



Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Исследование погрешностей электронных схем, вызываемых тепловыми шумами

Методические указания
по выполнению лабораторной работы № 10 по курсу
“Проектирование средств измерений и контроля”

ТОМСК 2022

Цель работы

Изучить погрешности, вызываемые тепловыми шумами компонентов электронной схемы. Получить навыки компьютерного моделирования измерительных схем на операционных усилителях с использованием программы компьютерного моделирования Multisim.

1. Исследование погрешностей электронных схем, вызываемых тепловыми шумами

1.1. Теоретические основы возникновения широкополосных шумов в электронных схемах

Электронные схемы работают благодаря протекающим по их элементам электрическим токам. Электрический ток – это направленное движение дискретных носителей электрического заряда, таких как электроны, ионы, «дырки» в полупроводниках и т.д. Дискретность носителей заряда при протекании электрического тока приводит к хаотическому изменению носителя сигнала – величины этого тока с амплитудой и частотой изменяющимися случайным образом. Этот называемый шумом сигнал ограничивает возможности датчика при обнаружении слабых сигналов. Поэтому разработчику необходимо снижать уровень шумов. По природе возникновения выделяют несколько видов электрических шумов:

Тепловые шумы иногда называют шумами Джонсона по имени их открывателя. Они генерируются тепловым движением электронов в проводниках. Проще говоря, чем сильнее нагрет проводник, тем больше он шумит. Случайное тепловое движение электронов накладывается на их упорядоченное движение под воздействием разности потенциалов. Тепловой шум исчезает только при температуре, равной абсолютному нулю по Кельвину. Подобно дробовому шуму спектральная плотность теплового шума не зависит от частоты (это называется белый шум), но к тому же не зависит от тока.

При частотах ниже 100 МГц для шумовых напряжения и тока справедливы соотношения Найквиста:

$$\sigma_U = \sqrt{U_{\text{ш}}^2} = \sqrt{4kTR_T\Delta f} \quad \text{или} \quad \sigma_I = \sqrt{I_{\text{ш}}^2} = \sqrt{\frac{4kTR_T\Delta f}{R_T}}, \quad (1)$$

где $k=1,38 \times 10^{-23}$ Дж×градус⁻¹ – постоянная Больцмана; T, K – температура проводника; Δf – полоса частот, в которой измеряется среднеквадратичное отклонение.

Величина данного вида шума не зависит от приложенного напряжения, тока и частоты, а только от величины сопротивления и полосы частот. При сопротивлении $R_T=10$ кОм и полосе $\Delta f=10$ кГц при комнатной температуре шумовое напряжение $U_{\text{ш}} \approx 10^{-6}$ В.

В полупроводнике флуктуациями скоростей тепловой генерации и рекомбинации свободных носителей заряда вызывается **генерационно - рекомбинационный шум**. В полупроводнике за счет тепловой энергии кристаллической решетки образуются электронно-дырочные пары. Как правило, из-за наличия примесей р- и n-типа концентрации электронов и дырок не равны между собой. При этом сопротивление образца флуктуирует во времени, что вызывает флуктуации напряжения на полупроводниковом элементе. В этом случае генерационно-рекомбинационный шум описывается выражением

$$\overline{u_{\text{ш-гр}}^2} = \overline{I_{\text{ш-гр}}^2} R = (2IR)^2 \left(\frac{b+1}{bN+P}\right)^2 \frac{NP}{N+P} \frac{\tau \Delta f}{(1+\omega^2\tau^2)}, \quad (2)$$

где τ – время жизни свободных носителей, I – ток смещения; b – отношение подвижностей электронов и дырок, N – полное число электронов, P – полное число дырок в образце. Относительно подаваемого на элемент СИК сигнала генерационно-рекомбинационный шум имеет мультипликативный характер.

В полупроводниковых диодах, биполярных транзисторах и электровакуумных лампах возникает **дробовый шум**. Протекая через диод по нагрузочному сопротивлению R_H , этот флуктуирующий ток, создает напряжение, дисперсия которого равна

$$\overline{u_{\text{ш-др}}^2} = 2V(I + 2I_0)R_H^2\Delta f, \quad (3)$$

где I_0 - ток насыщения диода при обратном смещении его p-n перехода, V – приложенное к диоду напряжение, e - заряд электрона.

Выше перечисленные виды шумов слабо зависят от частоты. Кроме них в полупроводниках возникают так называемые **фликкер – шумы (шум $1/f$)**, которые вызваны наличием потенциальных барьеров на контактах, в объеме или на поверхности полупроводника. На практике часто применяют следующее выражение для описания низкочастотного шума

$$\overline{u_{ш-нч}^2} = K_{нч} I^2 R^2 \frac{\Delta f}{f} \quad (4)$$

где $K_{нч}$ - численная постоянная, значение которой определяется для каждого типа приемника, например, для фоторезистора типа PbS $K_{нч} = 10^{-11} - 10^{-12}$. Фликкер - шум имеет мультипликативный характер относительно подаваемого на элемент сигнала.

В операционных усилителях этот шум вызывается флюктуирующим захватом зарядов ловушками, образуемыми неоднородностями структуры полупроводника. Наибольшее значение фликкер-шум имеет в области низких частот, где его амплитудный спектр может значительно превосходить спектр шумов иной природы. На рис. 1 приведен график амплитудного спектра напряжения шума прецизионного ОУ AD707, приведенного к его входу.

На графике видно, что в области низких частот преобладает фликкер-шум. Частоту перехода от зависимости $e_N \sim 1/f$ к $e_N = \text{const}$ называют частотой сопряжения $f_{\text{сопр}}$.

Как правило, в технических характеристиках усилителей приводят следующие шумовые параметры: спектральную плотность входного напряжения шума e_N , спектральную плотность входного тока шума i_N и размах входного напряжения шума от пика до пика $E_{N \text{ п-п}}$ в полосе частот 0.1... 10 Гц, т. е. там, где наиболее сильно проявляется фликкер-шум.

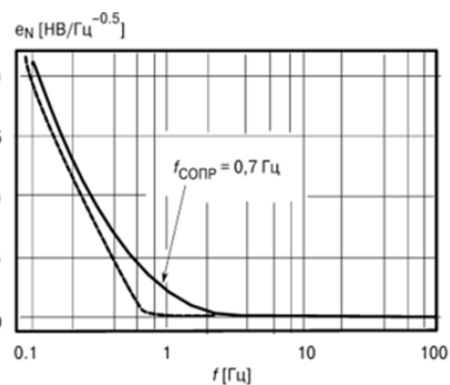


Рис. 1. График амплитудного спектра напряжения шума ОУ AD707

1.2. Методы снижения широкополосных шумов в электронных схемах

Из рассмотренного выше материала видно, что большинство широкополосных шумов возрастают при увеличении температуры элементов электронной схемы. Поэтому для предотвращения их роста в ходе проектирования схем необходимо следить за тем, чтобы участвующие в преобразовании аналитического сигнала элементы не нагревались электрическим током.

Более затратным способом снижения широкополосных шумов является охлаждение схемы. Охлаждение на десятки градусов осуществляется термоэлектрическим холодильником. Более существенное охлаждение до температур близких к абсолютному нулю достигается за счет снижения температуры при испарении сжиженных газов, например в сосудах Дьюара идет испарение жидкого азота.

Для снижения фликкер – шумов при проектировании измерительных устройств необходимо исключить их работу с низкочастотными (частота менее единиц Гц) сигналами.

Еще одним способом снижения влияния широкополосных шумов на результаты измерений является модуляция с определенной частотой амплитуды аналитического сигнала. После необходимых преобразований аналитический сигнал пропускается через полосовой частотный фильтр или подвергается процедуре синхронного детектирования. В результате все составляющие шумов с частотой, отличающейся от частоты модуляции, устраняются из результатов измерений.

Если не удастся снизить уровень широкополосных шумов в схеме измерительного прибора, то уменьшение их влияния на результаты измерений возможно путем увеличения амплитуды полезного сигнала. Это достигается тем, что на выходе каждого участвующего в

перобразовании аналитического сигнала элемента амплитуда этого сигнала должна быть по возможности максимальной. Поэтому известно простое правило: коэффициент усиления первого каскада любой измерительной схемы должен быть максимально возможным. В этом случае присутствующая в результатах измерения большая часть шумов будет обусловлена преимущественно шумами первого каскада схемы. При использовании искусственного охлаждения для снижения широкополосных шумов часто охлаждают только первый каскад измерительной схемы (чаще это датчик). Данная лабораторная работа посвящена исследованию именно этого метода снижения влияния широкополосных шумов на результаты измерений.

2. Исследование влияния тепловых шумов в электронных схемах на результаты измерений

2.1. Способ снижения влияния тепловых шумов резисторов в электронных схемах на результаты измерений

При выполнении лабораторной работы рассмотрим только тепловые шумы резисторов.

Тепловой шум резистора пропорционален его сопротивлению и температуре. По этой причине важно избегать использования во входных цепях усилителей с высоким коэффициентом усиления высокоомных резисторов и повышенной температуры этих цепей.

Если резистор включен на входе высокочувствительного усилителя, то на его выходе будут присутствовать характерные шумы. **Снизить уровень этих шумов можно, лишь уменьшив сопротивление R или температуру T .**

Помимо тепловых шумов существует токовый шум, возникающий при прохождении через резистор тока. Этот шум обусловлен дискретной структурой резистивного элемента. При прохождении тока возникают местные перегревы, в результате которых изменяется сопротивление контактов между отдельными частицами токопроводящего слоя и, следовательно, флюктуирует (изменяется) значение сопротивления, что ведет к появлению между выводами резистора ЭДС токовых шумов E_i . Токовый шум, так же как и тепловой, имеет непрерывный спектр, но интенсивность его увеличивается в области низких частот.

Поскольку значения тока, протекающего через резистор, зависит от значения приложенного напряжения U , то в первом приближении можно считать

$$E_{ш} = K U$$

где K -- коэффициент, зависящий от конструкции резистора, свойств резистивного слоя и полосы частот. Величина K указывается в ТУ и лежит в пределах от 0,2 до 20 мкВ/В. Чем однороднее структура, тем меньше токовый шум. У металлопленочных и углеродистых резисторов величина $K = 1,5$ мкВ/В, у композиционных поверхностных резисторов $K_i = 40$ мкВ/В, у композиционных объемных резисторов $K = 45$ мкВ/В. У проволочных резисторов токовый шум отсутствует. Величина токового шума в полосе частот от 60 до 6000 Гц. Значительно превышает величину теплового шума.

Шумовые свойства некоторых резисторов.

Таблица 1.

Тип	Технология	Уровень шума, мкВ/В
БЛП	Боруглеродистые	0,5
С2-13 С2-29В	Металлодиэлектрические	1,0
С2-50	Металлодиэлектрические	1,5
МЛТ ОМЛТ С3-23 С2-33	Металлодиэлектрические	1...5
С2-26	Металлоокисные	0,5
СПЗ-4	Пленочные композиционные	47...100
СПЗ-19		25...47
СПЗ-23		25...47

Из табл. 1 видно, что наиболее эффективно использовать в высококачественном малощумящем усилителе резисторы типов С2-26, С2-29В, С2-33 и резисторы в чип-исполнении (бескорпусные) С1-4. Как наиболее шумовые из популярных резисторов, кроме переменных и подстроечных, показали себя популярные и распространенные типы МЛТ, ОМЛТ.

Рассмотрим влияние тепловых шумов на выходной сигнал представленной на рис. 2 схемы состоящей из двух последовательно соединенных блоков.

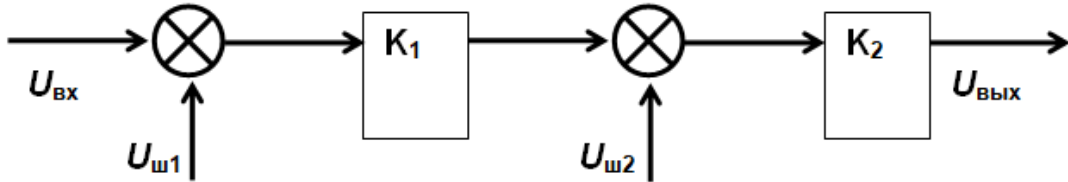


Рис. 2. Функциональная схема исследования влияния тепловых шумов на результат измерений.

Выходное напряжение схемы будет описываться выражением:

$$U_{\text{Вых}} = [(U_{\text{вх}} + U_{\text{ш1}}) K_1 + U_{\text{ш2}}] K_2 = U_{\text{вх}} K_1 K_2 + U_{\text{ш1}} K_1 K_2 + U_{\text{ш2}} K_2,$$

где: $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение; $U_{\text{ш1}}$ и $U_{\text{ш2}}$ – напряжения тепловых шумов первого и второго блоков; K_1 и K_2 – коэффициенты усиления первого и второго блоков.

Обычно для таких схем задают значение общего коэффициента передачи

$$K = K_1 K_2$$

В этом случае вклад шумов $U_{\text{ш1}}$ в выходной сигнал не зависит от соотношения коэффициентов K_1 и K_2 , а для снижения влияния шумов $U_{\text{ш2}}$ необходимо уменьшить коэффициент K_2 . Поэтому в измерительных схемах для снижения влияния тепловых шумов на выходной сигнал необходимо увеличивать коэффициент усиления входного каскада.

2.2. Исследование способа снижения влияния тепловых шумов резисторов в электронных схемах на результаты измерений

При выполнении работы необходимо изучить выше изложенный теоретический материал. Отдельным файлом в формате Microsoft Word начать составлять отчет по работе.

Открыть и запустить на выполнение программу Multicim. Составить представленную на рисунке 3 схему для исследований.

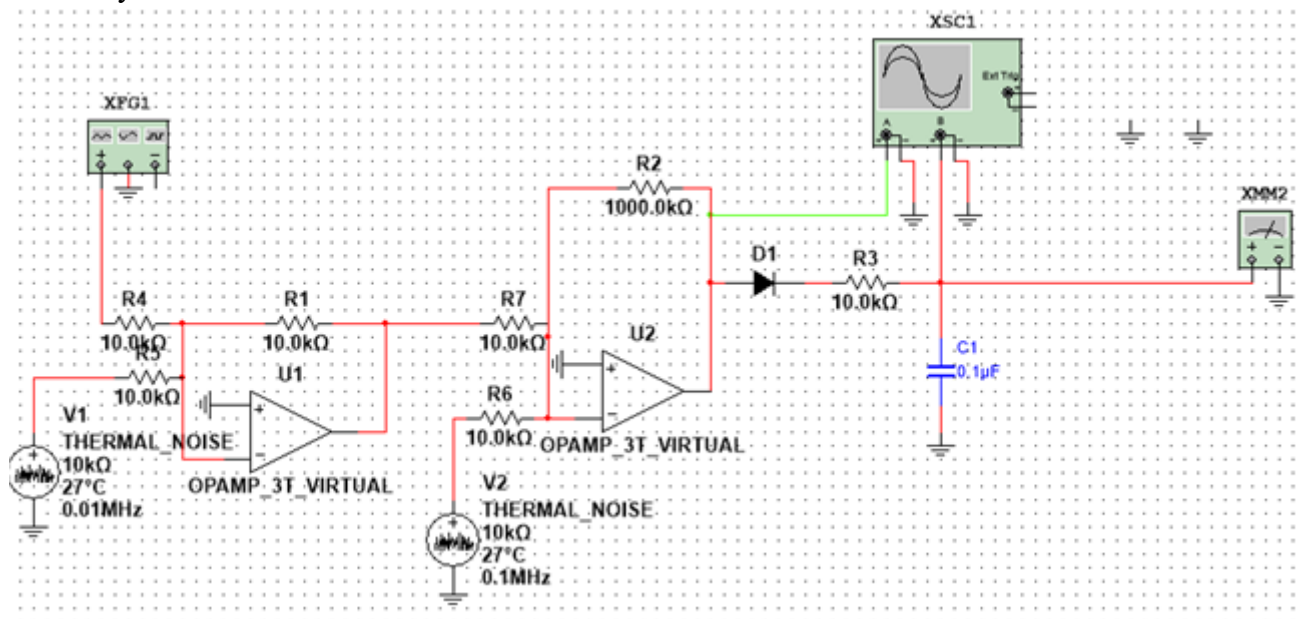


Рис. 3. Исследуемая схема

Настроить параметры функционального генератора в соответствии с рис.4.

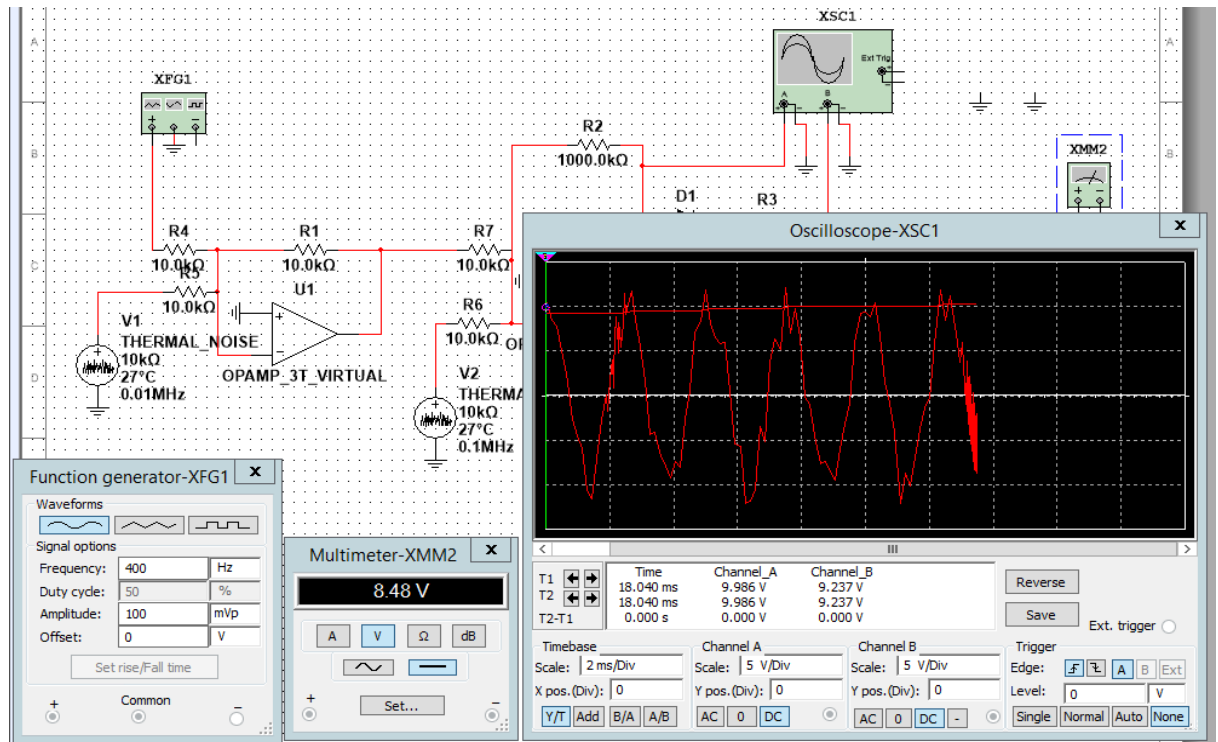


Рис. 4. Панели управления измерительными приборами

Настроить генераторы «белого» шума V₁ и V₂ в соответствии с рис.5.

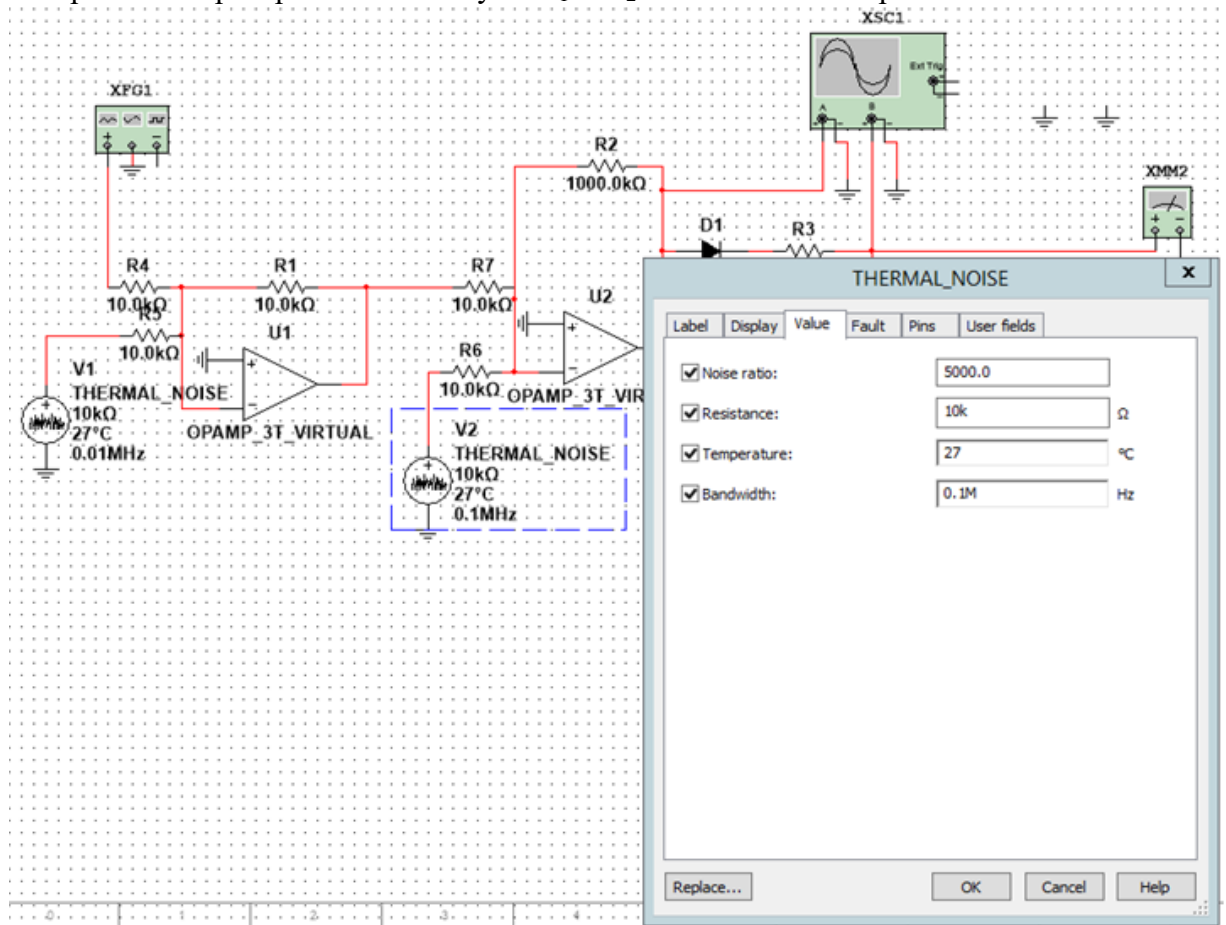


Рис. 5. Параметры генератора «белого» шума V₂

Общий коэффициент усиления схемы из двух последовательно соединенных усилителей U_1 и U_2 равен 100. Определить по мультиметру ХММ2 величины «зашумленного» выходного сигнала при коэффициенте усиления U_1 равном 1, 10, 100 (соответственно коэффициент усиления U_2 равен 100, 10, 1). Результаты измерений занести в таблицу. Коэффициенты усиления устанавливать изменяя сопротивление резисторов R_1 и R_2 , как это показано на рис. 6.

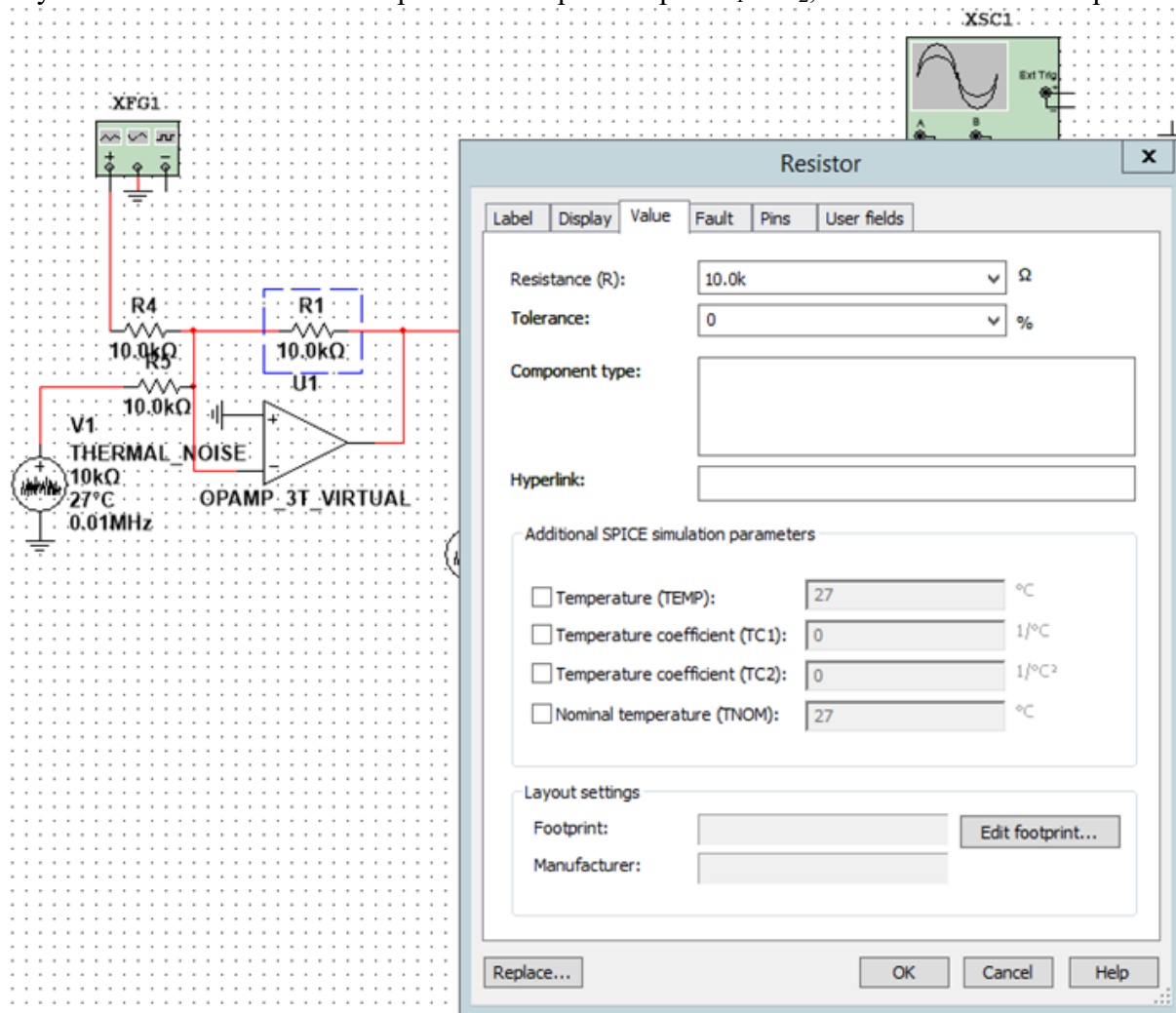


Рис. 6. Параметры резистора R_1 .

Замерить величину выходного сигнала схемы для случая отсутствия шумов. Для этого в соответствии с рис. 7 установить нулевые уровни шумов (Noise ratio) генераторов «белого» шума V_1 и V_2 . Затем мультиметром ХММ2 произвести замер выходного сигнала схемы. Этот сигнал считать истинным значением измеряемой величины.

Вычислить относительные погрешности измерения «зашумленного» сигнала для случаев коэффициента усиления U_1 равного 1, 10, 100. Сделать выводы.

Составление отчета

Выполнить изложенные выше задания. Оформить все полученные результаты в виде файла Word (.doc или .docx). Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с указанием названия работы, № группы, ФИО.
2. Цель работы.
3. Названия заданий к экспериментальным исследованиям.
4. Схемы исследуемых цепей.
5. Результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов. Временные диаграммы и графики, построенные по результатам измерений и расчетов.
6. Выводы и сопоставление результатов измерений и расчетов.

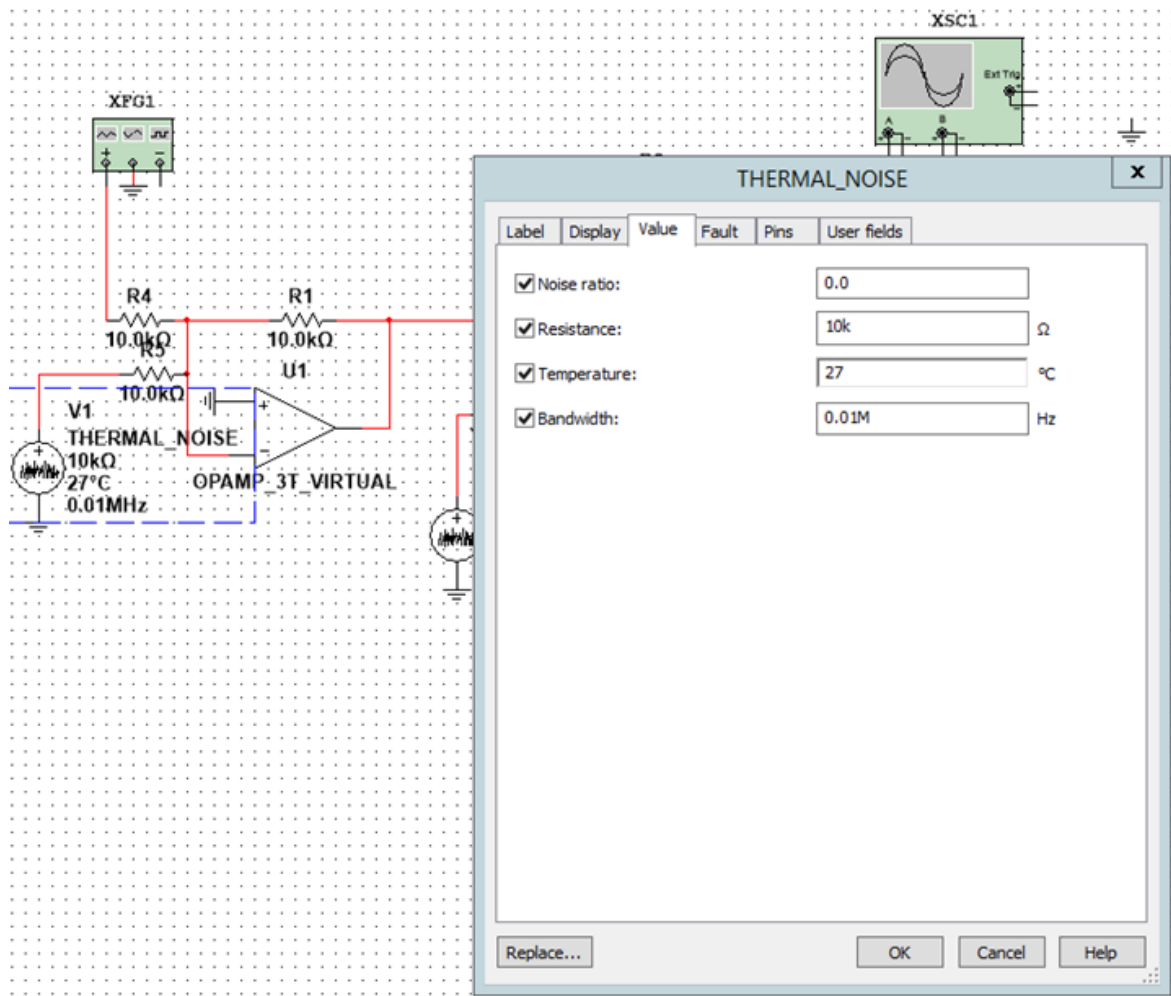


Рис. 7. Установка нулевых уровней шумов генераторов «белого» шума

Образец оформления отчета приведен в ПРИЛОЖЕНИИ 1 описания первой лабораторной работы. Отчет сформировать в виде файла Word (.doc или .docx). К отчету приложить модель исследуемых схем в виде файла Multicim (.ms13 или .ms14). Эти два файла необходимо передать преподавателю, прикрепляя их на странице задания по кнопке «Загрузить файл».