

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

В.А. Шалимов, А.М. Заболоцкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА НА
КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С
ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ (КМДП)**

Руководство к лабораторной работе

Томск 2023

Шалимов В.А., Заболоцкий А.М. Исследование логического элемента на комплементарных полевых транзисторах с индуцированным каналом (КМДП): руководство к лабораторной работе. Учебно-методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2023. – 17 с.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол 3 от 15.02.2023

© Шалимов В.А., Заболоцкий А.М., 2023

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные характеристики и параметры логических элементов.....	4
2. Описание лабораторного макета.....	8
3. Описание лабораторной работы	11
Список литературы.....	17

Введение

Настоящее руководство содержит описание лабораторной работы «Исследование логического элемента на комплементарных полевых транзисторах с индуцированным каналом (КМДП)».

Цифровые интегральные микросхемы (ИС) представляют собой электронные устройства, позволяющие строить практически все узлы и блоки ЦЭВМ, в которых обрабатываемая информация представлена в виде двоичных чисел. Переменные величины и функции от них, которые могут принимать только два значения 0 и 1, называются соответственно логическими переменными и логическими функциями. Свойства логических функций изучает Булева алгебра, а устройства, реализующие логические функции, называются логическими или цифровыми.

Логические элементы (ЛЭ) составляют основу цифровых устройств и основными являются элементы, реализующие логические функции НЕ, ИЛИ, И. В Булевой алгебре доказано, что любые логические операции могут быть выполнены с помощью ЛЭ только одного типа ИЛИ-НЕ или И-НЕ. Следовательно, любое цифровое устройство может быть построено из ЛЭ одного типа, однако на практике не ограничиваются одним типом ЛЭ. Отечественная промышленность выпускает несколько типов ЛЭ, объединенных в отдельные серии. Каждая серия представляет собой набор логических ИС, выполненных на одной конструкторско-технологической основе, но отличающихся реализуемой логической функцией.

В каждой серии ИС имеется так называемый базовый элемент, выполняющий основную логическую операцию, и ряд дополнительных, которые обеспечивают логическую полноту серии и позволяют более рационально проектировать изделие. Так как дополнительные элементы играют вспомогательную роль, для анализа работы определенной серии достаточно рассмотреть лишь базовый элемент.

1. Основные характеристики и параметры логических элементов (ЛЭ)

Основной статической характеристикой ЛЭ является передаточная характеристика – зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ от напряжения на одном из входов при постоянном напряжении других, равных $U_{вх}^0$ или $U_{вх}^1$ в зависимости от типа элемента. Передаточная характеристика инвертирующего ЛЭ представлена на рис. 1.1

Она имеет три четко выраженных участка. Участок 1 соответствует состоянию $U_{вых} = U_{вх}^0$, участок 2 – состоянию $U_{вых} = U_{вх}^1$. Кроме того, имеется промежуточный участок 3, на котором состояние ЛЭ не определено. В статическом режиме соответствующие участку 3 значения напряжений недопустимы. Границы участков

определяются точками А и В единичного усиления, в которых $dU_{\text{вых}}/dU_{\text{вх}}=1$. Входные напряжения, определяющие границы участков, называют порогами переключения $U_{\text{пор}}^0$ и $U_{\text{пор}}^1$. Разность напряжений логической 1 и логического 0 называют логическим перепадом $U_{\text{лог}}=U_{\text{вых}}^1-U_{\text{вых}}^0$. В тех случаях, когда область переключения не очень широкая, т.е. $U_{\text{пор}}^1-U_{\text{пор}}^0 \ll U_{\text{лог}}$, пользуются понятием среднего порога переключения $U_{\text{пор ср}}=(U_{\text{пор}}^0+U_{\text{пор}}^1)/2$.

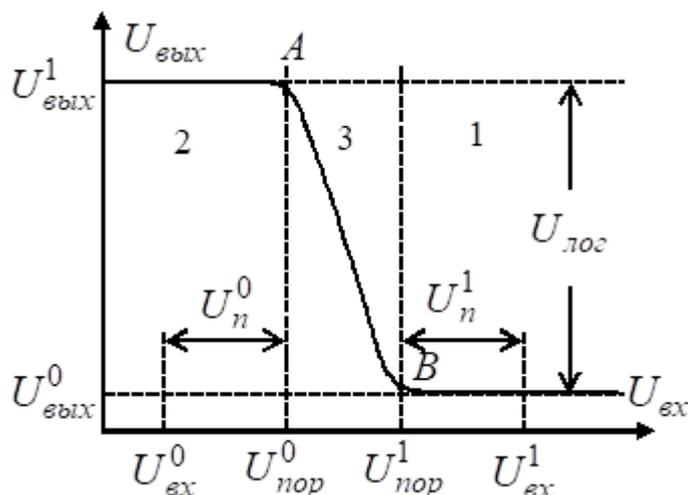


Рис. 1.1– Передаточная характеристика инвертирующего ЛЭ

Помимо логических сигналов на входах могут появляться напряжения помехи, которые либо повышают, либо понижают входное напряжение. Если на входе действует напряжение $U_{\text{вх}}^0$, то опасны помехи, имеющие положительную полярность, т.к. при достаточно большом напряжении помехи рабочая точка на передаточной характеристике может сместиться в область переключения 3, что приведет к сбою в работе, т.е. ложному изменению выходных напряжений в цифровом устройстве. При поступлении на вход напряжения $U_{\text{вх}}^1$ и напряжения помехи отрицательной полярности также возможно ложное срабатывание. Из рис. 1.1 видно, что максимально допустимые напряжения помехи положительной полярности U_n^0 при $U_{\text{вх макс}}^0$ на входе $U_n^0=U_{\text{пор}}^0-U_{\text{вх макс}}^0$ и отрицательной полярности U_n^1 при $U_{\text{вх мин}}^1$ на входе $U_n^1=U_{\text{вх мин}}^1-U_{\text{пор}}^1$ соответственно. Для оценки помехоустойчивости ЛЭ помимо напряжений U_n^0 и U_n^1 используют относительные величины $K_n^0=U_n^0/U_{\text{лог}}$ и $K_n^1=U_n^1/U_{\text{лог}}$, называемые коэффициентами помехоустойчивости.

Коэффициент разветвления по выходу n (нагрузочная способность) характеризует максимальное число входов логических элементов, аналогичных рассматриваемому, которые можно подключить к выходу. Данное увеличение нагрузочной способности ограничено, поскольку с ростом числа нагрузок ухудшаются другие основные параметры ЛЭ, главным образом помехоустойчивость и быстродействие. Так помехоустойчивость ЛЭ

на биполярных транзисторах уменьшается с ростом числа нагрузок, так как увеличиваются выходные токи в обоих состояниях, а это приводит к снижению уровня $U_{вых}^1$ и повышению уровня $U_{вых}^0$. Среднее время задержки сигнала возрастает вследствие увеличения емкости нагрузки. По этой причине в состав одной серии микросхем вводят ЛЭ с различной нагрузочной способностью: $n = 4 \div 25$. Коэффициент объединения по входу m равен числу входов ЛЭ. Обычно $m = 2 \div 8$.

Мощность, потребляемая ЛЭ от источника питания, зависит от его логического состояния, т.к. изменяется ток $I_{ин}$ в цепи питания. ЛЭ потребляет ток $I_{ин}^0$ при $U_{вых} = U_{вых}^0$ и ток $I_{ин}^1$ при $U_{вых} = U_{вых}^1$, поэтому средняя потребляемая в статическом режиме мощность равна $P_{cp} = 0,5E(I_{ин}^0 + I_{ин}^1)$. Зная среднюю мощность, потребляемую одним элементом, и число ЛЭ N в цифровом устройстве, можно вычислить среднюю мощность $P = P_{cp} \cdot N$, потребляемую всем устройством.

Мощность, потребляемую ЛЭ дополнительно в процессе переключения, называют динамической. Она пропорциональна частоте переключения ЛЭ, поэтому динамическую мощность определяют при заданной частоте переключения, близкой к максимальной. В основном динамическая мощность связана с затратами энергии на заряд паразитных емкостей.

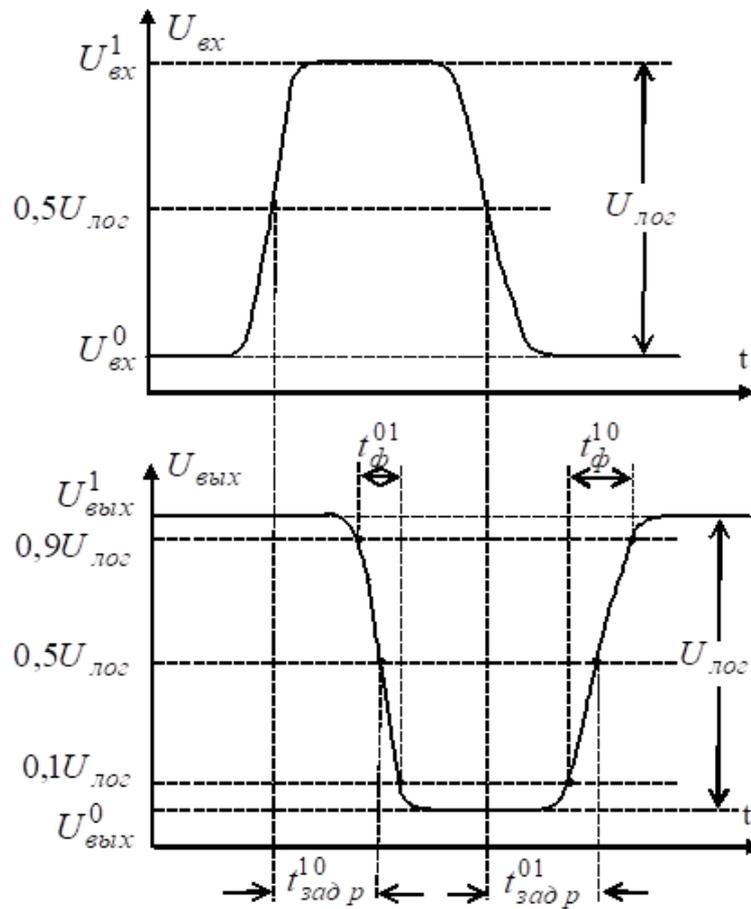


Рис. 1.2– Временные диаграммы напряжений на входе и выходе логического элемента

Быстродействие ЛЭ оценивается средним временем задержки распространения сигнала

$$t_{\text{зад } p \text{ ср}} = \frac{(t_{\text{зад } p}^{01} + t_{\text{зад } p}^{10})}{2}$$

где $t_{\text{зад } p}^{01}$ и $t_{\text{зад } p}^{10}$ – времена задержки распространения сигнала при переходе напряжения на выходе от значения $U_{\text{вых}}^0$ к $U_{\text{вых}}^1$ и от $U_{\text{вых}}^1$ к $U_{\text{вых}}^0$ соответственно, измеряемые на уровне $0,5 U_{\text{лог}}$ (см. рис 2.3).

Представляют интерес длительности фронтов импульсов $t_{\text{ф}}^{01}$ и $t_{\text{ф}}^{10}$, измеряемые между уровнями 0,1 и 0,9 от амплитуды, при переходе напряжения на выходе от $U_{\text{вых}}^0$ к $U_{\text{вых}}^1$ и от $U_{\text{вых}}^1$ к $U_{\text{вых}}^0$ соответственно.

Для измерения среднего времени задержки распространения сигнала $t_{\text{зад } p \text{ ср}}$ часто используют кольцевой генератор, представляющий замкнутую в кольцо цепочку нечетного числа K инвертирующих ЛЭ. Схема генератора представлена на рис. 1.3 В таком генераторе возбуждаются колебания с периодом $T_{\Gamma} = 2K \cdot t_{\text{зад } p \text{ ср}}$.

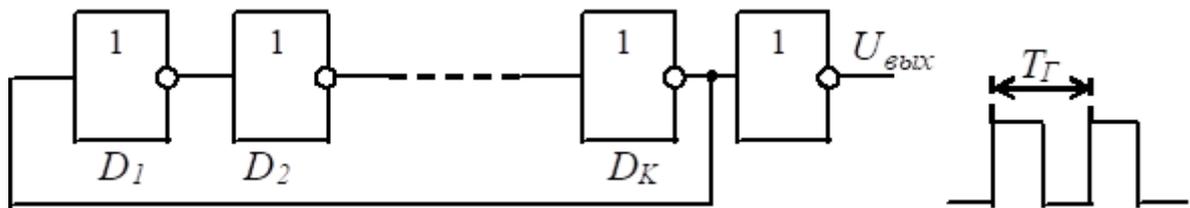


Рис. 1.3 – Кольцевой генератор на ЛЭ

При единичной нагрузке каждого инвертора и большом количестве инверторов K , а также при подключении измерительного прибора через развязывающий инвертор, удается определить минимальное значение $t_{зад\ p\ ср}$ для оценки предельного быстродействия ЛЭ. .

Для сравнения ЛЭ различных типов используют параметр, называемый работой переключения $A_{пер} = P_{ср} \cdot t_{зад\ p\ ср}$. Чем выше качество схемотехнической и конструкторско-технологической реализации ЛЭ, тем меньше работа переключения. Для большинства семейств цифровых микросхем работа переключения находится в пределах $0,1 \div 500$ пДж.

2. Описание лабораторного макета.

Лицевая панель лабораторного макета изображена на рис. 2.1. На лицевой панели нанесены исследуемые схемы ЛЭ И-НЕ ТТЛ и КМДП типов, с выводами контрольных точек по входу, выходу, напряжению источника питания. В ЛЭ введены измерительные резисторы $R_{изм}$ тока протекающего через ЛЭ. Измерительные резисторы включаются выключателем SA6. Переключателем SA2 осуществляется выбор типа логического элемента, а также устанавливается напряжение питания $E_{пит}$ 5 или 10 В для ЛЭ КМДП типа. Переключателем SA3 «Вид сигнала» – на вход ЛЭ подаются следующие сигналы:

- 1) пилообразные импульсы, необходимые для наблюдения передаточной характеристики (положение 1)
- 2) короткие прямоугольные импульсы для удобства измерения времени задержки и фронтов импульсов (положение 2)
- 3) прямоугольные импульсы со скважностью $Q = 2$ разной частоты (положения переключателя 3,4,5).

При этом на гнездо «СИ» подаются синхроимпульсы, необходимые для синхронизации осциллографа.

В качестве задающего генератора формирователя импульсов используется кольцевой генератор представляющий замкнутую в кольцо цепочку из семи инверторов на ЛЭ И-НЕ 561ЛА7 (см. рис. 1.3). Напряжение с генератора выводится на гнездо $U_{ген}$.

Ток, потребляемый исследуемым ЛЭ, можно измерить с помощью миллиамперметра, чувствительность которого устанавливается переключателем SA1.

Внимание! Включайте миллиамперметр только по мере необходимости, начиная с минимальной чувствительности (10 мА).

Переключатель SA 4 « R_H » позволяет подключать к выходу ЛЭ требуемое сопротивление нагрузки R_{H2} относительно источника питания E_{III} (положения 5, 6, 7), либо R_{H1} относительно общей точки (положения 2, 3, 4).

С помощью переключателя SA5 « C_H » к выходу ЛЭ можно подключать различные емкости нагрузки.

Значения параметров переключаемых элементов к макету приведены в таблице 3.1.

Значения параметров элементов к макету.

Таблица 3.1

Положение переключателей	R_H , Ом		C_H , пФ
	ТТЛ	КМДП	
1	∞	∞	0
2	2400	4700	50
3	1000	2000	100
4	360	380	150
5	360	380	–
6	1000	2000	–
7	2400	4700	–
8	∞	∞	–

$R_{изм\ КМДП} = 100\ \text{Ом}$

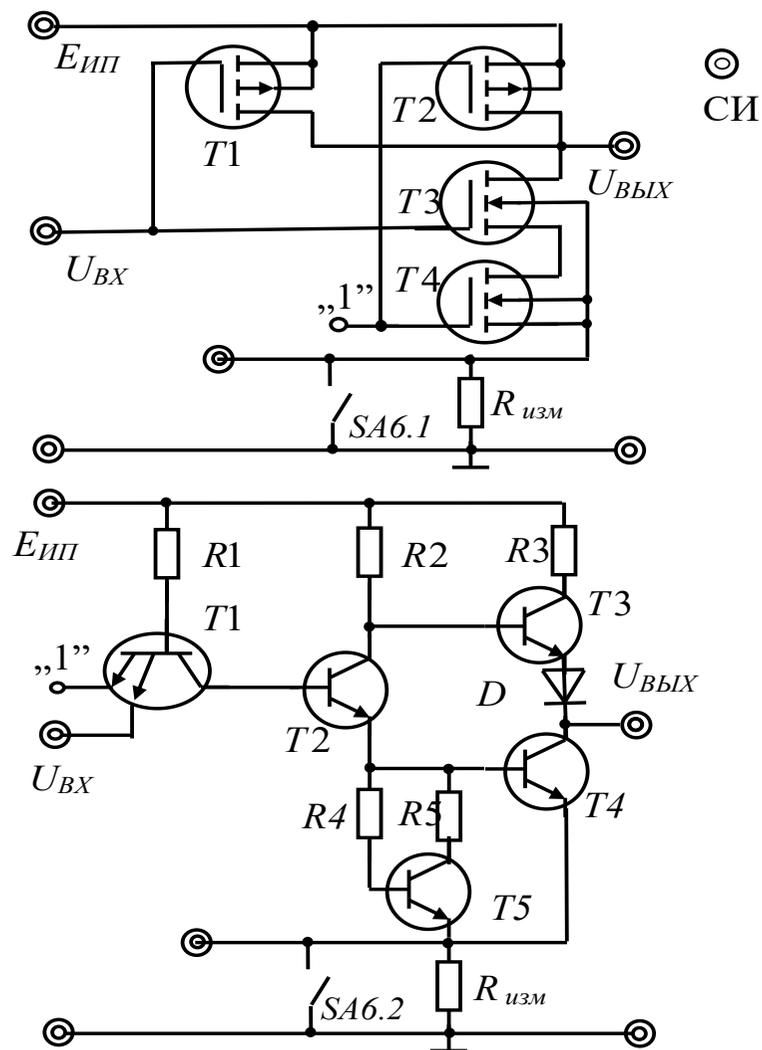
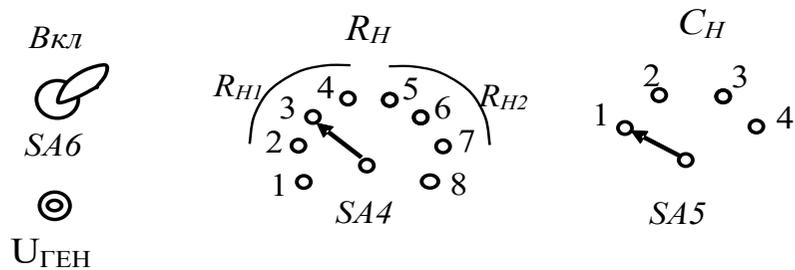
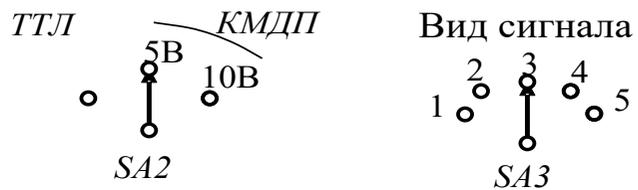
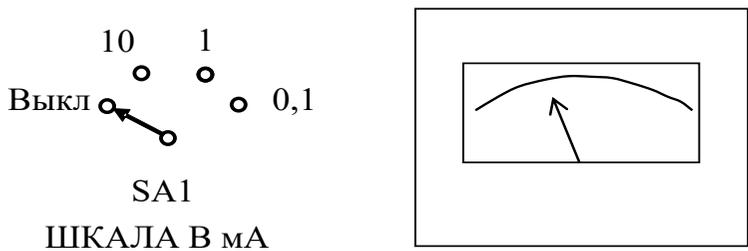


Рис. 2.1 – Лицевая панель макета для исследования логических элементов И-НЕ ТТЛ и КМДП типа

3. Описание лабораторной работы

"Исследование логического элемента на комплементарных полевых транзисторах с индуцированными каналами (КМДП)"

3.1. Цель работы

Целью работы является:

- 1) ознакомление с принципиальной схемой, логикой работы и изучение принципа действия ЛЭ И-НЕ КМДП - логики;
- 2) освоение методики экспериментального определения основных характеристик и параметров ЛЭ КМДП - типа и их зависимости от условий работы.

3.2. Краткие сведения из теории

В данной работе исследуется ЛЭ КМДП типа К561ЛА7, реализующий функцию 2И-НЕ. Его принципиальная схема приведена на рис. 3.1. Для реализации функции И-НЕ применяется последовательное включение n - канальных транзисторов VT1, VT2 и параллельное включение р-канальных транзисторов VT3 и VT4. При входных сигналах

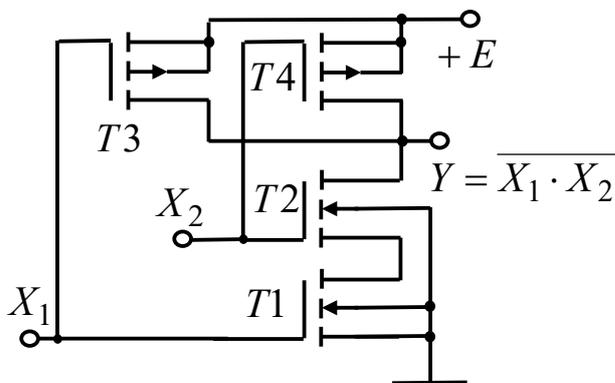


Рис. 3.1. Базовый логический элемент КМДП – логики типа И – НЕ

равных нулю р-канальные транзисторы VT3 и VT4 - открыты и на выходе устанавливается высокий потенциал $U_{вых}^1 = E_{ИП}$. Это состояние по выходу сохраняется, если хотя бы на одном из входов присутствует сигнал равный нулю.

При входных сигналах

$U_{вх}^1 = E_{ИП}$ транзисторы VT1 и VT2 -

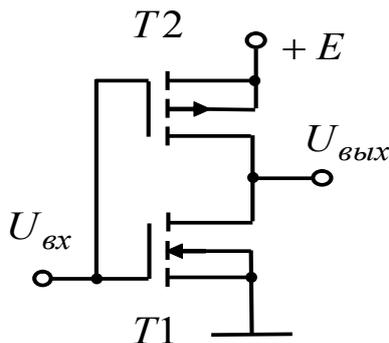


Рис. 4.2. Ключ на комплементарных МДП - транзисторах

открываются, а транзисторы VT3 и VT4 закрываются и на выходе ЛЭ И-НЕ устанавливается напряжение $U_{вых}^0 \cong 0$. Таким образом, ЛЭ выполняет операцию логического умножения (конъюнкции) $Y = \overline{X_1 \cdot X_2}$.

При определении статических и динамических характеристик ЛЭ на комплементарных парах можно

воспользоваться результатами анализа ключевого ЛЭ «НЕ» (см. рис. 3.2), заменив группы транзисторов в проводящем состоянии эквивалентным транзистором.

3.3. Порядок выполнения работы

1. Снять передаточную характеристику логического элемента И-НЕ КМДП типа 561ЛА7.

Для этого необходимо подключить входы осциллографа к входу и выходу ЛЭ И-НЕ КМДП типа, а вход синхронизации осциллографа к гнезду «СИ» (синхроимпульсы); установить одинаковую чувствительность по обоим входам на одном уровне в нижней части экрана.

Переключатель SA2 установите в положение 2, соответствующее подключению ЛЭ КМДП типа к источнику питания $E_{пит} = 5$ В, а переключатели SA4 и SA5 в положение 1, когда отключены C_H и R_H . Тумблер SA6 поставьте в положение выключено.

Подайте на вход ЛЭ пилообразное напряжение, установив переключатель SA3 в положение 1, при этом на выходе ЛЭ формируется передаточная характеристика (рис. 3.3).

Зарисуйте осциллограммы сигналов на входе и выходе ЛЭ.

По форме передаточной характеристики определите $U_{вых}^0, U_{вых}^1, U_{пор}^0$ и $U_{пор}^1$.

Вычислите логический перепад $U_{лог} = U_{вых}^1 - U_{вых}^0$.

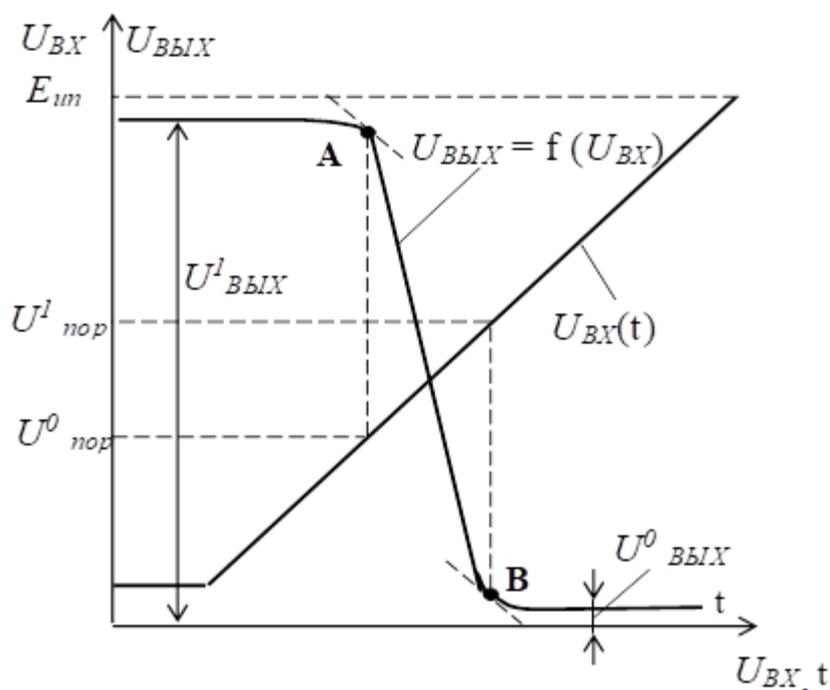


Рис. 3.3—Передаточная характеристика

Рассчитайте максимально допустимые напряжения помехи

$$U_n^0 = U_{пор}^0 - U_{вх.мак}^0, U_n^1 = U_{вх.мак}^1 - U_{пор}^1,$$

и коэффициенты помехоустойчивости

$$K_n^0 = U_n^0 / U_{лог} \text{ и } K_n^1 = U_n^1 / U_{лог}$$

Здесь $U_{вх.макс}^0 = 0,1E_{ИП}$, $U_{вх.мин}^1 = 0,9E_{ИП}$

Измеряйте осциллографом напряжение источника питания.

2. Определите амплитуду сквозного тока, протекающего через ЛЭ и пороговые напряжения транзисторов VT1 и VT2.

Переключив вход осциллографа с выхода ЛЭ на резистор $R_{изм}$, поставьте тумблер SA6 в положение «Вкл.», зарисуйте осциллограмму напряжения на резисторе $R_{изм}$ (см. рис 3.4).

Определите амплитуду сквозного тока, протекающего через ЛЭ во время переключения $I_{скв} = U_{скв} / R_{изм}$

Определите пороговое напряжение открывания транзистора VT1 U_{01} по моменту t_1 появления сквозного тока и пороговое напряжение транзистора VT2 U_{02} , измерив напряжение $E_{ИП} - U_{02}$ в момент t_2 когда сквозной ток падает до нуля.

3. Повторите действия пунктов 1. и 2. при напряжении источника питания 10 В, поставив переключатель SA2 в положение 3.

Сравните полученные результаты

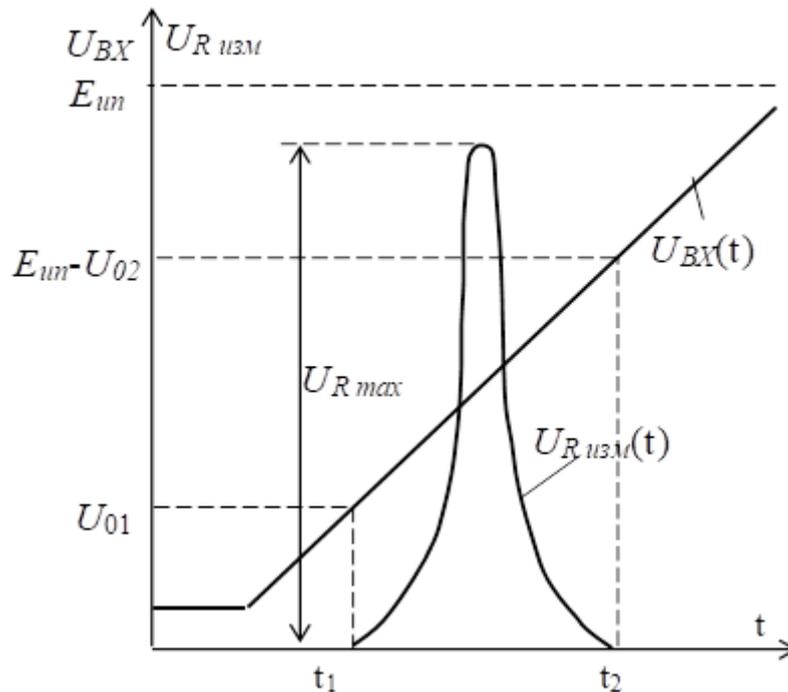


Рис. 3.4 – Осциллограмма напряжения на измерительном резисторе

4. Снять зависимости $U^0_{вых} = f(R_{H2})$ и $U^1_{вых} = f(R_{H1})$ и по ним построить выходные характеристики ЛЭ для напряжения низкого уровня на выходе $U^0_{вых} = f(I^0_{вых})$ и для напряжении высокого уровня на выходе $U^1_{вых} = f(I^1_{вых})$, где $I^0_{вых} = \frac{E_{ИП} - U^0_{вых}}{R_{H2}}$ $I^1_{вых} = \frac{U^1_{вых}}{R_{H1}}$

Таблица 3.1

Положение переключателя	1	2	3	4
R_{H1} , Ом				
$U^1_{вых}$, В				
$I^1_{вых}$, А				

Для этого подключите вход осциллографа к выходу ЛЭ и подайте на его вход переключателем «вид сигнала» SA3 прямоугольный импульс, поставив его в положение 4. Переключатели SA1, SA5 поставьте в положение 1 и тумблер SA6 в положение выключено. Снимите зависимости $U^0_{вых} = f(R_{H2})$ и $U^1_{вых} = f(R_{H1})$, изменяя сопротивление R_n переключателем SA4. Результаты эксперимента сведите в таблицы вида:

Таблица 3.2

Положение переключателя	5	6	7	8
R_{H2} , Ом				
$U^0_{вых}$, В				
$I^0_{вых}$, А				

Проделайте действия этого пункта для двух значений напряжения питания 5 В и 10 В, установив переключатель SA2 в соответствующее положение.

5. Снять зависимость потребляемого от источника питания тока от частоты входного сигнала $I_{ИП ср} = f(f_c)$ при $C_n = 0$ и $C_{n max}$, $R_n = \infty$.

Построить зависимость мощности, потребляемой от источника питания, от частоты входного сигнала $P_{ср} = I_{ИП ср} \cdot E_{ИП} = f(f_c)$ при $C_n = 0$ и $C_{n max}$, $R_n = \infty$.

На вход ЛЭ подаются симметричные прямоугольные импульсы, частота которых меняется переключателем «Вид сигнала» SA3 (положения 3, 4, 5) Измерение частоты сигнала осуществляется осциллографом на входе или выходе ЛЭ. Потребляемый от источника питания ток измеряется миллиамперметром, встроенным в макет. Требуемая чувствительность прибора устанавливается переключателем SA1. Емкость нагрузки C_n задаётся переключателем SA5.

Результаты эксперимента и расчетные данные сведите в таблицы 3.3.

Таблица 3.3

Положение переключателя	3	4	5
T_c , мкс			
f_c , кГц			
I_{III} , мА			
P_{cp} , мВт			

6. Снять зависимости $t_{зад p}^{01} = f(C_n)$, $t_{зад p}^{10} = f(C_n)$

$t_{\phi}^{01} = f(C_n)$, $t_{\phi}^{10} = f(C_n)$, при $R_n = \infty$.

На вход логического элемента подайте короткие прямоугольные импульсы с аналогичного ЛЭ, поставив переключатель «Вид сигнала» SA3 в положение 5. Входы осциллографа подключите к входу и выходу ЛЭ, произведите измерение указанных выше величин, изменяя емкость нагрузки ЛЭ переключателем SA5.

Данные измерений сведите в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Положение переключателя	1	2	3	4
C_n , пФ				
$t_{зад p}^{01}$, нс				
$t_{зад p}^{10}$, нс				
t_{ϕ}^{01} , нс				
t_{ϕ}^{10} , нс				

Постройте графики полученных зависимостей.

Проделайте действия этого пункта для двух значений напряжения источника питания 5 В и 10 В.

Объясните полученные результаты.

7. Подключите осциллограф к гнезду $U_{3Г}$ и измеряйте частоту задающего генератора.

Задающий генератор выполнен в виде кольцевого генератора на двух микросхемах 561ЛА7, где в кольцо замкнуты 7 логических элементов И-НЕ при питании его от источника 10 В.

Тогда можно определить минимально возможное среднее время задержки распространения сигнала из выражения

$$t_{\text{зад } p \text{ ср}} = \frac{T_{3Г}}{2k} = \frac{1}{2kf_{3Г}},$$

где $f_{3Г}$ – частота импульсов задающего генератора; k – количество ЛЭ в кольце генератора.

Сравните полученное значение $t_{\text{зад } p \text{ ср}}$ со значением, полученным в предыдущем пункте при $C_n = 0, R_n = \infty$ и напряжении $E_{\text{ИП}} = 10 \text{ В}$.

Объясните полученный результат.

8. Оформите отчет по лабораторной работе. Он должен содержать принципиальную схему, выполнение пунктов программы, выводы.

Проведите сравнение ЛЭ ТТЛ и КМДП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
2. Электроника. Часть 1: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 209 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7278> (дата доступа:08.05.2023)
3. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
4. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
5. Электроника. Часть 2: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 120 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7279> (дата доступа:08.05.2023)
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.- 488 с.
7. Учебное пособие «Микроэлектроника» : Для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н.С. - 2013. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4280> (дата доступа:08.05.2023)
8. Гусев В.Г. Электроника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. (73): Библиотека ТУСУР.