

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ NI MULTISIM, часть 5

В статье рассмотрены примеры анализа простейших цифровых устройств с помощью программы моделирования радиоэлектронных устройств NI Multisim Analog Devices Edition.



Free downloadable SPICE simulator for Analog Devices component evaluation.

MULTISIM MODELLING OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES BY MEANS OF PROGRAM NI MULTISIM, part 5

Abstract – In article examples of the analysis of the elementary digital devices by means of the program of simulation analysis of the radioelectronic devices NI Multisim Analog Devices Edition are considered.

В. Макаренко

V. Makarenko

В пятой части статьи [1] рассмотрим возможности программы NI Multisim по моделированию цифровых устройств. В бесплатной версии NI Multisim Analog Devices Edition введены существенные ограничения на редактирование библиотек цифровых элементов и серии ИМС, используемых для моделирования. Это объясняется тем, что Analog Devices не выпускает логические ИМС широкого применения, а в программе NI Multisim AD Edition обеспечивается поддержка только тех ИМС, которые выпускаются именно этой компанией. Однако, имеющихся в библиотеке элементов вполне достаточно для формирования любых цифровых сигналов.

Начнем с состава библиотек цифровых логических ИМС Multisim AD Edition. Для моделирования доступны быстродействующие ИМС ТТЛШ серии 74LS. В полной версии программы для моделирования можно использовать ИМС ТТЛ серий 74STD, 74S, 74LS, 74F, 74ALS, 74AS и ИМС КМОП серий 4000 (с рабочим напряжением 5, 10 и 15 В), 74НС (с рабочим напряжением 2, 4 и 6 В) и Tiny-Logic® серии NC7S (в миниатюрных корпусах с рабочим напряжением 2, 3, 4, 5 и 6 В).

Для контроля состояний логических элементов и отображения буквенно-цифровой информации в обеих версиях программы предусмотрены различные индикаторные устройства: семисегментные (со встроенным дешифратором) и пятнадцатисегментные цифровые одноразрядные знакосинтезирующие индикаторы различного цвета свечения, индикаторные лампы, шкальные индикаторы (рис. 1), пробники, устройства звуковой сигнализации (buzzer), вольтметры и амперметры. Кроме этого, для индикации состояний цифровых устройств можно использовать светодиоды различного цвета (как одиночные, так и наборы из нескольких диодов в одном корпусе).

На рис. 1 приведен пример использования шкальных индикаторов DCD Bargraph для контроля напряжения источника питания и индикатора UNDCD Bargraph, в котором используются разделенные сегменты для контроля состояния выхода логических элементов. На схеме состояние логической единицы ("1") имитируется напряжением источника 9 В. Для свечения сегмента нужно, чтобы величина тока через сегмент была не менее 5 мА. При этом необходимо учитывать, что внутри индикатора в каждом сегменте имеется встроенный резистор с номинальным значением сопротивления 500 Ом. Для схемы рис. 1 ток, вытекающий из точки 3, должен составлять 10 мА, а эквивалентное сопротивление включенных параллельно резисторов двух светящихся сегментов равно 250 Ом. Не сложно определить сопротивление дополнительного балансного резистора R1 для обеспечения требуемого тока.

$$R_1 = (U_{\text{ист.пит}} - iR_{\text{пар}}) / i = (9 - 10^{-2} \cdot 250) / 10^{-2} = 650 \text{ Ом.}$$

Такой индикатор может быть использован для контроля состояния логических элементов с напря-

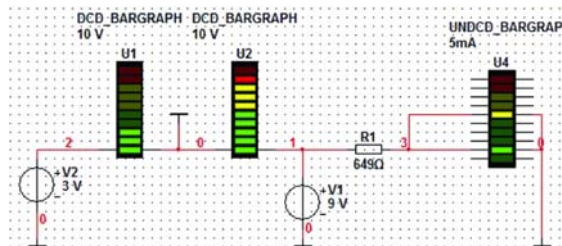


Рис. 1. Схема включения шкальных индикаторов

жением питания не менее 2.5 В.

На рис. 2 показаны семи-сегментные знаковосинтезирующие индикаторы синего и желтого цветов свечения (U3 и U4). Всего доступны для пользователя пять цветов индикаторов: синий, зеленый, красный, оранжевый и желтый. Можно использовать индикаторы с прямым начертанием символов (U3) и с наклонным (U4). Для контроля знака отображаемого параметра предназначен знаковый индикатор (U2), который содержит 5 светодиодов и позволяет отображать символы +, -, 1 (или отдельно каждый из двух ее сегментов) и точку. На рис. 2 в индикаторе U2 для иллюстрации отображаемых символов включены все светодиоды. Прямое падение напряжения на включенном светодиоде равно 1.66 В, номинальный ток через сегмент – 5 мА. Светодиоды разбиты на две группы, в каждой из которых они соединены по схеме с общим анодом. В первой группе светодиоды, отображающие знаки + и -, а во второй – остальные. Для контроля постоянного напряжения можно воспользоваться четырехразрядным вольтметром (U1), входное сопротивление которого составляет 10 МОм. На рис. 2 вольтметр включен параллельно светодиоду индикатора и отображает прямое падение напряжения на нем.

Для демонстрации возможностей контроля состояния логических элементов с помощью пробников (Probe) воспользуемся схемой двухразрядного двоичного счетчика, собранного на двух RSD-триггерах типа 74ALS74N (рис. 3). Для контроля состояния выходов триггеров воспользуемся разноцветными пробниками – синим и красным. Если установить низкую частоту следования синхроимпульсов, подаваемых на вход первого триггера, то на экране можно увидеть, как пробники включаются и выключаются. Выключенный пробник не закрашен (смотри X1 на рис. 3). При напряжении на выходе логического элемента, соответствующем уровню "1" (превышающему 2.5 В), пробник включается.

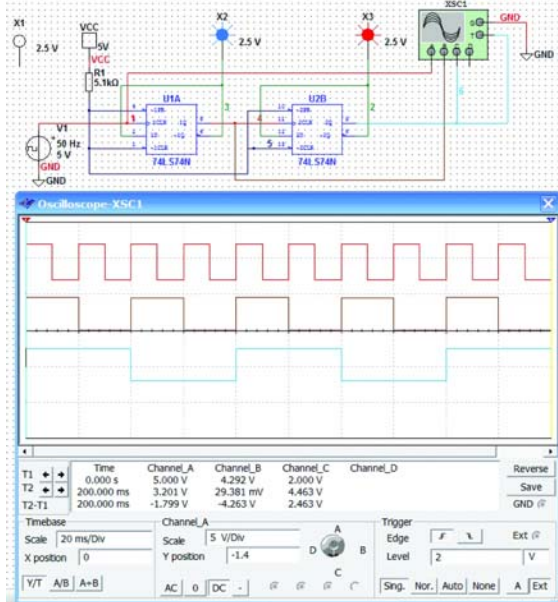


Рис. 3. Схема двухразрядного двоичного счетчика с подключенными пробниками и осциллографом

Для контроля сигналов на выходах элементов схемы удобно пользоваться четырехканальным осциллографом. Если контролируемых сигналов больше четырех, целесообразно воспользоваться логическим анализатором.

Проиллюстрируем работу с логическим анализатором на примере синхронного счетчика с коэффициентом счета 10, схема которого приведена на рис. 4. Максимальный коэффициент счета такого счетчика равен 16, а введение дополнительного логического элемента DD4A позволяет осуществлять принудительную установку триггеров счетчика в "0". Когда на выходах счетчика установится код 1010 (двоичного эквивалента десятичного числа 10), на выходе DD4A сформируется сигнал в виде короткого отрицательного импульса, который поступает на инверсные входы установки триггеров в "0" (CLR). Для анализа сигналов в различных точках схемы используются логический анализатор XLA1 и осциллограф XSC1.

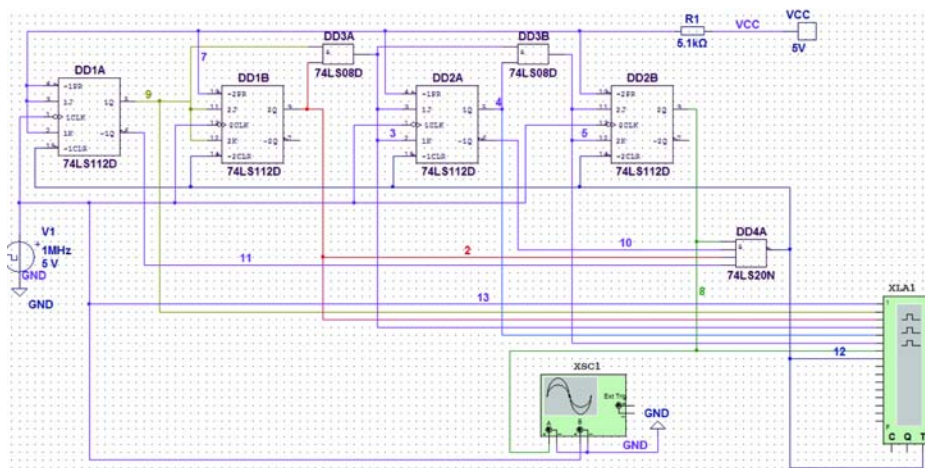


Рис. 4. Схема синхронного счетчика с коэффициентом счета, равным десяти

На рис. 5 приведены временные диаграммы сигналов, полученные с помощью логического анализатора. Для правильного отображения результатов работы схемы необходимо задать параметры анализа: частоту входного сигнала и параметры логического анализатора. Учитывая то, что в ноде 12 схемы (выход DD4A) формируется очень короткий импульс, длительность которого равна времени срабатывания DD4A плюс время установки триггеров в "0", необходимо выбрать частоту входного сигнала не ниже 100 кГц, иначе разрешающая способность модели будет недостаточной для отображения результатов в ноде 12. Для моделирования была задана частота входного сигнала 1 МГц, а тактовая частота внутреннего генератора анализатора – 10 МГц. Чем выше тактовая частота, тем выше разрешающая способность анализатора по времени. Чтобы задать тактовую частоту, необходимо нажать кнопку Set в открытом окне анализатора (рис. 5), при этом откроется диалоговое окно установки параметров анализа (рис. 6). Кроме тактовой частоты (Clock Rate) здесь задается число выборок, которые будут обрабатываться и выводиться на экран. Если число выборок мало, может быть выведена только часть сигнала, если выборок больше, чем необходимо, то последовательно выводится несколько реализаций, занимающих полный экран в окне вывода, пока процесс анализа не будет завершен. Под выборкой (отсчетом) подразумевается значение выводимого сигнала на каждом тактовом интервале.

Количество отсчетов, выводимых на экран до момента синхронизации (Pre-trigger sample) и после него (Post-trigger sample), задается в соответствующих окнах (рис. 6). Для рассматриваемой схемы каждому периоду входного сигнала соответствует 10 выборок (samples). С учетом коэффициен-

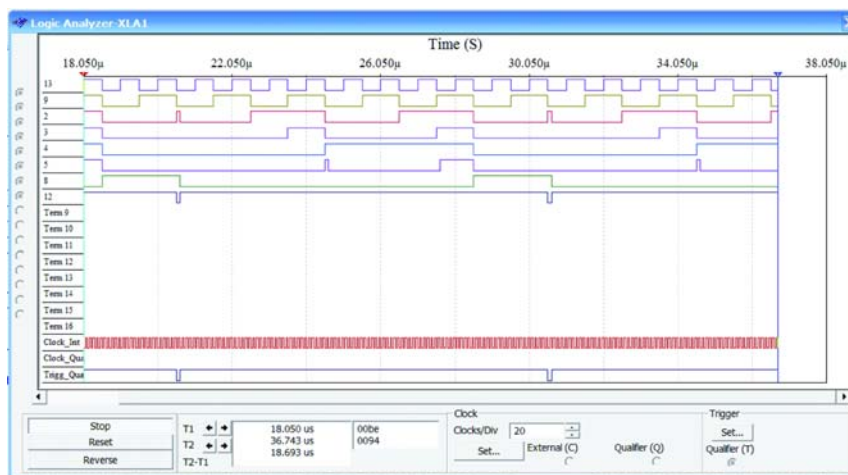


Рис. 5. Временные диаграммы сигналов на выходах счетчика, полученные с помощью логического анализатора

та счета счетчика, равного 10, для того чтобы на экран был выведен один полный цикл работы счетчика, в окно Post-trigger sample необходимо ввести число не менее 100. Более удобно рассматривать процессы, когда на экран выводится не один период, а более 1.2, чтобы увидеть начало и окончание процесса. Для рассматриваемого примера задано число выборок, равное 150, что позволило наблюдать на экране (рис. 5) 1.5 цикла работы счетчика. Масштаб по оси времени можно изменять, задавая в окне вывода результатов анализа (рис. 5) число тактов, приходящихся на деление (Clocs/Div). Чем меньше заданное число, тем больше масштаб по оси времени. Подробнее о параметрах логического анализатора можно узнать в [3].

Еще один инструмент предназначен для синтеза цифровых схем по заданному логическому выражению (Булевой функции) или по таблице истинности логической схемы. На рис. 7 показано окно логического конвертера XLC1 (Logic Converter), позволяющего осуществлять преобразование логических функций, содержащих от одной до восьми переменных.

Пользователю доступны два способа задания функции: табличный и аналитический. При табличном вводе значений функции необходимо отметить входы, на которых будут задаваться входные переменные. Для этого достаточно указателем "мышки" прикоснуться к требуемому входу и нажать левую кнопку. Цвет активного входа – белый, неиспользуемого входа – серый. На рис. 7 используются входы A, B и D. После выбора входов в таблице под каждым из них автоматически проставляются все возможные комбинации "0" и "1". В левой колонке указывается порядковый номер комбинации, а в правой – значение выходной переменной для каждой комбинации входных значений, которое можно скорректировать.

По умолчанию в правой колонке во всех строках проставляются значения, соответствующие работе логического элемента И. Например, при активации входов G и H (все остальные входы неактивны) значения входных и выходной переменных будут соответствовать представленным в таблице. Для изменения значений выходной переменной необходимо указателем "мышки" щелкнуть на символе, расположенном в правой колонке. При каждом щелчке будет происходить изменение значения выходной переменной – 0→1→х и вновь – 0. Необходимо задать требуемые значения выходной переменной.

Для преобразования табличной функции в аналитическое выражение необходимо нажать кнопку 2 в зоне "Conversions" (рис. 7). Тогда в строке "Булева функция" будет выведено логическое выражение искомой функции. В приведенном на рис. 7 примере это выражение имеет вид

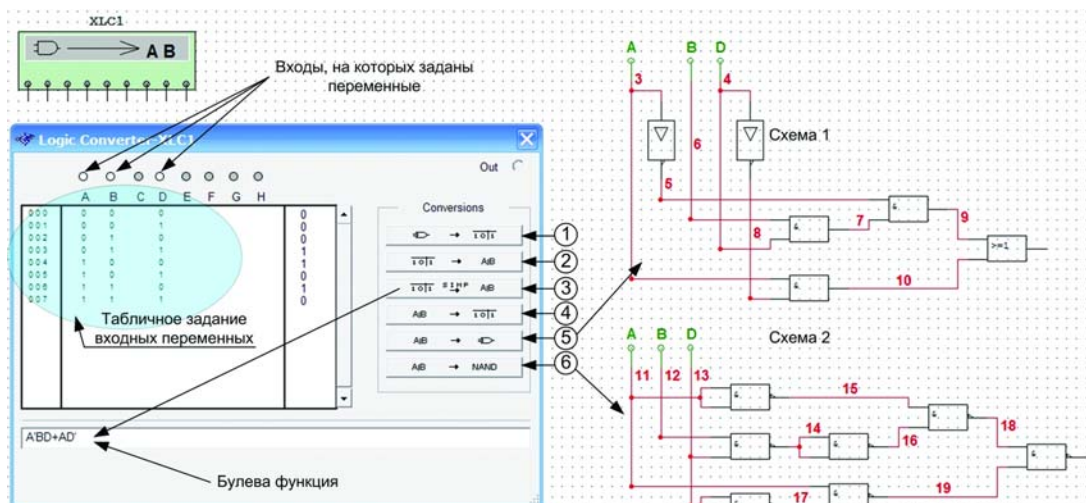


Рис. 7. Рабочее окно логического конвертера и схемы 1 и 2, синтезированные с его помощью

$A'BD+AD'$, где запись A' эквивалента традиционной записи A .

Для преобразования функции в принципиальную схему можно воспользоваться кнопками 5 и 6 (рис. 7). При нажатии кнопки 5 строится схема из логических элементов различного типа (схема 1), а при нажатии кнопки 6 – только из элементов И-НЕ (схема 2).

Чтобы получить табличное значение по логическому выражению, необходимо в строку "Булева функция" вписать требуемое логическое выражение и нажать кнопку 4. В таблице против указанных в функции входов появятся значения "0", "1" и выходной переменной.

Необходимо учитывать некоторые особенности ввода логического выражения в программе NI Multisim. Так как ввод осуществляется с клавиатуры, то невозможно записать логическое выражение, в котором две или более букв находятся под общим знаком инверсии. Такое выражение необходимо преобразовать по правилам (в некоторых источниках – теоремам) де Моргана [5] и привести к такому виду, чтобы общих инверсий над несколькими переменными не было. Например, выражение $\overline{AB+BC}$ необходимо преобразовать следующим образом $\overline{AB+BC} = AB \cdot \overline{BC} = AB \cdot (\overline{B+C}) = AB\overline{C}$, так как $AB\overline{B} = 0$. После ввода в строку "Булева функция" выражения $AB\overline{C}$ и последовательного нажатия кнопок 4 и 6 (рис. 7) получим табличные значения и принципиальную схему для введенного выражения (рис. 8).

В бесплатной версии программы NI Multisim AD Edition функция преобразования логического выражения в принципиальную схему не поддерживается.

Для формирования тестовых многоразрядных цифровых сигналов используется Word Generator (генератор слова), условное обозначение и окно установки параметров которого показаны на рис. 9.

Генератор позволяет формировать 32-разрядные кодовые слова, которые можно ввести с клавиатуры непосредственно в окне ввода кода (рис. 9). Для ввода и сохранения введенных слов другими способами необходимо нажать кнопку Set в окне установки параметров генератора слова (рис. 10).

Значения входных и выходной переменных

Номер комбинации	Входные переменные		Выходная переменная
	G	H	
000	0	0	0
001	0	1	0
002	1	0	0
003	1	1	1

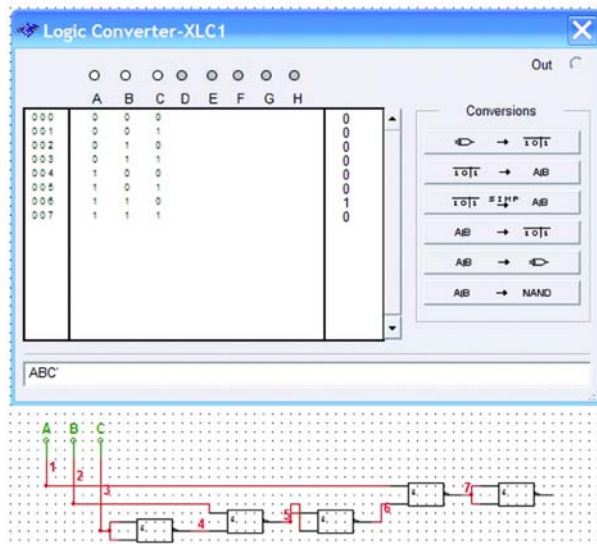


Рис. 8. Результаты преобразования логического выражения $AB\overline{C}$

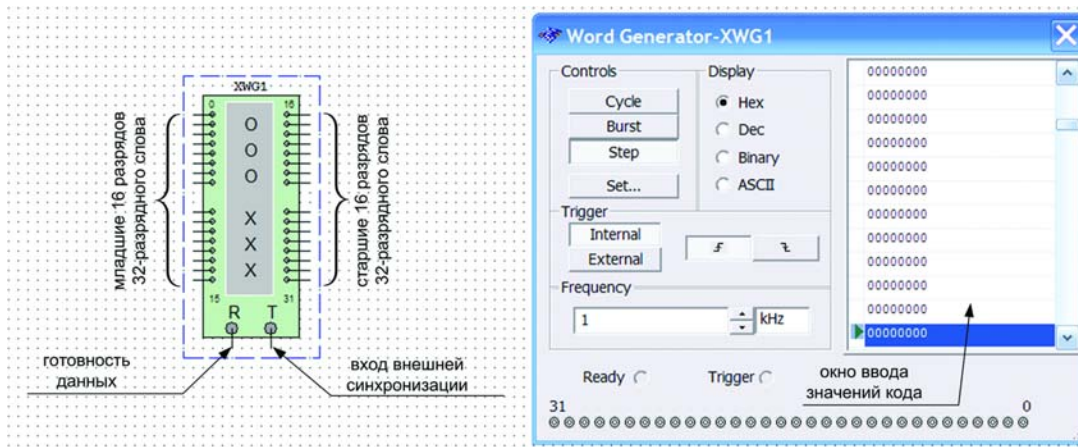


Рис. 9. Условное обозначение параметров генератора слова и их окно установки

В открывшемся окне предустановок в столбце Pre-set Patterns можно выбрать один из восьми вариантов формирования и сохранения слова:

- No Change – не изменяется автоматически (ручной ввод значений)
- Load – загрузить из файла
- Save – сохранить в файле
- Clear buffer – очистить буфер
- Up Counter – автоматически увеличивать каждое последующее значение на 1
- Down Counter – автоматически уменьшать каждое последующее значение на 1
- Shift Right – сдвигать вправо на одну позицию каждое последующее значение
- Shift Left – сдвигать влево на одну позицию каждое последующее значение.

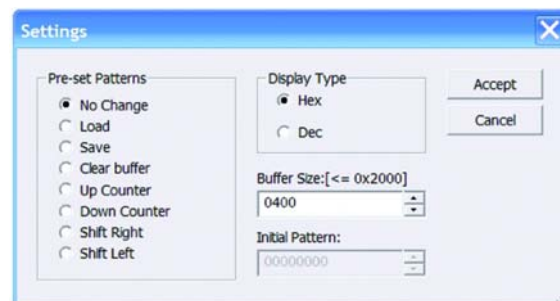


Рис. 10. Окно предустановок генератора слова

Перед началом ввода кодовых слов необходимо в окне Buffer Size (рис. 10) ввести необходимое число кодовых слов, задаваемых в окне Display Type в шестнадцатиричном или десятичном коде в зависимости от формы представления данных на дисплее (в шестнадцатиричном коде – Hex, а в десятичном – Dec). Предельный размер буфера – 8192 кодовых слова (2000 – в шестнадцатиричном коде).

При использовании режимов формирования кода Up Counter, Down Counter, Shift Right и Shift Left в окне Initial Pattern необходимо ввести начальное значение кода.

Рассмотрим на примере, как будет выглядеть набор кодовых слов при следующих установках:

- Display Type – Dec
- Buffer Size – 10
- Shift Right
- Initial Pattern – 2147483648 (соответствует шестнадцатиричному коду 80000000).

Сформированные кодовые слова показаны на рис. 11. Для наглядного представления формируемого цифрового сигнала результат в окне Word Generator представлен в двоичном коде.

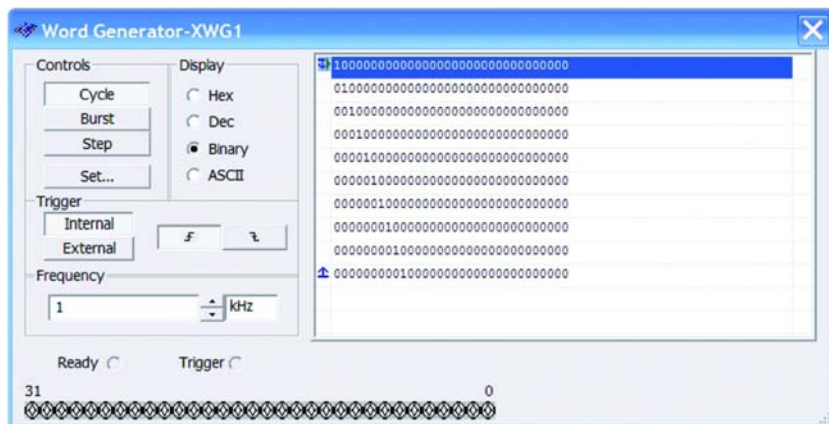


Рис. 11. Основное окно генератора слова

В открывшемся диалоговом окне необходимо указать имя файла (по умолчанию предлагается имя схемного файла). В полученном таким образом текстовом файле с расширением *.dr в табличном виде будут записаны все набранные на экране комбинации. При необходимости файл можно отредактировать в любом текстовом редакторе и загрузить снова нажатием кнопки LOAD.

На рис. 12 приведен пример формирования 8-разрядного цифрового сигнала с периодом повторения 16 тактов (режим вывода Cycle) и временные диаграммы этого сигнала, полученные с помощью логического анализатора. Текст файла, содержащего информацию о сформированном сигнале, приведен на рис. 13. Частота вывода сигналов задается в строке Frequency (рис. 12). По умолчанию задается частота вывода сигнала 1 кГц.

Для ввода значений кода в режиме No Change необходимо щелкнуть "мышкой" на соответствующем слове и затем ввести с клавиатуры нужные значения кода. Дальнейшие перемещения по полю экрана удобнее проводить не с помощью "мыши", а клавишами управления курсором. Содержимое экрана можно стереть и загрузить новое значение или записать его в файл. Для записи необходимо нажать кнопки SAVE и Accept, предварительно нажав кнопку Set (рис. 11).

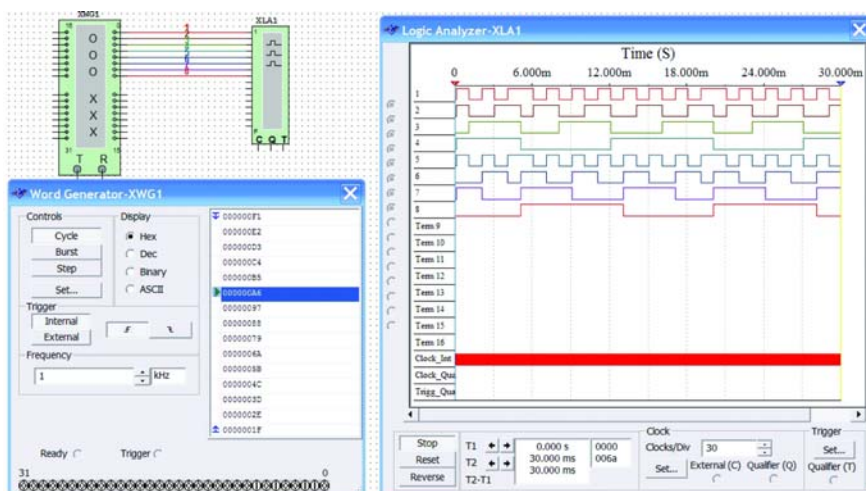


Рис. 12. Формирование 8-разрядного цифрового сигнала генератором слова в циклическом режиме и временные диаграммы этого сигнала, полученные с помощью логического анализатора

Data:
000000F1
000000E2
000000D3
000000C4
000000B5
000000A6
00000097
00000088
00000079
0000006A
0000005B
0000004C
0000003D
0000002E
0000001F
Initial:
0000
Final:
000E

Рис. 13. Текст, сохраняемый в файле *.dr

Сформированные слова снимаются с восьми выходов (от 0 до 7) младших разрядов XWG1 (рис. 12). На остальных выходах формируются нули в соответствии с таблицей программирования генератора.

Предусмотрена возможность подключения ко входу Т (рис. 9) внешнего синхронизирующего сигнала. По умолчанию включена синхронизация от внутреннего тактового генератора.

Кроме циклического режима вывода можно использовать режимы однократного вывода всей последовательности кодовых слов (Burst) и пошагового вывода (STEP). В пошаговом режиме после каждого нажатия кнопки Run (на панели инструментов кнопка обозначена зеленым треугольником) выводится очередное кодовое слово. После перебора всех введенных значений кода будет вновь выводиться первое слово, затем второе и т.д.

На выводе R (Ready) генератора слова формируется сигнал тактовой частоты, который может быть использован для синхронизации других устройств. Сигнал с этого выхода сопровождает каждую выдаваемую на выход кодовую комбинацию и может быть использован в случае, если исследуемое устройство обеспечивает возможность квитирования (подтверждения). В этом случае после получения очередной кодовой комбинации и сопровождающего ее сигнала READY исследуемое устройство формирует сигнал подтверждения получения данных, который подается на вход внешней синхронизации генератора Т (рис. 9) и производит очередной запуск генератора, если он работает в режиме внешней синхронизации.

Для очистки буфера от введенных кодовых слов необходимо нажать кнопку Clear buffer.

Генератор кодовых слов удобно использовать для тестирования различных цифровых устройств, так как он позволяет формировать произвольные последовательности нулей и единиц.

Рассмотрим пример использования генератора кодовых слов для тестирования дешифратора типа 74LS138N, имеющего три входа данных и восемь инверсных выходов. Схема модели показана на рис. 14.

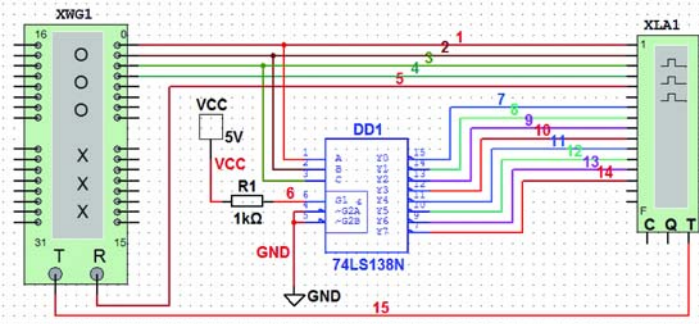


Рис. 14. Схема тестирования дешифратора трехразрядного двоичного кода



Рис. 15. Результаты тестирования дешифратора трехразрядного двоичного кода

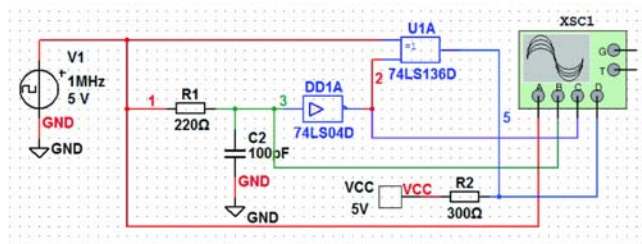
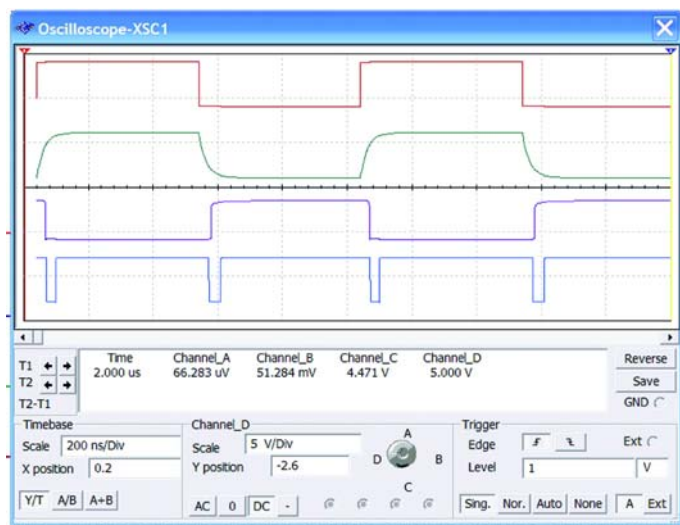


Рис. 16. Схема формирователя импульсов



*Рис. 17. Временные диаграммы сигналов
в различных точках
схемы формирователя импульсов*

Для синхронизации логического анализатора используется сигнал Ready, формируемый генератором кодовых слов.

В четыре младших разряда генератора кодовых слов занесен код, увеличивающийся с каждым тактом синхронизации на единицу. Результаты тестирования представлены на рис. 15.

Четыре верхние диаграммы соответствуют сигналам на выходах четырех младших разрядов XWG1, пятая диаграмма соответствует сигналу Ready, а диаграммы с седьмой по одиннадцатую соответствуют сигналам на выходах дешифратора. Коду 000 на входах дешифратора соответствует 0 на первом выходе дешифратора, а коду 111 – 0 на восьмом выходе.

Рассмотрим еще один пример простейшего цифрового устройства – формирователя коротких импульсов, схема которого приведена на рис. 16, из фронта и спада входного сигнала. Формирователь построен с использованием интегрирующей цепочки, элемента исключающее ИЛИ и инвертора. В схеме использован элемент исключающее ИЛИ с открытым коллектором, поэтому между его выходом и источником питания включен нагрузочный резистор.

Следует обратить внимание на то, что источник питания должен быть обязательно показан на схеме, даже если к нему не подключен ни один элемент. При отсутствии источника на схеме логические элементы работать не будут.

Так как число анализируемых сигналов невелико, для анализа временных диаграмм работы формирователя целесообразно использовать четырехканальный осциллограф. Временные диаграммы работы схемы показаны на рис. 17.

В последующих публикациях мы рассмотрим моделирование смешанных аналого-цифровых устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко В. Моделирование радио-
электронных устройств с помощью програм-
мы NI MULTISIM // ЭКиС – Киев: VD MAIS,
2008, № 1-4.
2. [http://www.fairchildsemi.com/pro-
ducts/logic/tinylogic/](http://www.fairchildsemi.com/products/logic/tinylogic/)
3. Multisim 10 User Guide.pdf.

4. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. Изд. 3-е переработанное и дополненное. – М.: СОЛОН-Пресс. 2003. – 736 с.
5. Новожилов О.П. Основы цифровой техники / Учебное пособие. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 528 с.