то это означает искажение, дисторсию (distortion) сигнала. При этом в спектре выходного сигнала появляются гармоники более высоких частот, поэтому говорят о гармонических (harmonic) искажениях. Электрическая цепь с такими свойствами содержит нелинейные элементы: диоды, ограничители, магнитные сердечники и подобные компоненты, а поэтому вносимые ею искажения еще называют нелинейными. Из множества добавочных гармоник принимают в расчет несколько наиболее значимых по величине.

На рис. 1 дан пример построения прямоугольного импульса (с частотой $f = 1/T$, периодом $T = 0,02$ с) из трех гармоник: с основной частотой f и с частотами $3f$, $5f$.

На рис.2 графически показано, как возникают нелинейные искажения в цепи, содержащей элемент с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ).

Характеристикой нелинейных искажений является отношение суммарной мощности высших гармоник, начиная со второй, к мощности первой основной гармоники (на частоте входного сигнала). Часто коэффициент нелинейных искажений (total harmonic distortion) или коэффициент гармоник вычисляют как отношение среднеквадратичного напряжения всех гармоник, начиная со второй, к напряжению первой гармоники (в процентах)

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Программа анализа нелинейных искажений предусматривает два режима работы.

1. Если в исследуемой схеме действует один синусоидальный источник переменного напряжения, то анализ заключается в совокупном определении величин второй и третьей гармоник, вносящих наибольший энергетический вклад в искажение формы сигнала источника по напряжению в любом узле или по току в любой ветви контура.

2. Если цепь содержит два источника переменного напряжения с частотами F_1 и F_2 ($F_1 > F_2$), то анализ состоит в определении интермодуляционных IM искажений, вызванных взаимной модуляцией. Амплитуды и фазы этих источников могут устанавливаться независимо. Программа определяет совокупно величины на трех частотах: сумме частот $F_1 + F_2$, разности частот $F_1 - F_2$, разности $2F_1 - F_2$, частоты второй гармоники $2F_1$ от первого источника

F_1 и частоты F_2 второго источника. Можно работать с одним источником, программа воспринимает его как источник двух частот, если отношение F_2/F_1 установлено.

Описание лабораторной работы

Схема включения нелинейного элемента (полупроводникового диода) дана на рис. 3.

Рабочая точка на ВАХ диода D3 задается генератором тока I1, напряжение на диоде D3 измеряют вольтметры M1 постоянного тока и M3 – переменного тока. Входной гармонический сигнал определяется генератором V1 и измеряется амперметром M2. (Все значения эффективные).

Порядок выполнения работы

1. Открыть файл fo13. Двойным щелчком на диоде D3 вызвать его диалоговое окно и из библиотеки выбрать тип диода.
2. Снять и построить ВАХ диода в диапазоне токов 10 мкА – 100 мА.
3. Рассчитать дифференциальное сопротивление $r_d = \Delta U/\Delta i$ диода при токах 0,1; 1 и 10 мА. Здесь ΔU – показания вольтметра M3; Δi – показания амперметра M2.
4. При токе I1 = 1 мА, напряжении V1 = 0,0707 В, частоте 1кГц при R1 = 0,1; 1 и 10 кОм произвести измерение амплитуд первой, второй и третьей гармоник.

Меню	—	Строка меню	—	Кнопка
Analysis	—	Fourier	—	Simulate

Просмотреть и зарисовать осциллограммы напряжения на диоде D3.

5. Одновременно произвести анализ нелинейных искажений путем измерения амплитуд 2-ой и 3-ей гармоник.

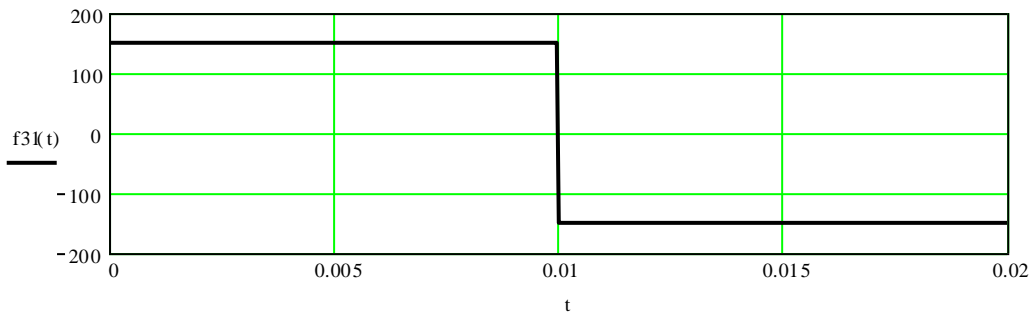
Меню	—	Строка	—	Кнопка
Analysis	—	Distortion	—	Simulate

Установить отношение $F_2/F_1 = 0,9$ и повторить п. 5. В этом случае производится измерение интермодуляционных искажений (IM distortion).

6. Выбрать строку Parameter Sweep, выбрать компонент I1, установить Start value — 1 мА, End value — 100 мА, Increment — 0,5 мА., нажать кнопку Simulate. Повторить то же самое с величинами: Start value — 0,01 мА; End value — 1 мА; Increment — 0,01 мА. Зарисовать ВАХ диода, сравнить с предыдущим измерением.
7. Оформить результаты анализа.

$$T := 0.02 \quad \text{с} ; t := 0, 0.00005 \cdot T \quad ; \omega := 2 \cdot \pi \cdot T^{-1} \quad ;$$

$$f_3(t) := \begin{cases} 150 & \text{if } 0 \leq t \leq 0.5T \\ (-150) & \text{if } 0.5T \leq t \leq T \end{cases}$$



$$u_1(t) := \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \left(\sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega \cdot t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5\omega \cdot t) + \dots \right) \quad ; \quad U_m := 150 \quad .$$

Представление входного сигнала суммой трех гармоник:

$$f_2(t) := \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad ; \quad f_3(t) := \frac{4 \cdot U_m}{\pi \cdot 3} \cdot \sin(3\omega \cdot t) \quad ;$$

$$f_4(t) := \frac{4 \cdot U_m}{\pi \cdot 5} \cdot \sin(5\omega \cdot t) \quad ; \quad f_5(t) := f_2(t) + f_3(t) + f_4(t) \quad .$$

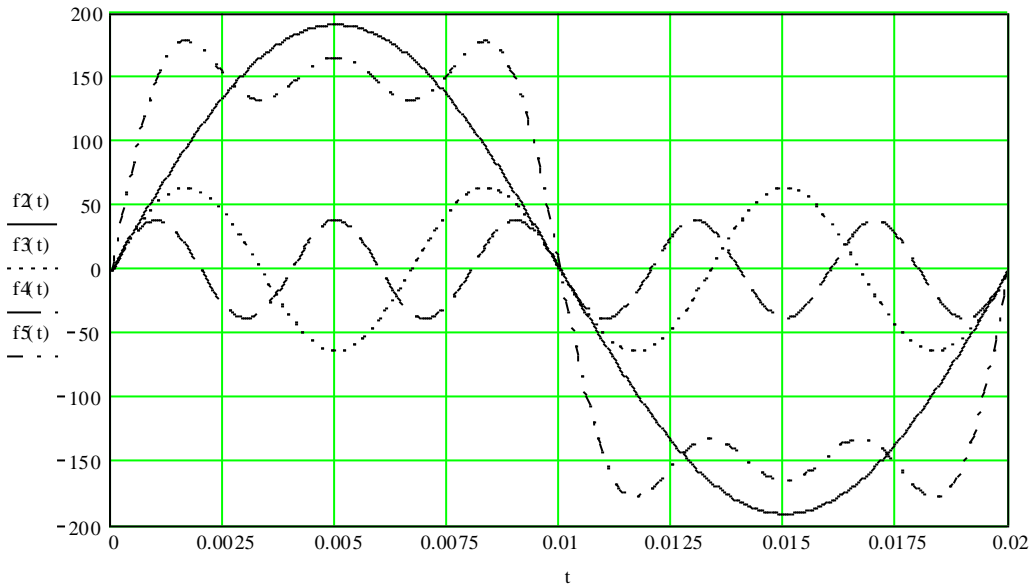


Рис.1. Прямоугольный периодический импульс (верх) и его спектр (низ)

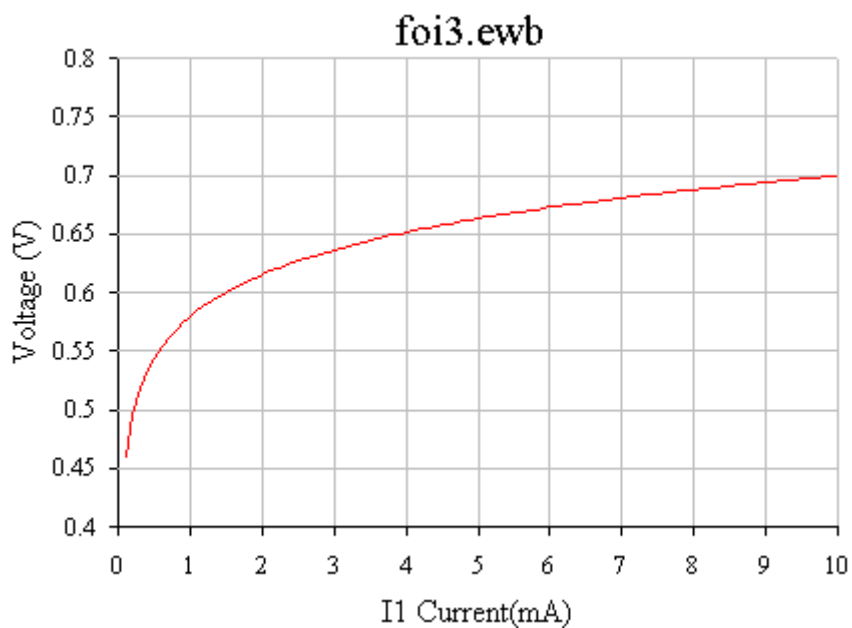


Рис.2. Возникновение нелинейных искажений: а – входной гармонический сигнал; /b – выходной гармонический сигнал; с - искаженный выходной сигнал

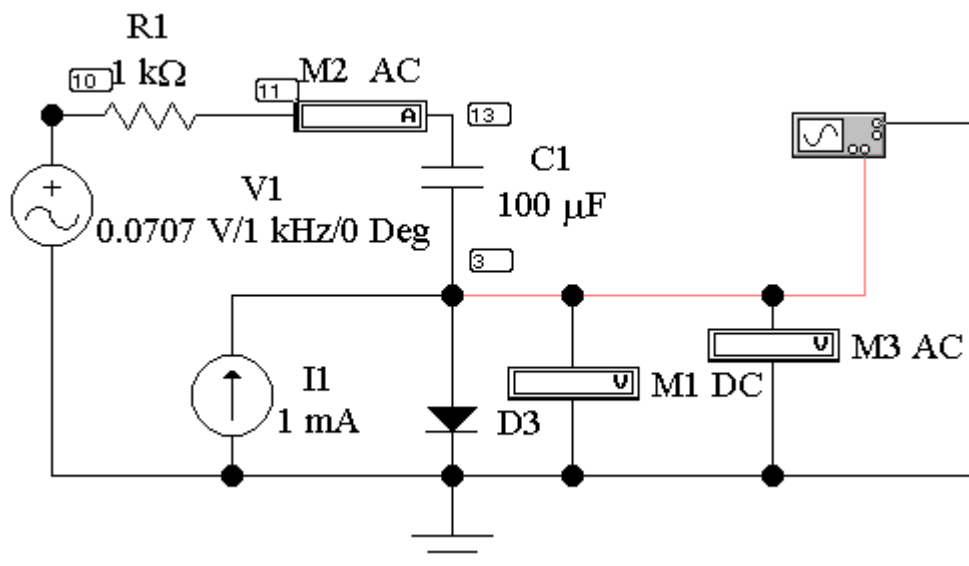


Рис. 3 Схема для исследования нелинейных искажений

Лабораторная работа 3 по курсу «Физические основы измерений»

Параметрические и температурные испытания

Как объект измерения, так и измерительное устройство содержит компоненты, параметры которых зависят от ряда факторов. Степень влияния части из них может быть оценена и учтена при обработке результатов измерения. Влияние ряда других факторов, например случайных, не поддается строгой оценке, поэтому подлежит опытному исследованию, если таковое возможно. В противном случае измерения проводят многократно, а их результаты усредняют.

В данной лабораторной работе исследуется влияние отклонения параметра элемента измерительной цепи от номинального значения на результат измерения. Отклонение задается принудительно или определяется вариацией температуры компонента цепи.

Описание лабораторной работы

Перечень элементов:

D1 - стабилитрон (диод Зенера), это полупроводниковый диод, включенный в обратном направлении. При определенном напряжении в нем происходит лавинный пробой,

D2 - полупроводниковый диод, используется в выпрямителях постоянного тока

D3 – диностор (диод Шокли), используется как переключатель, так как его сопротивление резко падает при достижении определенного напряжения.

Q1 – биполярный транзистор. Вывод 48 – база, в которую задается входной управляющий ток, вывод 49 – коллектор, в котором протекает выходной усиленный ток, к нулевой шине направлен эмиттер.

VR1 – компаратор, сравнивающее устройство. Его выходное напряжение $U_{53} = 3,5$ В, если $U_{54} - U_{52} < 0,7$ В и $U_{53} = 0,23$ В, если $U_{54} - U_{52} \geq 0,7$ В.

При указанных параметрах цепи переключение компаратора происходит при $U_{54} = 1,9$ В, то есть при $V_3 = 19$ В. Следовательно, при заданных *R4* и *R5* можно измерять V_3 путем изменения известного напряжения *V1*, и наоборот. Подобным образом можно измерять и параметры *R4* и *R5*. Если известны все величины и зависимость *R5* от температуры, можно *R5* использовать в качестве датчика температуры.

R5 – резистор с известной зависимостью сопротивления от температуры

$$R_5 = R_0[1 + TC_1(T - 27) + TC_2(T - 27)^2],$$

где *R0* – сопротивление при температуре 27°C, *T* - текущая температура, $TC_1 = 0,02$ Ом/К² и $TC_2 = 0,005$ Ом/К² – температурные коэффициенты.

S1 – *S4* - переключатели, служат для подключения к источнику тока *I1* одного из элементов.

Вариация параметра. В меню Analysis выбрать строку Parameter Sweep и в диалоговом окне установить обозначение элемента Component, название его параметра Parameter, диапазон изменения Start - End Value, шаг изменения Increment Step Size, выходную контрольную точку Output node.

Вариация температуры. В меню Analysis выбрать строку Temperature Sweep и в диалоговом окне указать начальную Start температуру (27°C), конечную End 77°C и шаг изменения 1°C. Если какой-либо термозависимый элемент цепи не подвергается общему изменению температуры, ему следует установить локальную температуру, сняв галочку Use global temp.

Порядок выполнения работы.

Файл foi1. Схема испытаний на постоянном токе дана на рис.1.

Вариация параметра.

1. При температуре $T=27^\circ\text{C}$ снять вольтамперные характеристики (ВАХ) диодов в режимах согласно таблице.

Включить	S1	S2	S3
Диоды	D2	D3	D1
Установить $I1$ (мкА)	100	0,1	10^4
Шаг по $I1$	100	0,01	10^3
$I1$ start	10	0	0
$I1$ end	10^4	0,2	10^5

2. Включить S4 и снять переходную характеристику транзистора Q1, то есть зависимость тока коллектора $\frac{-U50}{R2}$ от тока базы $I1$. Ток $I1$ изменять от 1 до 100 мкА с шагом 10 мкА. Снять выходную характеристику Q1, то есть зависимость тока коллектора от напряжения источника V2.
3. Методом вариации V3 от 1 В до 20В с шагом 0,5 В определить по скачку напряжения U53 напряжение V3, при котором срабатывает компаратор VR1.
4. Открыть файл foi2 и произвести многовариантный частотный анализ цепи в узле 51. Параметром выбрать L1 с диапазоном 4 - 400 мГн и шагом 100 мГн. Диапазон частот 10 Гц – 10 кГц.

Вариация температуры

5. При токе $I1=100$ мкА исследовать температурный уход рабочей точки диода D2 (узел 45).
6. При токе $I1=100$ мкА исследовать температурный уход напряжения стабилизации D1и рассчитать его дифференциальное сопротивление (узел 46).
7. При токе $I1=100$ мкА исследовать температурный уход напряжения базы U48 транзистора и найти изменение сопротивления базы $\Delta U48/I1$. По изменению напряжения в узле 50 найти изменение тока коллектора.
8. Установить зависимость R5 от общей температуры (use global temp) и снять зависимость U54 от T, а затем U53 от T. Найти температуру срабатывания компаратора и сравнить с расчетной.

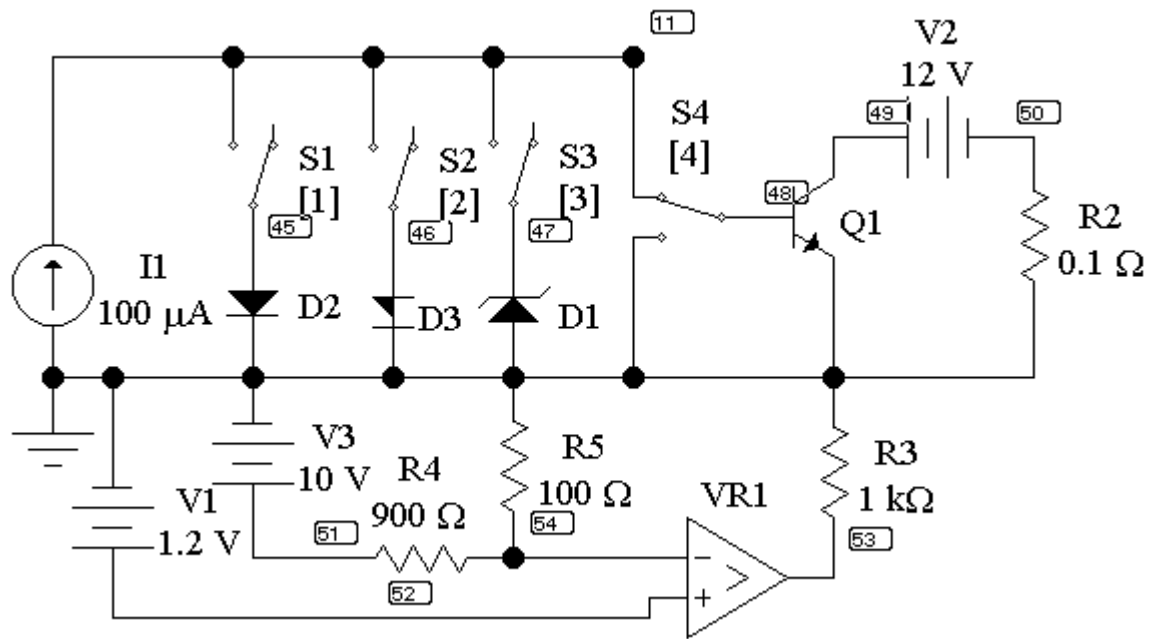


Рис.1. Схема для параметрических и температурных испытаний (файл foi1)

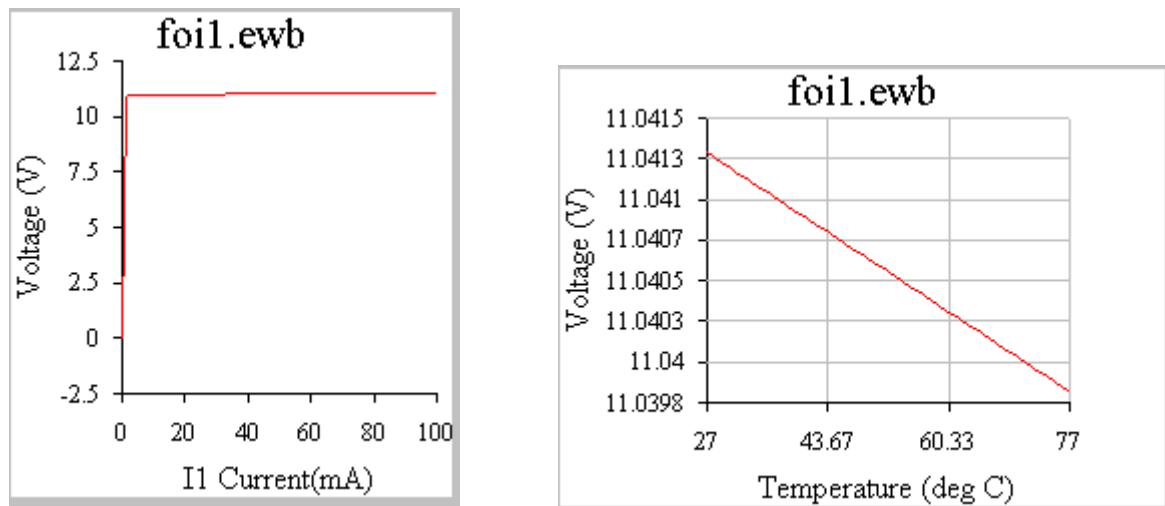


Рис.2. Результаты испытаний стабилизатора по току (I1) и температуре

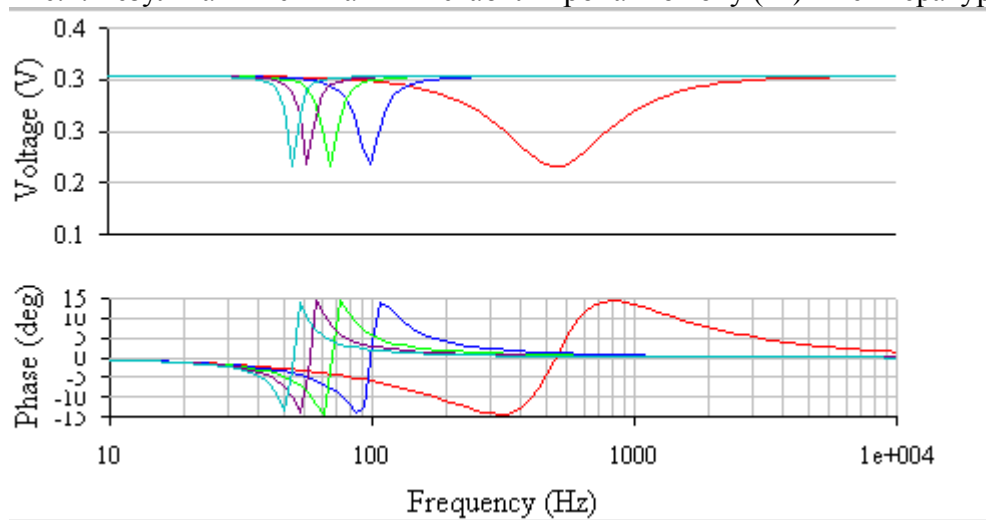


Рис.3. Многовариантный частотный анализ контура (файл foi2)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Когда нельзя опытным путем оценить влияние изменения параметров объекта, носящего случайный характер, прибегают к статистическим многократным испытаниям. Если влияющих факторов много, а изменения разнонаправлены, то среднее значение разброса измеряемой величины будет меньше отклонений, вызванных частными факторами. Оно и принимается за наиболее вероятное.

Под чувствительностью (Sensitivity) понимают отношение $\Delta y/\Delta x$ изменения выходной величины Δy (тока ветви или потенциала выбранного узла) к изменению Δx параметра компонента. На постоянном токе (DC) вычисляются чувствительности к малым изменениям параметра каждого элемента цепи, выраженных в основных единицах СИ. На переменном токе (AC) – только по одному элементу за один цикл, но в диапазоне частот.

Под худшим случаем (Worst Case) понимают такое изменение параметров всех компонентов (на одну величину в процентах), при котором выходная величина достигает экстремума.

Под методом Монте Карло (Monte Carlo) понимают проведение многократных испытаний (run), причем каждый раз параметры компонентов цепи изменяются случайным образом в пределах диапазона изменений (Tolerance).

Если установлено равномерное распределение вероятности (uniform), то отклонения разной величины равновероятны. Если установлено нормальное распределение (Gaussian), то меньшие отклонения более вероятны

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \ell^{-0,5 \left(\frac{u-x}{\sigma} \right)^2}, \quad \sigma = \frac{t_p \cdot u}{100},$$

где u – номинальное значение параметра,

σ - величина стандартного отклонения,

x – независимая переменная, случайное отклонение,

t_p – диапазон изменения x в процентах;

Здесь отклонения могут быть и больше σ , например, $>2\sigma$ с вероятностью 4,5 %, $>3\sigma$ – 0,3 %.

Описание лабораторной работы

На рис.1 изображена двухконтурная цепь для испытаний на постоянном токе, на рис.6 дана схема третьего порядка для испытаний на переменном токе.

Порядок выполнения работы

1. Для схемы рис.1 рассчитать предварительно по указанию преподавателя чувствительность.

Пример. Чувствительность потенциала узла 5 к малому изменению сопротивления резистора $R1$.

Контурный ток нижнего контура $I_2 = \frac{445}{23+8R1}$. $R1_1 = 5$ Ом; $V2_1=35,317$ В;

$R1_2 = 5,1$ Ом; $V2_2 = 35,572$ В. Чувствительность $\Delta V2/ \Delta R1 = 2,55$ В/Ом.

2. Вызвать файл fo14.

Проверить расчет путем моделирования:

- в меню Analysis выбрать строку Sensitivity;
- в диалоговом окне в блоке Analysis установить Voltage, Output node –5; в блоке Frequency установить DC Sens; нажать кнопку Simulate;
- в окне результатов напротив обозначения $R1$ прочитать чувствительность 2,5787 (см. рис.2).

3. Провести анализ на худший случай:

- в меню Analysis выбрать строку Worst Case ;
- в диалоговом окне установить диапазон изменения параметров Tolerance;
- установить Max.Voltage или min в окне Collating function;
- выбрать выходной узел;
- выбрать изменения Sweep для постоянного тока DC;
- нажать кнопку Simulate;
- в появившемся окне прочитать результат моделирования (см. рис.3).

4. Провести анализ по методу Монте Карло:

- в меню Analysis выбрать строку Monte Carlo,
- в диалоговом окне установить число испытаний (run), диапазон Tolerance, начальное число генератора случайных чисел (любое от 1 до 32767) Seed, выбрать вид распределения вероятностей (Uniform, Ganssian), выбрать выходной узел, нажать кнопку Simulate (см. рис.4).

5. Вызвать файл fo15 (рис.6) и определить чувствительность цепи по переменному току источника $V1$ при вариации индуктивности $L1$. Для этого в диалоговом окне Sensitivity Analysis установить: Current, Output source: $V1$, component: $L1$. Результаты сравнить с рис.5.

6. Оформить результаты работы.

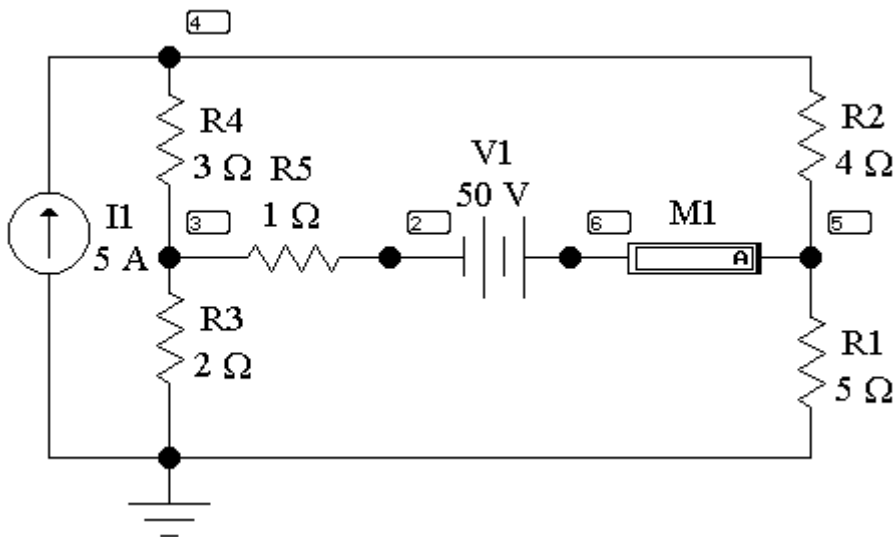
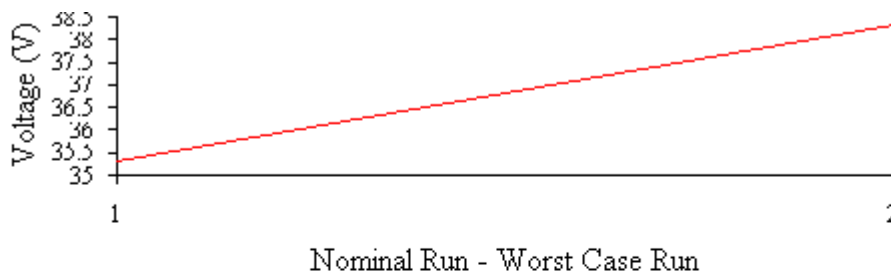


Рис.1. Схема для статистических испытаний на постоянном токе (foI4)

Component	Sensitivity (V...
I1	2.5079
M1	-5.8642
R1	2.5787
R2	0.27715
R3	-1.3102
R4	0.67397
R5	-5.8642
R5:tc1	0
R5:tc2	0
R5_temp	-0.11728
V1	0.55556

Рис.2 Чувствительность схемы и вариации параметров элементов



Parameter	Worst case value
R1 Resistance (Ohms)	5.25
R2 Resistance (Ohms)	4.2
R3 Resistance (Ohms)	1.9
R4 Resistance (Ohms)	3.15
R5 Resistance (Ohms)	0.95
V1 Voltage (V)	52.5

Рис.3. Испытания по худшему случаю

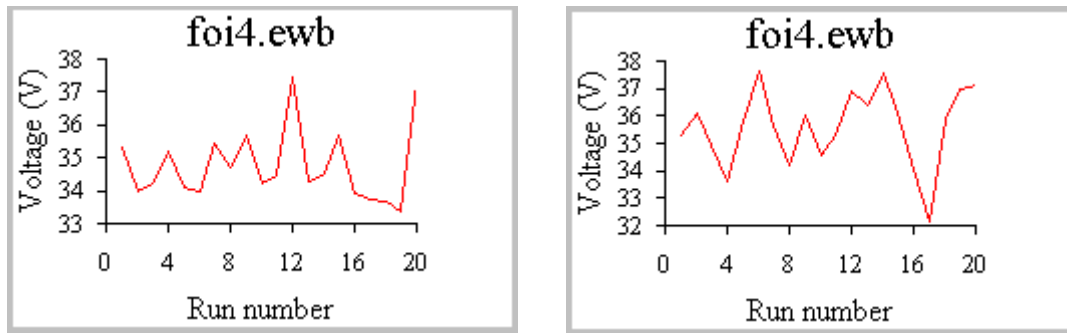


Рис.4. Результат статистических испытаний по Гауссу (справа) и равновероятные

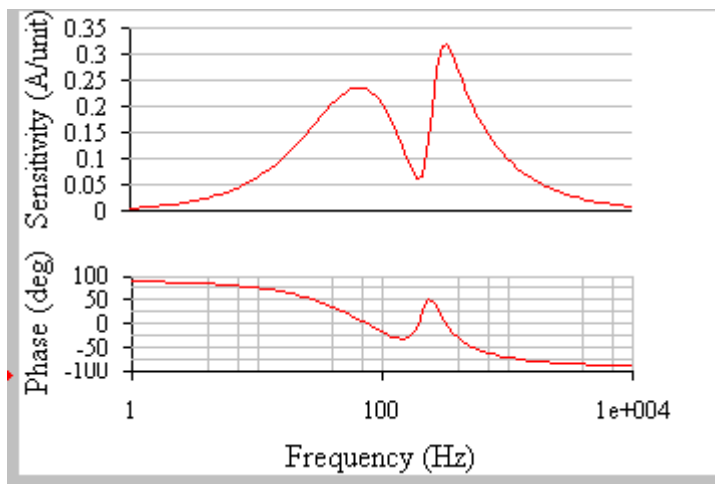


Рис.5. Чувствительность тока контура к изменению L1.

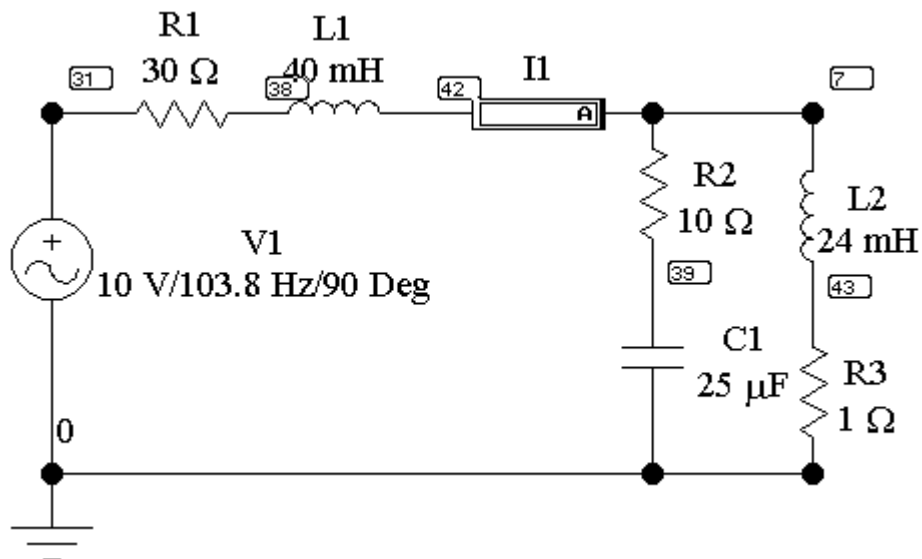


Рис.6. Схема испытаний на переменном токе (foi5)

Ниже приведены снимки схем измерения в программе Multisim

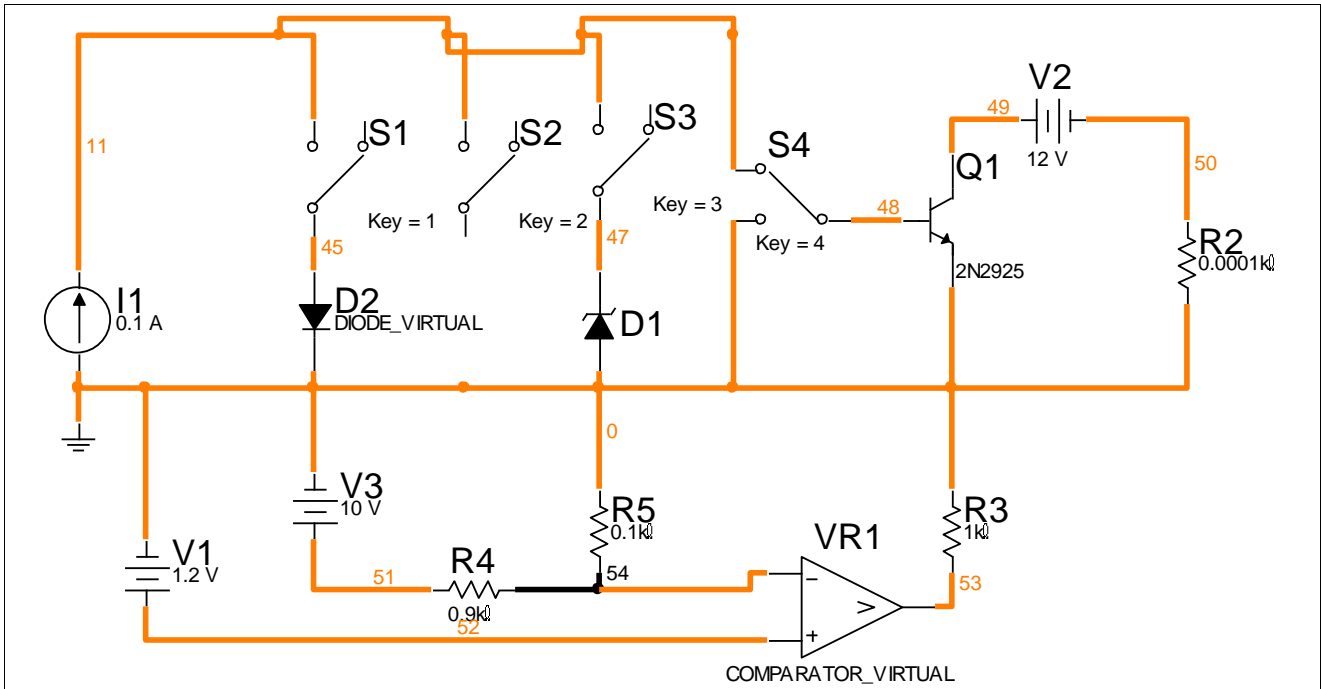


Рис. foi 1

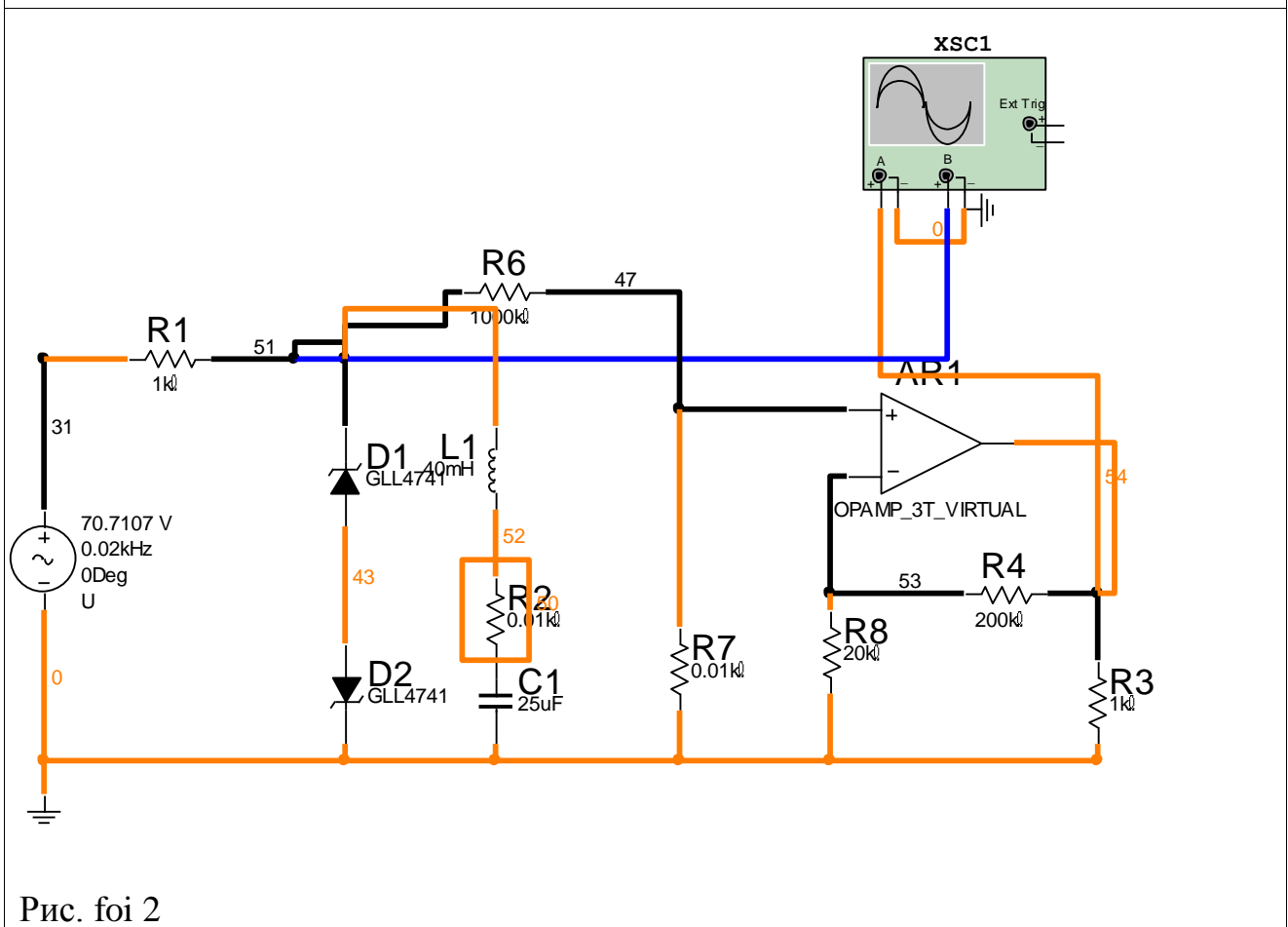


Рис. foi 2

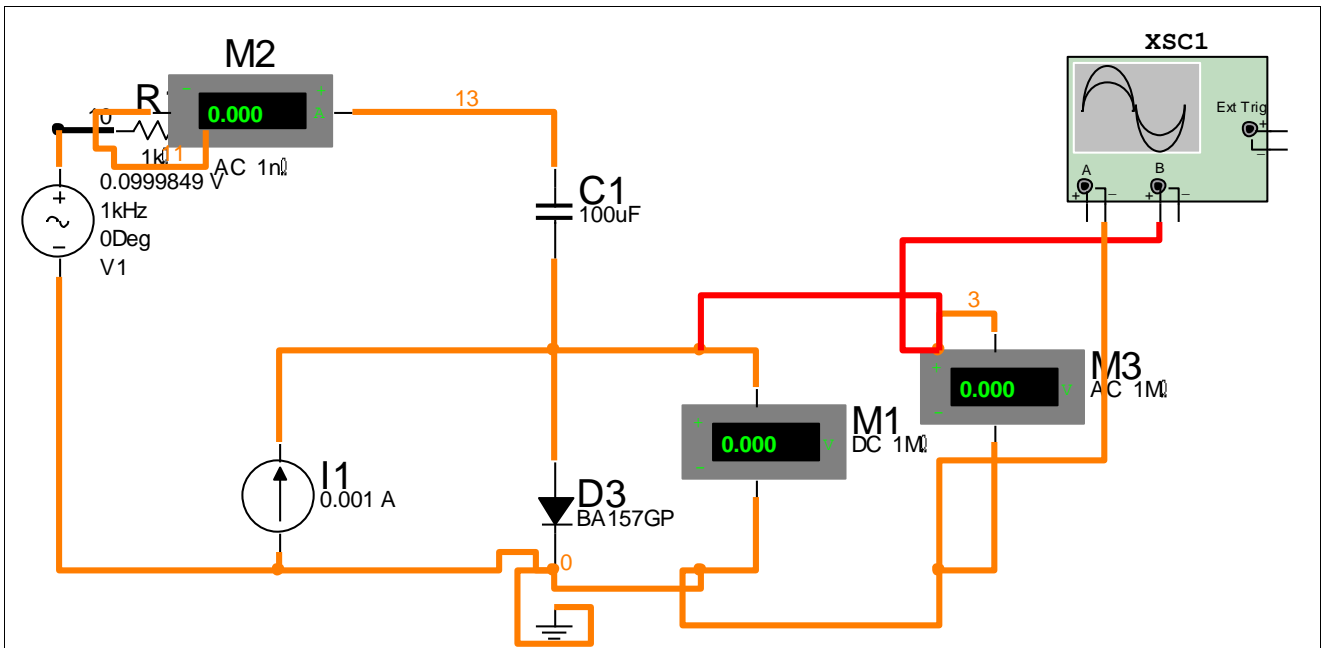


Рис. Foi 3

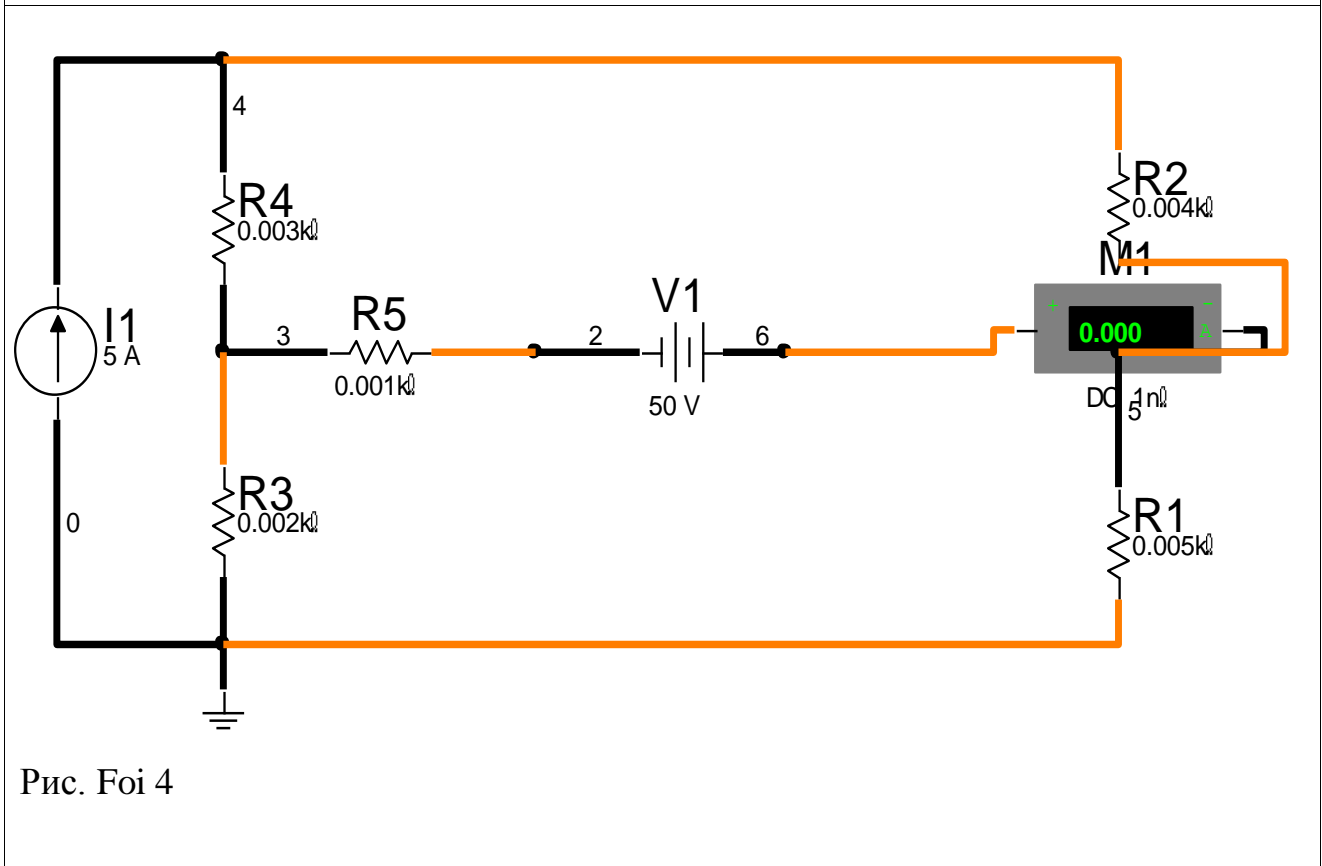


Рис. Foi 4

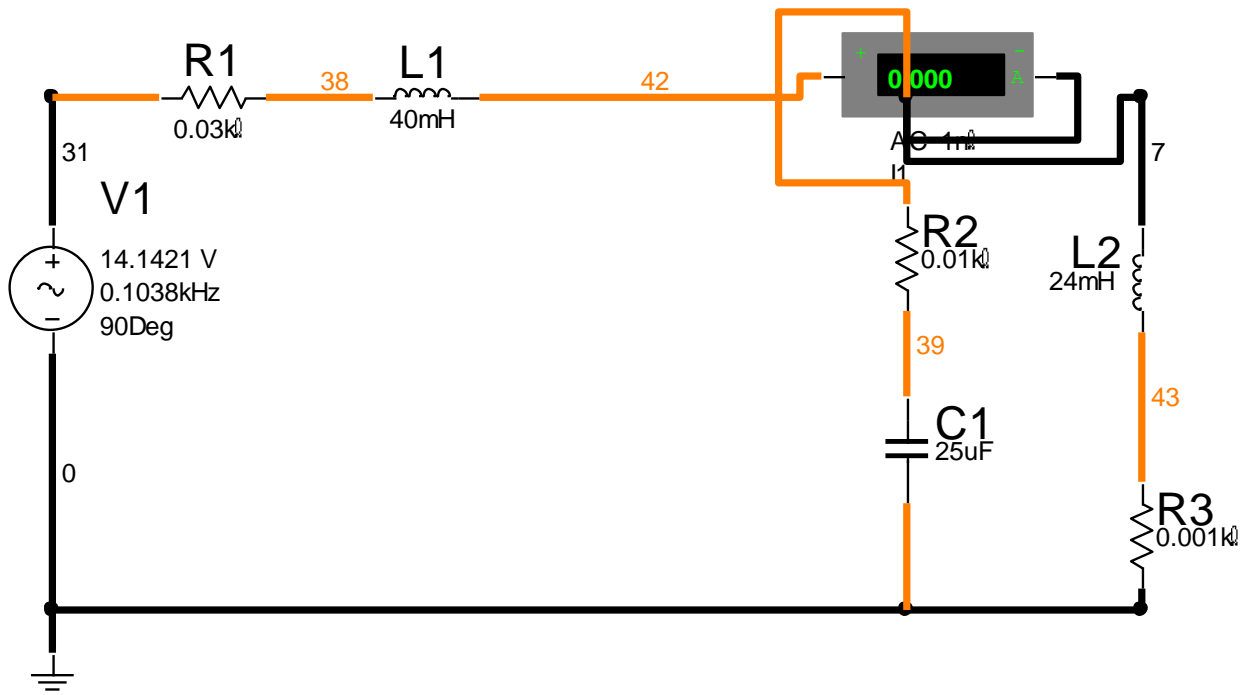


Рис. Foi 5

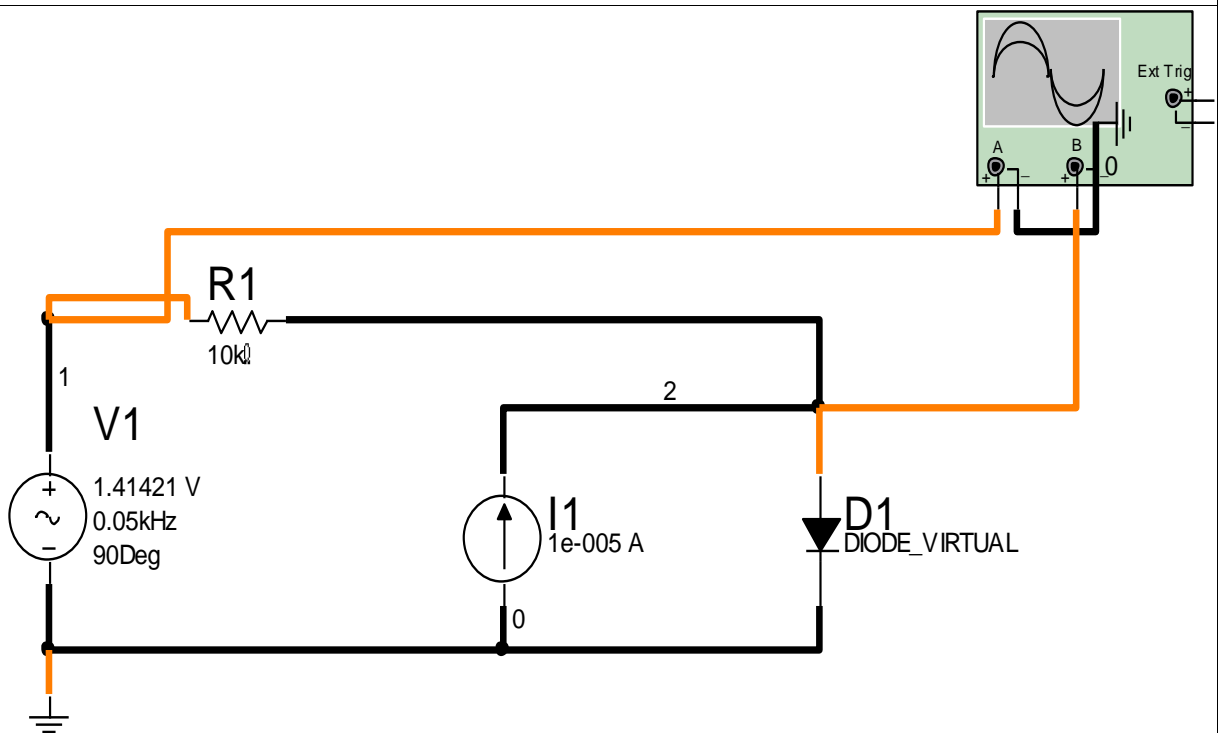


Рис. Foi 6