

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Моделирование и расчет КМОП- (CMOS-) инверторов  
и создание КМОП-усилителя гармонических колебаний**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 422 группы  
направления 11.03.02 Инфокоммуникационные  
технологии и системы связи  
физического факультета  
Громко Игоря Дмитриевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.,

\_\_\_\_\_

А.В.Хохлов

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

В.С. Анищенко

Саратов 2020

## **Введение**

В отечественной и зарубежной литературе все чаще рассматривается использование комплементарных МОП-транзисторов с индуцированными каналами n- и p-типа. Такие транзисторы создаются в виде интегральных микросхем и широко используются в современной радиоэлектронике, схемотехнике, радиоизмерениях и теории связи (от мобильной до космической). Основная трудность изучения КМОП-структур состоит в том, что их параметры определяются типами полупроводниковой технологии параметры. Чтобы облегчить изучение процессов в КМОП структурах было высказано предложение изучать характеристики и параметры таких структур на моделях, составленных из дискретных МОП-транзисторах.

В последние годы стали появляться публикации об использовании КМОП-элементов для усиления периодических, обычно гармонических колебаний.

**Целью настоящей квалификационной работы** являлось создание дискретных моделей, попытка рассчитывать характеристики КМОП-транзисторов, используя программное обеспечение системы Multisim, создание и экспериментальное исследование усилителей гармонических колебаний на дискретных моделях КМОП-инверторах.

## **Усилитель. Принцип работы.**

Электронное устройство, предназначенное для увеличения мощности электрических колебаний с сохранением их формы и частоты за счет использования энергии внешнего источника питания, называется **усилителем**. Мощность усилителя на выходе должна превышать мощность сигнала на входе. Для этого используются различные нелинейные элементы. Минимальную часть усилителя, способную повышать мощность входных электрических колебаний, принято называть усилительным каскадом. Усилитель может состоять из одного или нескольких каскадов.

Усилители сигналов классифицируют по назначению, используемым усилительным элементам и режимам их работы, форме усиливаемых сигналов и полосе рабочих частот. Все усилители усиливают мощность входного сигнала, однако в ряде случаев основным показателем являются величины выходных напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  или тока  $I_{\text{ВЫХ}}$ .

Усилители напряжения электрических сигналов по виду сигналов разделяют на усилители постоянного тока, усиливающие электрические сигналы с частотой от нуля герц и выше, и усилители переменного тока, усиливающие электрические сигналы с частотой, отличной от нуля.

Усилительные элементы в разных усилителях могут работать в линейном и нелинейном режимах. Если элемент работает в линейном режиме, то усилитель относят к классу линейных, считают активным линейным четырехполюсником, и на него распространяются свойства линейных цепей. Если же элемент работает в нелинейном режиме, то усилитель является нелинейным устройством, хотя по форме выходной и входной сигналы могут отличаться незначительно.

Еще одним важным параметром усилителей являются их фазочастотные характеристики (ФЧХ) — это зависимости угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты. ФЧХ позволяет наблюдать за фазовыми искажениями, так как гармоники сигнала запаздывают друг от друга.

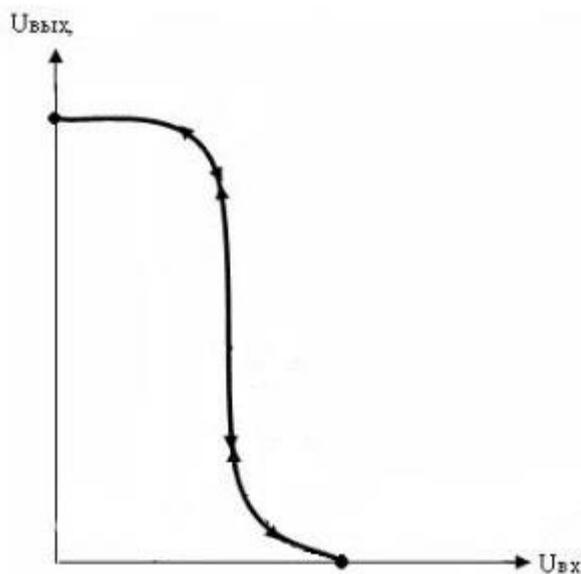


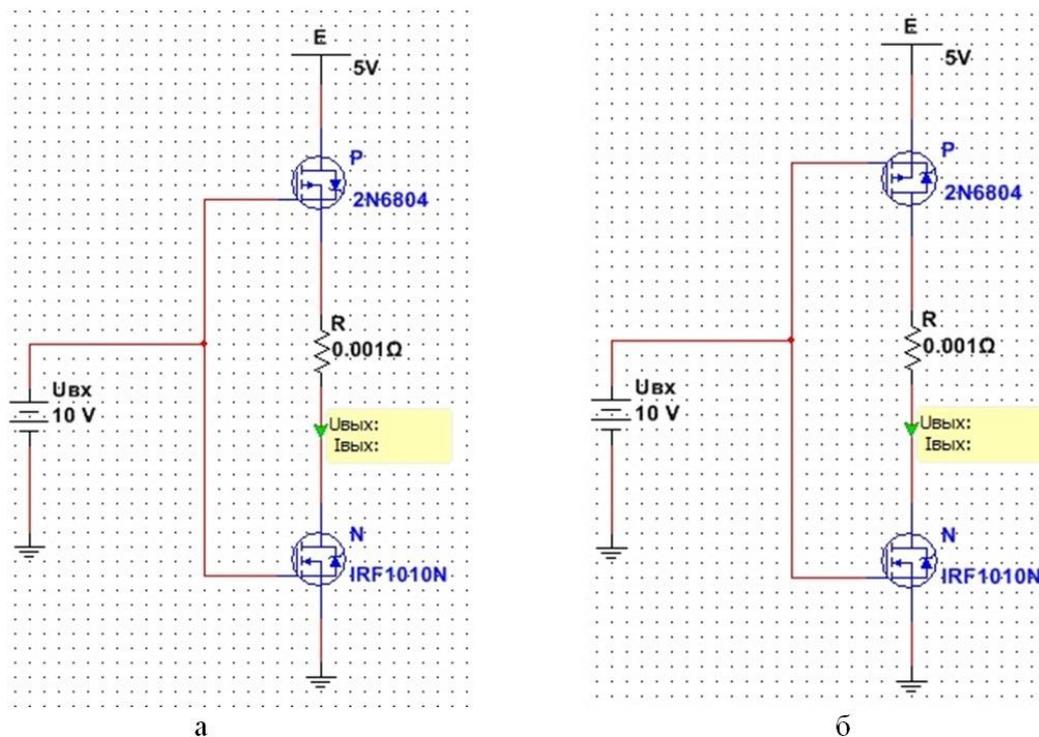
Рисунок 1. Теоретическая передаточная характеристика КМОП-инвертора.

**Передаточная характеристика усилителя** связывает выходное напряжение схемы  $U_{\text{ВЫХ}}$  с напряжением входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ .

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

## Комплементарные полупроводниковые структуры и их свойства.

**Комплементарной** называется полупроводниковая структура, состоящая из МОП- транзисторов с индуцированными с n- и p-каналами.



CMOS-инвертор (а), КМОП-инвертор (б)

Рисунок 2.

Отличие структуры КМОП от CMOS состоит в том, что у КМОП-структур выходом является объединение истоков, а у CMOS-структур выходом является объединение истока и подложки p-канального транзистора со стоком n-канального.

Основной КМОП-схем является инвертор, показанный на рисунке 1,б. Он состоит из двух МОП транзисторов: с каналом p-типа (верхний) и каналом n-типа (нижний). Оба затвора соединены между собой и являются общим входом. Инвертор реализует функцию НЕ и является простейшим базовым логическим элементом.

Верхний транзистор р-типа открывается при отрицательном напряжении на затворе относительно истока. Сопротивление транзистора резко уменьшается, напряжение на нем стремится к нулю, а напряжение на его стоке, а значит и на выходе инвертора приближается к напряжению питания (т.е. обеспечивая высокий уровень выходного напряжения). При положительном напряжении входного сигнала на инверторе верхний транзистор р-типа закрывается, а нижний n-типа – открывается, его сопротивление стремится к нулю и на выход возникает нулевое напряжение. Общая точка стоков служит выходом.

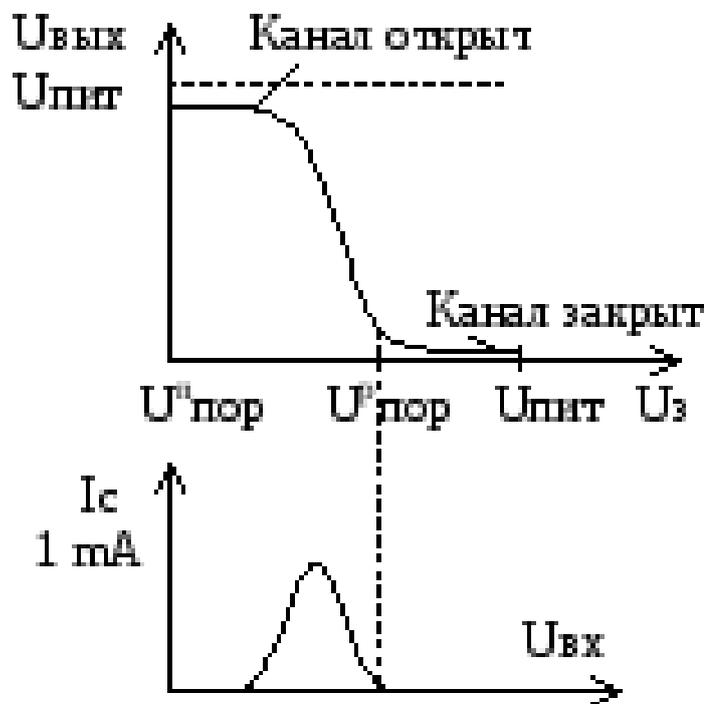


Рисунок 3. Теоретическая передаточная характеристика CMOS каскада и график импульса тока, протекающего через инвертор при его переключении.

## Моделирование КМОП-инверторов на основе дискретных МОП-транзисторов с индуцированным каналом.

В литературе подробно рассматриваются различные комбинации транзисторов в МОП-структурах, но результаты практических измерений и расчетов характеристик нам найти не удалось. Поэтому перед нами была поставлена задача разработать программу расчета, промоделировать основные характеристики КМОП и CMOS-инверторов и в случае необходимости подобрать МОП-транзисторы так, чтобы обеспечить соответствие теоретическим зависимостям.

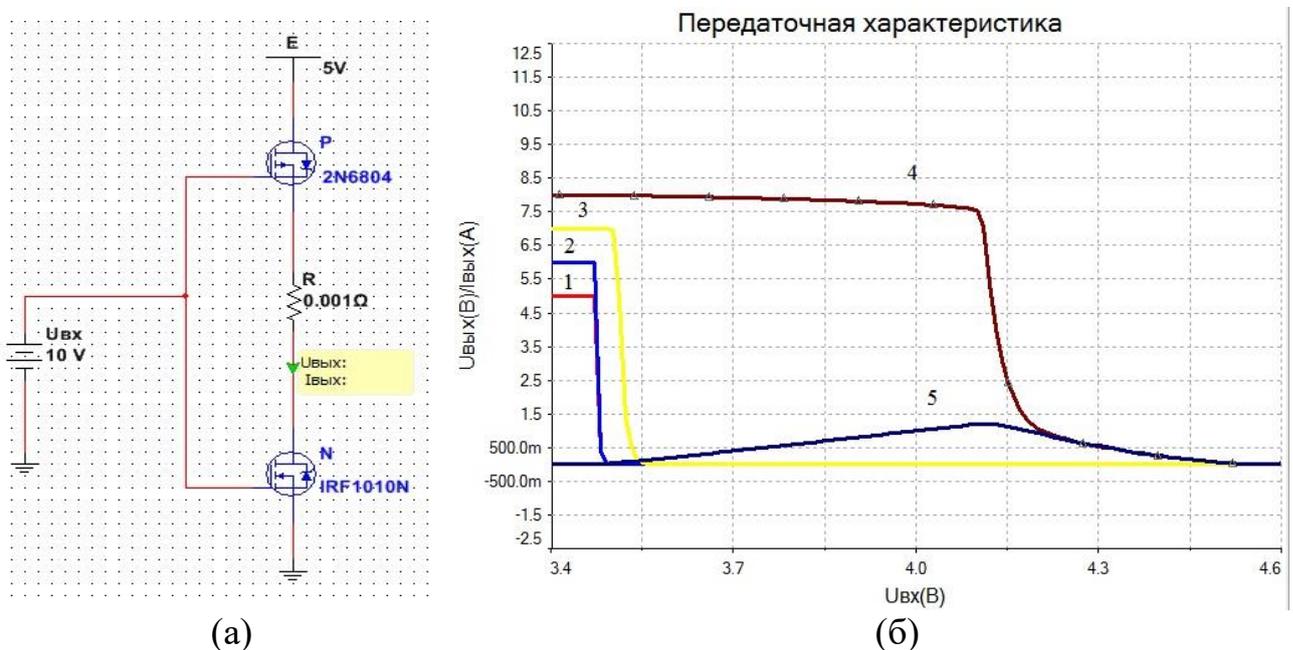


Рисунок 4. (а) CMOS инвертор на транзисторах 2N6804 и IRF1010N,  
(б) передаточные характеристики инвертора.

- 1- зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$  при  $E=5V$
- 2-зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$  при  $E=6V$
- 3- зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$  при  $E=7V$
- 4- зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$  при  $E=8V$
- 5- зависимость  $I_{вых}(A),(U_{вх})$  при  $E=8V$

$U_{вх}$  - напряжение между зажимом объединённого затвора и землей.

Из рисунка 4 (б) видно, как появляется ток (кривая 5), после статичного режима (логической «1»), когда транзисторы открылись и очень медленно закрывались, в это время через них и протекал ток.

Как следует из графиков рисунка 4 (б), при трех различных напряжениях источника  $E$  ( $E=5\text{В}$ ,  $6\text{В}$ ,  $7\text{В}$ ) переход инвертора из одного устойчивого состояния (логическая "1") в другое (логический "0") происходит при близких входных напряжениях от  $3.48\text{ В}$  до  $4.58\text{ В}$  и осуществляется очень быстро, что хорошо согласуется с теоретическими выводами. Уже при  $E=8\text{ В}$  переключение инвертора происходит в интервале входных напряжений от  $3.77\text{ В}$  до  $4.55\text{ В}$  и осуществляется по более сложному закону (появляется незапланированный излом, а напряжение логического нуля устанавливается очень медленно). Когда  $U_{вх}$  проходит через область, где оба транзистора открыты, протекающие в каналах транзисторов токи возрастают. Это хорошо видно на кривой 5, где ток достигает максимального значения  $1.21\text{ А}$ , при напряжении  $4.11\text{ В}$ .

## Экспериментальное исследование передаточных характеристик дискретных моделей КМОП-инвертора.

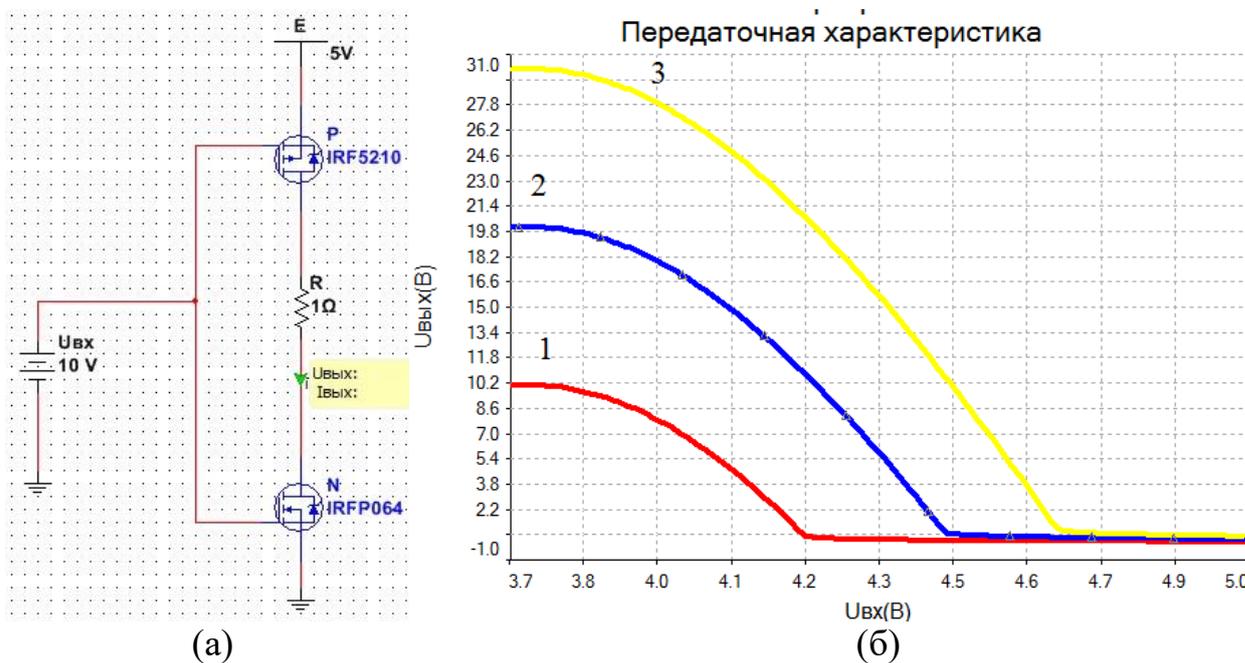


Рисунок 5. (а) КМОП инвертор на транзисторах IRF5210 и IRF064, (б) передаточные характеристики КМОП-инвертора.

1-зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$ , при  $E=10В$ .

2- зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$ , при  $E=20В$

3- зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$ , при  $E=30В$

Передаточные характеристики КМОП-инвертора даже при напряжениях 10, 20, 30В оказываются квазилинейными, но следует отметить, что уровень логического нуля устанавливается на уровне 0.2 В при напряжении  $E=10 В$ , уровне 0.4 В при  $E =20 В$  и 0.5 В при напряжении  $E=30 В$ .

## Построение схемы усилителя гармонических колебаний и исследование его характеристик.

Целесообразно использовать КМОП-инверторы передаточные характеристики которых имеет протяженный участок переключения из верхнего состояния (напряжение питания модели) в нижнее (напряжение точки заземления), рисунок 6.

Желательно, чтобы возможно большая часть участка переключения была линейной. Поэтому я выбрал модель КМОП-инвертора, содержащую МОП-транзисторы IRF5210 и IRF064. Передаточная характеристика такого инвертора (рис. 10) при напряжении питания 30 В имеет квазилинейный участок от 4.2 В до 4.6 В. При этих условиях рабочая точка модели КМОП-инвертора может быть выбрана с любым напряжением в этом интервале. Я выбрал напряжение смещения равным 4.3 В. При таком смещении усилитель может усиливать синусоидальное напряжение с амплитудой до 0.1 В.

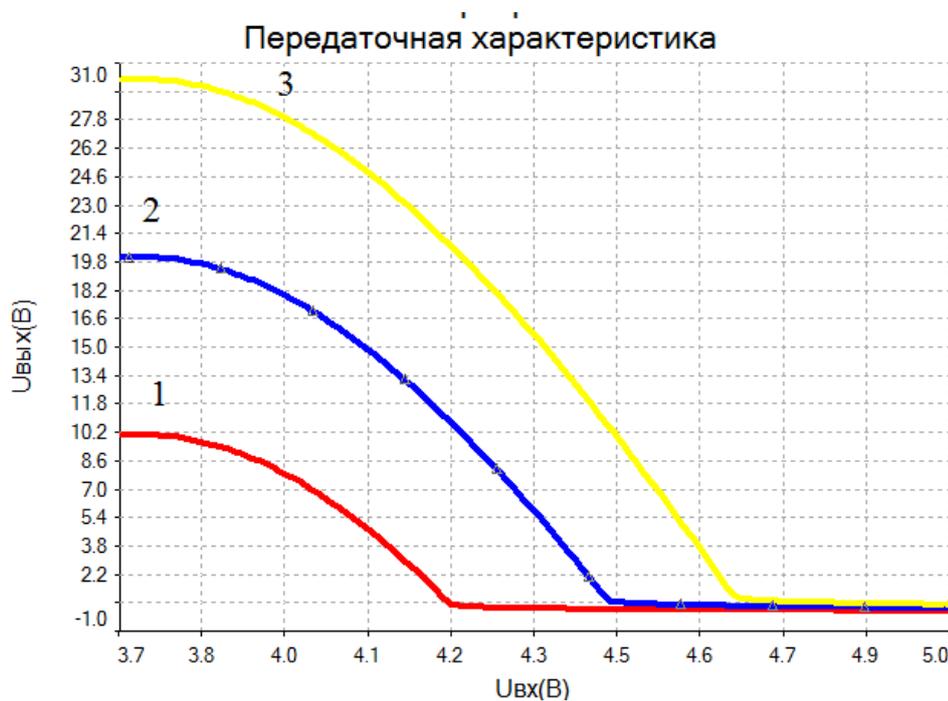


Рисунок 6. Передаточная характеристика КМОП-инвертора.

Полная принципиальная схема усилителя с измерительными приборами представлена на рисунке 7.

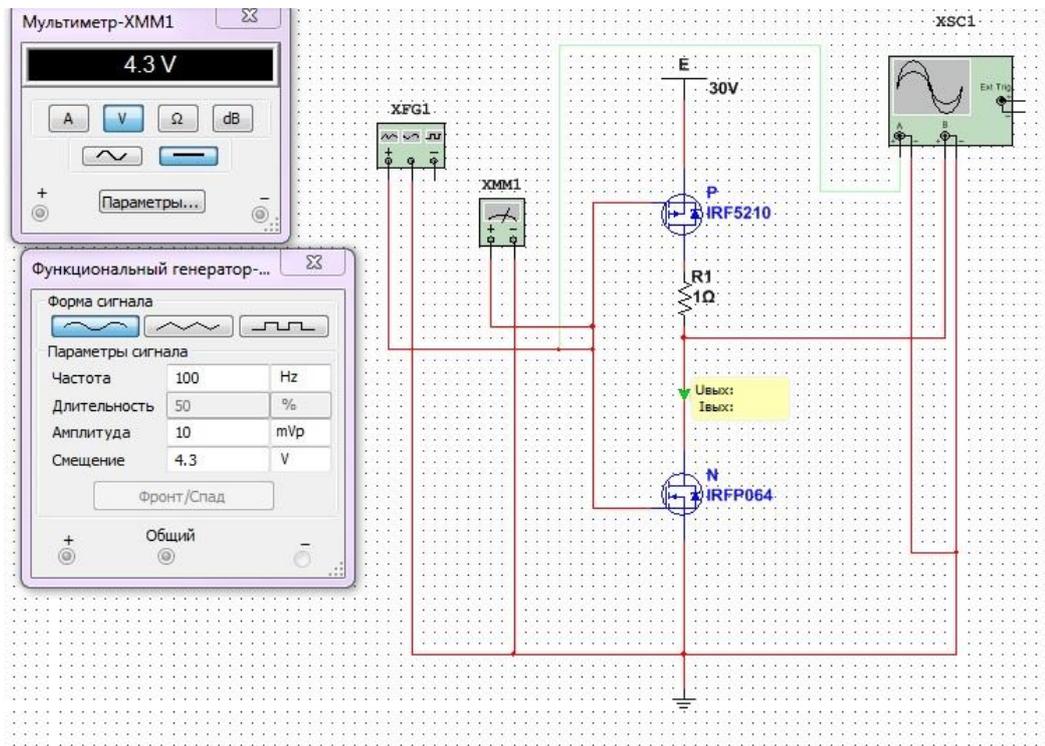


Рисунок 7. Схема усилителя на КМОП-инверторе.

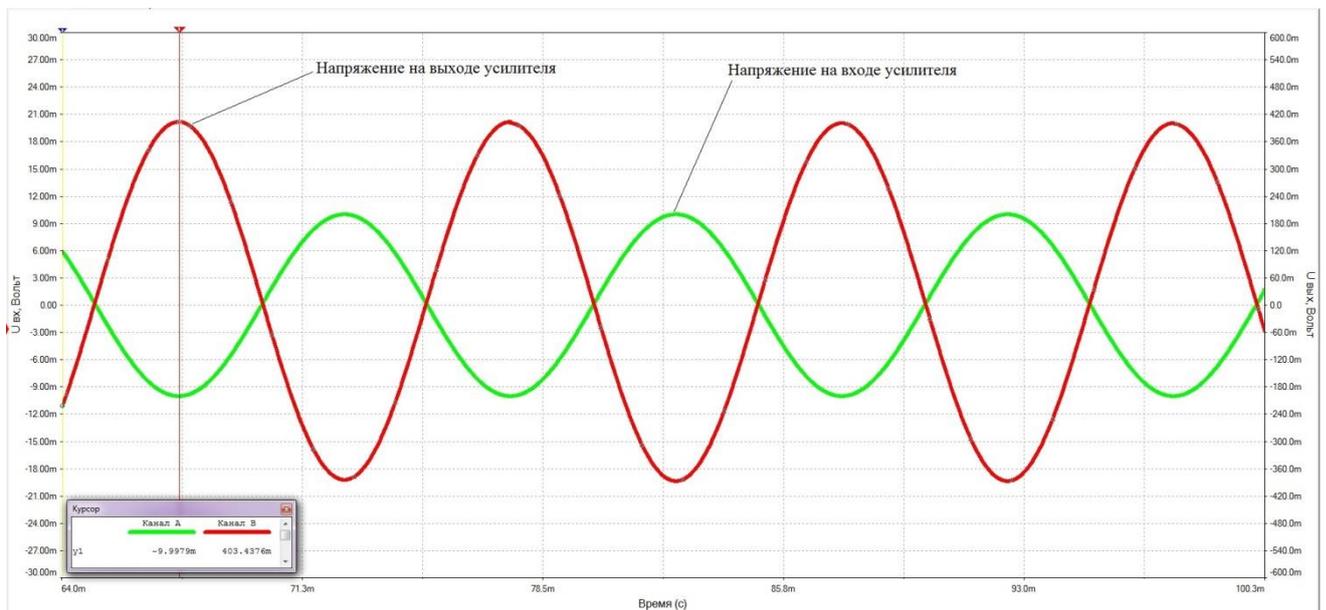


Рисунок 8. Синусоидальное напряжение на входе и на выходе усилителя на КМОП-инверторе.

Как следует из рисунка 8, выходное напряжение усилителя имеет синусоидальную форму сдвинуто по фазе на  $180^\circ$ , так как передаточная характеристика обладает отрицательным наклоном, и реализует коэффициент усиления 40, что хорошо согласуется с теоретическим расчетом.

## Список использованных источников

1. Ракитин В.В. Интегральные схемы на КМОП-транзисторах. М.2007
2. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. Санкт-Петербург, 2007
3. Нахалов А.В. Схемотехника телекоммуникационных устройств. М. 2012
4. Трухин М.П. Основы компьютерного проектирования радиосистем. Томск 2015.
5. Жан М. Рабаи, Ананта Чандракасан, Боривож Николич. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. М. «Вильямс», 2007.
6. Точки, Рональд, Дж., Уидмер, Нил, С. Цифровые системы. Теория и практика, М. «Вильямс», 2004.
7. Токхейм Р. Основы цифровой электроники. М.: Мир, 1988.
8. Марк Е. Хернитер. Multisim Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств, ДМК Пресс, 2006.
9. Бирюков С,А. Цифровых устройства на МОП-интегральных микросхемах. М: Радио и связь, 1990.
- 10.И. А. Нечаев, МРБ Выпуск 1172, 1992.
- 11.Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. В 2-х т. — Т. 1. — М.: Додэка-XX1, 2008.
- 12.Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем. — М.: ДМК Пресс, 2008.
- 13.Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. — М.: Бином, 2016.