

## **Работа №7. Исследование синхронных счетчиков**

Цель работы – изучение принципов построения счетчиков, овладение методом синтеза синхронных счетчиков, экспериментальная оценка динамических параметров счетчиков, изучение способов наращивания разрядности синхронных счетчиков.

Во время самостоятельной подготовки к работе необходимо ознакомиться с теоретическими сведениями, изучить методы синтеза синхронных счетчиков, синтезировать синхронный суммирующий двоично-десятичный счетчик с заданным порядком изменения состояний, подготовить по каждому пункту раздела «Задание и порядок выполнения работы» расчетные и теоретические материалы, электрические функциональные схемы исследуемых счетчиков. Перед началом работы студент должен предъявить преподавателю рабочие материалы для проверки и обсуждения. После выполнения работы студенты обязаны представить преподавателю оформленный отчет.

Экспериментальная часть работы проводится или на персональном компьютере путем математического моделирования, используя прикладные программы Electronics Workbench, Multisim или на физических моделях на базе учебного макета. Вначале проводится сборка схемы счетчиков, затем исследование его временных диаграмм и параметров с помощью логического анализатора (осциллографа).

Продолжительность работы – 4 часа.

### Теоретические сведения

*Счетчик* - операционный узел ЭВМ, предназначенный для выполнения счета, кодирования в определенной системе счисления и хранения числа сигналов импульсного типа, поступающих на его счетный вход.

Кроме микроопераций счета, счетчики могут выполнять микрооперации установки произвольного состояния (запись числа параллельным кодом) и установки в нулевое или начальное состояние.

Счетчик состоит из разрядных схем, связанных между собой и содержащих триггеры и комбинационные схемы. Для счета и

кодирования счетных сигналов наиболее широко применяется двоичная система счисления, а также двоично-кодированные системы, в которых цифры 0, 1, 2, ... кодируются многоразрядными двоичными кодами, последовательно изменяющимися на единицу, начиная с начального. В качестве начального кода часто применяется нулевой код 000...0.

Конкретное значение цифрового кода фиксируется в триггерах (разрядах) счетчика и называется *состоянием* счетчика.

Порядок изменения состояния, начиная с нулевого, когда значения кодов состояний отличаются на единицу от кодов предыдущих состояний, называется *естественным*.

Порядок изменения состояний называется *произвольным*, если значения кодов соседних состояний могут отличаться больше, чем на единицу.

Счетчики с произвольным порядком изменения состояний называют также пересчетными схемами.

### **Основные параметры счетчиков**

*Модуль счета  $M$*  - это число разрешенных состояний счетчика, включая начальные или нулевые.

Модуль счета или коэффициент пересчета пересчетной схемы – это число входных сигналов, которое возвращает пересчетную схему в начальное состояние, в качестве которого может быть принято любое ее состояние.

Модуль счета равен  $M=q^n$ , где  $q$  - основание системы счисления,  $n$  - число разрядов счетчика в системе счисления с основанием  $q$ .

Двоичный  $m$ -разрядный счетчик имеет  $2^n$  состояний: 0, 1, 2,...,  $2^n-1$ , а его модуль счета  $M=2^n$ . Одноразрядный двоично-десятичный счетчик имеет модуль счета  $M=10$ .

*Емкость счетчика  $N$*  - максимальное число импульсов, которое может быть зафиксировано в счетчике. Этот параметр определяется числом разрядов и модулем счета:  $N=q^n - 1$ .

Двоичный  $m$ -разрядный счетчик имеет емкость  $N=2^n-1$ . Емкость двоично-десятичного  $m$ -разрядного счетчика равна  $N=10^n-1$ .

*Статические параметры счетчика*  
 $U_{вх}^0, U_{вх}^1, U_{вых}^0, U_{вых}^1, I_{вх}^0, I_{вх}^1, K_{раз}$  и другие определяются аналогичными параметрами логических и запоминающих элементов, на которых он реализован.

**Динамические параметры.** Динамические свойства счетчиков характеризуются большим числом параметров, из которых отметим следующие:

- максимальная частота счета,
- времена задержек распространения трактов: счетный вход - выход  $Q_i$ , счетный вход - выход переноса (заема), вход параллельной записи - выход  $Q_i$ , вход R - выход  $Q_i$ .
- минимальные длительности импульсов счета, установки в 0, параллельной записи.

Время задержки распространения  $t_{эд,р,сч}^{01}(t_{эд,р,сч}^{10})$  сигнала в счетчике – интервал времени между входным и выходными сигналами при переходе напряжения на выходе счетчика от  $U^0$  к  $U^1$  (или от  $U^1$  к  $U^0$ ), измеренный на уровне 0,5 логического перепада входного и выходного сигналов.

Для триггеров счетчика должны быть обеспечены необходимые времена предустановки и выдержки информационных сигналов относительно активного перепада сигнала параллельной записи.

Максимальной частотой счета  $f_{\text{макс}}$  называется частота счетных сигналов, при которой счетчик сохраняет нормальную работоспособность (отсутствуют пропуски счета входных сигналов). Для надежной фиксации состояний триггеров, анализа и передачи выходных сигналов счетчика максимальную частоту уменьшают в 1,5-2 раза и называют ее рабочей частотой  $f_{\text{раб}} = (0,5 \div 0,7) f_{\text{макс}}$

### **Классификация счетчиков по основным признакам**

По значению модуля счета различают двоичные ( $M=2^n$ , n- количество двоичных разрядов), двоично-кодированные (например, двоично-десятичные) счетчики, счетчики с одинарным кодированием, когда состояние представлено местом расположения единственной единицы и др.

По направлению счета счетчики делят на суммирующие, вычитающие, реверсивные. Суммирующие счетчики выполняют

микрооперацию типа  $CT := CT+1$ , вычитающие -  $CT := CT-1$ . Реверсивные счетчики выполняют обе микрооперации.

По способу организации межразрядных связей различают счетчики с последовательным, сквозным, параллельным и групповым переносами.

По порядку изменения состояний различают счетчики с естественным порядком счета и с произвольным порядком счета (пересчетные схемы).

По способу управления переключением триггеров во время счета сигналов счетчики разделяют на синхронные и асинхронные.

В асинхронных счетчиках триггер каждого данного разряда переключается входными сигналами счета, или выходными сигналами триггеров других разрядов, или комбинацией этих сигналов. Переключение триггеров происходит последовательно во времени.

В синхронных счетчиках триггеры осуществляют переходы из одного состояния в другое в соответствии со значениями сигналов на информационных входах в момент прихода синхронизирующего (тактового) сигнала. Сигналы счета являются синхронизирующими сигналами.

Таким образом, при изменении состояния синхронного счётчика переключение триггеров всех разрядов происходит одновременно, последовательно во времени, а в асинхронном счётчике этот процесс протекает во всех разрядах последовательно во времени.

По способу организации переноса различают счётчики с последовательным, сквозным параллельным и групповым переносами.

Для построения счётчиков могут быть использованы интегральные триггеры разных типов:  $T$ ,  $D$ ,  $DV$ ,  $JK$  с внутренней задержкой, имеющие двухступенчатую структуру, а также  $D$ ,  $DV$ ,  $JK$  с прямым или инверсным динамическим управлением. В счётчиках, построенных на триггерах с прямым динамическим управлением, изменение состояний происходит от положительного перепада счётного импульса; если применяются триггеры с инверсным динамическим управлением – от отрицательного перепада.

Синхронные счетчики строятся на синхронных триггерах, все тактовые (синхронизирующие) входы которых объединены. Счетные сигналы (импульсы) подают на объединенные синхронизирующие входы всех триггеров счетчика. Поэтому триггеры, которые должны изменять свои состояния при поступлении очередного счетного импульса, переключаются одновременно. Следовательно, время задержки распространения сигнала от счетного входа счетчика до выходов его триггеров, на которых формируется новое состояние счетчика, равно времени задержки распространения сигнала любого триггера счетчика от С-входа до его выхода:

$$t_{\text{зд. п. сч.}} = t_{\text{зд. п. тр.}}$$

При этом полагаем, что время задержки распространения сигнала от С-входа до выхода у всех триггеров счетчика одинаковое.

Максимальная частота счета достигается при параллельном, т.е. одновременном, образовании сигналов переноса во всех разрядах счетчика. Сигналы переноса формируются в каждом разряде логическими схемами независимо друг от друга. В качестве триггеров используются синхронные триггеры с динамическим управлением записью JK-, D- и реке T-типа.

В синхронном двоичном суммирующем счетчике с параллельным переносом, построенном на JK-триггерах, функции возбуждения (они же функции переносов) формируются независимо друг от друга одновременно, т.е. параллельно:

$$\begin{aligned} J_0 &= K_0 = 1, J_1 = K_1 = Q_0, J_2 = K_2 = Q_0 Q_1, \\ J_3 &= K_3 = Q_0 Q_1 Q_2, \dots, J_i = K_i = Q_0 Q_1 Q_2 \dots Q_{i-1}. \end{aligned}$$

Поскольку функции возбуждения  $J_i = K_i$ ,  $i=0,1,2,\dots,n$ ,  $n$ -число разрядов счетчика, то JK-триггеры работают в счетном режиме, т.е. являются синхронными T-триггерами.

Функциональная схема 4-разрядного синхронного двоичного суммирующего счетчика с параллельным переносом, построенном на синхронных T-триггерах, и его временная диаграмма приведены на рис. 1 и 2 соответственно.



- модуль счета  $M$ ,
- порядок изменения состояний,
- максимальное значение состояния  $L$ ,

- тип триггера,
- базовый логический элемент или серия ИМС.

Синтез синхронного счетчика как цифрового автомата содержит следующие этапы:

1. Определение числа триггеров счетчика, исходя из модуля счета  $M$  и максимального состояния  $L$  счетчика:

$$n_1 = \lceil \log_2 M \rceil, \quad n_2 = \lceil \log_2 L \rceil,$$

где символ  $\lceil \dots \rceil$  означает округление до ближайшего большего целого числа.

Число триггеров счетчика равно  $n = \max\{n_1, n_2\}$ .

Если порядок изменения состояний естественный, то  $n_1 = n_2$ .

## 2. Составление обобщенной таблицы переходов счетчика и функций возбуждения триггеров

Таблица содержит двоичные коды предыдущих и последующих состояний счетчика, определяемых через состояние триггеров в моменты времени  $t$  и  $t+1$  до и после прихода очередного входного сигнала соответственно. Так как триггер может иметь два устойчивых состояния (0 и 1), то возможны четыре типа переходов из текущего состояния  $Q_i^t$  в последующее состояние  $Q_i^{t+1}$ : 0-0, 0-1, 1-0, 1-1. Пользуясь матрицей переходов триггера, определяют и заносят в обобщенную таблицу значения сигналов  $J_i$ ,  $K_i$  для JK-триггеров или  $D_i$  для D-триггеров, обеспечивающие соответствующие переходы счетчика.

Зависимость информационного сигнала  $J_i(t)$ ,  $K_i(t)$  или  $D_i(t)$  триггера от значений состояний всех триггеров счетчика в момент времени  $t$  и от значений входного сигнала счетчика в момент времени  $t$  называют функцией возбуждения триггера. Так как при переключении счетчика его входной сигнал является активным, т.е. равен 1, то его значение и записи функции возбуждения можно опустить.

Таким образом в обобщенной таблице определены функции возбуждения триггеров счетчика:

$$J_i(t) = f_i(Q_{n-1}^t, Q_{n-2}^t, \dots, Q_0^t), \quad K_i(t) = \varphi_i(Q_{n-1}^t, Q_{n-2}^t, \dots, Q_0^t) \text{ для JK-триггеров}$$

$$\text{и } D_i(t) = \psi_i(Q_{n-1}^t, Q_{n-2}^t, \dots, Q_0^t) \text{ для D-триггеров,}$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

3. Минимизация функции возбуждения триггеров счетчика.

4. Перевод минимизированных функций возбуждения в заданный базис логических функций.
5. Построение функциональной схемы счетчика.
6. Проверка полученной схемы счетчика на самовосстановление после сбоев.

Счетчик с модулем  $M$  имеет  $2^n - M$  лишних состояний, которые исключаются в процессе счета тем или иным образом. Таким образом лишние состояния не используются. Однако эти состояния счетчик может принимать в результате сбоев или при подаче на схему напряжения питания. Если лишние состояния существуют временно и по истечении нескольких тактов работы счетчика исчезают без специального внешнего воздействия, то такая схема является самовосстанавливающейся после сбоев. Не все синтезированные схемы счетчиков обладают этим свойством.

Проверка на самовосстановление заключается в том, что для каждого лишнего (т. е. не используемого) состояния счетчика определяются последующие переходы. Если после нескольких тактов счетчик переходит в одно из рабочих состояний, то он является самовосстанавливающимся после сбоев, в противном случае не самовосстанавливающимся. Без внешнего воздействия не самовосстанавливающийся счетчик не может перейти к рабочему состоянию. Для обеспечения самовосстановления после сбоя в счетчик вводят дополнительные специальные логические элементы.

Пример 1. Синтезировать синхронный суммирующий счетчик с модулем счета  $M=10$  с естественным порядком изменения состояний на JK- и D-триггерах.

1. Определяем количество триггеров  $n_1 = \lceil \log_2 10 \rceil = 4$ .
2. Составляем обобщенную таблицу функционирования счетчика (табл. 1), пользуясь матрицами переходов (они называются также характеристическими таблицами) для JK- и D-триггеров (табл.2).



Таблица 1

№ п.п.	Время t.				Время t+1.				Время t Счетчик на JK-триггерах.							
									Функции возбуждения JK-триггеров							
	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	$Q_3^*$	$Q_2^*$	$Q_1^*$	$Q_0^*$	$J_3$	$K_3$	$J_2$	$K_2$	$J_1$	$K_1$	$J_0$	$K_0$
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	$\alpha$	0	$\alpha$	0	$\alpha$	1	$\alpha$
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	$\alpha$	0	$\alpha$	1	$\alpha$	$\alpha$	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	$\alpha$	0	$\alpha$	$\alpha$	0	1	$\alpha$
3	0	0	1	1	0	1	0	0	0	$\alpha$	1	$\alpha$	$\alpha$	1	$\alpha$	1
4	0	1	0	0	0	1	0	1	0	$\alpha$	$\alpha$	0	0	$\alpha$	1	$\alpha$
5	0	1	0	1	0	1	1	0	0	$\alpha$	$\alpha$	0	1	$\alpha$	$\alpha$	1
6	0	1	1	0	0	1	1	1	0	$\alpha$	$\alpha$	0	$\alpha$	0	1	$\alpha$
7	0	1	1	1	1	0	0	0	1	$\alpha$	$\alpha$	1	$\alpha$	1	$\alpha$	1
8	1	0	0	0	1	0	0	1	$\alpha$	0	0	$\alpha$	0	$\alpha$	1	$\alpha$
9	1	0	0	1	0	0	0	0	$\alpha$	1	0	$\alpha$	0	$\alpha$	$\alpha$	1
					$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$								
					Функции возбуждения D- триггеров											
					Время t											

Таблица 2

$Q_i^t \rightarrow Q_i^{t+1}$	J	K	D
0 - 0	0	$\alpha$	0
0 - 1	1	$\alpha$	1
1 - 0	$\alpha$	1	0
1 - 1	$\alpha$	0	1

3. Минимизация функций возбуждения выполняется с помощью известных методов, например, по методу Квайна с применением карт Карно. При минимизации следует учитывать неиспользуемые состояния счетчика. Для двоично-десятичного кода с весами разрядов 8-4-2-1 это состояния 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111.

В приложениях Electronics Workbench и Multisim имеются программные средства минимизации Logic Converter функций алгебры логики до 8 переменных.

В результате минимизации получены функции возбуждения JK- и D-триггеров счетчиков:

$$J_3 = Q_2 Q_1 Q_0, \quad K_3 = Q_0, \quad J_2 = K_2 = Q_1 Q_0, \quad J_1 = \bar{Q}_3 Q_0, \\ K_1 = Q_0,$$

$$J_0 = K_0 = 1;$$

$$D_3 = Q_2 Q_1 Q_0 \vee Q_3 \bar{Q}_0, \quad D_2 = Q_2 \bar{Q}_1 \vee Q_2 \bar{Q}_0 \vee \bar{Q}_2 Q_1 Q_0,$$

$$D_1 = \bar{Q}_3 \bar{Q}_1 Q_0, \quad D_0 = \bar{Q}_0.$$

4. Реализуем комбинационную часть счетчика в базисе И, ИЛИ, НЕ. В качестве примера схема синхронного суммирующего двоично-десятичного счетчика на JK-триггерах приведена на рис. 3.

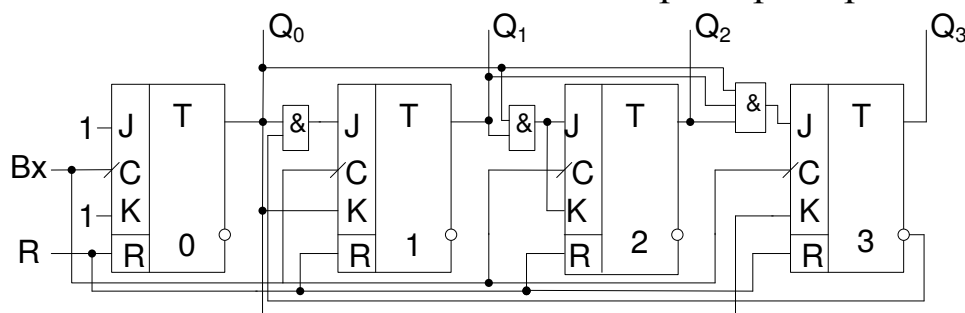


Рис. 3

Для проверки правильности функционирования следует построить временные диаграммы работы счетчиков по модулю 10 на JK- и D-триггерах.

### Задание и порядок проведения работы

1. Исследование четырёхразрядного синхронного суммирующего счётчика с параллельным переносом на Т-триггерах. Проверить работу счётчика

- от одиночных импульсов, подключив к прямым выходам разрядов световые индикаторы,
- от импульсов генератора.

Просмотреть на экране логического анализатора (осциллографа) временную диаграмму сигналов на входе и выходах счетчика, провести анализ временной диаграммы сигналов счетчика. Измерить время задержки распространения счетчика и максимальную частоту счета.

3. Синтезировать двоично-десятичный счётчик с заданной последовательностью состояний. Последовательность состояний счётчика для каждого варианта работы приведена в табл.3; десятичными числами обозначены номера двоичных наборов, изображающие десятичные цифры и определяющие состояние счётчика. Начертить схему счётчика на элементах интегрального базиса (И-НЕ; И, ИЛИ, НЕ), синхронных *JK*-триггерах.

4. Собрать десятичный счётчик, используя элементную базу приложения Multisim или учебного макета. Установить счётчик в начальное состояние, подав на установочные входы R соответствующий сигнал.

Таблица 3

№ варианта двоично-десятичного кода	Десятичные номера двоичных наборов переменных, изображающих десятичные цифры 0,1,...,9
1	3, 4,5,6,7,8,9,10,11,12
2	0,1,2,3,5,10,12,13,14,15
3	0,1,4,5,7,8,10,12,14,15
4	0,1,2,3,4,5,8,9,10,11
5	0,1,2,3,4,5,6,8,9,10
6	0,1,2,3,6,9,12,13,14,15
7	5,6,7,8,9,10,11,12,13,14
8	0,1,2,3,4,8,9,10,11,12,
9	0,1,3,4,5,7,8,10,11,12
10	0,1,2,4,5,6,7,8,9,10
11	0,1,2,3,4,5,6,7,12,13
12	0,1,2,3,7,8,12,13,14,15
13	0,1,2,4,5,6,8,9,10,12
14	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11
15	0,1,3,4,5,7,11,12,13,15
16	0,1,2,3,5,6,9,10,12,13
17	0,1,2,3,6,7,8,9,10,11
18	0,1,2,4,5,6,10,11,13,14
19	0,1,3,4,5,8,9,11,12,13
20	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13
21	0,1,2,3,4,11,12,13,14,15
22	0,1,2,3,5,7,8,12,13,14

23	0,1,2,3,6,7,9,10,11,14
24	0,1,2,3,5,6,7, 10,12,13
25	0,1,2,3,6,7,8,10,14,15

5. Исследование четырёхразрядного синхронного суммирующего счётчика с параллельным переносом. Проверить работу счётчика

- от одиночных импульсов, подключив к прямым выходам разрядов световые индикаторы,
- от импульсов генератора.

Просмотреть на экране логического анализатора (осциллографа) временную диаграмму сигналов на входе и выходах счетчика, провести анализ временной диаграммы сигналов счетчика. Измерить время задержки распространения счетчика и максимальную частоту счета.

6. Исследование четырёхразрядного синхронного суммирующего счётчика с параллельным переносом ИС К555ИЕ9, аналог ИС 74LS160 (рис.4).

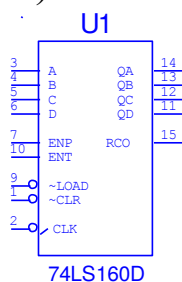


Рис.4

Проверить работу счётчика

- от одиночных импульсов, подключив к прямым выходам разрядов световые индикаторы,
- от импульсов генератора.

Просмотреть на экране логического анализатора (осциллографа) временную диаграмму сигналов на входе и выходах счетчика, провести анализ временной диаграммы сигналов счетчика. Измерить время задержки распространения счетчика и максимальную частоту счета.

7. Исследование схем наращивания разрядности счетчиков ИЕ9 до четырех секций с последовательным переносом между секциями (рис. 5) и по структуре «быстрого» счета(рис. 6).

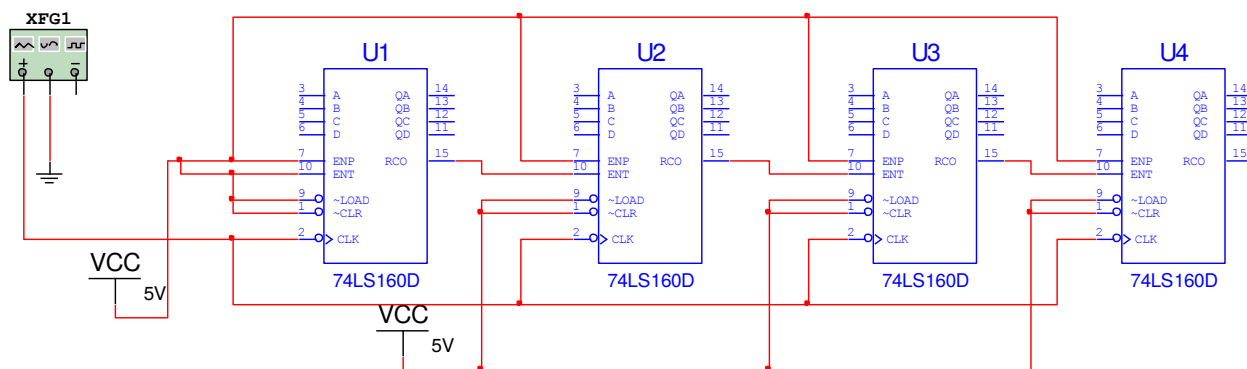


Рис. 5

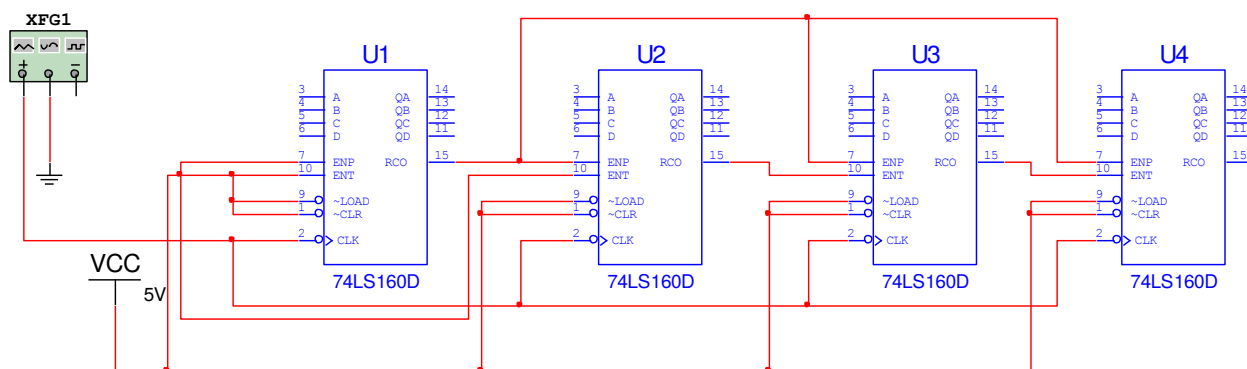


Рис. 6

### Требование к отчёту

Отчёт должен содержать электрические функциональные схемы исследуемых счётчиков, временные диаграммы сигналов счётчиков, материалы по синтезу двоично-десятичного счётчика, результаты измерений.

### Контрольные вопросы

8. Что называется счётчиком?
9. Что называется коэффициентом пересчёта?
10. Перечислить основные классификационные признаки счётчиков.
11. Указать основные параметры счётчиков.
12. Что такое время установки кода счётчика?
13. Объяснить работу синхронного счётчика с параллельным переносом, оценить его быстродействие.
14. Объяснить методику синтеза синхронных счётчиков на двухступенчатых *JK*- и *D*-триггерах.