

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Осциллограф.....	6
Двухканальный осциллограф.....	8
Четырехканальный осциллограф.....	17
Функциональный генератор.....	20
Мультиметр.....	21
Ваттметр.....	24
Плоттер Боде.....	25
Логический анализатор.....	27
Генератор слов.....	30
Логический преобразователь.....	34
Характериограф.....	37
Анализатор спектра.....	38
Панорамный анализатор.....	39
Измерение модуля и фазы с помощью функции «Режим АС»	42
Вопросы.....	46
Литература.....	47
Приложение.....	48
Запись результатов измерений.....	50
Децибелы.....	52
Напряжение и ток: V- и I- величины.....	53
Таблицы.....	55
Коэффициенты перехода.....	55
Свойства материалов.....	56

## ВВЕДЕНИЕ

### **Измерительная техника комплекса National Instrument Multisim 10 в образовательном процессе**

Наша способность выполнять точные измерения является одним из фундаментальных факторов, позволяющих заниматься наукой и техникой. Другими словами: «В физике существует только то, что можно измерить» (Макс Планк).

У измерений давняя история. За четыре тысячелетия до Рождества Христова вавилоняне и египтяне уже проводили астрономические измерения. Несмотря на то, что сегодня может выглядеть тривиальным, принятие повсюду в мире одной системы мер и весов (системы СИ) стало заметной вехой в области измерений.

Цель настоящего пособия состоит в том, чтобы предоставить студенту необходимые сведения по контролю и измерению физических величин при исследовании и анализе устройств по дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника» в лаборатории National Instrument Multisim 10.

«Multisim 10 составляет основу платформы для обучения электротехнике компании National Instruments. Среда моделирования дает возможность студентам получить всесторонний практический опыт на всем протяжении полного цикла проектирования электронного оборудования», - заявил Рей Алмгрен, вице-президент компании National Instruments по академическим связям. «При помощи среды разработки студенты могут с легкостью перейти от теории к практике, создавая опытные образцы и углубляя свои знания в основах проектирования схем», - отметил он.

Важное место в исследованиях, разработке и создании современной техники занимает контрольно - измерительная аппаратура.

Multisim10 - моделирующая программа, предоставляющая огромные возможности в проектировании, исследованиях и анализе электронных устройств, располагает достаточно большим количеством виртуальных измерительных приборов. Эти измерительные инструменты устанавливаются, используются и работают подобно их реальным эквивалентам. Важной особенностью измерительных приборов в этой моделирующей программе является то, что они выглядят подобно инструментам, с которыми работают в научных и исследовательских лабораториях.

Использование виртуальных контрольно-измерительных приборов – самый простой способ проверить поведение схемы и увидеть результаты проектирования.

В пакете программ Multisim 10 присутствуют следующие измерительные приборы: мультиметры для измерения постоянного и переменного напряжения и тока, сопротивления; функциональный генератор или генератор сигналов – источник напряжения, который может генерировать синусоидальные,

пилообразные и прямоугольные импульсы; ваттметр – прибор, предназначенный для измерения мощности; двух- и четырехлучевые осциллографы, с регулировкой каналов усиления, частоты развертки, смещения лучей по координатам X, Y, имеются открытый и закрытый входы, предусмотрен ввод сигналов синхронизации.

В составе присутствует плоттер Бодэ, графопостроитель, предназначенный для построения и анализа амплитудно-частотных и частотно-фазовых характеристик с логарифмической и линейной шкалами по осям Y и X.

Кроме того, имеются логический анализатор - устройство, предназначенное для записи и анализа цифровых последовательностей и генератор слов, формирователь последовательностей цифровых сигналов и другие.

Приборы, в учебной, научной и конструкторской документации можно представлять, как в условных графических отображениях, так и в «виртуально – реальном» виде.

Виртуальные инструменты имеют два вида: иконка инструмента, которую вы подключаете к вашей схеме, и панель инструмента, где вы устанавливаете параметры прибора. Можно показывать или скрывать панель инструмента двойным щелчком по его иконке. Панели инструментов всегда располагаются вверху основного рабочего поля так, что они не скрыты. Имеется возможность поместить панель в любом месте рабочего стола. При сохранении схемы положение панели инструмента и состояние скрыть/показать сохраняются вместе со схемой. Также сохраняются все данные, полученные прибором до некоторого максимального размера.

Для выполнения измерений необходимо вызвать программу NI Multisim 10.1.1. В открывшемся главном окне программы автоматически появляется панель измерительных приборов (справа).

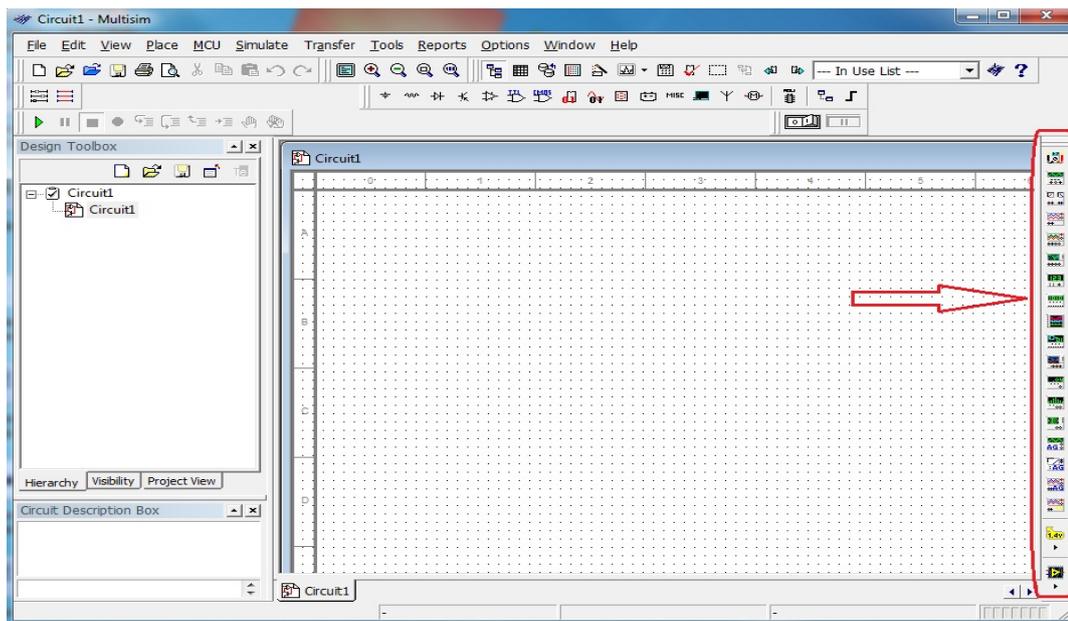


Рис. 1. Панель приборов в главном окне

## Осциллограф

Осциллограф – это прибор, предназначенный для исследования (наблюдения, записи и измерения) амплитудных и временных параметров электрического сигнала, подаваемых на его входы.

Электронный осциллограф в настоящее время является одним из наиболее распространенных радиоизмерительных приборов. Он применяется не только при исследовании радиоэлектронных схем, но также и в других областях науки и техники, использующих методы электроники, например в биологии, автоматике и управлении, медицине и так далее.

Такое распространение и широкое применение электронного осциллографа обусловлено универсальностью измерений, наглядностью получаемого на экране изображения исследуемого напряжения, а также высокими параметрами прибора: большим входным сопротивлением и высокой чувствительности, широкой полосой пропускания и отсутствием инерционности.

Большое входное сопротивление осциллографа обеспечивает минимальное влияние при его подключении на электрический режим исследуемой цепи.

Отсутствие инерционности электронного осциллографа позволяет исследовать электрические процессы в очень широком диапазоне частот, а его высокая чувствительность дает возможность получать осциллограммы напряжений малой амплитуды.

Применение широкополосных усилителей вертикального отклонения позволяет исследовать несинусоидальные напряжения, включающие в себя широкий спектр частот с минимальными искажениями.

Основными элементами схемы электронного осциллографа являются: электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением, каналы вертикального (Y) и горизонтального (X) отклонений лучей с соответствующими элементами (делителем и усилителем), генератор развертки, обеспечивающий получение осциллограмм, блок синхронизации для получения устойчивого неподвижного изображения, калибратор для измерения амплитуды напряжения и временных интервалов, блок питания.

Основными техническими показателями электронного осциллографа являются: чувствительность и полоса пропускания каналов, входное сопротивление и входная емкость, максимальное напряжение входного сигнала, искажения исследуемого напряжения, виды развертки, погрешность измерения амплитуды и временных интервалов, наибольшая частота синхронизации, тип электронно-лучевой трубки (или размеры экрана). Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка ЭЛТ. Она представляет собой стеклянный баллон с высоким вакуумом, внутри которого находятся: накаливаемый катод, являющийся источником электронов; модулятор, представляющий собой диск с малым отверстием, управляет интенсивностью

электронного пучка. Регулируя разность потенциалов между катодом и модулятором, можно изменять количество электронов, проходящих через отверстие модулятора в единицу времени, и тем самым регулировать яркость светового пятна на экране. При достаточно большом отрицательном (относительно катода) потенциале модулятора электронный пучок можно полностью запереть; аноды предназначены для ускорения и фокусирования электронного пучка; две пары отклоняющих пластин, одна из которых служит для отклонения электронного луча в вертикальном направлении - Y, а другая - в горизонтальном - X. Упрощенная структурная схема осциллографа изображена на рис. 2.

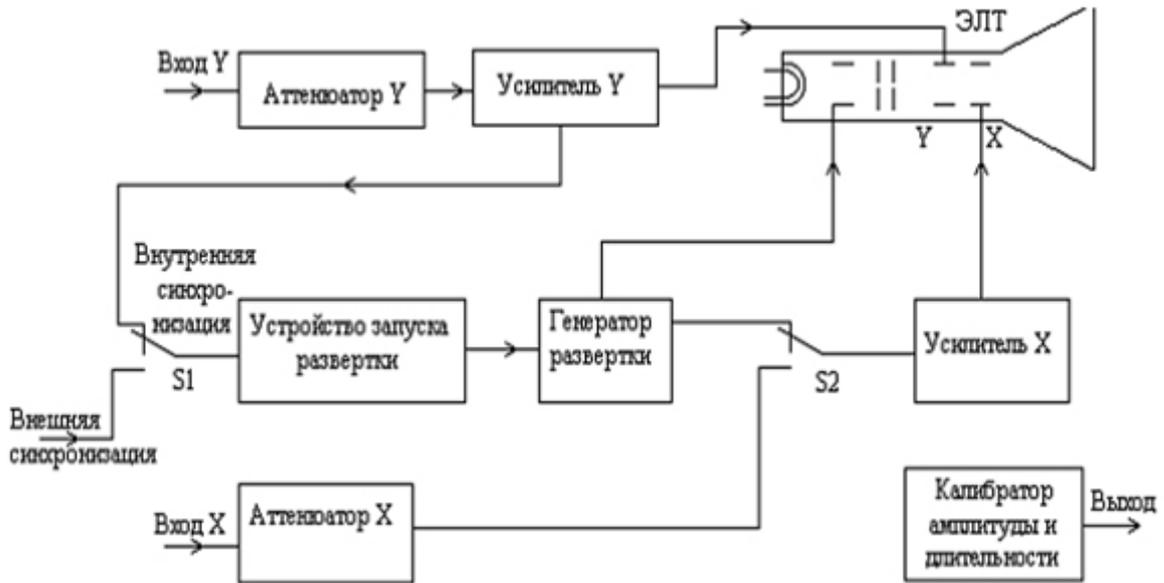


Рис. 2. Структурная схема и принцип действия осциллографа

Исследуемый сигнал подается на вход усилителя вертикального отклонения (Y) через аттенюатор. С выхода усилителя сигнал поступает на пластины вертикального отклонения луча ЭЛТ. Аттенюатор необходим при работе с сигналами, имеющими большую амплитуду.

Для управления перемещением луча в горизонтальном направлении служит генератор развертки, напряжение с которого поступает на пластины горизонтального отклонения через усилитель горизонтального отклонения (X). Для управления генератором развертки предназначено устройство запуска развертки. При необходимости генератор развертки можно отключить, и установив переключатель S2 в нижнее положение, подать со входа X через усилитель внешний сигнал на пластины горизонтального отклонения.

Для получения осциллограммы исследуемого сигнала необходимо перемещать световое пятно на экране ЭЛТ в двух направлениях.

Смещение пятна в вертикальном направлении осуществляется сигналом, а в горизонтальном - напряжением развертки.

В Multisim 10.1.1 есть две модели осциллографов: двухканальный и четырёхканальный.

## Двухканальный осциллограф

Для работы с двухканальным осциллографом и переносом его на рабочую область необходимо щелкнуть по кнопке «Осциллограф» на панели «Приборы» (стандартно она находится справа от рабочей области), рис. 3.

Далее необходимо щелкнуть по месту, где следует поместить иконку в рабочей области.

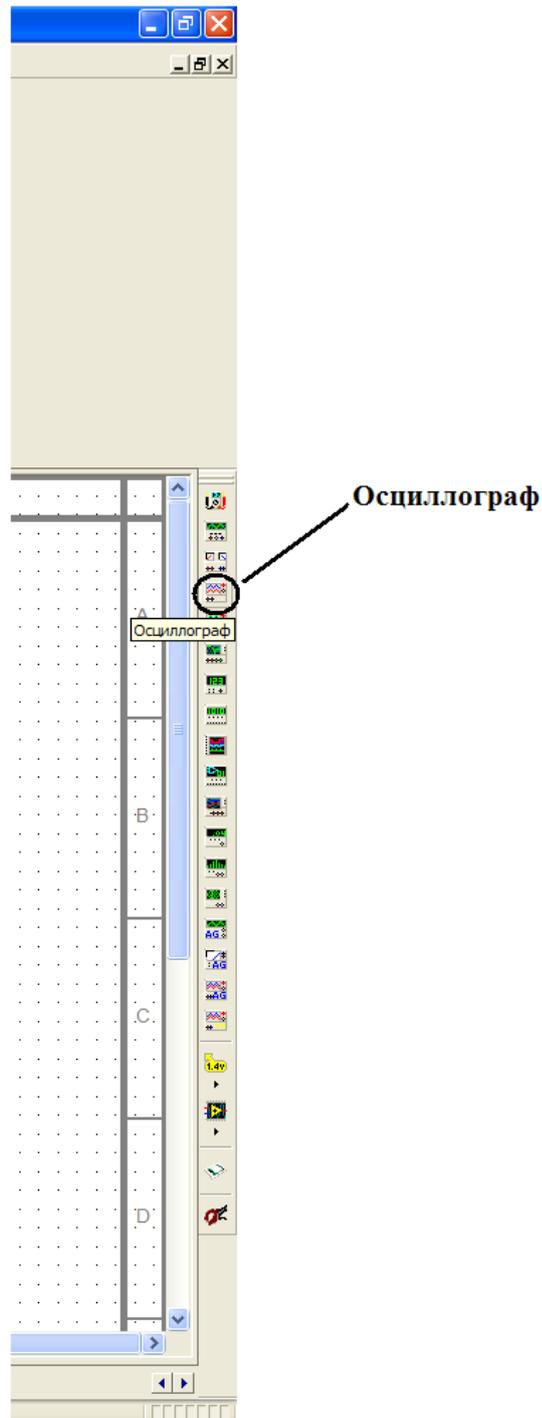


Рис. 3. Панель «Приборы»

Если же ее там нет, то необходимо ее включить (Вид, «Панель инструментов», Приборы), рис. 4.

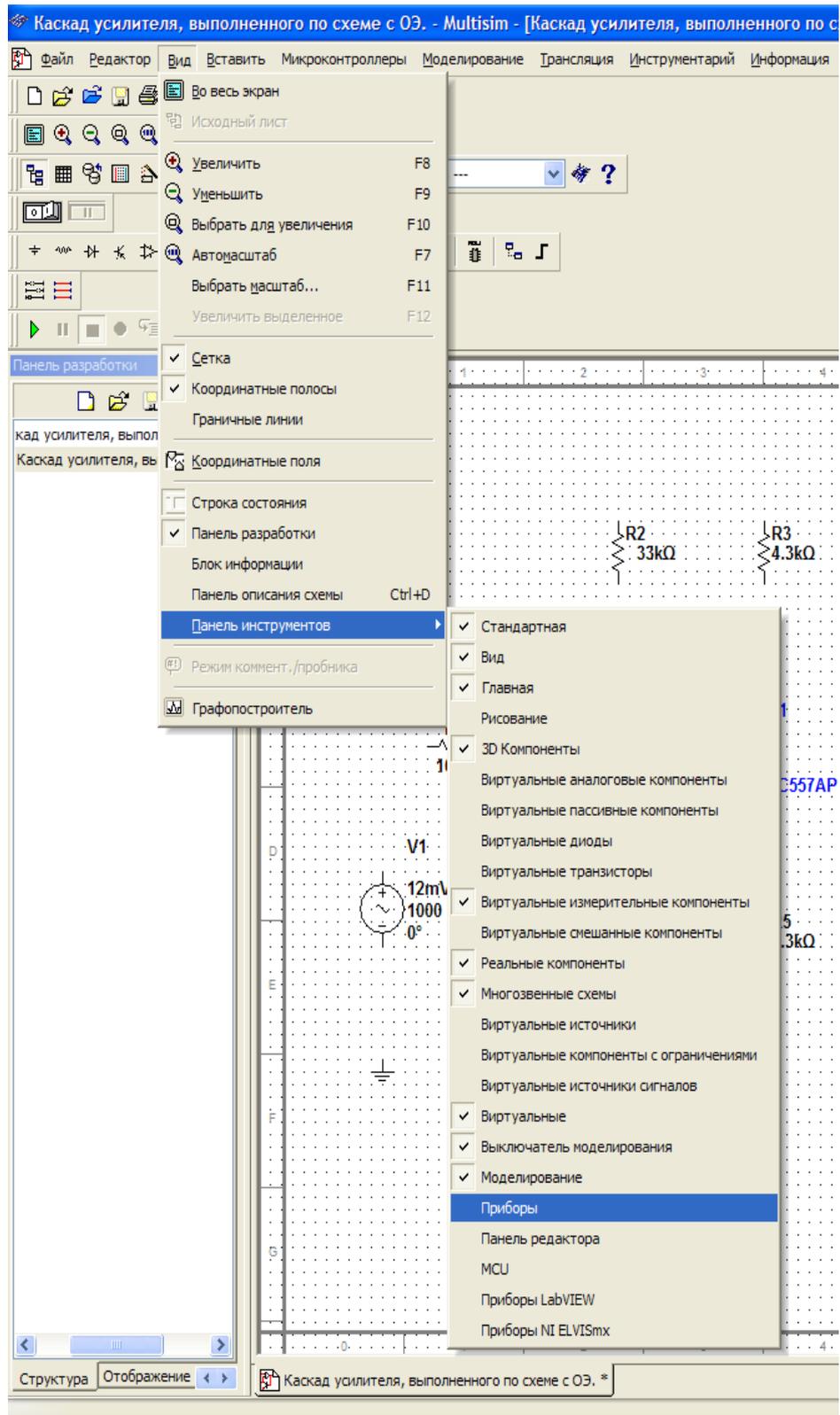


Рис. 4. Включение панели «Приборы»

Итак, выбраны и расположены все элементы схемы на рабочей области, рис. 5.

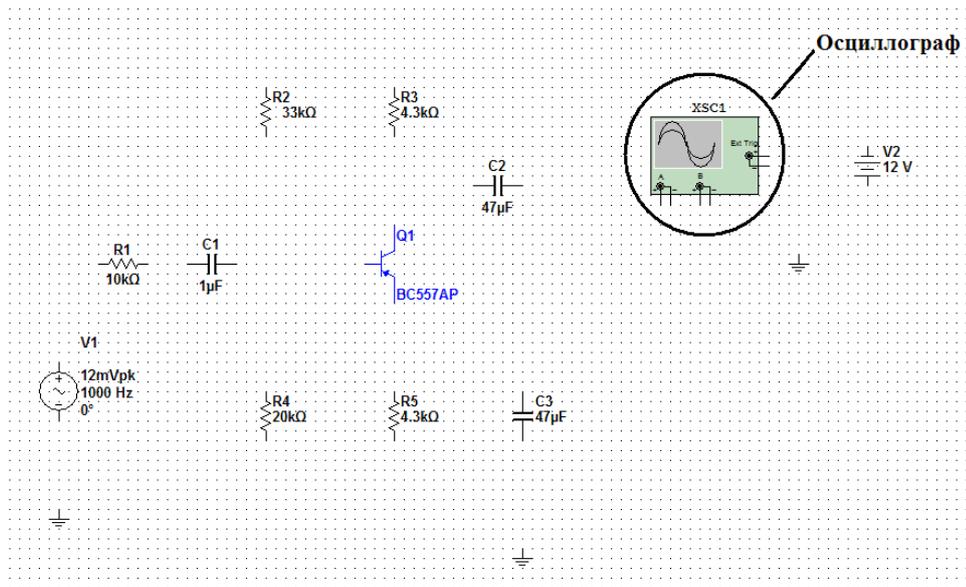


Рис. 5. Осциллограф на рабочей панели

Функционирование осциллографа рассматривается на примере исследований каскада усилителя с ОЭ.

После соединения всех элементов по схеме усилителя с ОЭ подключаем осциллограф, рис. 6.

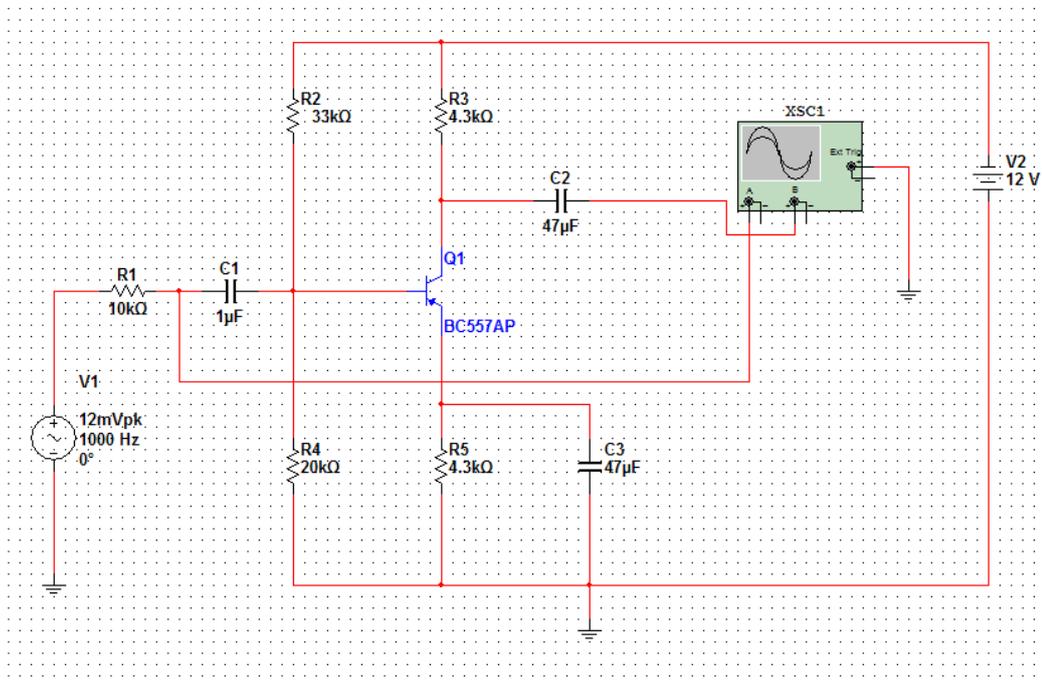


Рис. 6. Соединение элементов схемы

Заметим, что для удобства восприятия и наглядности получаемой осциллограммы целесообразно входную и выходную цепи схемы после подключения к осциллографу окрасить в разные цвета. Для этого необходимо правой кнопкой нажать по проводу, который нужно окрасить и выбрать пункт меню «Сегмент цвета», и выбирать цвет, рис. 7.

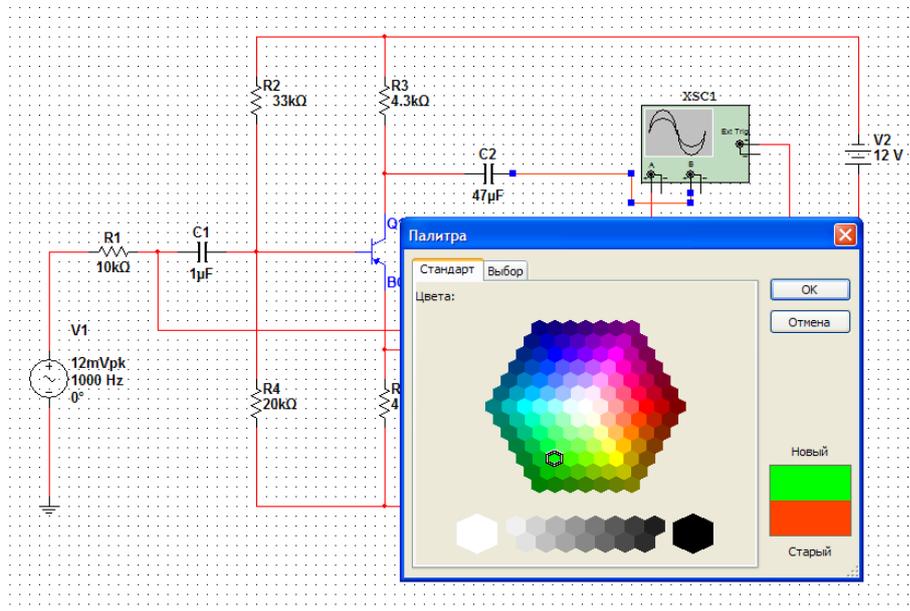


Рис. 7. Выбор цвета провода

В нашем случае мы окрасили один из проводов в зеленый цвет, рис. 8.

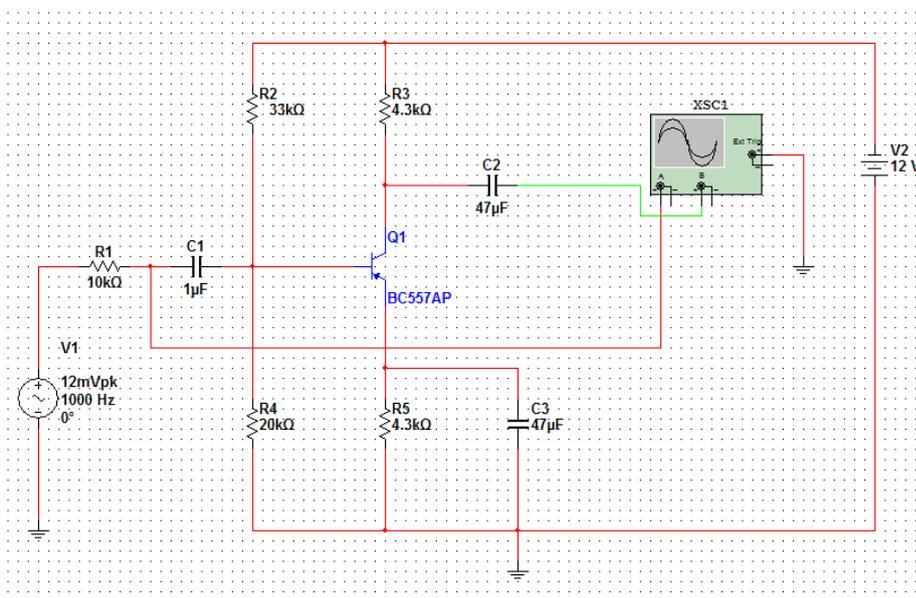


Рис. 8. Входная и выходная цепи, обозначенные разными цветами

Теперь все готово для запуска схемы и ее анализа. Нажимаем на быстрой панели кнопку запуска, которая называется «Выключателем моделирования», рис. 9. Схема начинает работать.

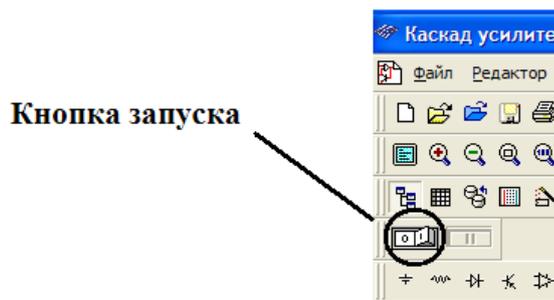


Рис. 9. Выключатель моделирования

Необходимо заметить, что аналогичный алгоритм действий (взятие прибора с панели «Приборы», окрашивание проводов, запуск работы схемы и др.) осуществляется при работе с остальной линейкой контрольно-измерительных приборов, представленной в среде Multisim 10.1.1.

Для получения результатов работы схемы (осциллограмм входного и выходного напряжения усилителя) кликнем два раза левой кнопкой мыши по осциллографу, результат изображен на рис. 10.

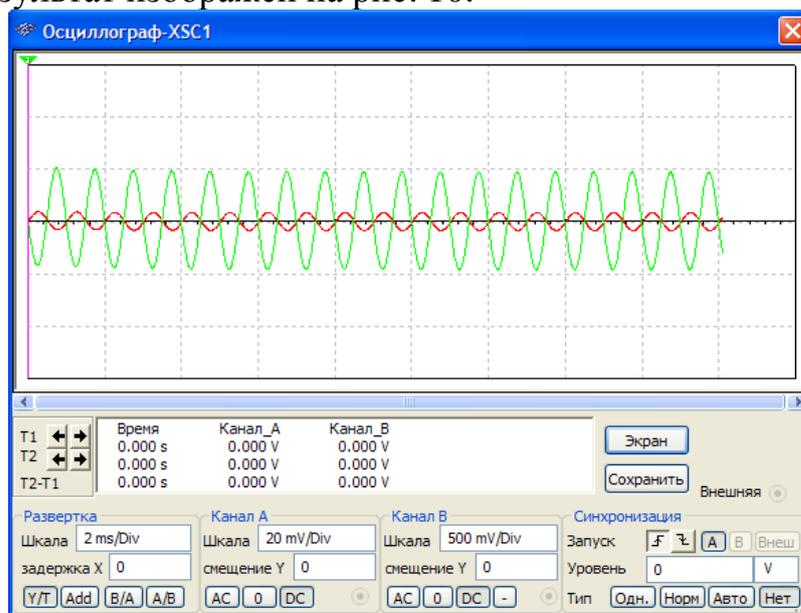


Рис. 10. Осциллограмма напряжений усилителя с ОЭ

Графики напряжений отображены на экране и окрашены разными цветами. Входное и выходное напряжения находятся в противофазе, что соответствует теории. Внизу осциллограммы находится панель, на которой производится синхронизация осциллографа, задаются масштабы работы устройства и представляются абсолютные значения параметров усилителя.

На экране двухканального осциллографа можно наблюдать графики одного или двух сигналов одновременно и поучать сравнения их. Если необходимо измерить усиление сигнала в приведенном выше примере, нужно щелкнуть кнопкой мыши по вертикальным курсорам и переместить их из

положения 1 в положение 2, при которых они должны находиться на максимуме сигналов обоих синусоид, рис. 11.

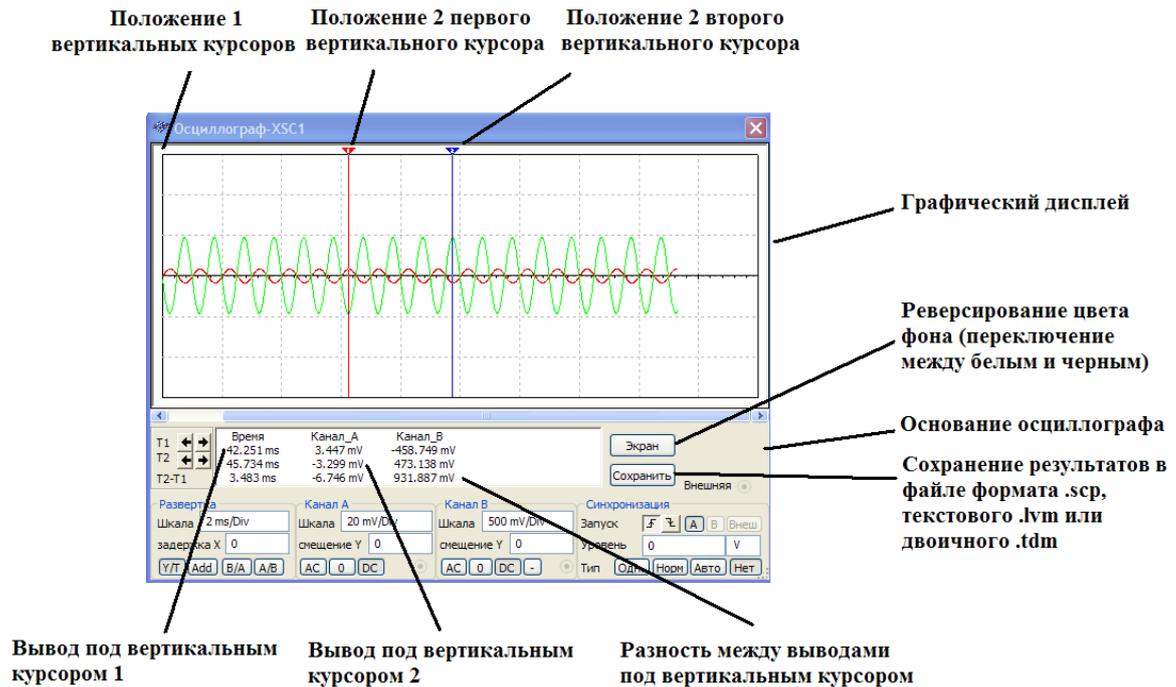


Рис. 11. Перемещение вертикальных курсоров по экрану осциллографа

Из показаний осциллографа следует, что максимальное значение амплитуды входного напряжения составляет 3.447 мВ, а максимальное значение выходного напряжения составляет 473.138 мВ.

Исходя из этих показаний, можно сделать вывод, что сигнал усиливается  $\approx$  в 140 раз.

Настройки осциллографа изображены на рис. 12.



Рис. 12. База установки времени

Установка временной базы управляет масштабом по горизонтали осциллографа - оси X, когда сравниваются величины сигнала и времени (периода) (Y/T).

Чтобы получить на графическом дисплее удобные для анализа результаты моделирования, необходимо настроить временную базу в обратном отношении к установкам частоты функционального генератора или источника переменного напряжения. Следует иметь в виду, что чем выше частота, тем меньше временная база.

Например, если вы хотите увидеть один цикл сигнала 1кГц, временная база должна быть около 1 миллисекунды.

По умолчанию стоит 1 s/Div, что означает – одна клетка экрана соответствует одной секунде. Обычно (в зависимости от схемы), если уменьшить это значение, то на экране можно более отчетливо различить сигналы.

Для примера проведем моделирование схемы однополупериодного выпрямителя, рис. 13.

Для лучшего визуального восприятия следует уменьшить на панели осциллографа величину шага шкалы развертки до 50 us/Div, рис. 14.

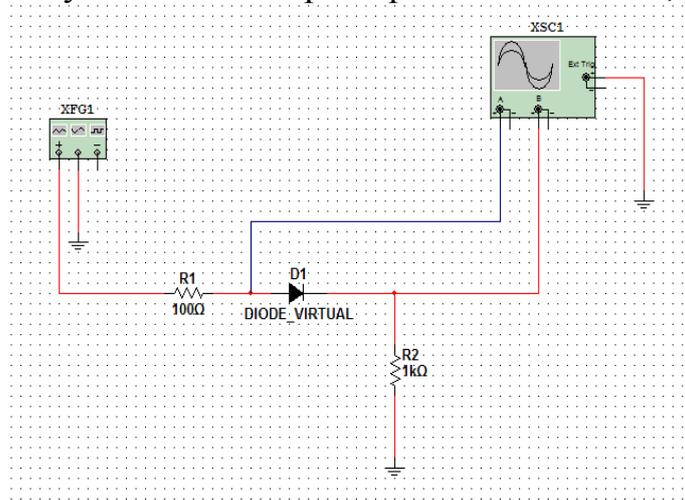


Рис. 13. Схема однополупериодного выпрямителя



Рис. 14. Осциллограмма однополупериодного выпрямителя



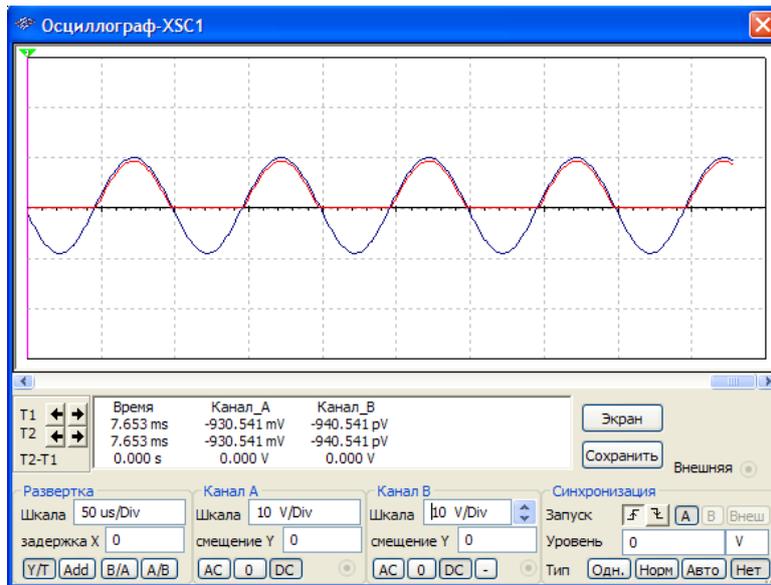


Рис. 16. Входной и выходной сигналы до смещения

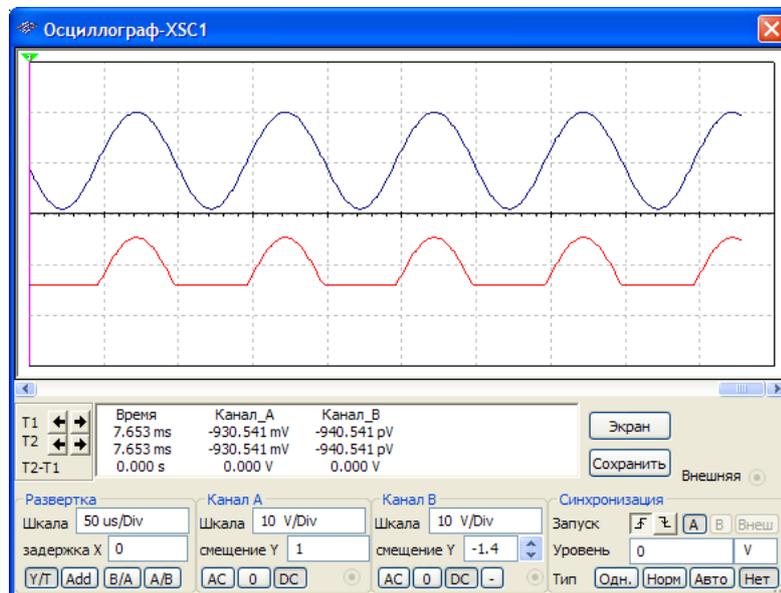


Рис. 17. Входной и выходной сигналы после смещения

При выборе подключения AC отображается только переменная составляющая сигнала.

При подключении DC отображается сумма переменной и постоянной составляющих сигнала.

Выбор 0 отображает прямую линию в точке исходной установки положения Y.

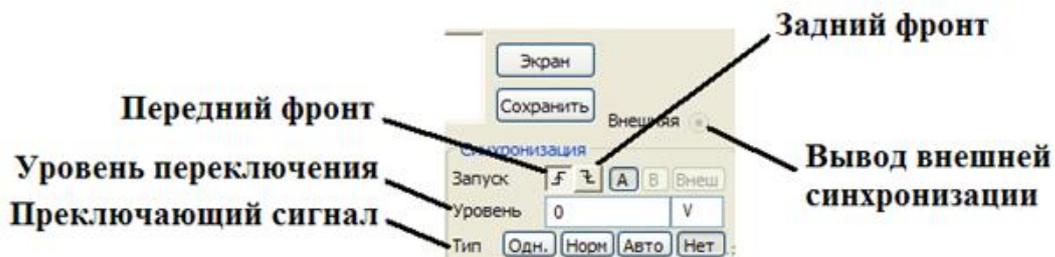


Рис. 18. Фрагмент экранной формы

Эти установки определяют условия, при которых сигнал первоначально отображается на экране осциллографа.

Уровень переключения это точка на оси Y осциллографа, которая должна пересечься с уровнем сигнала перед его отображением на экране.

Переключающий сигнал может быть внутренним, со ссылкой на входной сигнал канала А или В, или внешним, со ссылкой на сигнал на выводе внешней синхронизации.

Если этот сигнал «плоский», или, если сигнал должен быть отображен как можно раньше, выберите «Авто».

Кнопка «Одн.» используется для обеспечения единственного прохода до встречи с точкой переключения. Когда кривая достигнет конца экрана осциллографа, кривая не изменится, пока вновь не будет нажата кнопка «Одн.».

Кнопку «Норм» используется для того, чтобы осциллограф обновлял каждый раз изображение при достижении уровня переключения.

Кнопка «Нет» используется, если не нужно использовать переключение.

### Четырехканальный осциллограф

Четырехканальный осциллограф отличается от двухканального тем, что может принимать, обрабатывать и визуализировать результаты одного, двух, трех или четырех сигналов одновременно. На передней панели четырехканального осциллографа находится ручка переключения каналов А, В, С, D, при помощи которой исследователь выбирает, с каким каналом необходимо ему работать и производить соответственно регулировки масштабов сигнала, устанавливая смещение и т.д.

На рис. 19 и 20 можно видеть условные графические отображения и осциллограммы напряжений двух и четырехканального осциллографов, снятых с функционирующей схемы усилителя.

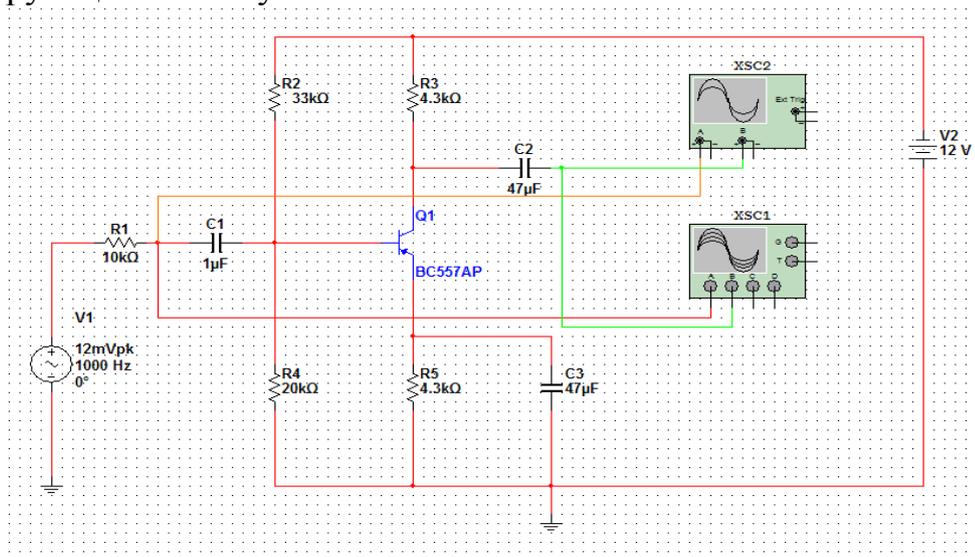


Рис. 19. Снятие показаний с помощью двух осциллографов

На обоих осциллографах установлены: время=2ms, масштаб для входного сигнала 10mV, для выходного 500mV.



Рис. 20. Осциллограммы напряжений на двух осциллографах

### «Реальный» виртуальный осциллограф

Multisim 10.1.1 позволяет проектировать электронные устройства привычным методом, создавая их с помощью условных графических отображений. Кроме того, здесь появилась возможность, с помощью модуля 3D элементов, представлять компоненты, элементы и приборы в «реальном» виде, так как они изготовлены в производстве.

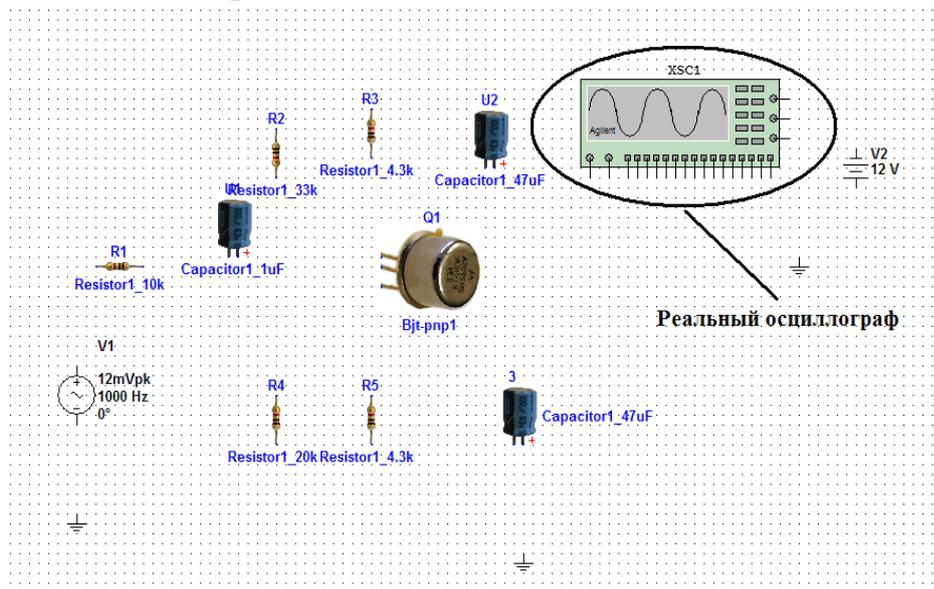


Рис. 21. «Реальные» компоненты и осциллограф на рабочей области

На рис. 22 приведена схема усилителя с ОЭ, собранная на 3D элементах.

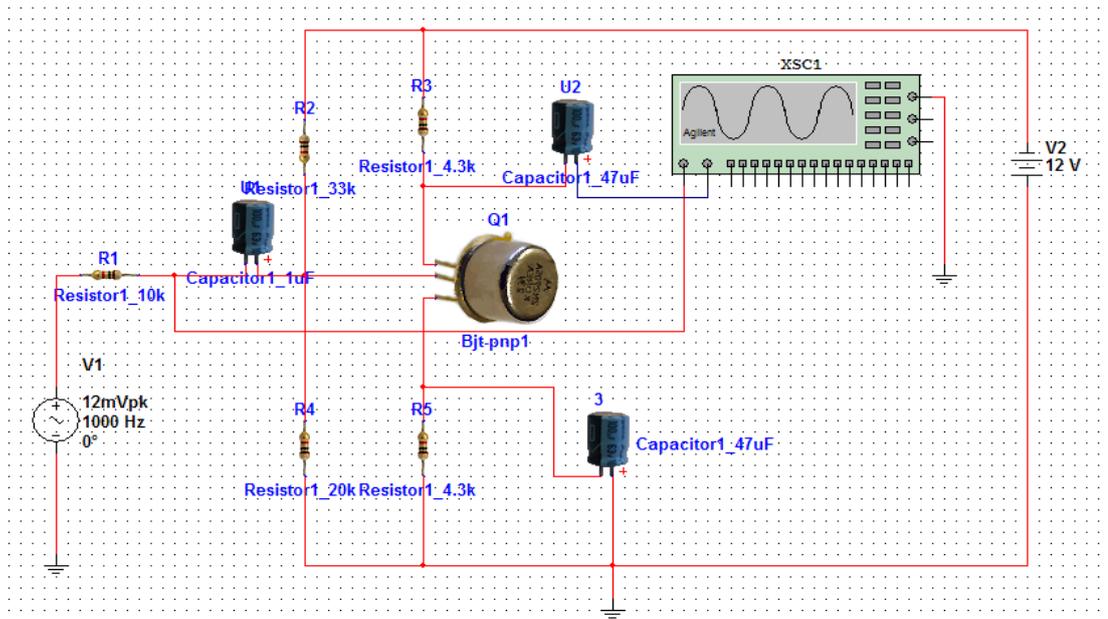


Рис. 22. Схема усилителя с ОЭ на реальных элементах

На рис. 23 приведена передняя панель «реального» осциллографа. Настройка этого осциллографа происходит так же, как и реального осциллографа. Нажатием на кнопку Power он включается, затем ручками регулируется масштаб по амплитуде каждого канала и масштаб по времени.

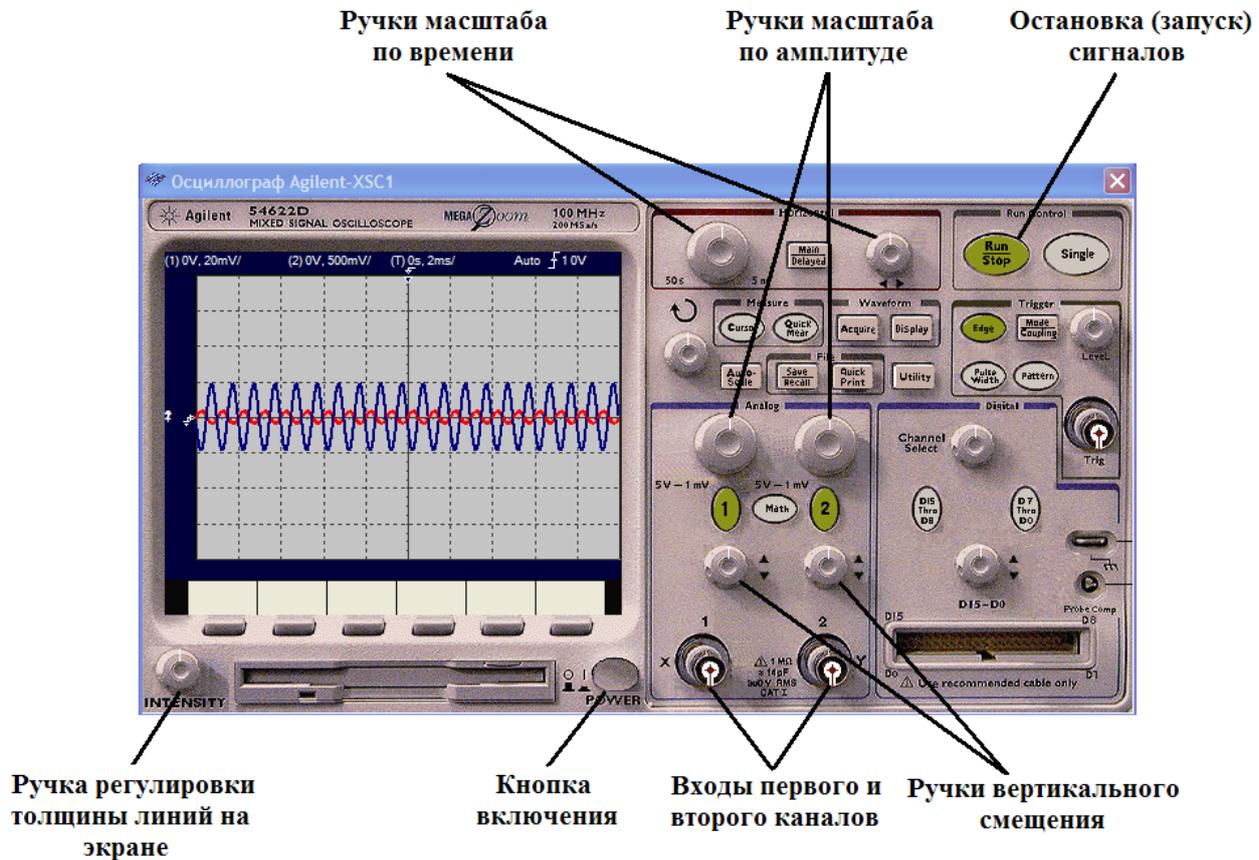


Рис. 23. Передняя панель «реального» осциллографа

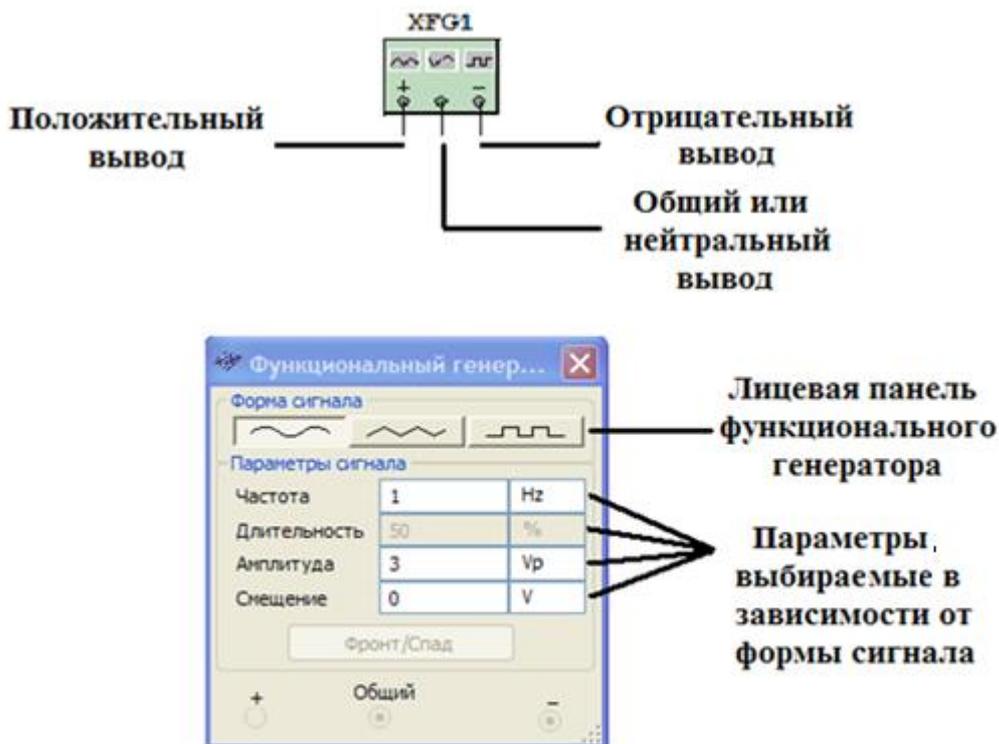
## Функциональный генератор

Функциональный генератор или генератор сигналов — это импульсный источник напряжения, который может генерировать синусоидальные, пилообразные и прямоугольные импульсы.

Можно изменить форму сигнала, его частоту, амплитуду, коэффициент заполнения и постоянный сдвиг. Диапазон генератора достаточен, чтобы воспроизвести сигналы с частотами от несколько герц до аудио и радиочастотных.

У генератора сигналов есть три терминала - источника импульсов: гармонический, пилообразный и прямоугольный.

Общий центральный терминал определяет положение нуля. Генератор сигналов представлен на рис. 24.



- 1) В поле "Частота" задается частота генерируемых колебаний;
- 2) В поле "Длительность" - указывается скважность импульсов;
- 3) Амплитуда - в этом поле задается амплитуда сигнала;
- 4) Смещение – в этом поле задается уровень постоянной составляющей.

Рис. 24. Передняя панель функционального генератора

На рис. 25 представлена схема преобразователя с усилителем мощности (преобразователь с независимым возбуждением).

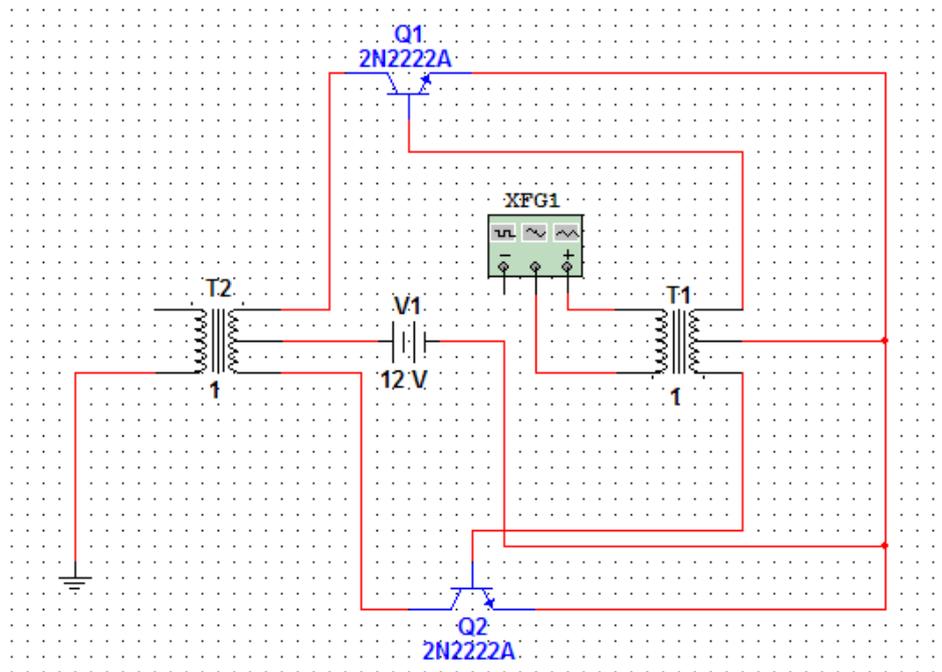


Рис. 25. Транзисторный преобразователь с независимым возбуждением

Преобразователь содержит два транзистора Q1, Q2, входной T1 и выходной T2 трансформаторы, между средними точками обмоток которых включен источник, преобразуемого постоянного напряжения V1, величиной 12 В. В данной схеме функциональный генератор использован в качестве задающего генератора. Он находится в режиме синусоидального сигнала напряжением 3 В.

## Мультиметр

Мультиметр – это универсальный прибор, предназначенный для измерения переменного и постоянного тока и напряжения, сопротивления и затухания между двумя узлами схемы.

Диапазон измерений мультиметра подбирается автоматически. Внутреннее сопротивление прибора и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить.

На рис. 26 представлен общий вид прибора.

На лицевой панели мультиметра расположен дисплей для отображения результатов измерения, клеммы для подключения к схеме и кнопки управления.

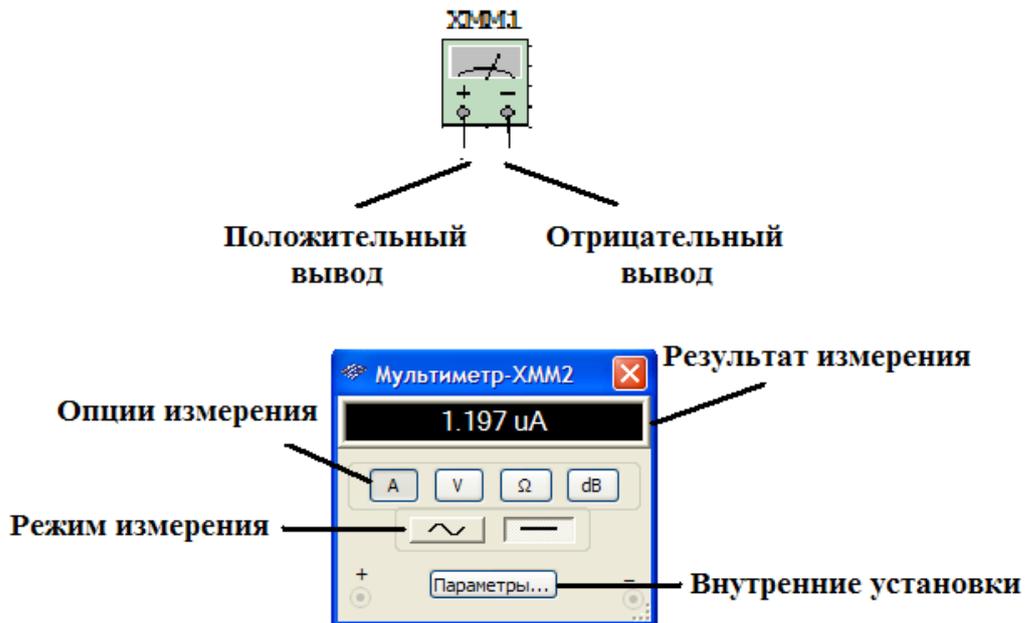


Рис. 26. Мультиметр

Опции измерения – выбор режима измерения тока, напряжения, сопротивления и ослабления (затухания).

Режим измерения – выбор режима измерения переменного или постоянного тока.

Внутренние установки – режим установки параметров мультиметра. После нажатия на эту кнопку открывается диалоговое окно с параметрами, рис. 27.

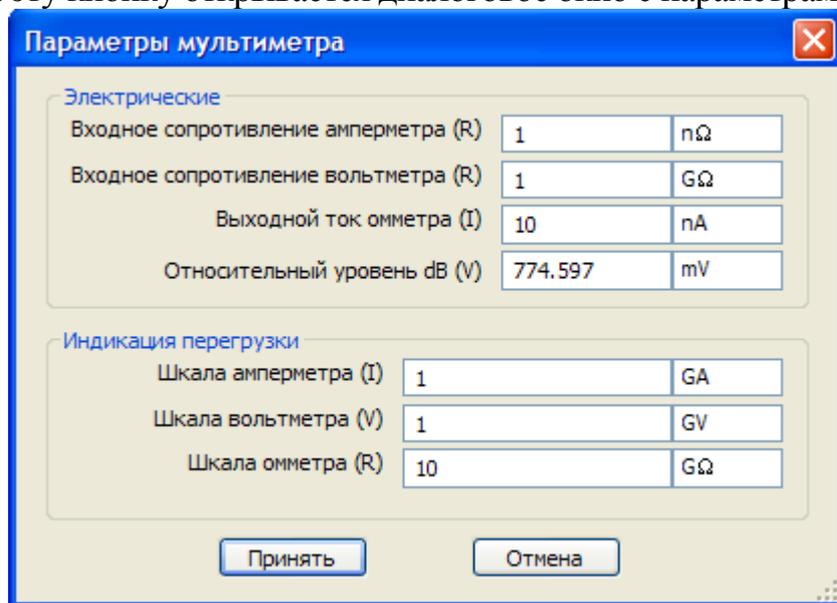


Рис. 27. Режим установки параметров мультиметра

По умолчанию устройство имеет сопротивление 1 нОм, если измеряет ток, и 1 ГОм, если измеряет напряжение. Устройство при измерении

сопротивления пропускает ток 10 нА через подключенный компонент, а затем считывает напряжение на этом компоненте.

Следует понимать, что нельзя путать символы «плюс» и «минус» на мультиметре. Протекание тока в цепи принято от «плюса» и к «минусу», на экране отображается положительное направление, рис. 28.

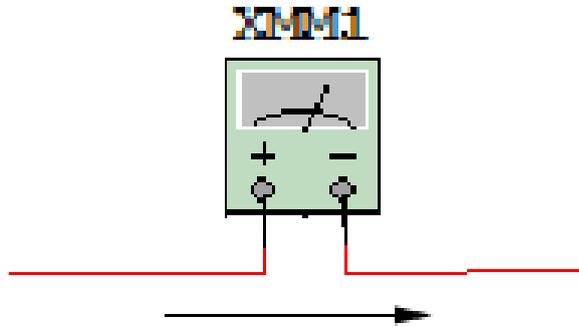


Рис. 28. Направление движения тока

Следует иметь в виду, что, если мультиметр используется как амперметр, то он подключается последовательно. Если же мультиметр необходим в качестве вольтметра, то прибор подключается параллельно, рисунок 29.

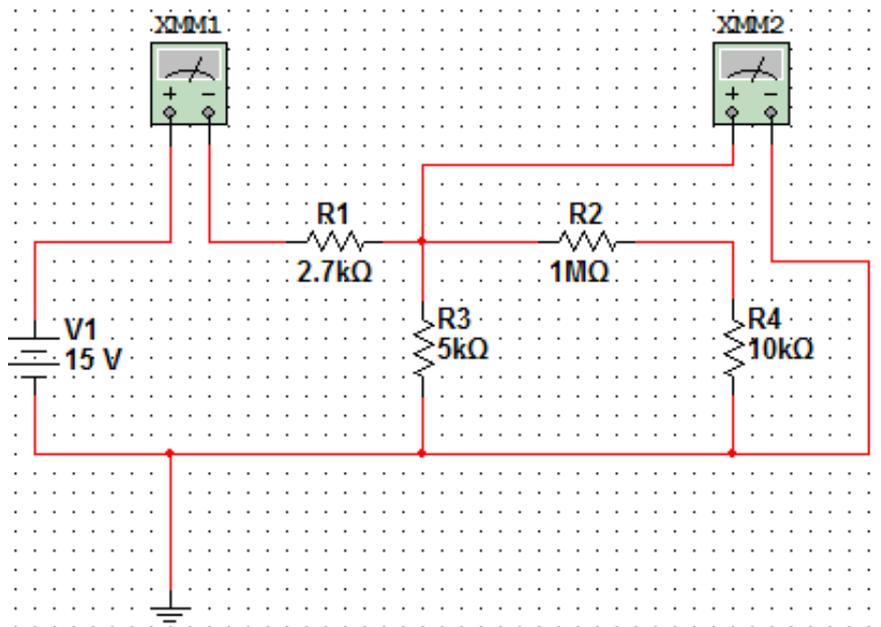


Рис. 29. Схема с двумя мультиметрами

Величины параметров представлены на передних панелях приборов, рисунок 30. Здесь сила тока, проходящая через первый прибор, равна 1,956 мА; напряжение, проходящее через второй прибор, равно 9.723 В.



Рис. 30. Показания мультиметров

## Ваттметр

Ваттметр прибор, который измеряет мощность. Он используется для измерения величины активной мощности, производимой падением напряжения и током, протекающим через выводы в схеме. Результат отображается в ваттах. Ваттметр также измеряет коэффициент мощности. Коэффициент мощности — это косинус фазового угла между напряжением и током.

Чтобы измерить мощность, рассеиваемую на элементе, нужно измерить ток через этот элемент и напряжение на нем.

Прибор ваттметр имеет четыре клеммы и разделён на два сегмента. Первый сегмент включает две клеммы, отвечает за измерение напряжения на элементе.

Второй сегмент по аналогии с первым включает две клеммы и отвечает за измерение тока.

В каждом сегменте имеется положительная и отрицательная клемма. Подключение ваттметра подобно подключению двух независимых индикаторов, рис. 31.

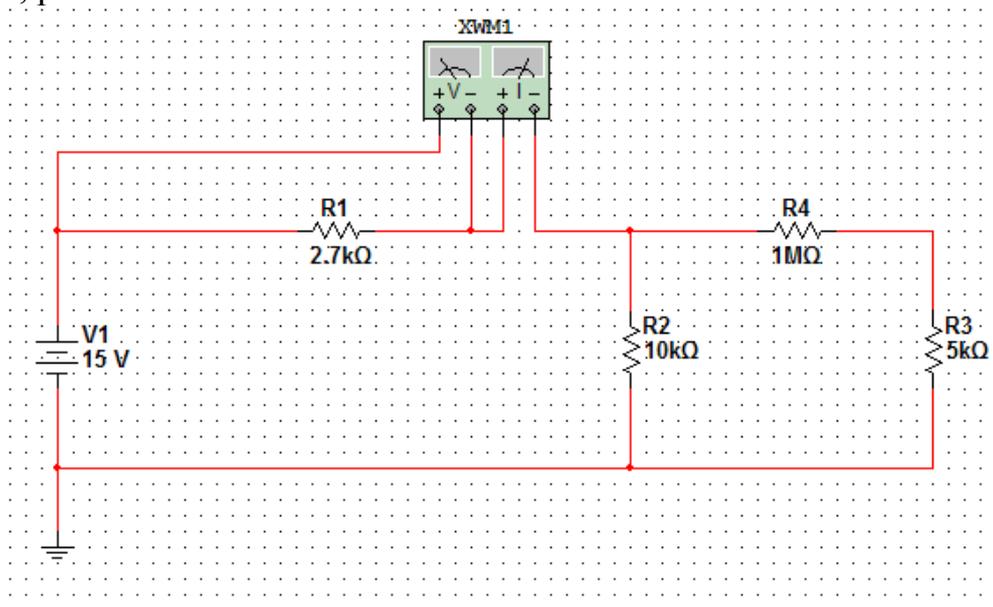


Рис. 31. Простейшая электрическая цепь

В окне ваттметра отображается информация о мощности элемента. Выполнив моделирование схемы, изображенной на рис. 31, получаем результаты моделирования, рис. 32.

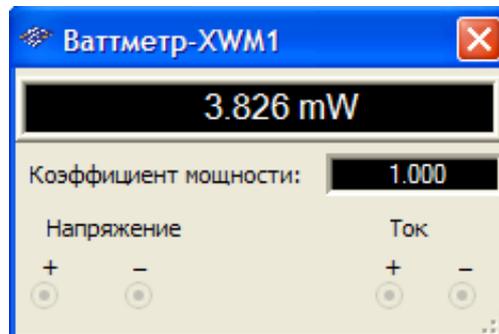


Рис. 32. Результаты измерения мощности

По показаниям ваттметра - мощность составляет порядка 4 мВт, коэффициент мощности равен 1.

### Плоттер Боде

Плоттер Боде или графопостроитель предназначен для исследования и анализа амплитудно-частотных и частотно-фазовых характеристик по логарифмической или линейной шкалам, по осям Y и X. Работа прибора основана на тех же принципах, что и осциллограф, отличие заключается в природе сигналов, подаваемых на Y- и X-каналы отклоняющей системы.

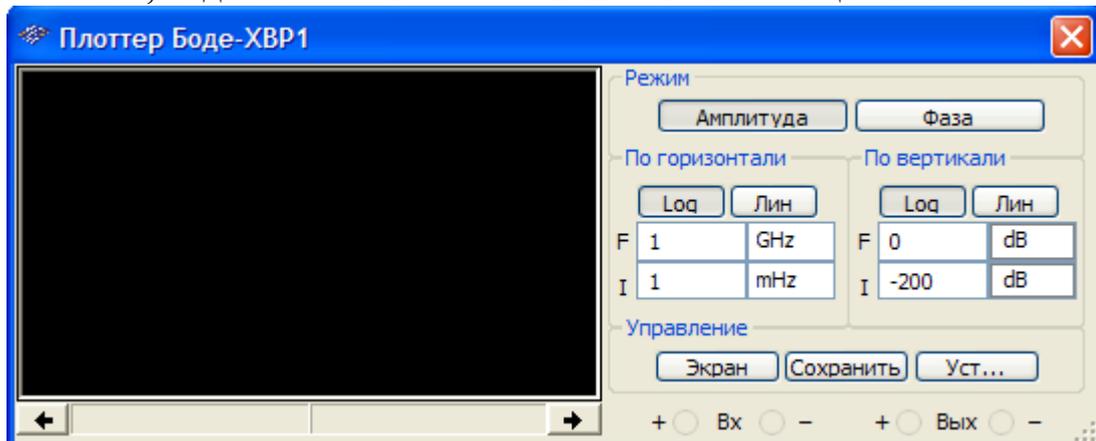


Рис. 33. Плоттер Боде

Для измерений прибор подсоединяется своими выводами- In (Вход) и Out (Выход) к узлам схемы, в которых необходимо измерить входное и выходное напряжения ( $V_{in}$  и  $V_{out}$  соответственно).

Для измерения амплитуды или фазы необходимо установить соответственно на передней панели прибора значения «Амплитуда» или «Фаза» в зависимости от того, что мы хотим получить на экране. Графопостроитель или плоттер Боде создаст на экране амплитудную характеристику (отношение амплитуд сигнала между двумя точками, в вольтах или децибелах) или фазовую характеристику (сдвиг фазы сигнала между двумя точками, в градусах, от частоты, в герцах).

Установка «Log» (логарифмическая шкала) или «Лин» (линейная) позволяет использовать логарифмическую (по основанию 10) или линейную шкалу, как на горизонтальной, так и на вертикальной оси плоттера Боде.

Логарифмическая шкала в основном используется, когда необходимо проводить анализ частотных характеристик схемы в широком диапазоне частот. (График выстраивается графопостроителем только, когда используется логарифмическая шкала.)

Для установки шкалы вертикальной оси необходимо установить начальную и конечную точки для вертикальной оси графопостроителя изменением значений его параметров F (Конечное значение) и I (Начальное).

Когда измеряется амплитуда (усиление), вертикальная ось показывает отношение выходного напряжения к входному напряжению ( $V_{out}/V_{in}$ ). Для логарифмической шкалы единицы измерения - децибелы. Для линейной шкалы – относительные единицы.

Сдвиг фаз, измеряется в градусах.

На горизонтальной оси графопостроителя показания частоты. Можно изменить начальную и конечную точки на этой оси установкой параметров F (конечная частота) и I (начальная частота).

При нажатии кнопки «Уст...» появляется окно для установки разрешающей способности, рисунок 34.

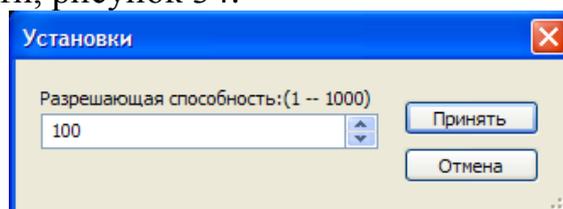


Рис. 34. Установка разрешающей способности плоттера Боде

Чтобы сохранить результаты, необходимо воспользоваться кнопкой «Сохранить».

Для получения графика необходимо включить схему и затем для нахождения точных результатов частоты, амплитуды или фазы в любой точке графика нужно перемещать указатели графопостроителя.

Существует два способа перемещения указателей:

- нажатием мыши на стрелки на панели под экраном графопостроителя;
- перетаскиванием мышью указателя в требуемую точку графика.

Абсолютные значения параметров в точке пересечения указателя и графика располагаются под экраном, внизу прибора.

Работу плоттера Боде предлагается рассмотреть на примере исследования схемы полосового фильтра на базе Т-моста, рис. 35.

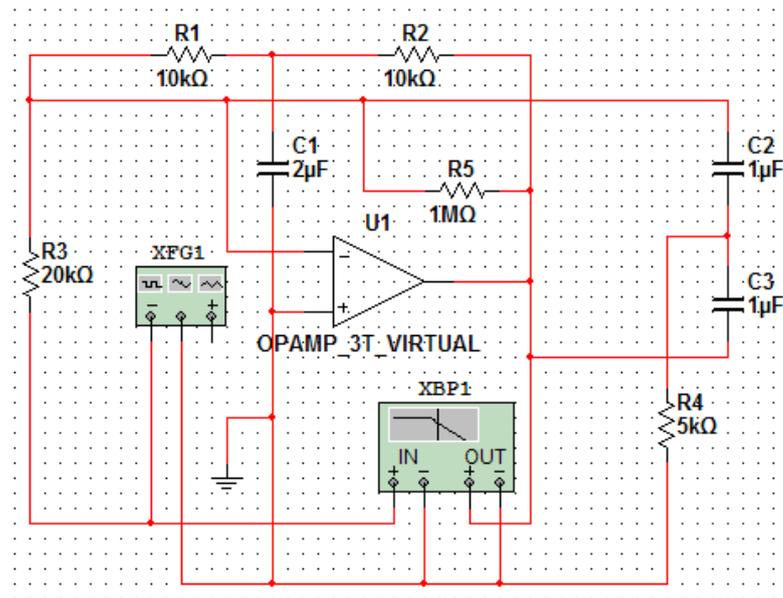


Рис. 35. Схема полосового фильтра на базе Т-моста

На рис. 36 представлена экранная форма с результатами измерений плоттера Боде при исследовании схемы полосового фильтра.

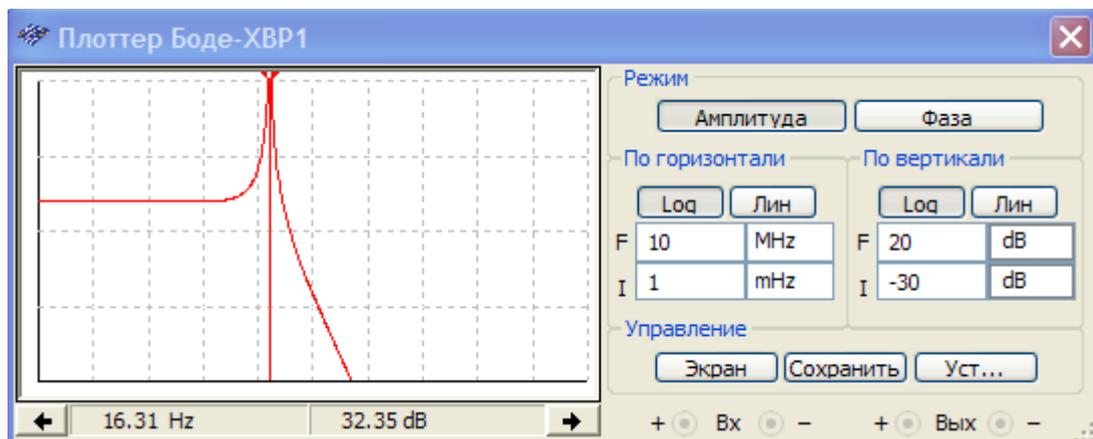


Рис. 36. Показания плоттера Боде при работе со схемой полосового фильтра на базе Т-моста

## Логический анализатор

Логический анализатор – устройство, предназначенное для записи и анализа цифровых последовательностей. Он может быть автономным, а также в

виде приставки к ПК. Характеризуется числом каналов и максимальной скоростью считывания данных.

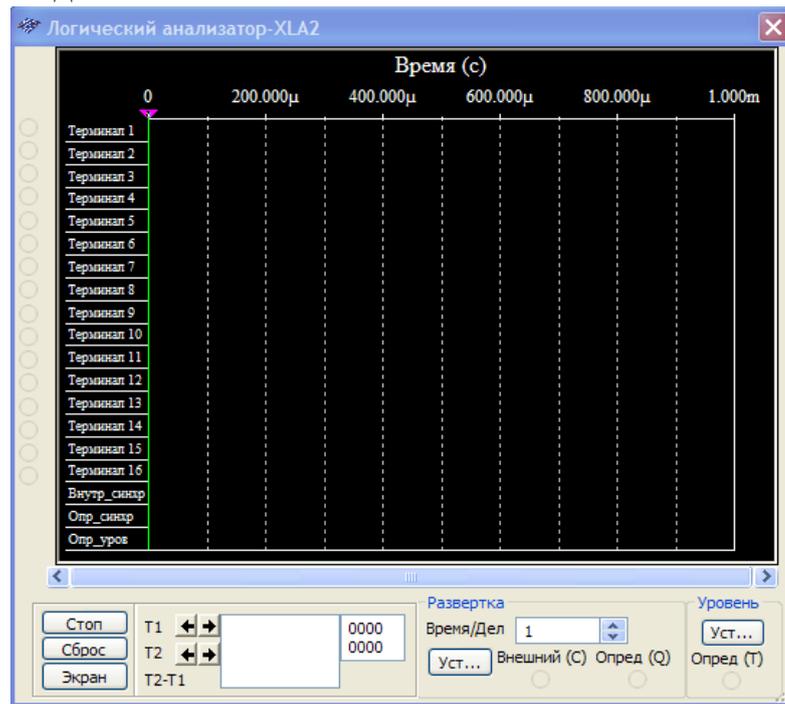


Рис. 37. Логический анализатор

Анализатор, как и осциллограф, снабжен двумя визирными линейками, что позволяет получать точные отсчеты временных интервалов  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_2-T_1$ .

Анализатор также снабжен линейкой прокрутки по горизонтали для просмотра осциллограмм на большом временном интервале.

В блоке «Развертка» изменяется масштаб (Время/Деление) на графическом дисплее анализатора.

При нажатии кнопки «Уст...» открывается окно «Установки синхронизации», рис. 38.

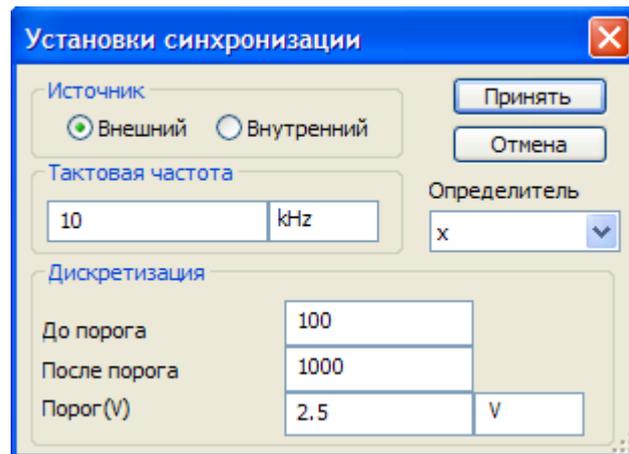


Рис. 38. Установки синхронизации

В нем выбирается внешняя или внутренняя синхронизация, тактовая частота, дискретизация.

В окне «Определитель» устанавливается значение логического сигнала (0,1 или X), при котором производится запуск анализатора.

При нажатии кнопки «Уст...» в блоке «Уровень» открывается окно «Установки запуска», рис. 39.

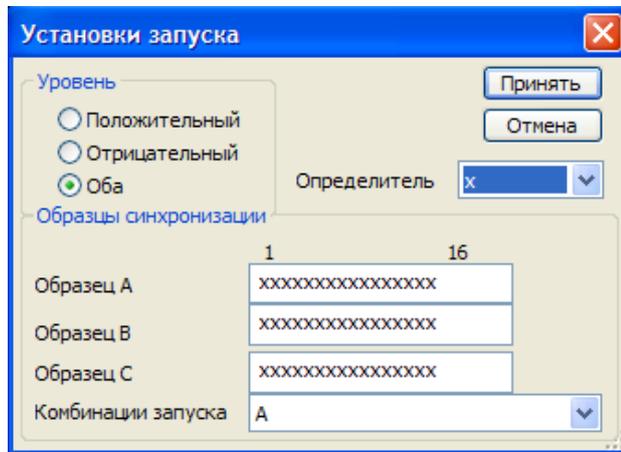


Рис. 39. Установки запуска

В окне рис.39 выбираются уровни сигналов, в каналах А, В и С задаются нужные двоичные 16-разрядные комбинации сигналов.

В строке «Комбинация запуска» устанавливаются комбинации сигналов, которые показаны на рис. 40.

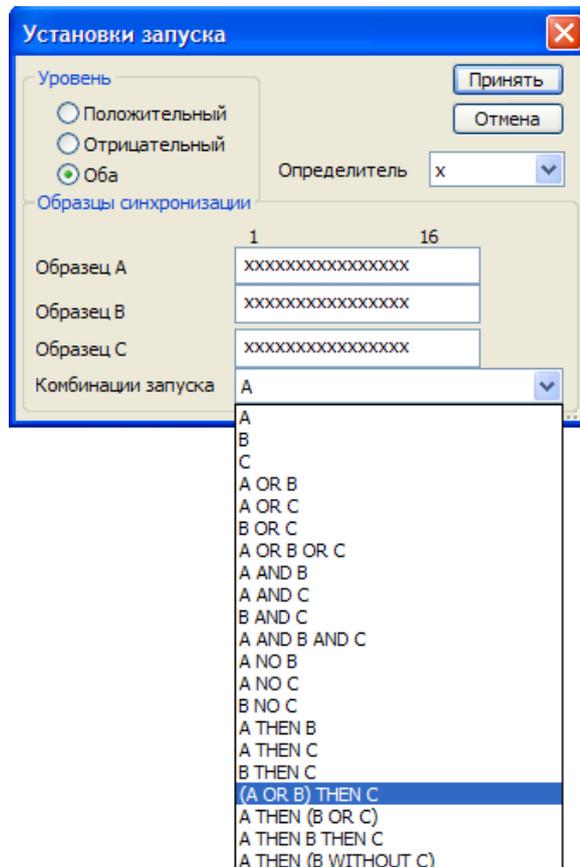


Рис. 40. Установка условий отбора

Перечислим некоторые из них:

A OR B – запуск анализатора от канала A до канала B;

A THEN B – запуск анализатора от канала A, если сигнал в канале B равен 1;

(A OR B) THEN C – запуск анализатора от канала A или B, если сигнал в канале C равен единице.

В окне «Определитель» можно задать логические сигналы 1, 0 или X, при которых производится запуск анализатора.

### Генератор слов

Генератор предназначен для формирования последовательностей цифровых сигналов. Имеет 32 независимых канала генерации цифровых последовательностей.

Генерируемые последовательности импульсов набираются в линейках с номерами, соответствующими номерам выходов генератора. Указанные цифровые последовательности выдаются на все выходы одновременно. Таким образом, генератор позволяет изменять синхронно параметры 32 устройств.

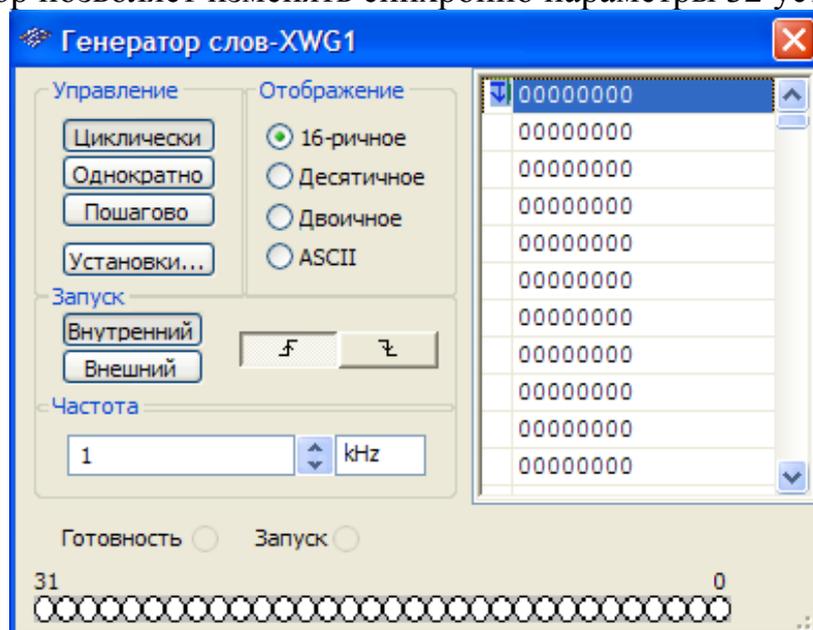


Рис. 41. Генератор слов

Чтобы ввести битовые наборы или слова в генератор слов, необходимо щелкнуть мышкой на нужной вам позиции и ввести нужное значение.

После выбора позиции, ввода можно использовать клавиши редактирования для перемещения по полям.

Следует использовать набор бит, который даст предсказуемый результат, так как записано в таблице истинности.

Генератор имеет три режима формирования последовательностей импульсов: пошаговый режим, построчный режим и циклический режим.

Пошаговый режим работы необходим при отладке цифровых схем и позволяет выполнять заданные последовательности сигналов с остановкой после каждого такта.

Построчный режим работы предназначен для формирования заданных цифровых последовательностей с остановкой после завершения строки последовательности, т.е. после завершения кодовой последовательности. Этот режим используется для однократного выполнения последовательности цифровых сигналов.

Циклический режим работы используется для непрерывного повторения последовательностей цифровых сигналов. Данный режим полезен при наблюдении динамики работы цифровых автоматов. Значение каждого бита отображается напротив каждого вывода генератора слов.

При нажатии кнопки «Установки» появляется возможность очистки последовательностей бит в данном разделе, а так же записи их в файл или чтения их из файла, рис. 42.

Для очистки всех линеек цифровых последовательностей используется кнопка «Очистить буфер». При нажатии на эту кнопку во все такты всех линеек цифровых последовательностей будут записаны нули.

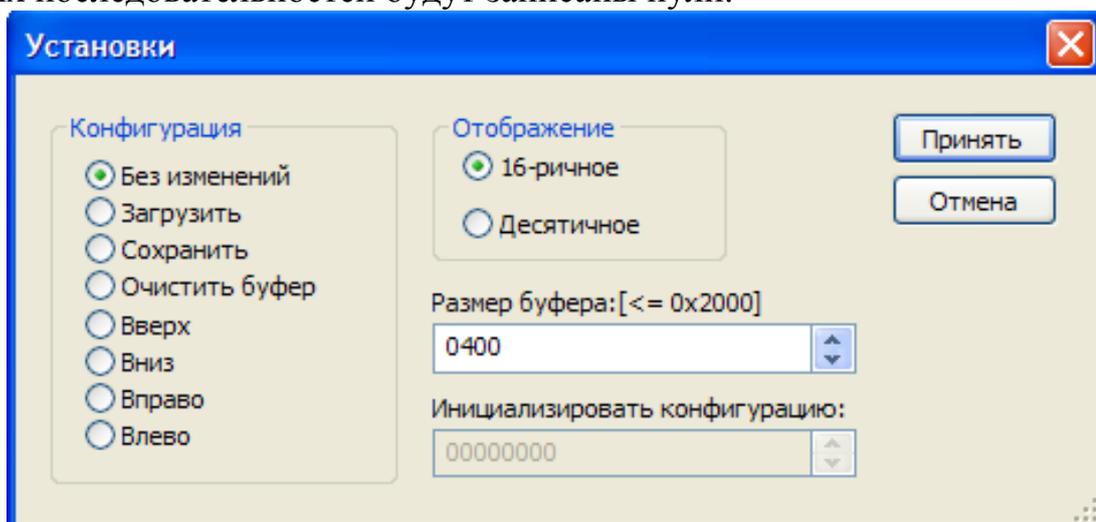


Рис. 42. Установки генератора слов

Генератор позволяет сохранять и восстанавливать сохраненные значения цифровых последовательностей с помощью клавиш «Сохранить» и «Загрузить» на панели генератора. С помощью этих кнопок вы можете записать в файл или считать из файла последовательности цифровых сигналов. При нажатии мышью на кнопку «Сохранить» или на кнопку «Загрузить» на экране появляется окно для выбора файла, в котором будут сохранены цифровые последовательности или из которого они будут загружены. Файлы, содержащие наборы слов, имеют расширение .DP.

В поле «Установки» имеется возможность выбрать размер буфера и его отображение: шестнадцатеричное или десятичное.

Также в поле установки существуют еще четыре кнопки, которые необходимо отметить (для примера приведена работа в шестнадцатеричной системе счисления, при размере буфера равном 0400):

«Вверх» - заполнить буфер кодовыми комбинациями, начиная с 0 в нулевой ячейке и далее до 000003FF с прибавлением 1 в каждой ячейке;

«Вниз» - заполнить буфер экрана кодовыми комбинациями, начиная с 00000400 в нулевой ячейке и далее с уменьшением на 1 в каждой последующей ячейке;

«Вправо» - заполнить каждые восемь ячеек комбинациями 1-2-4-8 со смещением их в следующих четырех ячейках вправо. (Например, 80000000, 40000000, 20000000, 10000000, 08000000, 04000000, ... 00000001).

«Влево» - то же самое, но со смещением влево (00000001, 00000002, 00000004, 00000008, 00000010, 00000020, ... 80000000).

Необходимо заметить, что генератор слов может быть зашелкнут внутренне своим собственным тактовым выходом или внешне – сигналом.

Тактовая частота генератора слов может быть установлена в Гц, кГц или МГц. Каждое слово будет находиться на выходе генератора на протяжении одного периода тактового генератора.

Для примера работы генератора слов и логического анализатора собрана схема, рис. 43.

В ней так же используется компонент DCD\_HEX, который является индикатором с семью сегментами.

Это позволяет подать на четыре входа двоичный код от 0000 до 1111 и на буквенно-цифровом дисплее получить его шестнадцатеричный эквивалент от 0 до F. Система преобразования входных двоичных сигналов встроена в компонент.

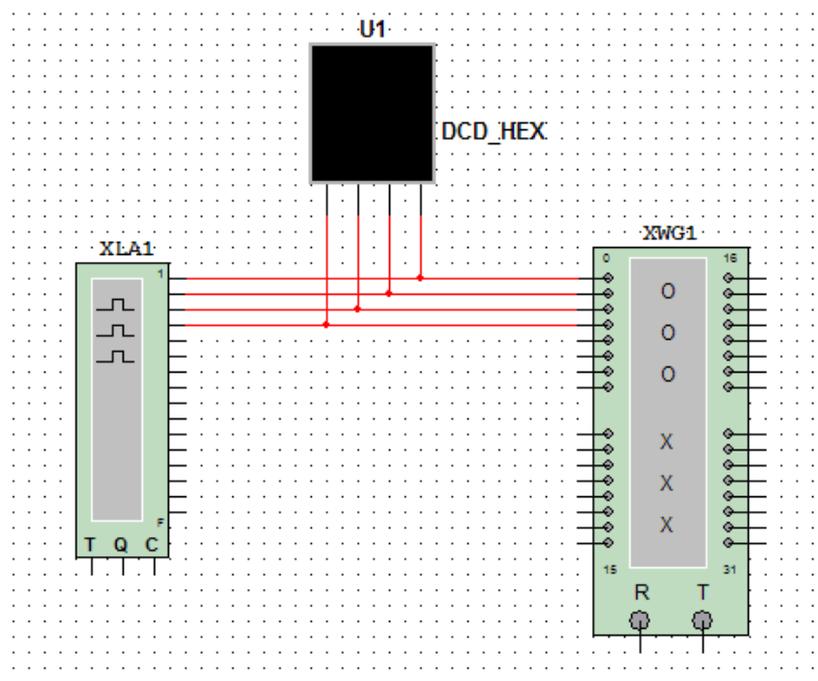


Рис. 43. Схема с логическим анализатором и генератором слов

После того, как собрана схема, необходимо запрограммировать генератор слов, чтобы он выполнял счет от 0 до 15 (F) (рис. 43). Далее настраивается логический анализатор.

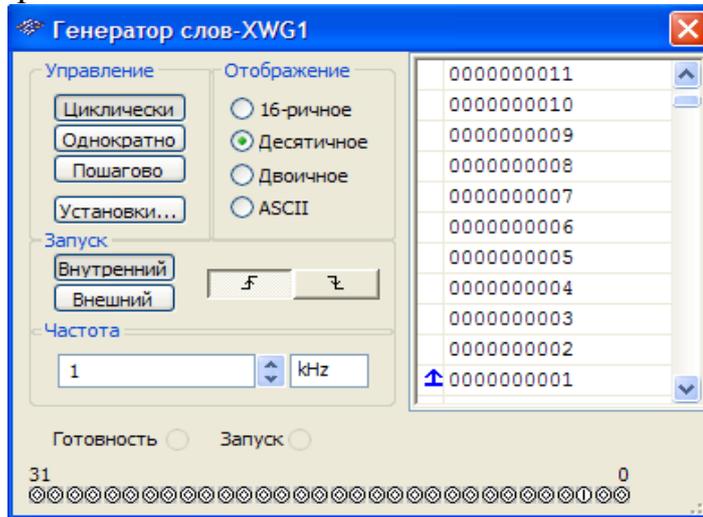


Рис. 44. Программирование генератора слов

Затем необходимо запустить моделирование схемы.

Далее рассмотрим подробней работу логического анализатора. Если остановить моделирование, то можно измерить значения на экране с помощью курсоров, рис. 45. Курсоры показывают координаты по времени, а также временной сдвиг между курсорами. Кроме того, с помощью курсоров можно получить входные значения. Если вход 0 считать самым младшим разрядом, а вход 15 - самым старшим, то состояние входов прибора может быть представлено 16-разрядным двоичным кодом. Соответствующий ему шестнадцатеричный код отображен в окне курсора.

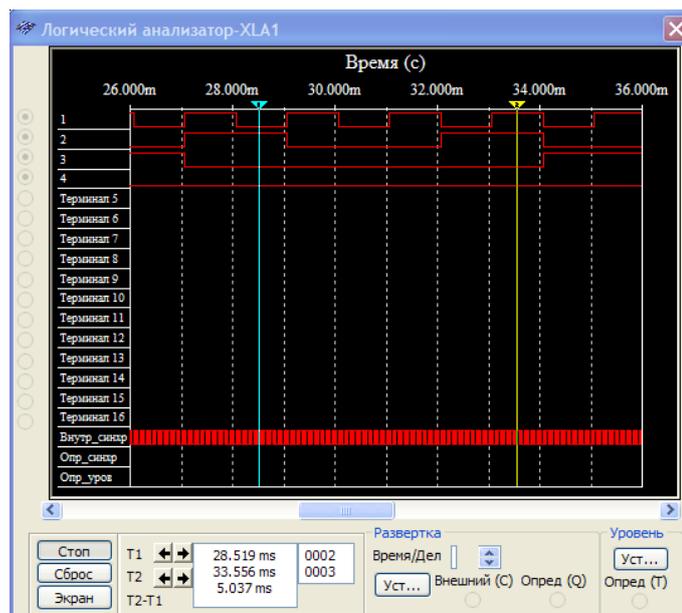


Рис. 45. Работа логического анализатора

Если посмотреть на курсор 1, то можно увидеть, что входы 0, 2 и 3 находятся на низком логическом уровне, а вход 1 - на высоком. Все прочие входы не используются и диаграммы для них не выводятся.

Таким образом, состояние входов в момент, соответствующий положению курсора 1, отображается числом 0010, то есть 2 в шестнадцатеричном коде. Если посмотрим на курсор 2, то заметим, что входы 0 и 1 находятся на высоком логическом уровне, а входы 2 и 3 - на низком.

Таким образом, состояние входов, соответствующее положению курсора 2, отображается двоичным числом 0011, то есть 3 в шестнадцатеричном коде. Эта информация показана в окне курсора.

Схема работы собранной схемы представлена на рис. 46.

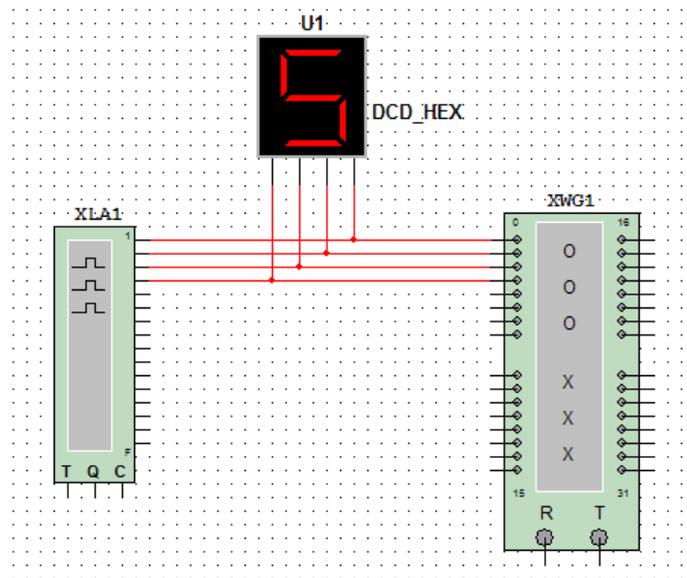


Рис. 46. Схема работы логического анализатора и генератора слов

### Логический преобразователь

Логический преобразователь - мощное устройство, производящее некоторые преобразования представления схем. Он используется для преобразования:

- схемы в таблицу истинности;
- таблицы истинности в логическое выражение;
- таблицы истинности в упрощенное логическое выражение;
- логического выражения в таблицу истинности;
- логического выражения в схему;
- логического выражения в схему на базе элементов И-НЕ.

Клавиши преобразования находятся на правой стороне панели логического преобразователя.

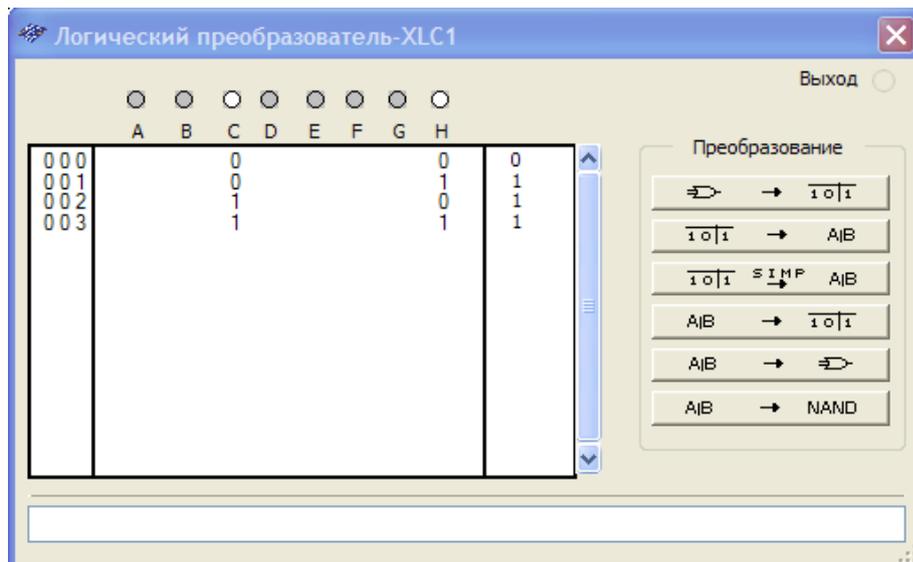


Рис. 47. Логический преобразователь

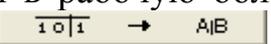
Для ввода таблицы истинности необходимо отметить с помощью мыши входы таблицы истинности, необходимые для ее составления (нужно подвести указатель мыши к необходимому входу и нажать левую кнопку мыши). При этом значения возможных состояний на входах схемы будут заполнены автоматически. Затем необходимо поместить указатель мыши в крайний правый столбец для заполнения выходных значений схемы и нажать левую кнопку мыши. Далее целесообразно изменять значения выходных сигналов схемы, чтобы они соответствовали входным по таблице, причем если таблица истинности содержит неопределенности, то автоматически выставится символ “?”.

Логический преобразователь может создавать таблицу истинности для схем с максимальным числом входов равным восьми и всего с одним выходом.

Необходимо присоединить входы схемы к выводам “А”... “Н” логического преобразователя. Затем присоединить выход схемы в выводу “OUT”.

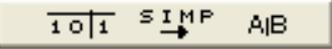
Далее осуществить преобразование нажатием кнопки  на панели логического преобразователя.

Также имеется возможность редактировать или преобразовывать таблицу истинности к другим видам, используя кнопки логического преобразователя.

Для получения логического выражения из таблицы истинности необходимо воспользоваться этим типом преобразования. Сначала нужно ввести таблицу истинности в рабочую область прибора. Далее нажимается с помощью мыши кнопка  на панели таблицы истинности, соответствующая преобразованию таблицы истинности в логическое выражение. В нижней строке панели логического преобразователя будет показано полученное выражение. Если выражение не помещается полностью в отведенном для нее окне, то просмотреть остальную ее часть можно,

передвинув область просмотра выражения с помощью указателя в правом нижнем углу панели логического преобразователя.

Далее имеется возможность упростить полученное логическое выражение или преобразовать его в схему.

Для получения упрощенной формы записи логического выражения необходимо нажать мышью кнопку  на панели логического преобразователя.

Для упрощения логического выражения Multisim использует метод Куайна-Маккласки. Этот метод гарантирует упрощение систем, имеющих большее число входов, чем это может быть просчитано вручную при помощи карт Карно.

Если известно логическое выражение, описывающее требуемый цифровой автомат, то получить таблицу истинности по этому выражению можно с помощью этой опции на панели управления прибора. Для этого преобразования нужно установить курсор с помощью мыши в строку логического выражения и нажать левую клавишу мыши, после чего необходимо набрать имеющееся выражение. Входные значения обозначаются буквами от “a” до “h” (по названиям входов логического преобразователя). Для обозначения инверсии сигнала используется символ “’” после соответствующего входа. Для обозначения инверсии группы входов эта группа записывается в скобках и после закрывающей скобки ставится символ “’”. Логическая операция “&” обозначается последовательной записью входных значений (например, “a & h” запишется как ah). Логическая операция “E” обозначается символом “+”. После того как вы набрали функцию, нажмите с помощью мыши кнопку преобразования .

В поле таблицы истинности появится таблица истинности, построенная по набранному логическому выражению.

Для упрощения логического выражения сначала нужно преобразовать его в таблицу истинности, а затем упростить.

Преобразование логического уравнения в схему используется для получения схемы по имеющемуся логическому выражению. Введите логическое выражение и нажмите мышью клавишу преобразования:



Логические элементы, которые составляют введенное логическое выражение, будут помещены в рабочее пространство. Все эти элементы будут выделены таким образом, что будет возможность перемещать их по рабочему пространству в любое место или скопировать и поместить их в подсхему. Таким образом, можно разрабатывать сложные схемы, например, декодеры.

Создание схемы из элементов И-НЕ используется при необходимости получения схемы, состоящей только из логических элементов И-НЕ. Для использования такой схемы необходимо ввести логическое выражение и нажать клавишу преобразования: .

## Характериограф

Характериограф – прибор для измерения вольтамперных характеристик, (ВАХ) полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов в логарифмическом (лог) или линейном (лин) масштабах.

Для примера работы прибора приведем схему для измерения ВАХ диода, рис. 48.

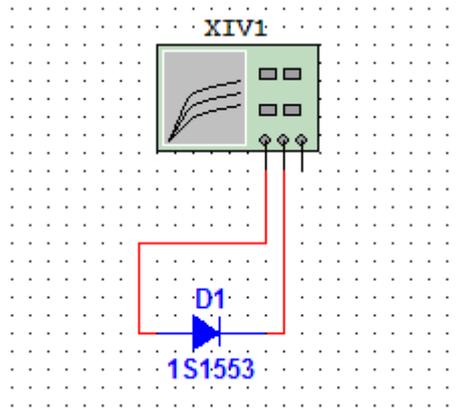


Рис. 48. Схема измерения ВАХ диода

Тип прибора выбирается в строке-меню «Выбор компонента». Основные настройки прибора производятся в окне, вызываемом кнопкой «Моделирование», и сводятся к выбору номинальных значений отрицательного, положительного напряжения и шага их приращения, рис. 49.

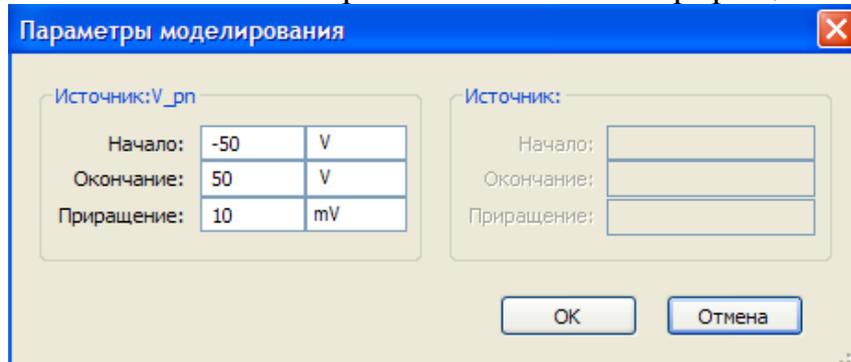


Рис. 49. Выбор параметров моделирования характериографа

После установки этих параметров и начала моделирования в окошках разделов «Шкала тока(A)» и «Шкала напряжения(V)» автоматически устанавливаются максимальное В и минимальное Н значения токов и напряжений при формировании ВАХ. Инвертирование цвета фона производится с помощью кнопки «Экран». Ток и напряжение в заданной точке ВАХ определяется с помощью визирной линейки, перемещаемой курсором мыши или стрелками под дисплеем прибора.

На рис. 50 представлены показания характериографа при измерении ВАХ диода.

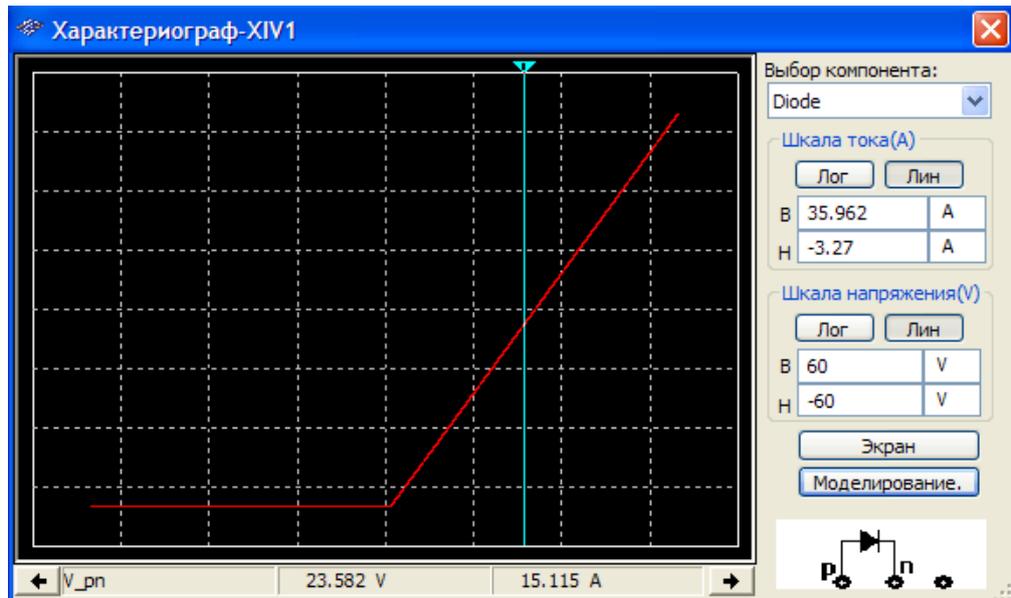


Рис. 50. Показания характериографа при измерении ВАХ диода

### Анализатор спектра

Анализатор спектра - прибор для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электрических (электромагнитных) колебаний в полосе частот.

На рис. 51 показан пример применения прибора для анализа схемы перемножителя двух сигналов.

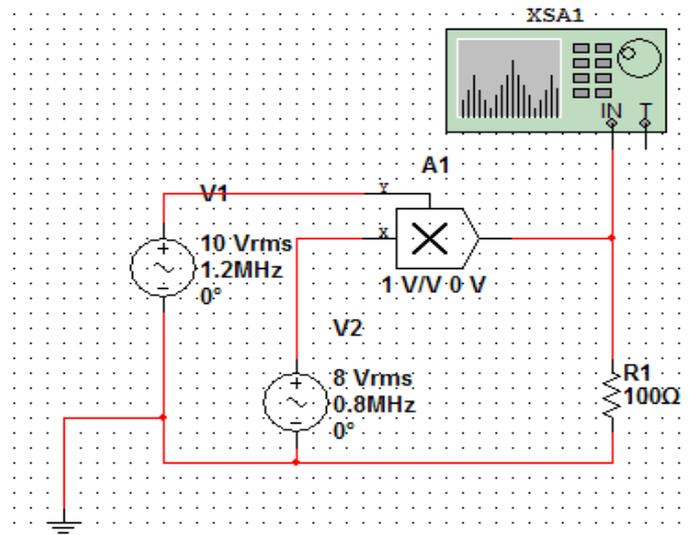


Рис. 51. Схема перемножителя двух сигналов

Настройка прибора сводится к выбору предела по амплитуде (в меню «Шкала») и частотного диапазона.

В режиме «Установить» частотный диапазон выбирается установкой вручную начальной («Начало») частоты - минимальное значение 1 Гц; и конечной («Граница») - максимальное значение 4 ГГц. Если в этом режиме установить частоту в поле «Полоса» и «Центр», то после нажатия кнопки «Ввод» автоматически устанавливаются значения начальной и конечной частот.

В режиме «Узкополосный» будет анализироваться только частота, установленная в поле «Центр».

В режиме «Весь диапазон» будет анализироваться весь допустимый для прибора диапазон частот.

Уровень dBm определяет уровень мощности, рассеиваемой на резисторе сопротивлением 600 Ом при напряжении 0,775 В. При использовании единиц dB и dBm в поле «Ref» можно установить контрольный уровень дБ. Отсчет измеряемых величин производится с помощью визирной линейки, перемещаемой курсором мыши или кнопками под дисплеем анализатора.

На рис. 52 изображены показания прибора при анализе схемы перемножителя двух сигналов.

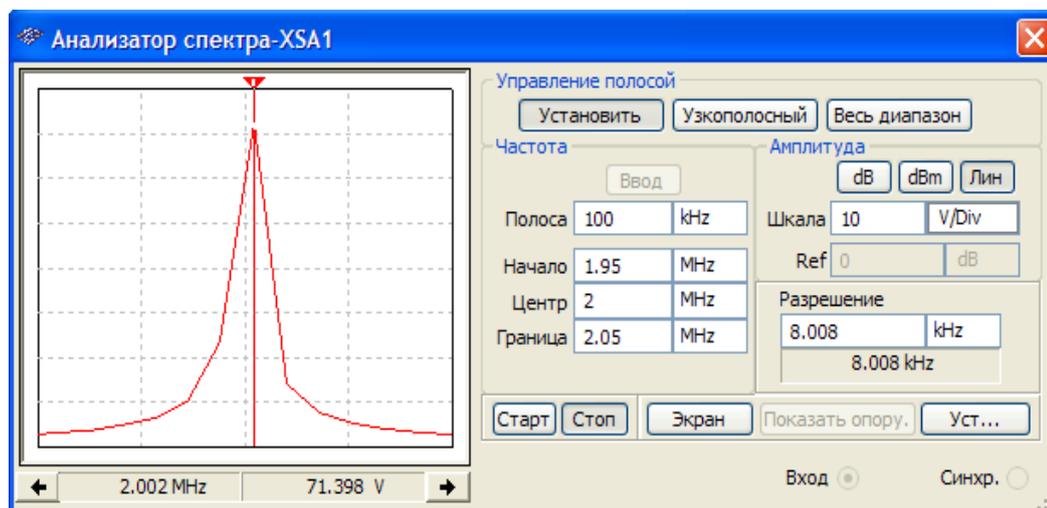


Рис. 52. Показания анализатора спектра при анализе схемы

## Панорамный анализатор

Панорамный анализатор – прибор для анализа электрических цепей в обобщенном виде – в виде четырехполюсников, имеющих два входа и два выхода (четыре полюса). К четырехполюсникам могут быть отнесены усилители (активные четырехполюсники), трансформаторы, длинные линии, фильтры и т.п.

Для иллюстрации применения панорамного анализатора воспользуемся схемой транзисторного каскада, рис. 53.

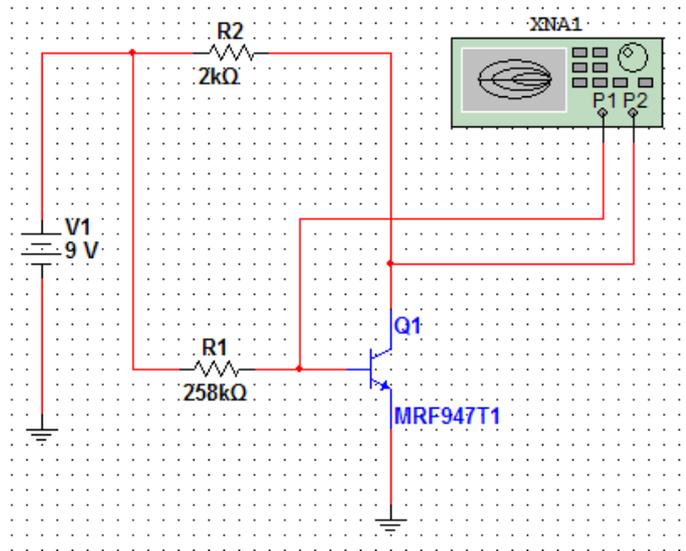


Рис. 53. Схема транзисторного каскада с панорамным анализатором

После начала моделирования панорамный анализатор за достаточно короткое время производит два АС-анализа: со стороны входа и со стороны выхода при соответствующей коммутации входа и выхода по переменному току. Результаты анализа представляются на экране анализатора в виде графиков зависимостей параметров  $S_{11}$  и  $S_{22}$  от частоты при нагрузке со стороны входа и выхода  $Z_0 = 50000 \text{ Ом}$  (рис. 54).

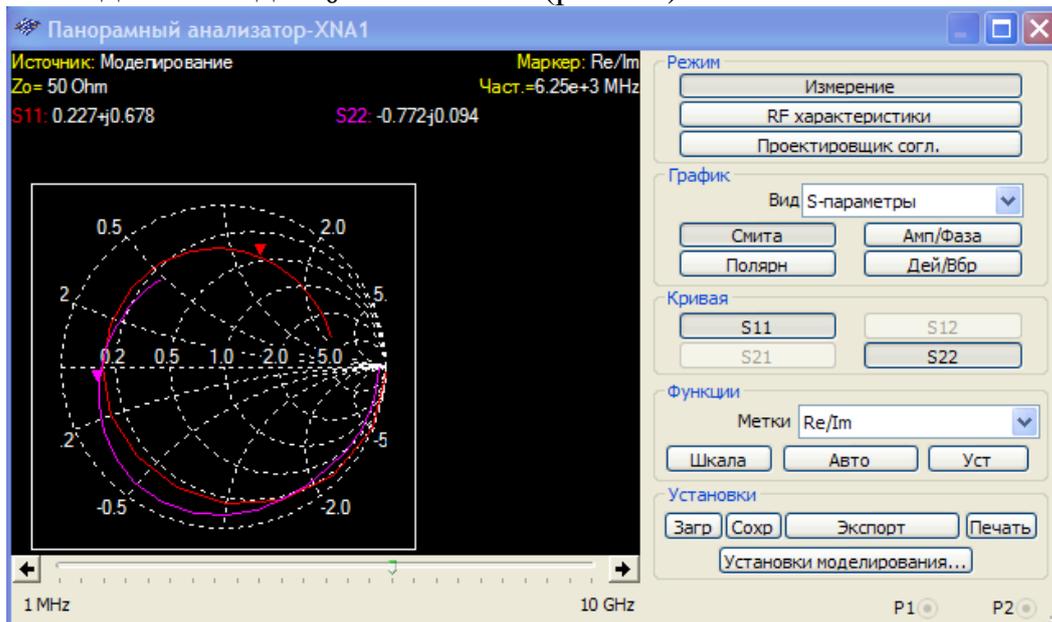


Рис. 54. Результат работы панорамного анализатора

Для получения численных значений параметров  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  (в комплексной форме) в выбранных точках используются маркеры в виде треугольников, перемещаемых по графику с помощью кнопок прокрутки внизу экрана анализатора.

Следует заметить, что по умолчанию экран анализатора имеет черный фон.

Для установки требуемого цветового оформления выводимой на экран информации с помощью кнопки «Уст» в блоке «Функции», вызывается окно с

тримя закладками, в котором предусмотрены настройки по цвету, по ширине линий и др., рис. 55.

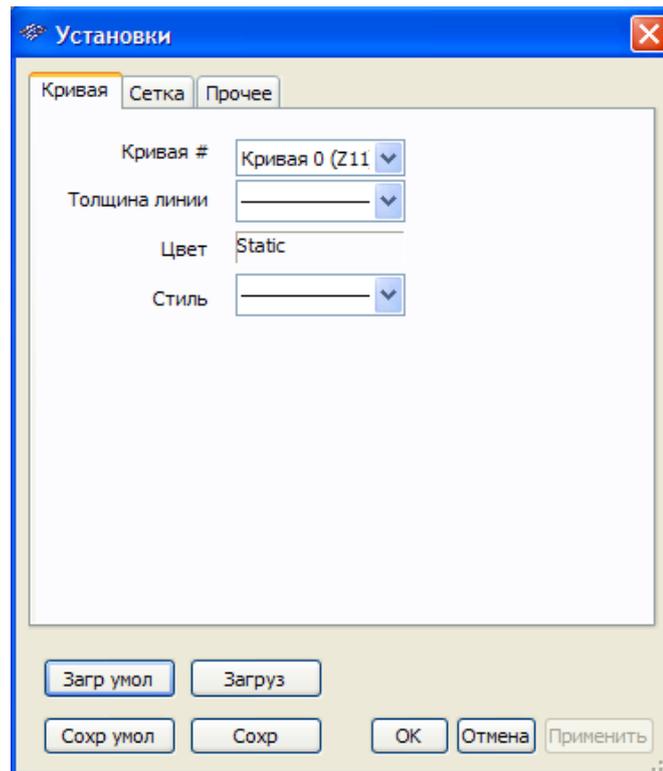


Рис. 55. Установки по цвету, ширине линий и др. параметров

Рассмотрим назначение других элементов панели анализатора:

«Режим» – блок выбора режимов измерения  $S$ -... $Z$ -параметров («Измерение») и высокочастотных параметров («RF-характеристики»), выбор структурной схемы четырехполюсника и его параметров для моделирования («Проектировщик согласен»), включая частотный диапазон, внутреннее сопротивление источника сигнала и сопротивление нагрузки (по умолчанию 50 Ом) и др., рис. 56.

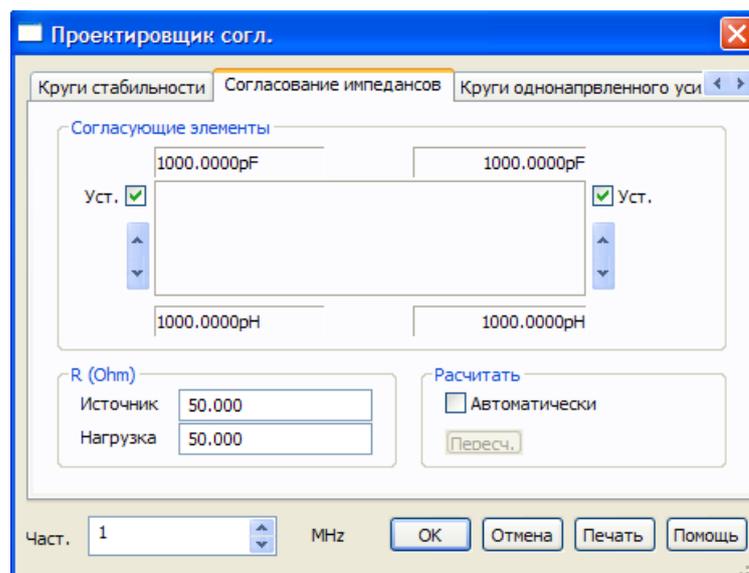


Рис. 56. Проектировщик согласен

«График» – блок индикации типа контролируемых параметров:

- типа контролируемого параметра в поле «Вид»: S-, H-, Y-, Z-параметры и запас устойчивости (фактор устойчивости устройства).

- формата вывода данных: в виде диаграммы Смита (используется только при измерении S-параметров), в полярных координатах, в форматах Амплитуда/Фаза и Дей/Вбр.

«Кривая» – блок индикации типа контролируемых параметров.

«Установки» – загрузка файла с исходными данными для анализа («Загр»); запись («Сохранить») данных моделирования схемы в файлы с расширением .sp и с расширением .txt (кнопка «Экспорт»); вывод на печать («Печать»).

В режиме измерения RF-характеристик в блоке «График» могут быть заданы параметры: «Усиление по мощности» - коэффициент усиления мощности, «Усиление» - коэффициент усиления напряжения, «Полное сопротивление» - входное и выходное сопротивление, рисунок 57.

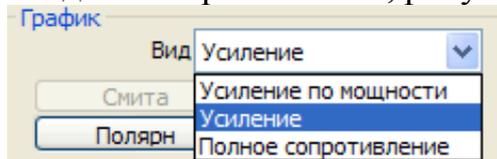


Рис. 57. Блок «График» в режиме измерения RF-характеристик

### Измерение модуля и фазы с помощью функции «Режим АС»

Среда Multisim 10.1.1 позволяет пользователю проводить разные виды анализа, такие как анализ Фурье, статистический анализ Монте-Карло, анализ коэффициента шума, анализ искажений и др.

Для примера поработаем с функцией «Анализ АС». Используя эту функцию, можно рассчитать не только модуль, но и фазу. Соберём схему, изображённую на рис. 58.

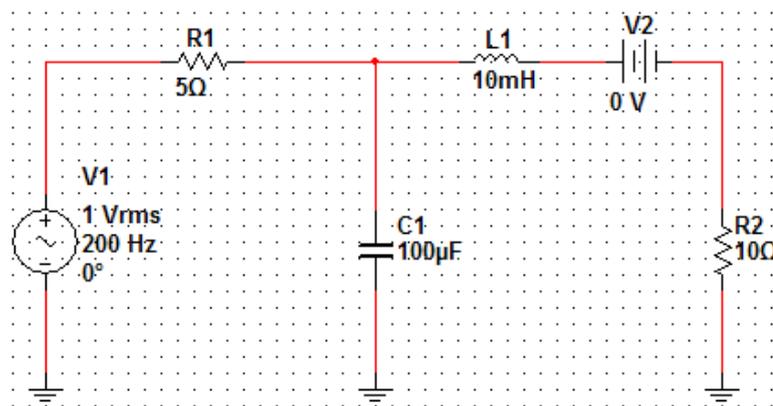


Рис. 58. Схема для работы с «Анализом АС»

Чтобы воспользоваться функцией «Анализ АС» нужно указать параметры источника V1, которые будут изменяться.

Данные источника V1, которые показаны на экране, используются только при работе с инструментами виртуальной лаборатории.

При работе с функцией «Анализ АС» необходимо применять другую группу данных. Нужно дважды щелкнуть по иконке источника V1 и задать модуль напряжения источника равным 1В, а фазу задать равной 0, рис. 59.

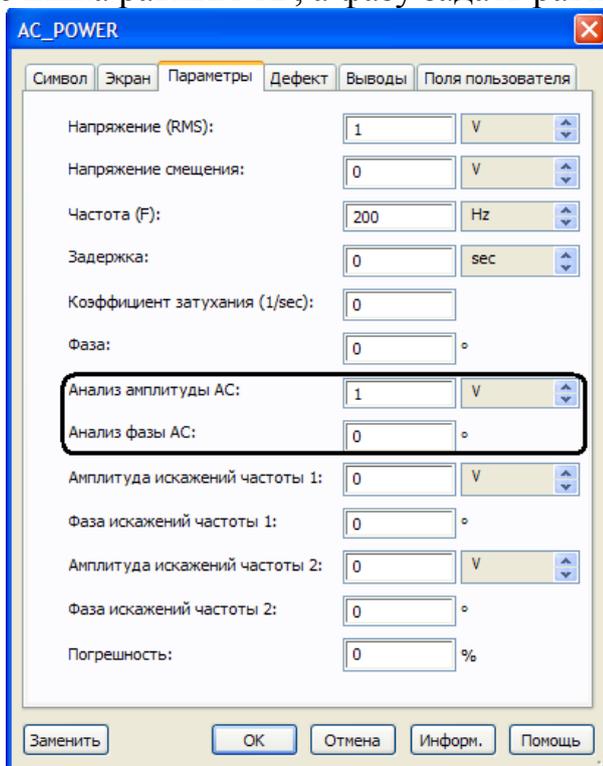


Рис. 59. Задание параметров источника

Для настройки функции «Анализ АС» необходимо включить (Моделирование »Вид анализа »Режим АС), рис. 60.

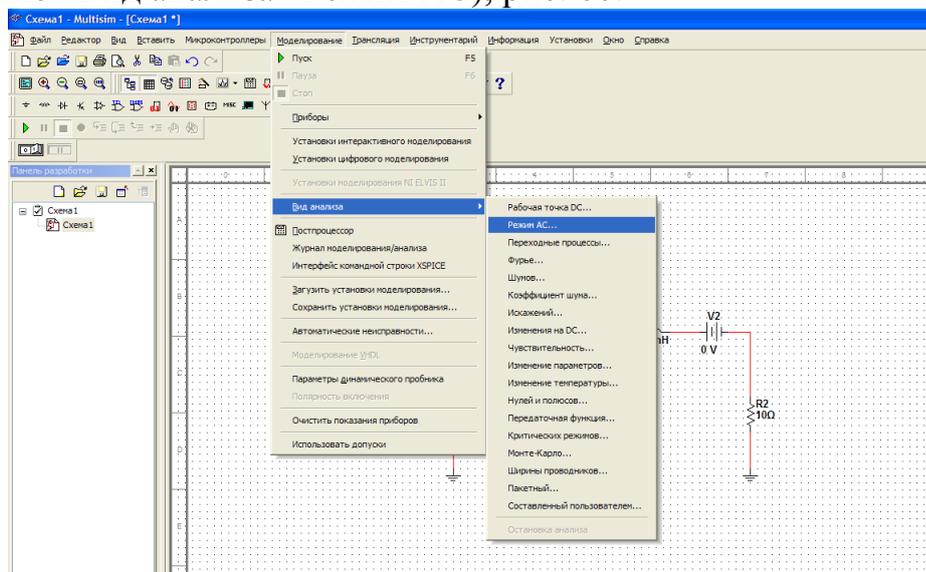


Рис. 60. Включение функций «Анализа АС»

Будем анализировать схему при одном значении частоты (200 Гц). Введем в диалоговом окне данные, как показано на рис. 61.

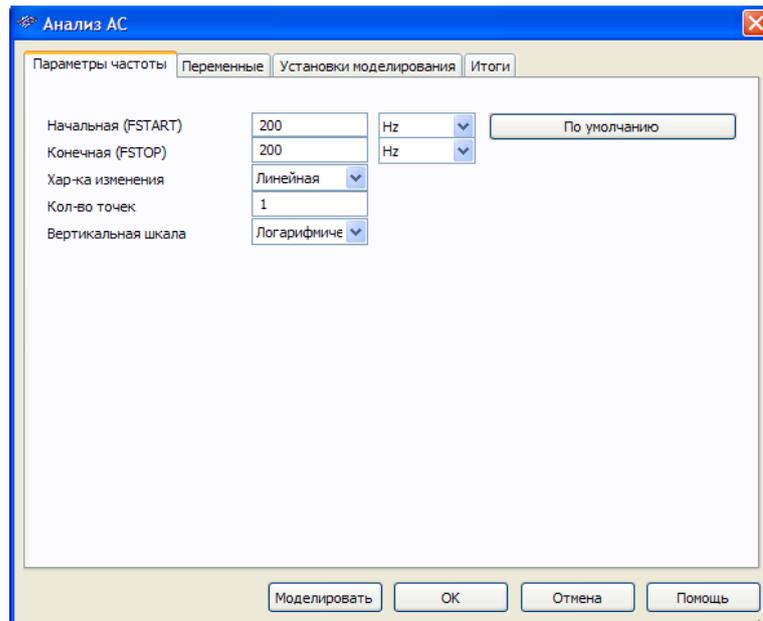


Рис. 61. Задание данных в окне «Анализ АС»

Мы выбрали линейную характеристику изменения, а также настроили опцию «Кол-во точек» на 1.

Начальная частота и частота остановки равны 200 Гц.

Таким образом, в диалоговом окне используется одна частота: 200 Гц. Не обязательно указывать значение для опции «Вертикальная шкала», так как нет необходимости в графическом представлении результатов.

Далее укажем выходные переменные. Для этого необходимо щелкнуть по вкладке «Переменные».

Далее щелкнем по переменной V(4), чтобы выбрать ее и нажмем кнопку «Добавить», рис. 62.

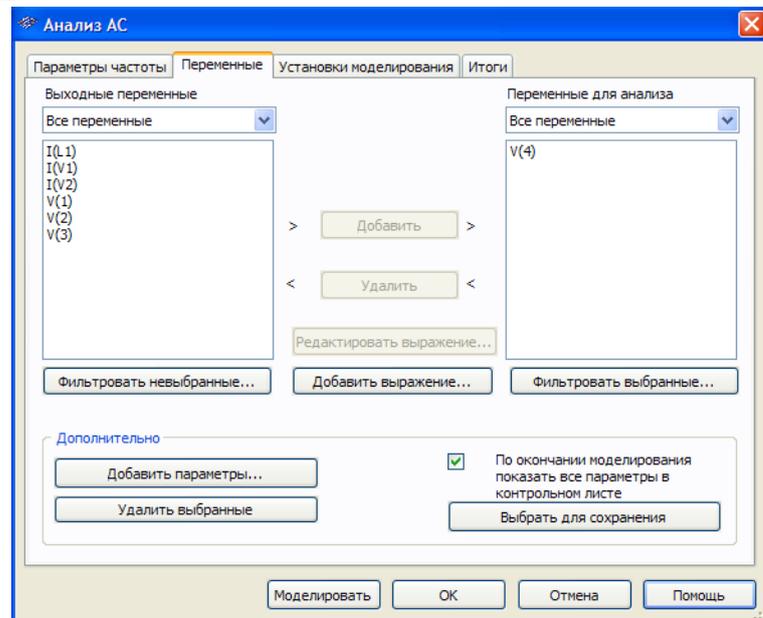


Рис. 62. Добавление переменной для анализа

Теперь в результатах моделирования будет получено напряжение узла 4, следовательно, данные станут доступны для программы «Постпроцессор».

Повторим процедуру и добавим в список переменную  $I(V2)$  (ток источника  $V2$ ), который является также током через катушку  $L1$ .

Выберем в меню пункт (Моделирование «Постпроцессор»).

Создадим следующие выражения:  $\text{real}(\text{frequency})$ ,  $\text{vm}(V(4))$ ,  $\text{vp}(V(4))*180/\pi$ ,  $\text{mag}(I(v2))$  и  $\text{ph}(I(v2))*180/\pi$ , рис. 63.

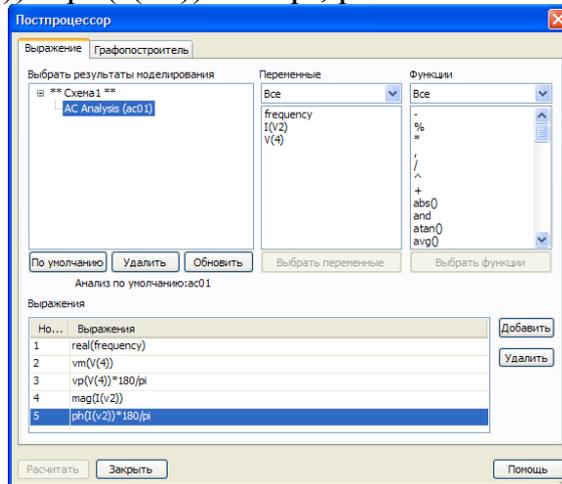
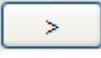


Рис. 63. Создание выражения в программе «Постпроцессор»

По умолчанию программа Multisim отображает данные в виде комплексных чисел с действительными и мнимыми частями.

Так же, Multisim возвращает угол в радианах, поэтому выполним преобразование в градусы, умножив значение на  $180/\pi$ .

Чтобы отобразить данные в виде текста, необходимо на вкладке «Графопостроитель» создать новую страницу и диаграмму. Это делается нажатием кнопки , или обеих кнопок «Добавить». Также, после нажатия кнопки , доступные выражения пересылаются в окошко «Выбранные выражения», рис. 64.

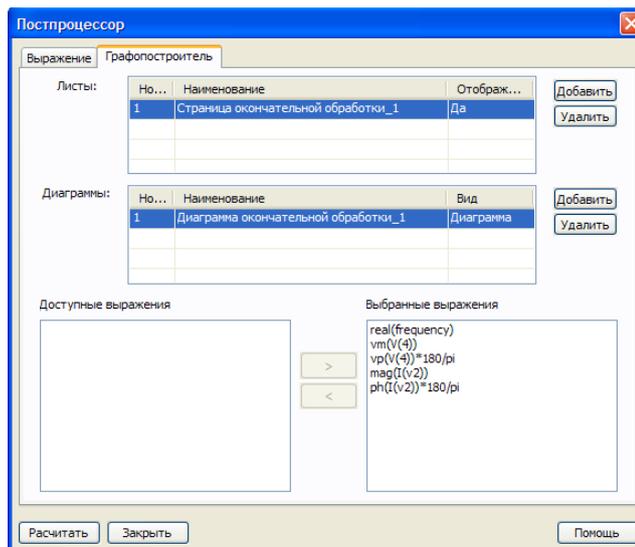


Рис. 64. Создание страницы и диаграммы

Для получения результатов необходимо нажать кнопку «Рассчитать»

## Вопросы

1. Назовите основные изменения в программе Multisim 10 в части измерительной техники, сравнив ее с программой Electronics Workbench.
2. Приведите пример проектирования устройства электронной техники, создав его в условных графических отображениях с помощью программы Multisim10 с подключением измерительных приборов.
3. Приведите пример проектирования устройства электронной техники, создав его в виртуальных «реальных» графических отображениях с помощью программы Multisim.
4. Каким образом определяются динамические параметры исследуемого устройства в среде Multisim?
5. Покажите и объясните работу контрольно-измерительных приборов в среде Multisim.
6. Какие виды анализа электрических схем возможны в среде Multisim?
7. Приведите пример и объясните работу метода Фурье в среде Multisim.
8. Приведите пример и объясните работу статистического анализа с помощью метода Монте-Карло в среде Multisim.
9. Назовите, какие виды анализа работы схем возможны при моделировании в среде Multisim.
10. Сообщите, какие программы для моделирования схем известны Вам, и определите приоритет, с Вашей точки зрения, лучший и обоснуйте, почему.
11. Какие труды отечественных и зарубежных авторов по моделирующим программам известны Вам? Дайте краткую характеристику.
12. Каким образом создаются недостающие для Вашей работы элементы и компоненты в среде Multisim.
13. Каким образом происходит пополнение базы элементов в среде Multisim.
14. Приведите пример проектирования в среде Multisim одной из аналоговой или цифровой электроники.
15. Выполните анализ по постоянному току каскада усилителя с ОЭ в среде Multisim.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Клаассен К.Б. Основы измерений, Электронные методы и приборы в измерительной технике. - М.: Постмаркет, 2002.
2. Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC (Electronics Workbench)-М. Т. 1 и 2. - М.: Солон - Пресс, 2006.
3. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003.
4. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2 М. - М.: Солон-Р, 2003.
5. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 М. - М.: Солон-Р, 2000.
6. Электротехника и Электроника в экспериментах и упражнениях / под ред. Д.И Панфилова. - М.: Додэка, 2000
7. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника, компьютерное моделирование аналоговых устройств. - М.: Горячая линия – Телеком, 2002.
8. Резников Б.Л., Схемотехническое моделирование в учебном процессе. - М.: МГТУ ГА, 2005.
9. Кучумов А.И. Электроника и схемотехника. - М.: Гелиос АРВ, 2004.
10. Перельман Б.Л. Справочник по полупроводниковым приборам. - М.: Микротех, 1996
11. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. - М.: Питер, 2003.
12. Браммер Ю.А., Пащук И.Н. Импульсные и цифровые устройства. - М.: Высшая школа, 1999.
13. Барри Уилкинсон. Основы проектирования цифровых схем. – М., СПб. и др., 2004.
14. Бобровников А. З., Электроника. – М., СПб. и др., 2004.
15. Павлов В.Н., Ногин В.Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. - М.: Горячая линия-Телеком, 2008.
16. Джонс М.Х., Электроника – практический курс. - М.: Постмаркет, 1999.
17. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. - М.: Высшая школа, 1991.
18. Ибрагим К.Ф. Основы электронной техники. - М.: Мир, 1997.
19. Резников Б. Л. Виртуальные методы исследования в учебном процессе //Научный вестник МГТУ ГА, серия Информатика. Прикладная математика. - 2002. - № 55.

## Приложение Система единиц SI

Международная система метрических единиц (Systeme International d'Unites), принятая в результате проведения ряда конференций (Conference Generale des Poids et Mesures), состоит из семи основных величин, двух дополнительных величин и многочисленных производных величин. Семь основных величин с их единицами измерения в SI перечислены в табл. 1, а две дополнительные величины указаны в табл. 2; в табл. 3 приведены примеры производных величин и их единицы в системе SI. Кроме того, в табл. 4 дан список десятичных приставок, используемых для обозначения кратных и дольных величин, получающихся в результате умножения и деления на 1000.

Таблица 1

Основные величины и единицы в системе SI

Основная величина	Единица SI		
	Наименование	Символ	
		лат.	рус.
длина	метр	m	м
масса	килограмм	kg	кг
время	секунда	s	с
электрический ток	ампер	A	А
термодинамическая температура	кельвин	K	К
сила света	кандела	cd	св
количество вещества	моль	mol	моль

Таблица 2

Дополнительные величины и единицы в системе SI

Величина	Единица	Символ	
		лат.	рус.
(плоский)угол	радиан	rad	рад
телесный угол	стерадиан	sr	ср

Таблица 3

Производные величины и их единицы в системе SI

Величина	Единица	Символ		Размерность	
		лат.	Рус.		
частота	герц	лат.	Рус.		$c^{-1}$
сила	ньютон	N	Н		$кг \cdot м / c^2$
давление (напряжение)	паскаль	Pa	Па	$Н / м^2$	$= кг / м \cdot c^2$
энергия, работа	джоуль	J	Дж	Н·м	$= кг \cdot м^2 / c^2$
мощность	ватт	W	Вт	Дж/с	$= кг \cdot м^2 / c^3$
электрический заряд	кулон	C	Кл		A·c

Продолжение табл. 3

Электрический потенциал	вольт	V	В	Вт/А	$= \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3 \cdot \text{А}$
Электрическое сопротивление	ом	$\Omega$	Ом	В/А	$= \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
проводимость	сименс	S	См	$\text{Ом}^{-1}$	$= \text{с}^3 \cdot \text{А}^2 / \text{кг} \cdot \text{м}^2$
емкость	фарада	F	Ф	Кл/В	$= \text{с}^4 \cdot \text{А}^2 / \text{кг} \cdot \text{м}^2$
индуктивность	генри	H	Гн	Вб/А	$= \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 \cdot \text{А}^2$
магнитный поток	вебер	Wb	Вб	Вс	$= \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 \cdot \text{А}$
плотность магнитного потока	тесла	T	Тл	Вб/м <sup>2</sup>	$= \text{кг} / \text{с}^2 \cdot \text{А}$
световой поток	-люмен	lm	лм		св·ср
освещенность	люкс	lx	лк		св·ср/м <sup>2</sup>

Таблица 4

## Десятичные приставки

Приставка		Аббревиатура		Множитель
лат.	рус.	лат.	рус.	
yotta	йотта	Y		$10^{24}$
zeta	зета	Z		$10^{21}$
exa	экса	E		$10^{18}$
penta	пента	P		$10^{15}$
tera	тера	T	Т	$10^{12}$
giga	гига	G	Г	$10^9$
mega	мега	M	М	$10^6$
kilo	кило	k	к	$10^3$
milli	милли	m	м	$10^{-3}$
micro	микро	$\mu$	мк	$10^{-6}$
nano	нано	n	н	$10^{-9}$
pico	пико	p	п	$10^{-12}$
femto	фемто	f	ф	$10^{-15}$
atto	атто	a	а	$10^{-18}$
zepto	зепто	z		$10^{-21}$
yocto	йокто	Y		$10^{-24}$

Основные единицы определены следующим образом.

Мерой *длины* в системе единиц SI является *метр*. Один метр равен пути, который проходит свет в вакууме за время, равное  $1/299792458$  с.

Мерой *массы* в системе единиц SI является *килограмм*. Это единственная единица, которая все еще определяется как физический артефакт (предмет, сделанный человеком), а именно — прототип из платино-иридиевого сплава, объявленный третьей генеральной конференцией по мерам и весам (в 1901 году) эталоном массы. Он содержится в международном бюро по мерам и весам во Франции.

Мерой *времени* в системе единиц SI является *секунда*. Она определена как длительность 9 192 631 770 периодов электромагнитного колебания, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133.

Мерой *электрического тока* в системе единиц SI является *ампер*. По определению, это такой ток, который приводит к тому, что между двумя параллельными длинными проводниками, помещенными на расстоянии одного метра в вакууме, действует сила, равная  $2 \times 10^{-7}$  ньютонов на метр длины.

Мерой термодинамической *температуры* в системе единиц SI является *кельвин*, определенный как  $1/273.16$  от термодинамической температуры тройной точки воды.

Мерой *силы света* в системе единиц SI является *свеча*. Она определена как сила света в заданном направлении от источника, испускающего в этом направлении монохроматическое колебание с частотой  $540 \times 10^{12}$  герц с интенсивностью излучения  $1/683$  ватт на стерадиан.

Мерой *количества вещества* в системе единиц SI является *моль*. Один моль содержит столько элементарных компонентов, сколько атомов содержится в 0,012 килограмма углерода-12. (Здесь необходимо определить, что такое «элементарные компоненты». Этот термин может относиться к атомам, молекулам, ионам, электронам или к другим частицам, а также к объединениям идентичных объектов).

Определения двух дополнительных безразмерных величин таковы:

*Радян* — это плоский угол с вершиной в центре окружности, стягиваемый дугой, равной по длине радиусу этой окружности.

*Стерадиан* — это телесный угол с вершиной в центре сферы, стягиваемый сферической поверхностью, равной по площади квадрату радиуса сферы.

### Запись результатов измерений

Результаты измерений или вычислений, в основе которых лежат измеренные величины, имеют числовые значения с некоторой погрешностью. Величина этой погрешности служит мерой неопределенности, с которой так полученные значения следует воспринимать. Если результат измерений объявляется без

указания его погрешности, то этим не сообщается никакой информации и такие сведения не имеют смысла. Поэтому в общем случае результат измерений бывает представлен вместе с максимально возможной ошибкой. Например, результат измерения электрического тока может иметь вид:  $6,35 \pm 0,03$  А или  $6,35$  А  $\pm 5\%$ .

Если ошибка не сообщается в явном виде одновременно с результатом измерения, то, по умолчанию, принимается, что абсолютное значение ошибки равно плюс или минус единице в младшем десятичном разряде. Поэтому результат измерения  $7,35$  А означает  $7,35 \pm 0,01$  А. Если, например, потенциометр подстраивается таким образом, чтобы его сопротивление равнялось  $1000000$  Ом, а разрешение при этом составляет  $1\%$ , то значение сопротивления записывается как  $1,000$  МОм или  $1000$  кОм, поскольку запись  $1000000$  Ом означала бы, что ошибка не превосходит  $\pm 10^{-6}$ .

Очевидно, что сказанное не относится к точным математическим постоянным (таким, как  $\sqrt{2}$ ,  $2\pi$ ,  $\pi^2$  и т.д.), которые часто встречаются в физических соотношениях.

NB: Многие единицы измерения названы по имени знаменитых физиков прошлого. Когда название такой единицы измерения пишется полностью, то, согласно принятому соглашению, во избежание путаницы запись должна начинаться с маленькой буквы, тогда как при указании такой единицы измерения в виде аббревиатуры ее запись начинается с заглавной буквы. Так, например, единица измерения электрического тока в системе SI названа по имени Ампера (Andre Marie Ampere, 1775 — 1836), французского физика, ставшего пионером в исследовании электромагнетизма. Поэтому измеренное значение тока следует указывать как  $10,5$  ампера или  $10,5$  А.

Когда результаты последовательности измерений представляют в виде графика (например, в координатах  $x, y$ ), часто используют масштабные множители, чтобы продемонстрировать, что эксперименты дают сравнимые результаты. При этом, как правило, по одной из осей откладываются «произвольные единицы». Однако как раз *единицы* определенно не являются произвольными; произвольны *масштабные множители*. Так что вдоль соответствующей оси следует читать: «произвольный масштабный множитель».

Наконец, мы сделаем несколько замечаний относительно принятых соглашений по поводу терминологии, употребляемой при измерениях.

Часто при записи действующего значения напряжения, равного, скажем,  $25$  В, это бывает указано явно:  $25$  В<sub>RMS</sub>. Однако при этом можно подумать, что существует несколько единиц различного сорта: В и В<sub>RMS</sub>. Поэтому лучше писать так: «Действующее значение напряжения равно  $25$  В». Можно, впрочем, написать и так:  $= 25$  В.

Единицы всегда указываются в единственном числе, так что неправильно говорить: «Потенциал составляет  $10$  вольтов».

Температура в системе SI выражается просто в кельвинах, а не в градусах Кельвина. Точно так же не говорят о делениях вольта.

Строго говоря, названия вольтметр, амперметр и др. неправильны. Согласно названию, получается, что приборы измеряют не величины, такие как потенциал, ток и т.д., а единицы измерения. Более подходящими были бы названия типа потенциаломер, токомер и др.

Логично так увязывать физическую характеристику со значением параметра, чтобы по мере того, как характеристика проявляется в большей степени, значение параметра, количественно выражающего эту характеристику, росло. Например, про измерительную систему с допустимым отклонением коэффициента передачи от желаемого значения в 1% говорят, что погрешность составляет 1% (или можно сказать, что точность равна 99%), но неправильно говорить, что точность равна 1%. Точно так же говорят, что нелинейность составляет 10, но не говорят «линейность равна  $10^3$ ». Разрешение измерительной системы с высокой разрешающей способностью необходимо выражать числом  $10^4$ , но не числом  $10^{-4}$ .

### Децибелы

(Деци)бел является логарифмической мерой отношения мощностей. Мощность  $P_2$  на  $a$  бел больше мощности  $P_1$ , когда

$$\log_{10} \frac{P_2}{P_1} = a.$$

Таким образом, справедлива запись:

$$P_2 = 10^a P_1.$$

Децибел (дБ) составляет десятую часть от бела, так что

$$a \text{ бел} = 10a \text{ дБ} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \text{ дБ}.$$

Можно также использовать (деци)белы в качестве абсолютной меры мощности, установив фиксированное опорное значение  $P_r$ , относительно которого рассматриваемая мощность  $P_1$  выражается данным числом (деци)бел, и привязав все последующие расчеты мощности к этому значению  $P_r$ . Чаще всего выбирают  $P_r$  равным 1 мВт. В этом случае единицы, с помощью которых выражают мощность, обозначаются Бм или дБм. Таким образом, мощность в 0 дБм равна 1 мВт, мощность в 10 дБм — это то же самое, что 10 мВт, величина 20 дБм соответствует 100 мВт и т.д.

В децибелах можно выразить также отношение величин двух сигналов, например, отношение двух напряжений или двух токов. Это можно проиллюстрировать следующим примером. На вход электронной системы подается напряжение  $V_i$ ; ее входное сопротивление равно  $R$  и на нем рассеивается мощность  $P$  Вт. Система развивает выходное напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_o$ , отдавая в него мощность  $P_o$ . Вспоминая, что  $P = V^2 / R$ , найдем коэффициент усиления мощности данной системы, выраженный в децибелах

$$10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i} + 10 \log_{10} \left( \frac{R_i}{R_o} \right) \text{ дБ}.$$

Если  $R_i$  совпадает с  $R_0$ , то коэффициент усиления мощности становится равным

$$20 \log_{10} \frac{V_0}{V_i} \text{ Дб.}$$

Последнее выражение часто используется также в качестве логарифмической меры отношения двух величин, даже в том случае, когда входное сопротивление  $R_i$  не равно сопротивлению нагрузки  $R_0$ . Поправочный член  $10 \log_{10}(R_i/R_0)$  обычно опускают из соображений удобства. Если следовать данному правилу (как это обычно бывает в электронике), то во избежание путаницы важно в явном виде указывать, что имеется в виду *отношение величин*, а не *отношение мощностей*.

Наконец, натуральный логарифм отношения двух величин (потенциалов, токов, давлений и т.д.) выражается в *неперах*. Следовательно, коэффициент усиления напряжения, выраженный в неперах, имеет вид:

$$\ln\left(\frac{V_0}{V_i}\right) \text{ неп.}$$

*Напряжение и ток: V- и I- величины*

Аналогия между переменными и параметрами из различных разделов физики: (U — разность потенциалов; I — ток; R — сопротивление; C — емкость; L — самоиндукция; v — скорость; F — сила; D — затухание при поступательном движении; m — масса; K — жесткость при поступательном движении;  $\omega$  — угловая скорость; M — момент;  $D_r$  — затухание при вращении; J — момент инерции;  $K_r$  — жесткость при вращении;  $\Delta T$  — разность температур;  $I_w$  — поток тепла;  $R_w$  — тепловое сопротивление;  $C_w$  — тепловая емкость;  $\Delta p$  — разность давлений;  $I_v$  — скорость потока;  $R_s$  — сопротивление потока;  $C_s$  — емкость потока;  $L_s$  — инерция потока.)

Таблица 5

<i>Раздел Физики</i>	<i>Переменные</i>			<i>Параметры</i>		
<i>электрические величины</i>	V	I	$\bar{V}/\bar{I}$	R	C	L
<i>механическое поступательное движение</i>	v	F	$\bar{v}/\bar{F}$	$I/Dt$	m	$1/Kt$
<i>механическое вращение</i>	$\omega$	M	$\bar{\omega}/\bar{M}$	$I/D_r$	J	$1/K_r$
<i>(псевдо) тепловые величины</i>	$\Delta T$	$I_w$	$\overline{\Delta T}/\overline{I_w}$	$R_w$	$C_w$	-
<i>гидравлика пневматика акустика</i>	$\Delta p$	$I_v$	$\overline{\Delta p}/\overline{I_v}$	$R_s$	$C_s$	$L_s$

Известно, что часто поведение неэлектрической физической системы можно описать с помощью электрической аналогии. Поведение рассматриваемой физической системы и той электрической схемы, которая служит ее аналогией, описывается идентичными математическими соотношениями при надлежащей связи между физическими величинами, характеризующими данную систему, и соответствующими величинами аналога. Эту связь обычно называют отношениями эквивалентности.

Необходимо проводить различие между двумя типами величин — между переменными и параметрами. С помощью *переменных* представляют энергетические характеристики сигнала, такие как разность потенциалов, давление, скорость и т.д., тогда как *параметры* выражают неэнергетические качества системы или цепи, как, например, сопротивление, жесткость, масса и т.д.

Для целей измерений особенно удобной является классификация, согласно которой переменные делятся на «поперечные переменные» или «транс-переменные» (*across variables, transvariables*) и «сквозные переменные» или «перпеременные» (*through variables, pervariables*). Величина, являющаяся *транспеременной*, измеряется между двумя различными точками физической системы (измерительным прибором с большим входным импедансом). Величина, являющаяся *сквозной переменной*, измеряется в одной точке системы (путем вставления измерительной системы с малым входным импедансом). Каждый из этих двух видов переменных можно подразделить на *переменные, выражающие скорость* (*rate variables*), и *переменные, выражающие состояние* (*state variables*). Например, электрический ток и электрический заряд  $q$  оба являются сквозными переменными, но ток  $i$  — это величина, выражающая скорость, а заряд  $q$  — величина, выражающая состояние. Соотношение между  $i$  и  $q$  имеет вид:  $i = dq / dt$ . Подобное соотношение применимо и в общем случае: переменная, выражающая скорость, равна производной по времени от соответствующей переменной, выражающей состояние. Следовательно, мы можем позволить себе ограничиться рассмотрением только переменных, выражающих скорость. В пособии мы назвали транспеременные, выражающие скорость, *V-величинами*, а сквозные переменные, выражающие состояние, *I-величинами* по аналогии с тем, чем являются эти величины в разделе физики «Электричество».

Если ограничиться только *V- величинами*, то соотношения эквивалентности для величин, относящихся к различным разделам физики, можно представить в виде табл. 5.

Аналогичные величины перечислены в столбцах для каждого из разделов физики (которым соответствуют строки таблицы). Следует отметить, что здесь в качестве механического аналога импеданса указана величина, обратная той, которая чаще всего бывает определена как импеданс в механике. Кроме того, тепловая аналогия является, в действительности, псевдоанalogией. Более корректно было бы заменить поток тепла на поток энтропии. Наконец, следует

заметить, что тепловая самоиндукция не существует, и поэтому нельзя построить тепловой резонансный контур только из реактивных элементов.

### **Таблицы**

Ниже приводятся значения ряда физических констант, которые часто встречаются при измерениях. Мы перечислим также ряд коэффициентов пересчета для единиц измерения, не входящих в систему SI, которые, увы, все еще часто применяются. Наконец, описаны электрические, механические и тепловые свойства различных материалов, с которыми мы постоянно встречаемся.

#### **Коэффициенты перехода**

1 дюйм	= 2,540x10 <sup>-2</sup> м
1 фут	= 30,48x10 <sup>-2</sup> м
1 ярд	= 0,9144 м
1 ангстрем	= 10 <sup>-10</sup> м
1 миля (морская)	= 1853 м
1 миля (сухопутная)	= 1609 м
1 унция	= 28,35x10 <sup>-3</sup> кг
1 фунт	= 453,0x10 <sup>-3</sup> кг
1 карат	= 200x10 <sup>-6</sup> кг
1 дина	= 10 <sup>-5</sup> Н
1 бар	= 10 Н/м <sup>2</sup>
1 атмосфера	= 1,013x10 <sup>5</sup> Н/м <sup>2</sup>
1 см ртутного столба	= 10 тор = 1,333x10 <sup>3</sup> Н/м <sup>2</sup>
1 калория	= 4,187Д

(В физиологии часто пользуются так называемой большой калорией, которая равна 1 килокалории.)

Таблица 6

1 британская тепловая единица	= 1059,52 Дж
1 эрг	= 10 <sup>-7</sup> Дж
1 лошадиная сила	= 735,5 Вт
1 эрстед	= (1/4π)x10 <sup>3</sup> А/м
1 максвелл	= 10 <sup>-8</sup> Вб
1 гаусс	= 10 <sup>-4</sup> Тл
1 непер	= 20 log e дБ = 8,686 дБ
(y°F- 32) 5/9	= x°C
1 фут-свеча	= 10,764 лк
1 ламберт	= 10 <sup>4</sup> л

### Свойства материалов

Все свойства указаны для температуры 20 °С. Удельное сопротивление  $\rho$  и температурный коэффициент  $C_{T\rho}$  некоторых проводников.

Таблица 7

Материал	$\rho \times 10^{-8}$ Ом·м	$C_{T\rho} \times 10^{-3}/K$
серебро	1,50	4,10
медь	1,55	4,33
золото	2,04	3,98
алюминий	2,50	4,67
латунь	6-8	1-2
сталь	8-14	6-7
манганин	43	<0,005
константан	49	<0,04

Относительная диэлектрическая постоянная  $\epsilon_r$ , тангенс угла потерь  $\delta$ , удельное сопротивление  $\rho$  и напряженность поля  $E_d$  при которой наступает пробой, для некоторых изоляторов.

Таблица 8

Материал	$\epsilon_r$ (50 Гц)	$\text{tg } \delta \times 10^4$ 50 Гц	1 МГц	$\rho \times 10^{10}$ Ом·м	$E_d \times 10^6$ В/м
стекло	5-9	5-30	1-10	>10	100-400
резина	3-5	20-100	50-150	$10^5$ — $10^6$	20-30
фарфор	6	10-30	3-15	$10^2$ — $10^5$	300-400
слоуда	4	5	1	$>10^3$	100
нефть	2-2,5	1-5	1-5	$10^3$ — $10^4$	100-250
эпоксидная смола	3-4	30-50	100-200	$10^3$ - $10^4$	80-120
плексиглас	4	500	150	$10^4$	90
тефлон	2	<1	<1	$10^5$	250
поливинил хлорид	4-6	100-1000	50-500	$10$ - $10^4$	80

Пользуясь приведенными данными, можно найти время (свободной) релаксации заряда  $T = \epsilon_0 \epsilon_r \rho$ . Это время, необходимое для того, чтобы напряженность поля в проводнике снова стала равной нулю, когда все свободные заряды перераспределяются после введения в проводник точечного заряда  $q_0$ , так что  $q(t) = q_0 \exp(-t/T)$ .

Плотность  $\rho_m$ , температура Кюри  $T_c$ , относительная начальная магнитная проницаемость  $\mu_{ra}$  и удельное сопротивление  $\rho$  для некоторых *мягких магнитных материалов*.

Таблица 9

Материал	$\rho_m \times 10^3$ г/см <sup>3</sup>	$T_c$ °С	$\mu_{ra} \times 10^3$	$\rho \times 10^{-8}$ Ом·см
железо	7,8	770	0,3-1	10
кремнистая сталь	7,6	750	0,3-3	40-55
сплав никеля и железа	8,5	0-450	2-130	40-75
ферриты	4,5	130-400	0,3-10	$10^7-10^{13}$

Плотность  $\rho_m$ , коэффициент упругости  $E_m$  и относящийся к нему температурный коэффициент  $C_{TE}$ , а также модуль упругости  $G_m$  и относящийся к нему температурный коэффициент  $C_{TG}$  некоторых часто применяемых *конструкционных материалов*.

Таблица 10

Материал	$\rho_m$ $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	$E_m \times 10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>	$C_{TE}$ $\times 10^{-4}$ /К	$G_m \times 10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>	$C_{TG} \times 10^{-4}$ /К
$\alpha$ -железо	7,86	21	2,5	8,2	3,0
алюминий	2,70	7,1	4,4	2,7	4,9
медь	8,92	12	3,9	4,6	4,0

Плотность  $\rho_m$ , тепловое удельное сопротивление  $r$ , удельная тепловая емкость  $c$ , коэффициент линейного расширения  $\alpha$  и коэффициент эмиссии  $\epsilon$  ряда других *конструкционных материалов*.

Таблица 11

Материал	$M$ $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	$r$ $10^{-3}$ м К/Вт	$c$ $10^3$ Дж/кгК	$\alpha \times 10^6$ /К	$\epsilon$
алюминий	2,70	4,90	0,896	23,8	0,04-0,08
медь	8,92	2,59	0,383	16,8	0,04-0,05
железо	7,86	13,7	0,452	11,0	0,08
инвар	8,14	93,5	0,460	1,2	0,07
стекло	2,51	1320	0,745	3,2-4,2	0,88
поливинил	1,2-1,5	5800-6250	1,3-2,1	150-200	0,90
хлорид	1,18	5260-6250	1,2-1,4	70-100	0,85
тефлон	2,1-2,3	4400-6250	0,9-1,1	60-100	0,90

