

9. Генераторы прямоугольных импульсов на основе интегральных логических элементов.

Введение

Принцип действия генераторов прямоугольных импульсов основан на использовании усилителей, охваченных положительной обратной связью. В данном случае в качестве усилителей используются интегральные логические элементы, которые при переходе из состояния «1» в состояние «0» и обратно обязательно оказываются в усилительном режиме. Как известно, коэффициент усиления усилителя с положительной обратной связью $\dot{K}_{ос}$ определяется формулой:

$$\dot{K}_{ос} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\gamma}\dot{K}},$$

где $\dot{K}$ – коэффициент усиления усилителя без обратной связи, $\dot{\gamma}$ – коэффициент обратной связи. Для возникновения генерации необходимо выполнение условия $\dot{\gamma}\dot{K} \geq 1$. Если это условие выполняется для постоянного тока, то такое электронное устройство, выполненное на логических элементах, имеет два устойчивых состояния «1» и «0», и называется триггер. Если это условие выполняется для одной или нескольких близких частот, то возникает генерация синусоидальных колебаний. Если это условие выполняется для широкой полосы частот (в идеальном случае для бесконечно большой полосы частот), то возникает генерация прямоугольных импульсов.

Генераторы прямоугольных импульсов могут работать в автоколебательном или ждущем режиме. На практике часто используют мультивибраторы – генераторы повторяющихся с постоянной частотой прямоугольных импульсов. Как правило, мультивибраторы работают в автоколебательном режиме. На выходе таких мультивибраторов возникают прямоугольные импульсы сразу при включении питания. Примером генераторов, работающих в ждущем режиме, является одновибратор – генератор одиночных прямоугольных импульсов, которые возникают на его выходе при подаче на вход сигналов, превышающих пороговый уровень.

Для расчёта генераторов прямоугольных импульсов на основе интегральных логических элементов необходимо знать и учитывать при расчётах основные параметры подобных микросхем:

E – напряжение питания микросхемы;

$U_{\text{ВЫХ}}^0$ – номинальное (типовое) напряжение на выходе логического элемента, находящегося в состоянии «0»;

$U_{\text{ВЫХ}}^1$ – номинальное (типовое) напряжение на выходе логического элемента, находящегося в состоянии «1»;

$I_{\text{ВХ}}^0$ – номинальный (типовой) ток на входе логического элемента, находящегося в состоянии «0»;

$I_{\text{ВХ}}^1$ – номинальный (типовой) ток на входе логического элемента, находящегося в состоянии «1»;

$U_{\text{ВЫХ.МАХ}}^0$ – максимально допустимое напряжение на выходе логического элемента, находящегося в состоянии «0», при котором не нарушается нормальная работа цифрового устройства, состоящего из многих идентичных логических элементов;

$U_{\text{ВЫХ.МИН}}^1$ – минимально допустимое напряжение на выходе логического элемента, находящегося в состоянии «1», при котором не нарушается нормальная работа цифрового устройства, состоящего из многих идентичных логических элементов;

$R_{\text{ВЫХ}}^0$ – выходное сопротивление логического элемента, находящегося в состоянии «0»;

$R_{\text{ВЫХ}}^1$ – выходное сопротивление логического элемента, находящегося в состоянии «1»;

$t_{3,\text{CP}}$ – среднее время задержки при переключении логического элемента: $t_{3,\text{CP}} = \frac{t_3^{10} + t_3^{01}}{2}$, где

t_3^{10} – типовое время задержки при переключении логического элемента из состояния «1» в состояние «0»,

t_3^{01} – типовое время задержки при переключении логического элемента из состояния «0» в состояние «1».

Кроме того, необходимо знать пороговое напряжение. Будем называть пороговым напряжением такое входное напряжение, при превышении которого в цепочке из бесконечно большого числа последовательно включённых идентичных инверторов (логических схем «НЕ») состояние выходного инвертора изменяется с «1» до «0» или наоборот. Пороговое напряжение определяется по передаточной (амплитудной) характеристике логических элементов.

Задача 9.1.: Определить пороговое напряжение для интегрального логического элемента серии ТТЛ, работающего в режиме инвертора, передаточная характеристика которого приведена на рис 9.1.

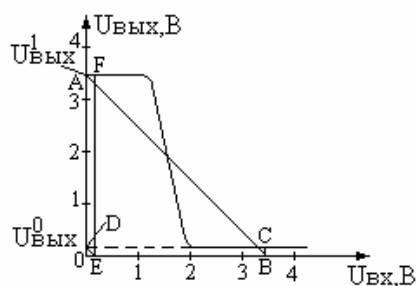


Рис.9.1. Передаточная характеристика логического элемента серии ТТЛ, работающего в режиме инвертора (логической схеме «НЕ»).

Пусть бесконечно большое количество логических элементов «И-НЕ», работающих в режиме инверторов, включены последовательно друг за другом (рис.9.2). Для упрощения решения задачи будем считать, что выходные сопротивления логических элементов в состояниях «1» и «0» пренебрежимо мало, т.е. $R_{\text{вых}}^0=0$ и $R_{\text{вых}}^1=0$.

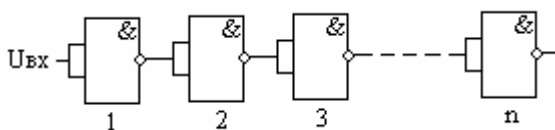


Рис.9.2. Последовательное включение n-го количества логических элементов «И-НЕ», работающих в режиме инвертора.

Предположим, что вход первого элемента подсоединён к «земле», т.е. подано напряжение равное нулю. Определим по передаточной характеристике, какие напряжения будут на выходах последующих элементов. Для этого, учитывая, что все логические элементы имеют идентичные передаточные функции, на рис.9.1 выполним следующие построения. Напряжению на входе первого инвертора, равного нулю, соответствует выходное напряжение, равное $U_{\text{вых}}^1$ (точка А). Поскольку $R_{\text{вых}}=0$, всё это напряжение будет действовать на входе второго инвертора. Проведём под углом -45° к оси ординат прямую до пересечения с осью абсцисс. Получим точку В, которая соответствует напряжению, действующему на входе второго инвертора. Восстановим перпендикуляр к оси абсцисс из точки В до пересечения с передаточной характеристикой и получим точку С. Проведя прямую из этой точки, параллельную оси абсцисс, на пересечении с осью ординат получим напряжение на выходе второго инвертора $U_{\text{вых}}^0$ (точка D). Это же напряжение будет действовать

на входе третьего инвертора. Проведём из точки D прямую с наклоном -45° к оси ординат, получим точку E. Восстановив перпендикуляр из точки E, на пересечении с передаточной характеристикой получим точку F, которая соответствует напряжению, получившемуся на выходе третьего инвертора. Это напряжение практически равно напряжению на выходе первого инвертора. Таким же образом можно убедиться в том, что на выходе каждого нечётного инвертора будет действовать напряжение $U^1_{\text{ВЫХ}}$, а на выходе каждого чётного – напряжение $U^0_{\text{ВЫХ}}$.

На рис.9.3(а,б) проведены аналогичные построения для разных напряжений на входе первого инвертора ($U_{\text{ВХ11}}=1,3\text{В}$ и $U_{\text{ВХ12}}=1,7\text{В}$).

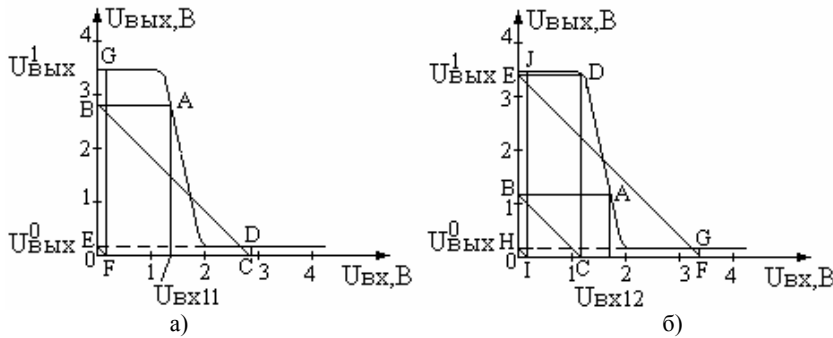


Рис.9.3. Передаточные характеристики инверторов и нахождение напряжений на выходах при их последовательном соединении
 а) при $U_{\text{ВХ11}}=1,3\text{В}$, б) $U_{\text{ВХ12}}=1,7\text{В}$.

Заметим, что при данных входных напряжениях первый инвертор находится в активном усилительном режиме. Об этом свидетельствует то обстоятельство, что отношение $\left| \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} \right|$ получается больше 1, т.е.

коэффициент усиления инвертора больше 1. (Анализ реальной передаточной характеристики показывает, что в данном случае $K=9-10$)

Из приведённых построений видно, что при $U_{\text{ВХ11}}=1,3\text{В}$ (рис.9.3.а), хотя на выходе первого инвертора напряжение меньше $U^1_{\text{ВЫХ}}$, на выходе третьего инвертора устанавливается напряжение $U^1_{\text{ВЫХ}}$ (точка G). Однако при $U_{\text{ВХ12}}=1,7\text{В}$ (рис.9.3.б) на выходе третьего инвертора устанавливается напряжение $U^0_{\text{ВЫХ}}$ (точка G на рис.9.3.б), а на выходе четвёртого инвертора $U^1_{\text{ВЫХ}}$ (точка J), т.е. на выходах всех нечётных инверторов устанавливается напряжение $U^0_{\text{ВЫХ}}$, а на выходах всех чётных – $U^1_{\text{ВЫХ}}$. Это означает, что напряжение $U_{\text{ВХ12}}=1,7\text{В}$ больше порогового.

Для нахождения порогового напряжения проведём из начала координат прямую с наклоном $+45^\circ$ к оси абсцисс. В точке пересечения с передаточной характеристикой получим выполнение следующих условий: $U_{ВХ1}=U_{ВЫХ1}=U_{ВХ2}=U_{ВЫХ2}=U_{ВХ3}=U_{ВЫХ3}=\dots=U_{ВХn}=U_{ВЫХn}$. Это означает, что все инверторы будут находиться в активном усилительном режиме.

Поскольку число последовательно соединённых инверторов равно бесконечности, мы получаем аналог идеального ОУ, для которого $K=\infty$. (Если использовать инверторы с реальной передаточной характеристикой элементов ТТЛ, то для получения коэффициента усиления, соответствующего коэффициенту усиления микросхемы стандартного ОУ необходимо использовать всего 5 инверторов).

Для реальных логических элементов, также как и в случае реального ОУ, работа в линейном режиме, при котором коэффициент усиления очень большой, невозможна без введения отрицательной обратной связи. В реальном ОУ на выходе установится напряжение, близкое к $-E_{ПИТ}$ или $+E_{ПИТ}$. В случае логических элементов, на выходе последнего инвертора получится либо $U_{ВЫХ}^1$, либо $U_{ВЫХ}^0$. Таким образом, для получения значения порогового напряжения, необходимо на графике передаточной характеристики инвертора провести из начала координат прямую с наклоном $+45^\circ$ к оси абсцисс. В точке пересечения с передаточной характеристикой получим $U_{ВХ1}=U_{ПОР}=U_{ВЫХ1}=1,6В$.

Задача 9.2. Определить частоту генерации импульсов мультивибратора, выполненного на двух микросхемах логических элементов серии ТТЛ, выполняющих функцию инверторов (схема приведена на рис.9.4). Пороговое напряжение считать равным 1,6В, определённым в предыдущей задаче.

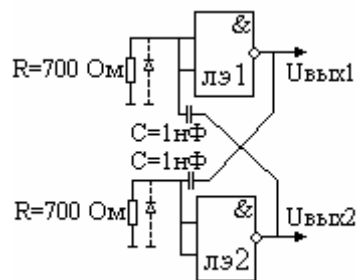


Рис. 9.4. Схема мультивибратора, выполненного на двух логических элементах «И-НЕ».

Параметры микросхем основных элементов серии ТТЛ К155 следующие:

$$\begin{aligned} I_{\text{ВХ}}^0 &= -1,6 \text{ мА}, I_{\text{ВХ}}^1 = 0,04 \text{ мА}, \\ U_{\text{ВЫХ}}^0 &= 0,4 \text{ В}, U_{\text{ВЫХ}}^1 = 2,4 \text{ В}, \\ U_{\text{ВХ.МАХ}}^0 &= 0,8 \text{ В}, U_{\text{ВХ.МИН}}^1 = 2,0 \text{ В}, \\ R_{\text{ВЫХ}}^0 &= 10 \text{ Ом}, R_{\text{ВЫХ}}^1 = 300 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Решение: Мультивибратор представляет собой два инвертора, замкнутых в петлю положительной обратной связи через две дифференцирующие RC-цепи.

Если оба инвертора, оказываются в активном режиме, как это случается в переходном режиме, нетрудно показать, что такой режим оказывается неустойчивым в большой области частот. Это приводит к генерации устройством прямоугольных импульсов. При этом, при переходе их одного состояния в другое напряжение на выходе каждого из логических элементов изменяется от $U_{\text{ВЫХ}}^0$ до $U_{\text{ВЫХ}}^1$ или наоборот.

Поскольку схема мультивибратора полностью симметрична, для определения частоты генерации необходимо рассчитать время одного из полупериодов колебаний напряжения. Для этого нарисуем временную диаграмму напряжения на входе одного из логических элементов, например, первого (рис.9.5). (Полные эпюры напряжений на каждом из входов и выходов логических элементов приведены в описании лабораторного практикума по курсу [2]).

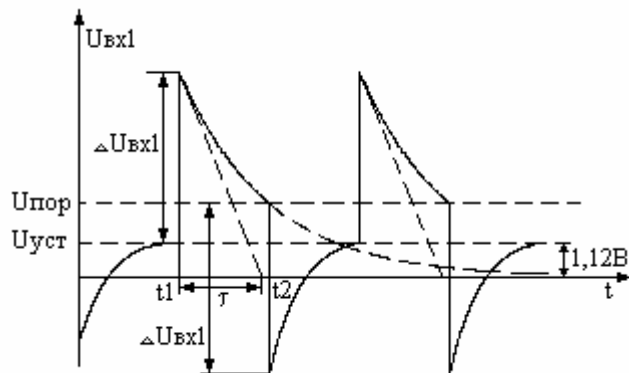


Рис.9.5. Временная диаграмма напряжения на входе одного из логических элементов.

До момента t_1 логический элемент (ЛЭ1) находится в состоянии «1», т.е. на его входе было низкое напряжение, меньшее, чем $U_{\text{ВХ.МАХ}}^0$. При

этом через открытые эмиттерные переходы входного многоэмиттерного транзистора, протекает ток, равный $I_{\text{ВХ}}^0 = -1,6 \text{ мА}$ (см. задачи темы №8). Этот ток создаёт напряжение на входе, равное установившемуся напряжению $U_{\text{УСТ}} = I_{\text{ВХ}}^0 R = 1,12 \text{ В}$.

В момент t_1 на выходе второго элемента происходит скачок напряжения от $U_{\text{ВЫХ}}^0$ до $U_{\text{ВЫХ}}^1$. (Причину этого скачка напряжения мы установим позже). Для логического элемента ТТЛ серии К155 этот скачок напряжения ΔU при отсутствии нагрузки на выходе второго инвертора будет равен: $\Delta U = U_{\text{ВЫХ}}^1 - U_{\text{ВЫХ}}^0 = (2,4 - 0,4) \text{ В} = 2 \text{ В}$.

Определить скачок напряжения на входе первого инвертора можно по эквивалентной схеме, приведённой на рис.9.6. В приведённой эквивалентной схеме учтено, что скачок напряжения ΔU закроет эмиттерные переходы входного многоэмиттерного транзистора логического элемента ЛЭ1 (см. задачи темы №8) и сопротивление логического элемента станет очень большим и его можно не учитывать.

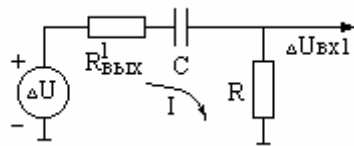


Рис.9.6. Эквивалентная схема для определения скачка напряжения на входе первого инвертора.

Напряжение ΔU в момент t_1 вызовет ток равный $I(t_1) = \frac{\Delta U}{R^1_{\text{ВЫХ}} + R}$, который уменьшит скачок напряжения на входе первого инвертора до величины $\Delta U_{\text{ВХ1}} = \Delta U \frac{R}{R^1_{\text{ВЫХ}} + R} = \Delta U \frac{700}{300 + 700} = 0,7 \Delta U = 1,4 \text{ В}$ (см. задачи темы №1 данного сборника). Таким образом, в момент t_1 на входе первого инвертора установится напряжение равное: $U_{\text{ВХ1}}(t_2) = \Delta U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{УСТ}} = (1,4 + 1,12) \text{ В} = 2,52 \text{ В}$.

Ток I , протекающий через конденсатор (см. рис.9.6), будет его заряжать, а напряжение на входе первого инвертора будет стремиться к нулю с постоянной времени τ равной

$$\tau = C(R^1_{\text{ВЫХ}} + R) = 1 \cdot 10^{-9} (300 + 700) \text{ с} = 10^{-6} \text{ с} = 1 \text{ мкс}:$$

$$U_{\text{ВХ1}}(t) = (\Delta U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{УСТ}}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}.$$

Этот процесс будет продолжаться до момента t_2 , при котором напряжение $U_{ВХ1}(t_2)$ достигнет порогового напряжения, при котором из-за возникновения положительной обратной связи произойдёт переброс логических элементов в новое состояние. Для определения времени полупериода колебаний $t_2 - t_1 = T/2$ запишем уравнение:

$$U(t_2) = U_{ПОР} = (\Delta U_{ВХ1} + U_{УСТ}) e^{-\frac{T}{2\tau}}.$$

Отсюда после логарифмирования и подстановки численных значений получим: $T = 2\tau \ln \frac{\Delta U_{ВХ1} + U_{УСТ}}{U_{ПОР}} = 2 * 10^{-6} \ln \frac{2,52}{1,6} = 0,91 \text{ мкс}$, т.е. $f = 1/T = 1,1$

МГц.

Заметим, что восстановление напряжения на входе первого логического элемента будет происходить достаточно быстро, т.к. в логических элементах ТТЛ на входах обычно включены диоды (диоды обозначены пунктиром на рис.8.4), которые в статическом режиме, всегда закрыты, поскольку на входах в статическом режиме получается всегда положительное напряжение. При возникновении отрицательного перепада напряжения на входе первого логического элемента из-за перепада напряжения на выходе второго логического элемента с $U^1_{ВЫХ}$ до $U^0_{ВЫХ}$ диод на входе открывается, что способствует быстрому восстановлению напряжения на входе первого логического элемента до уровня $U_{УСТ}$.

Задача 9.3. Определить максимальную и минимальную частоту мультивибратора, рассчитанного в предыдущей задаче, полагая, что микросхема логического элемента имеет $t_{3,CP} = 18 \text{ мкс}$, $f_{МАКС.ЛЭ} = 10 \text{ МГц}$, а максимально возможная ёмкость конденсаторов равна 1 мкФ (чем больше ёмкость конденсаторов, тем больше их размеры и меньше температурная стабильность).

Решение. Максимальная и минимальная частоты мультивибратора могут быть рассчитаны из условий гарантированной надёжности работы и условий практической потери работоспособности.

Максимальную частоту $f'_{МАКС}$, при которой мультивибратор практически теряет работоспособность можно определить по формуле:

$$f'_{МАКС} = \frac{1}{4t_{3,CP}}, \text{ где } t_{3,CP} - \text{среднее время задержки логического элемента.}$$

$$\text{Отсюда } f'_{МАКС} = \frac{1}{4 * 18 * 10^{-9}} \approx 14 \text{ МГц.}$$

Однако эта частота получается больше, чем максимальная частота работы логических элементов серии ТТЛ К155: $f_{МАКС.ЛЭ} = 10 \text{ МГц}$. Поэтому

можно считать, что гарантированная максимальная частота надёжной работы мультивибратора равна $f_{\text{МАКС.ЛЭ}}$, т.е. 10МГц.

Для определения минимально возможной частоты надёжной работы мультивибратора необходимо определить максимально возможные сопротивления резисторов R .

При этом для надёжной работы логических элементов с необходимой помехоустойчивостью, т.е. гарантией от ложных перебросов логических элементов, необходимо, чтобы входные токи логических элементов $I_{\text{ВХ}}^0$, протекающие по этим резисторам, не должны создавать напряжений больше, чем $U_{\text{ВХ.МАКС}}^0$. Отсюда $R' = \frac{U_{\text{ВХ.МАКС}}^0}{I_{\text{ВХ}}^0} = \frac{0,8\text{В}}{1,6\text{мА}} = 500\text{Ом}$.

Мультивибратор может потерять работоспособность, если входные токи логических элементов создадут на сопротивлениях R напряжения, равные пороговым, т.е. $R'' = \frac{U_{\text{ПОР}}}{I_{\text{ВХ}}^0} = \frac{1,6\text{В}}{1,6\text{мА}} = 1\text{кОм}$.

Отсюда, используя формулы, полученные при решении предыдущей задачи, получаем $\tau' = (300 + 500) \cdot 10^{-6} \text{с} = 0,8 \text{ мс}$, $\tau'' = (300 + 1000) \cdot 10^{-6} \text{с} = 1,3 \text{ мс}$, т.е. $f_{\text{МИН}} = 1,25\text{кГц}$, $f'_{\text{МИН}} = 0,77\text{кГц}$.

Замечание. Рассмотренная в задачах 9.2 и 9.3 схема мультивибратора (рис.9.4) имеет один принципиальный недостаток. При включении питания переходные процессы могут развиваться так, что на выходах логических элементов может одновременно установиться высокое напряжение (состояние «1»), т.е. мультивибратор не будет генерировать импульсы, и потребуются внешнее воздействие, чтобы начался процесс генерации.

Задача 9.4. Определить возможность возникновения генерации импульсов в мультивибраторе в двух случаях: при перебросе ключа Кл из положения 1 в положение 2 и переброс ключа из положения 3 в положение 2 (рис.9.7).

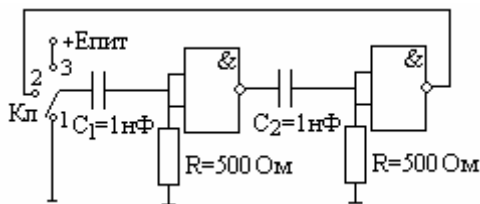


Рис.9.7. Схема мультивибратора с дополнительным ключом Кл.

Заметим, что при включении ключа в положении 2 образуемая схема полностью идентична схеме мультивибратора, приведённой на рис.9.4.

При включении ключа в положении 1 положительная обратная связь в схеме отсутствует и генерация импульсов невозможна. При этом на входах логических элементов действует напряжение, равное $U_{\text{ВХ.МАКС}}^0$, (см. предыдущую задачу), а выходные напряжения элементов равны $U_{\text{ВЫХ}}^1$. Конденсатор C_1 заряжен до напряжения $U_{\text{ВХ.МАКС}}^0$. В момент переключения ключа в положение 2 напряжение на конденсаторе остаётся неизменным. Но левая его обкладка будет подключена к напряжению $U_{\text{ВЫХ}}^1$, что вызовет положительный скачок напряжения на входе первого инвертора. Это положительное напряжение, большее, чем $U_{\text{ПОР}}$ перебросит первый инвертор в состояние «0», что в свою очередь приведёт к отрицательному скачку напряжения на входе второго инвертора, который останется в состоянии «1». Таким образом, два инвертора будут находиться в противоположных состояниях.

Далее будет происходить заряд конденсатора C_1 и уменьшение напряжения на входе первого инвертора. В момент достижения этим напряжением напряжения $U_{\text{ПОР}}$ произойдёт переброс инверторов в противоположное состояние. Возникает генерация импульсов. Таким образом, при переключении ключа из положения 1 в положение 2 мультивибратор начинает нормально работать.

При включении ключа в положении 3 положительная обратная связь в схеме также отсутствует, на входах обоих инверторов действует напряжение $U_{\text{ВХ.МАКС}}^0$, а на выходах - $U_{\text{ВЫХ}}^1$. При этом конденсатор C_1 заряжен до напряжения равного $E_{\text{ПИТ}} - U_{\text{ВХ.МАКС}}^0$. При переключении ключа в положение 2 напряжение на нём не изменится, но на левой его обкладке возникнет отрицательный скачок напряжения равный $\Delta U = U_{\text{ВЫХ}}^1 - E$ (для логического элемента «И-НЕ» серии ТТЛ 155 этот отрицательный скачок напряжения будет равен $\Delta U = 2,4 - 5 = -2,6\text{В}$). Отрицательный скачок напряжения на входе первого инвертора: $U_{\text{ВХ1}} = U_{\text{ВХ.МАКС}}^0 - \Delta U = 0,8 - 2,6 = -1,8\text{В}$. Полученное отрицательное напряжение не изменит состояние «1» первого инвертора. Таким образом, при переключении ключа из положения 3 в положение 2 оба логических элемента остаются в состоянии «1», а устройство не будет генерировать импульсы.

Приведённые соображения подтверждают сделанное выше замечание о ненадёжности самовозбуждения рассмотренной схемы мультивибратора при включении питания, т.к. при переходном процессе оба логических элемента могут попасть в состояние «1».

Задача 9.5. Рассчитать полупериоды мультивибратора, схема которого приведена на рис 9.8. Считать, что в качестве инвертора использованы логические элементы n-МОП серии 564 при напряжении питания $E=5\text{В}$. При этом основные параметры инверторов, необходимые для расчётов следующие: $U_{\text{ВЫХ}}^0=0,05\text{В}$, $U_{\text{ВЫХ}}^1=4,95\text{В}$, $U_{\text{ПОР}}=3\text{В}$, $R_{\text{ВЫХ}}^1=2\text{кОм}$, $R_{\text{ВЫХ}}^0=0,2\text{кОм}$, $R=10\text{кОм}$, $C=1\text{нФ}$. Входные токи логических элементов очень малы, т.к. они представляют собой затворные токи МОП-транзисторов, и их можно считать равными нулю.

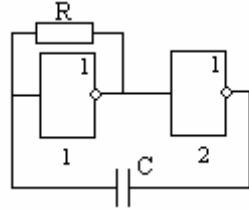


Рис. 9.8. Схема мультивибратора с одной времязадающей цепью.

Решение. Прежде всего отметим, что первый инвертор через сопротивление R охвачен местной отрицательной обратной связью по постоянному току, поэтому при разрыве общей положительной связи (например, при отключении конденсатора C от выхода второго инвертора) первый инвертор будет работать в усилительном режиме. При этом должно выполняться условие $U_{\text{ВХ1}}=U_{\text{ВЫХ1}}$, поскольку по сопротивлению R ток протекать не может, т.к. затворные токи МОП-транзисторов очень малы. Условие $U_{\text{ВХ1}}=U_{\text{ВЫХ1}}$ может выполняться лишь при равенстве этих напряжений $U_{\text{ПОР}}$ (см. задачу 9.1 по определению $U_{\text{ПОР}}$). Напряжение на выходе первого инвертора, равное $U_{\text{ПОР}}$, подаётся на вход второго инвертора и устанавливает его также в усилительный режим. Если при этом замкнуть цепь положительной обратной связи, подключив конденсатор C к выходу второго инвертора, то поскольку $K\gamma>1$, в схеме неизбежно должна возникнуть генерация колебаний. При этом временно устойчивые состояния в мультивибраторе возникают из-за передачи положительных и отрицательных скачков напряжения с выхода второго инвертора на вход первого – через конденсатор C .

Из приведённых соображений следует также, что переключение мультивибратора из одного состояния в другое происходит при достижении напряжения на входе первого инвертора, равного $U_{\text{ПОР}}$.

Для решения задачи необходимо знать, какой перепад выходного напряжения возникает при переключении второго инвертора, какое при

этом возникает напряжение на входе первого инвертора и к какому уровню стремится это напряжение.

Рассмотрим первый полупериод. Условимся считать первым тот, при котором напряжение на выходе второго инвертора изменяется от $U^0_{\text{ВЫХ}}$ до $U^1_{\text{ВЫХ}}$, т.е. в момент t_1 возникает положительный скачок напряжения, равный $\Delta U = U^1_{\text{ВЫХ}} - U^0_{\text{ВЫХ}} = 4,9\text{В}$.

Напряжение на входе первого инвертора в момент переключения равнялось $U_{\text{ПОР}}$, а поскольку напряжение на конденсаторе при переключении не изменяется на входе первого инвертора возникает напряжение, равное $U_{\text{ВХ}}(t_1) = U_{\text{ПОР}} + \Delta U = 3\text{В} + 4,9\text{В} = 7,9\text{В}$. Это напряжение установит на выходе первого инвертора $U^0_{\text{ВЫХ}}$, которое будет поддерживать в первый полупериод напряжение на выходе второго инвертора, равное $U^1_{\text{ВЫХ}}$.

Для определения процесса перезарядки конденсатора используем эквивалентную схему, приведённую на рис. 9.9.

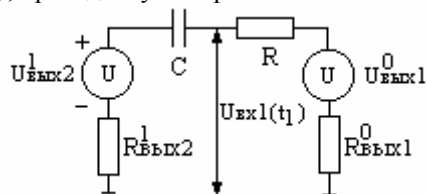


Рис. 9.9. Эквивалентная схема для расчёта изменения напряжения на входе первого инвертора в первый полупериод.

В приведённой эквивалентной схеме не учитывается входное сопротивление первого инвертора, поскольку входной ток инверторов равен нулю. Первый инвертор заменяется источником напряжения $U^0_{\text{ВЫХ1}}$ и его выходным сопротивлением $R^0_{\text{ВЫХ1}}$. Второй инвертор заменяется источником напряжения $U^1_{\text{ВЫХ2}}$ и его выходным сопротивлением $R^1_{\text{ВЫХ2}}$.

Из приведённой эквивалентной схемы следует, что напряжение $U_{\text{ВХ1}}$ будет уменьшаться от уровня $U_{\text{ВХ}}(t_1)$ по экспоненте с постоянной времени $\tau_1 = (R^1_{\text{ВЫХ2}} + R + R^0_{\text{ВЫХ1}})C = (2\text{кОм} + 10\text{кОм} + 0,2\text{кОм}) \cdot 10^{-9}\text{Ф} = 1,22 \cdot 10^{-5}\text{с}$ до уровня $U^0_{\text{ВЫХ1}}$. Эпюра входного напряжения первого инвертора в зависимости от времени имеет вид, представленный на рис. 9.10.

Можно записать следующее уравнение изменения напряжения на входе первого инвертора $U_{\text{ВХ}}(t) - U^0_{\text{ВЫХ1}} = [U_{\text{ВХ}}(t_1) - U^0_{\text{ВЫХ1}}] e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}$.

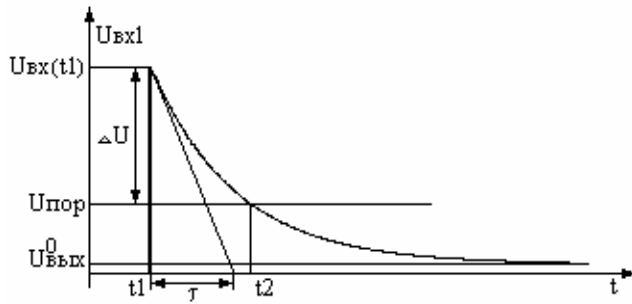


Рис.9.10. Изменения напряжения на входе первого инвертора в первый полупериод.

Переброс во второе временно устойчивое состояние произойдёт в момент времени t_2 , когда $U_{BX}(t_2) = U_{ПОР}$. Полагая, что первый полупериод

T_1 равен $T_1 = t_2 - t_1$, получим уравнение $U_{ПОР} - U_{ВЫХ1}^0 = (\Delta U + U_{ПОР} - U_{ВЫХ1}^0) e^{-\frac{T_1}{\tau}}$.
Отсюда $T_1 = \tau \ln \frac{\Delta U + U_{ПОР} - U_{ВЫХ1}^0}{U_{ПОР} - U_{ВЫХ1}^0} = 1,22 \cdot 10^{-5} \ln \frac{4,9 + 3 - 0,05}{3 - 0,05} \text{ с} \cong 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

Для расчёта второго полупериода необходимо учесть, что при втором переключении инверторов на выходе второго инвертора возникает отрицательный перепад напряжения $\Delta U = U_{ВЫХ}^0 - U_{ВЫХ}^1$. Этот отрицательный скачок напряжения ΔU передается через конденсатор на вход первого инвертора. Таким образом, на входе первого инвертора возникнет отрицательное напряжение, равное

$$U_{BX}(t_2) = U_{ПОР} - \Delta U = 3\text{В} - 4,9\text{В} = -1,9\text{В}.$$

Для определения закона изменения напряжения на входе первого инвертора воспользуемся эквивалентной схемой, приведённой на рис.9.11.

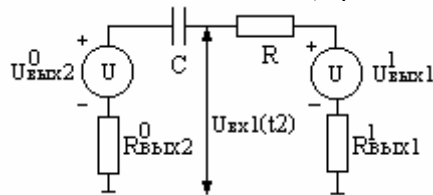


Рис.9.11. Эквивалентная схема для определения изменения напряжения на входе первого инвертора во второй полупериод.

Из приведённой эквивалентной схемы следует, что напряжение на входе первого инвертора будет стремиться к уровню $U_{\text{ВЫХ1}}^1$. Таким образом, изменение во времени напряжения на входе первого инвертора будет происходить от напряжения $U_{\text{ВХ}}(t_2) = U_{\text{ПОР}} - \Delta U$ до напряжения $U_{\text{ПОР}}$ по экспоненте с той же постоянной времени τ , что и в первом полупериоде (т.к. $R_{\text{ВЫХ1}}^1 = R_{\text{ВЫХ2}}^1$, $R_{\text{ВЫХ1}}^0 = R_{\text{ВЫХ2}}^0$). Эюра изменения напряжения на входе первого инвертора приведена на рис.9.12.

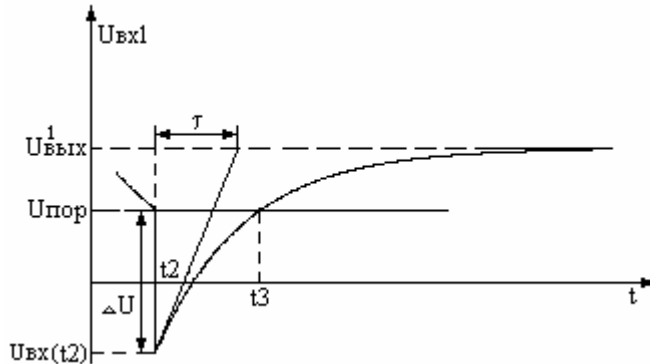


Рис.9.12. Изменение напряжения на входе первого инвертора во второй полупериод.

Изменение напряжения на входе первого инвертора можно выразить следующей формулой $U_{\text{ВХ1}}(t) = (\Delta U + U_{\text{ВЫХ1}}^1 - U_{\text{ПОР}})(1 - e^{-\frac{t-t_2}{\tau}}) - (\Delta U - U_{\text{ПОР}})$. Переброс инверторов произойдёт в момент t_3 , т.е. при достижении напряжения $U_{\text{ПОР}}$. Полагая, что второй полупериод равен $T_2 = t_3 - t_2$, получаем

$$T_2 = \tau \ln \frac{\Delta U + U_{\text{ВЫХ1}}^1 - U_{\text{ПОР}}}{U_{\text{ВЫХ1}}^1 - U_{\text{ПОР}}} = 1,22 \cdot 10^{-5} \ln \frac{4,9 + 4,95 - 3}{4,95 - 3} \text{ с} \approx 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Таким образом, первый и второй полупериоды мультивибратора не равны друг другу.

Задача 9.6. Рассчитать время выдержки одновибратора, схема которого приведена на рис 9.13, и выполненного на логических элементах ТТЛ (серии 155).

Считать, что в устойчивом состоянии на вход подано напряжение +5В, а запускающим импульсом является отрицательный скачок напряжения, понижающий напряжение на входе до нуля.

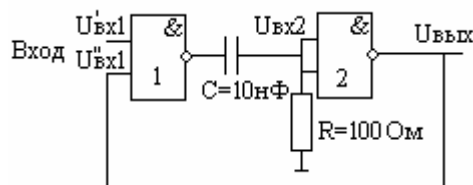


Рис.9.13. Схема одновибратора на логических элементах ТТЛ.

Решение. Определим положение логических элементов в устойчивом состоянии одновибратора. Прежде всего, заметим, что входы второго логического элемента «И-НЕ» подключены к «земле» через сопротивление $R=100\text{Ом}$. Входной ток логического элемента «И-НЕ» равный $1,6\text{мА}$ создаёт на этом сопротивлении напряжение $U_{\text{уст}}=0,16\text{В}$, которое меньше, чем $U_{\text{пор}}$. Таким образом, можно считать, что на вход второго логического элемента подан «0». Это означает, что на выходе этого логического элемента «И-НЕ» установится состояние «1». Следовательно, на оба входа первого логического элемента «И-НЕ» поданы «1» (напряжение $+5\text{В}$ соответствует состоянию «1») и логический элемент будет находиться в состоянии «0».

При приходе на вход первого логического элемента отрицательного скачка напряжения (напряжение на входе уменьшается до нуля) напряжение на его выходе увеличивается скачком до напряжения $U_{\text{вых}}^1$. Этот скачок напряжения через дифференцирующую цепочку передаётся на вход второго логического элемента. На какой-то момент оба логических элемента оказываются в усилительном режиме, возникает положительная обратная связь, ускоряющая переброс логических элементов во временно устойчивое состояние, при котором $U_{\text{вых1}}=U_{\text{вых}}^1$, а $U_{\text{вых2}}=U_{\text{вых}}^0$. На входе второго логического элемента возникает скачок напряжения $\Delta U_1=U_{\text{вых}}^1-U_{\text{вых}}^0=2,4\text{В}-0,4\text{В}=2,0\text{В}$.

Время нахождения одновибратора во временно устойчивом состоянии будет определяться процессом перезарядки конденсатора C . Этот процесс будет полностью аналогичен процессу перезарядки конденсатора в схеме мультивибратора, приведённой на рис.9.4 (см. задачу 9.2). Следовательно, для расчёта времени выдержки одновибратора (времени нахождения его во временно устойчивом состоянии) можно воспользоваться полученной при решении задачи 9.2 формулой:

$$T=\tau \ln \frac{U_{\text{уст}}+\Delta U}{U_{\text{пор}}} = 10^{-8}\text{Ф} \cdot 100\text{Ом} \ln \frac{0,16+2}{1,6} = 3 \cdot 10^{-7}\text{с}.$$

Временные диаграммы работы одновибратора приведены в описании лабораторной работы [2].

Контрольные вопросы

1. В каких случаях усилители могут превратиться в генераторы электрических колебаний?
2. Какое устройство можно реализовать при охвате усилителя глубокой положительной обратной связью по постоянному току?
3. Как реализовать генератор синусоидальных электрических колебаний?
4. Какие генераторы прямоугольных импульсов Вы знаете? Чем они отличаются?
5. Какие параметры интегральных логических элементов необходимо знать, чтобы рассчитывать генераторы прямоугольных импульсов на их основе?
6. Что такое пороговое напряжение логического элемента «НЕ»?
7. Как определить пороговое напряжение логического элемента «НЕ»?
8. Нарисуйте схему мультивибратора, выполненного на двух логических элементах «И-НЕ».
9. Какие состояния мультивибратора можно считать временно устойчивыми, а какое неустойчивым?
10. Что определяет интервал времени нахождения мультивибратора во временно устойчивом состоянии?
11. Из каких соображений выбирают значения сопротивлений резисторов в схеме мультивибратора на двух логических элементах «И-НЕ»?
12. Какими причинами ограничиваются минимальная и максимальная частоты мультивибратора?
13. По какой причине мультивибратор не может функционировать в нормальном режиме?
14. Какие коммутации необходимо выполнить, чтобы мультивибратор при включении питания начал бы генерировать прямоугольные импульсы?
15. Может ли логический элемент «ИЛИ-НЕ» работать в линейном активном режиме? Что для этого необходимо сделать?
16. Какое принципиальное отличие интегральных логических элементов, выполненных по МДП-технологии от логических элементов, выполненных по биполярной технологии?
17. Как определить скачок напряжения на выходе логического элемента при переключении его из одного состояния в другое?

18. Чему будут равны входное и выходное напряжения инвертора на МДП-транзисторах при охвате его отрицательной обратной связью, осуществляемой соединением входа и выхода инвертора через резистор?

19. Что такое одновибратор?

20. При каком условии одновибратор переходит во временно устойчивое состояние?

21. Как долго одновибратор находится во временно устойчивом состоянии?

При ответе на контрольные вопросы воспользуйтесь литературой, приведённой на следующей странице: [2-5,7,10,11].