

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

**КУРСОВА РОБОТА**

з дисципліни Схемотехніка аналогової та цифрової радіoeлектронної апаратури

на тему: Перетворювач однополярної напруги на двополярну та підсилювач з малим шумом на ОУ для навушників

Студента II курсу групи ДК-51

Напряму підготовки: Радіoeлектронні апарати

Спеціальності: Радіoeлектронні апарати та засоби

Ніношвілі С.Н

(прізвище та ініціали)

Керівник:

ст. викл., к.т.н. Короткий Є.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна оцінка: \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Члени комісії: \_\_\_\_\_

(підпис)

ст. викл., к.т.н. Короткий Є.В.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. ВИБІР ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ<br/>ПРИЛАДУ .....</b>                  | <b>5</b>  |
| 1.1    Операційний підсилювач .....  | 5         |
| 1.2    Перетворювач однополярної напруги у двополярну .....                                | 7         |
| 1.3    Малошумлячий підсилювач для навушників на ОУ .....                                  | 8         |
| <b>РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДУ .....</b>                                    | <b>10</b> |
| 2.1    Розрахунок схеми для постійного сигналу (при відсутності вхідного<br>сигналу) ..... | 10        |
| 2.2    Виведення коефіцієнту передачі по напрузі для одного з каналів.....                 | 11        |
| <b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРИЛАДУ .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЛАДУ .....</b>                         | <b>15</b> |
| <b>Висновок.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>Список використаних джерел .....</b>  | <b>19</b> |

## ВСТУП

Метою курсового проекту є реалізація та дослідження схеми малошумлячого підсилювача для навушників на операційному підсилювачі і перетворювача напруги з однополярної у двополярну.

Може здатися, що підсилювач навушникам непотрібен, адже будь-який внутрішній підсилювач має впоратись з навушниками, вихід на навушники є майже на всій мультимедійній техніці. Також може виникнути інше питання, якщо внутрішнього підсилювача не вистачає на якісне відтворення сигналу – чи не збільшить отримані викривлення зовнішній підсилювач?

Насправді в режимі холостого ходу параметри внутрішнього підсилювача можуть бути досить пристойними, коли ж ми під'єднуємо навушники, то виникає проблема узгодження за напругою. Тобто опір навушників надто низький, а як ми вже знаємо – для кращого узгодження за напругою та зменшення викривлень вихідний опір передавальної схеми має бути набагато менше вхідного опору приймаючої. Тому і виходить так, що потенційно непоганий пристрій для відтворення звуку не виправдовує очікувань.

При використанні зовнішнього підсилювача ситуація кардинально змінюється – враховуюче все вище сказане зрозуміло, що він буде мати високий вхідний опір та низький вихідний, що виправить відразу два випадки узгодження за напругою, збереже сигнал від викривлень та значно зменшить просідання каналів, або наявні шуми.

Перетворювач напруги з однополярної в двополярну реалізуємо для отримання з лабораторного джерела 30В двополярного живлення два плеча по 15В. Ця необхідність обумовлена наявністю в схемі операційного підсилювача, принцип роботи та характеристики якого буде розглянуто далі.

### Завдання курсової роботи:

- Дослідження принципу роботи схеми перетворювача напруги з однополярної у двополярну, принципу роботи схеми підсилювача для навушників, а також операційного підсилювача
- Розрахувати схему для постійного сигналу, при відсутності вхідних, вивести коефіцієнт передачі за напругою для одного з каналів, та порівняти розраховані значення з отриманими в симуляції та на практиці.
- Виконати моделювання схеми
- Побудувати прототип
- Перший розділ присвячений теорії – принципу роботи схем, та використаних мікросхем
- У другому наведені розрахунки досліджуваних схем
- Третій розділ містить моделювання схем, порівняння теоретично розрахованих з отриманими моделлю
- У четвертому розділі йдеться про побудову прототипу та експериментально отриманих значеннях

# РОЗДІЛ 1. ВИБІР ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИБОРУ

## 1.1 Операційний підсилювач

Операційні підсилювачі – це підсилювачі постійного струму з високим коефіцієнтом підсилення, диференціальним входом та малими значеннями напруг зміщення нуля та вхідних струмів. Під постійним струмом розуміється те, що підсилюється сигнал, починаючи 0 Гц. Мала напруга зміщення нуля – у випадку, коли вхідні напруги рівні на виході буде зовсім незначне відхилення від нуля.

Для того, щоб краще розуміти роботу ОУ варто знати характеристики ідеального ОУ:

- Нескінченно великий диференціальний коефіцієнт підсилення по напрузі(відношення вихідної напруги то різниці напруг на вході):

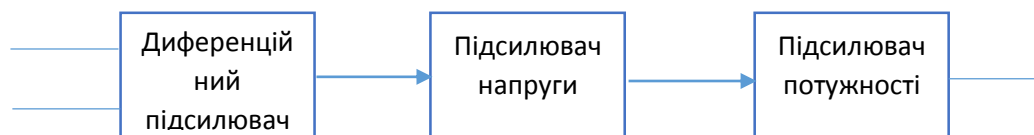
$$K_v = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta(V_p - V_n)}$$

де:  $V_p$  – напруга на неінвертуючому вході;

$V_n$  – напруга на інвертуючому вході;

- Нульова напруга зміщення нуля  $V_{OFF}$  – при рівних вхідних напругах на виході нуль незалежно від сінфазного сигналу (Сінфазний сигнал – це півсума вхідних напруг);
- Нульові вхідні струми по обом входам;
- Нульовий вихідний опір;
- Коефіцієнт підсилення сінфазного сигналу рівний нулю;
- Миттєва реакція на зміну вхідних сигналів.

### Блок-схема ОУ



Саме перший каскад визначає напругу зміщення нуля, КОСС (коефіцієнт ослаблення сінфазного сигналу), вхідні струми та вхідний опір.

Розглянемо більш детально стандартну схему ОУ, але значно спрощену:

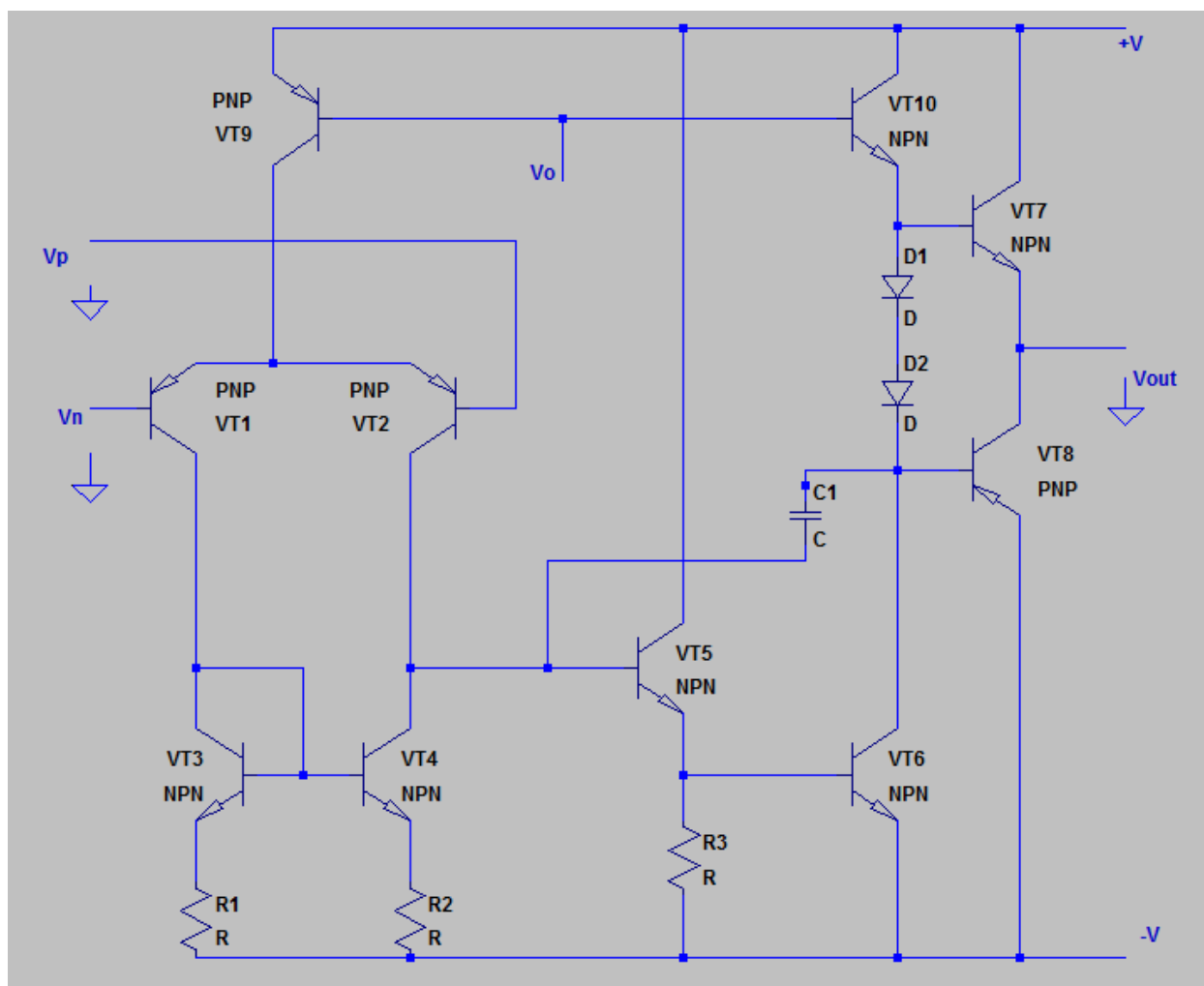


Рис.1. Спрощена принципова схема операційного підсилювача

Зі схеми видно, що синфазні вхідні сигнали ослабляються через те, що вихідний канал диференційного каскаду є різницею струмів колектору VT2 та колектору струмового дзеркала VT4. Як ми знаємо з теорії струмового дзеркала

саме VT3 задає струм та керує струмом через VT4, тому можна стверджувати, що віднімаються струми колекторів вхідних транзисторів.

Потім включений транзистор VT5 (спільний колектор), що має підсилити по струму в  $\beta+1$  разів, після чого йде другий каскад із загальним емітером на VT6, для якого в якості навантаження підключений VT10, який задає струм через нього. Включення транзистора зі спільним емітером підсилює і струм і напругу, що і є еквівалентно підсиленню по потужності вихідного каскаду.

Два діоди присутні для того, щоб задати невелике зміщення на вихідних транзисторах (двухконтактний емітерний повторювач) та зменшити нелінійні спотворення, що виникають при перебуванні транзисторів у закритому режимі при очікуванні. Конденсатор слугує для частотної корекції.

## 1.2 Перетворювач однополярної напруги у двополярну

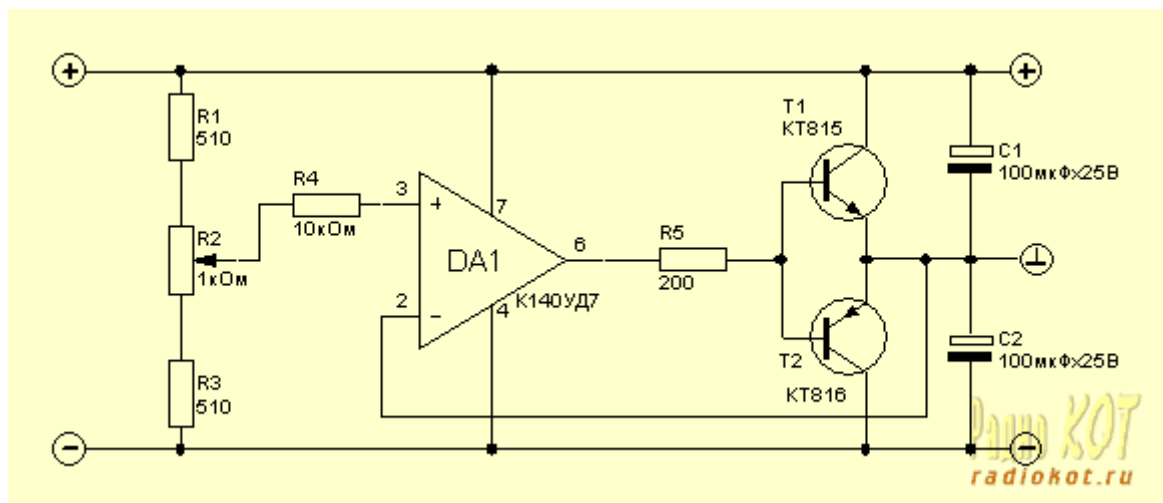


Рис. 2. Схема перетворювача

Двополярне живлення необхідно для живлення операційних підсилювачів, схем підсилювачів, адже треба, щоб підсилення відбувалось по негативній та позитивній складовій, що не призведе до зрізу вхідного сигналу, а також розширить межі вихідного.

Звичайно можна було б побудувати звичайний подільник напруги, та не брати додатково цілу схему, всього лиш пару однакових резисторів, у яких на кожному плечі було б однакове падіння напруги і точку між ними ми брали б як загальну, та вже відносно неї отримали б плюс та мінус живлення. Але, нажаль, при роботі на нерівномірне навантаження буде й нерівномірна напруга на плечах, вона не стабілізується подільником, а тільки задається. До того ж вона насправді не буде двополярною, тобто коливання напруги все одно будуть відбуватись вище «нуля», тож нам це не підходить. Якщо ж подібним чином використати конденсатори, то через їх властивість полярності вони справді створять мінус відносно нашого штучного «нуля», але схема знову надто залежить від навантаження.

В даному випадку ми побудували стабільний перетворювач з однополярного у двополярне живлення – спочатку звичайний дільник, що задає напругу на плече, у вигляді двох транзисторів та потенціометра, потім операційний підсилювач включений з від'ємним зворотнім зв'язком, в данному випадку він виконує стабілізацію напруги на вході, а транзистори включені по схемі зі спільним колектором, або емітерний повторювач, забезпечують підсилення по струму, до речі вихідний струм обмежується струмом колектора, конденсатори ж у свою чергу допомагають уникнути пульсацій, так як добре відомо, що напруга на них миттєво не змінюється.

### 1.3 Підсилювач з низькими шумами для навушників на ОУ

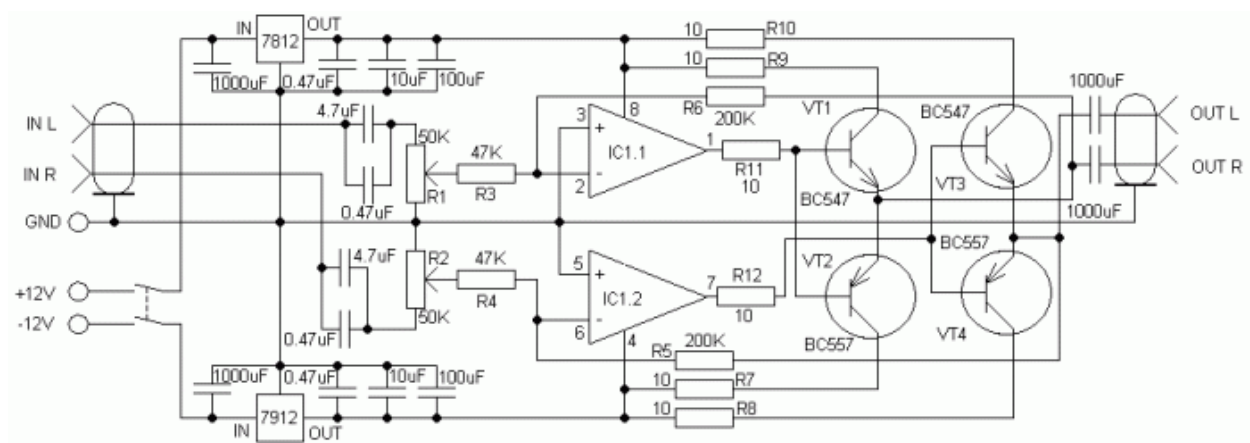


Рис. 3. Схема підсилювача



Почати опис схеми слід з живлення, на вхід подається двополярне живлення, яке ми отримаємо з вище отриманої схеми. В цьому підсилювачі додатково використовуються стабілізатори 7812 та 7912 з обв'язкою ще більш масивною, ніж вказана в даташиті. Шунтуючими конденсаторами виступають ряд електролітичних та один керамічний конденсатори. На канал вхідного сигналу також присутні конденсатори, з'єднанні паралельно між собою малої ємності електролітичний та керамічний, що дає одразу кілька переваг – по-перше ми захищаємо схему підключену до підсилювача та наш підсилювач від постійної складової, по-друге, виконують стабілізуючу функцію через те, що напруга на них відразу не змінюється, і по-третє, зберігають напругу робочої точки, тобто при поданні вхідного сигналу він доплюсовується до вже зарядженого на певне значення конденсатора.

На резисторах R3, R4, R5, R6 побудований зворотній зв'язок, та саме цими резисторами задається коефіцієнт підсилення, в нашому випадку він рівний приблизно -4,5.

Резистори R11 та R12 обмежують струм на бази включених за схемою загального колектора, або як її ще називають емітерний повторювач, що дає підсилення по струму.

Транзистори мають бути комплементарні, в найкращому випадку виготовлені під час одного технічного процесу, в такому разі вони розміщені на одній мікросхемі. Це дозволить максимально мінімізувати перепади по кожному з плечей підсилювача.

Резисторами R7, R8, R9 та R10 обмежується струм транзисторів, а також забезпечується захист від наскрізного струму.

Звичайно ж конденсатори на виході, що захищають від потрапляння постійної складової на наступну схему, або, що може бути ще гірше, безпосередньо на навушники, адже через це вони будуть перегріватись та є ризик, що вийдуть з ладу

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДУ

### 2.1 Розрахунок схеми для постійного сигналу (при відсутності вхідного сигналу)

Для цього використаємо лише один канал, та будемо вважати, що потенціометр виставлений опором 50 кОм, тоді схема набуде наступного вигляду:

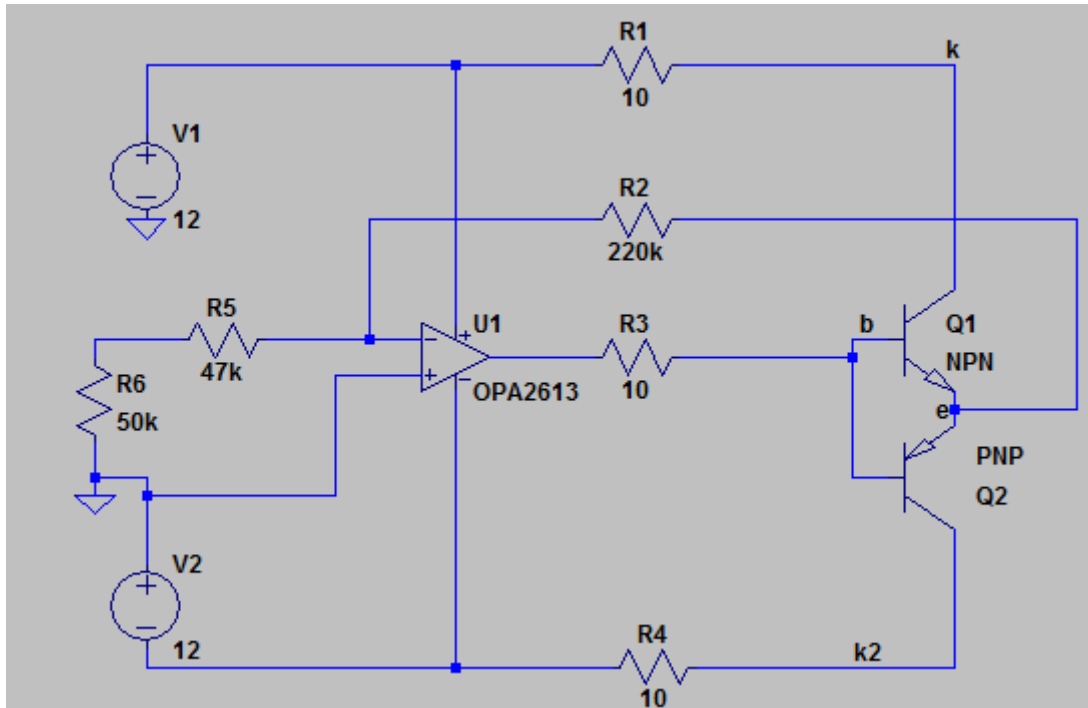


Рис.4. Модель для постійного сигналу

Відомо, що при негативному зворотному зв'язку диференційна напруга на вході операційного підсилювача буде нульова, тобто компенсуватися. Отже, так як неінвертуючий вхід заземлений, то і на інвертуючому буде нуль.

$$\Delta U = 0; U_p = 0; \Rightarrow U_n = 0;$$

В даній схемі зворотній зв'язок реалізовано з емітерів комплементарної пари, а значить транзистори будуть відкриті, як відомо падіння напруги на відкритому р-п переході близько 0,6В, і так як база і емітер з'єднанні паралельно:

$$U_{BE0} = 0,6 \text{ V}; U_{BE1} || U_{BE2}; U_{BE10} = U_{BE20} = 0,6 \text{ V};$$

Так як зворотній зв'язок має скомпенсувати напругу на вході можна прийти до висновку, що:

$$U_{R5} + U_{R6} = -U_{R2} - U_{BE0} - U_{R3} = -I_E R_2 - U_{BE0} - I_B R_3$$

## 2.2 Виведення коефіцієнту передачі по напрузі для одного з каналів

Так як вже було розглянуто вище, через те, що при негативному зворотному зв'язку вихід операційного підсилювача компенсує напругу на вході, тому на інвертуючому вході теж буде нуль. Отже, вхідна напруга буде визначатись сумою напруг прикладених до потенціометра  $R_6$  та резистора  $R_5$ :

$$U_{BX} = U_{R6} + U_{R5};$$

Напруга на виході буде визначатись негативним зворотнім зв'язком, отже:

$$U_{ВИХ} = -U_{R2} - U_{BE} - U_{R3} = -I_E R_2 - U_{BE} - I_B R_3;$$

$$K_U = -\frac{-U_{R2} - U_{BE} - U_{R3}}{U_{R6} + U_{R5}} = \frac{-I_E R_2 - U_{BE} - I_B R_3}{I_E (R_6 + R_5)}$$

### РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРИЛАДУ

Для достовірності отриманих результатів проведемо моделювання, що дасть нам змогу зрозуміти картину роботи приладу із обраними номіналами компонентів. Також моделювання дає змогу виправити помилки перед конструюванням в реальному житті.

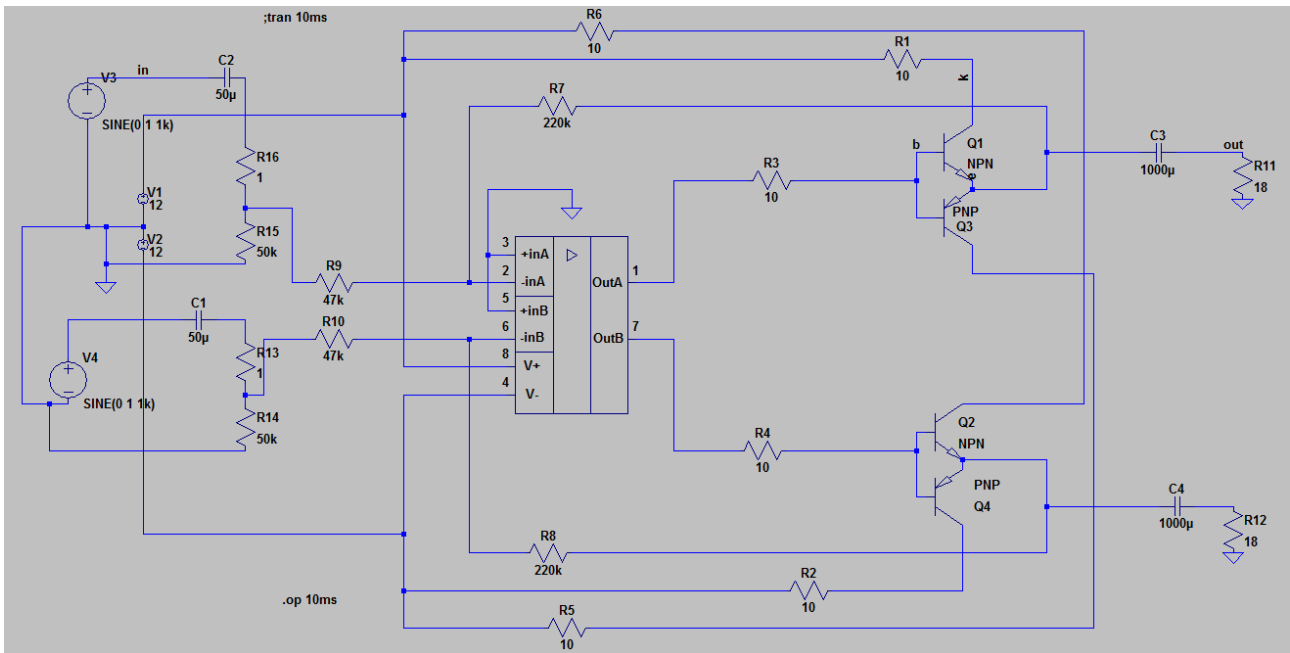


Рис. 5. Схема моделі в LTspice

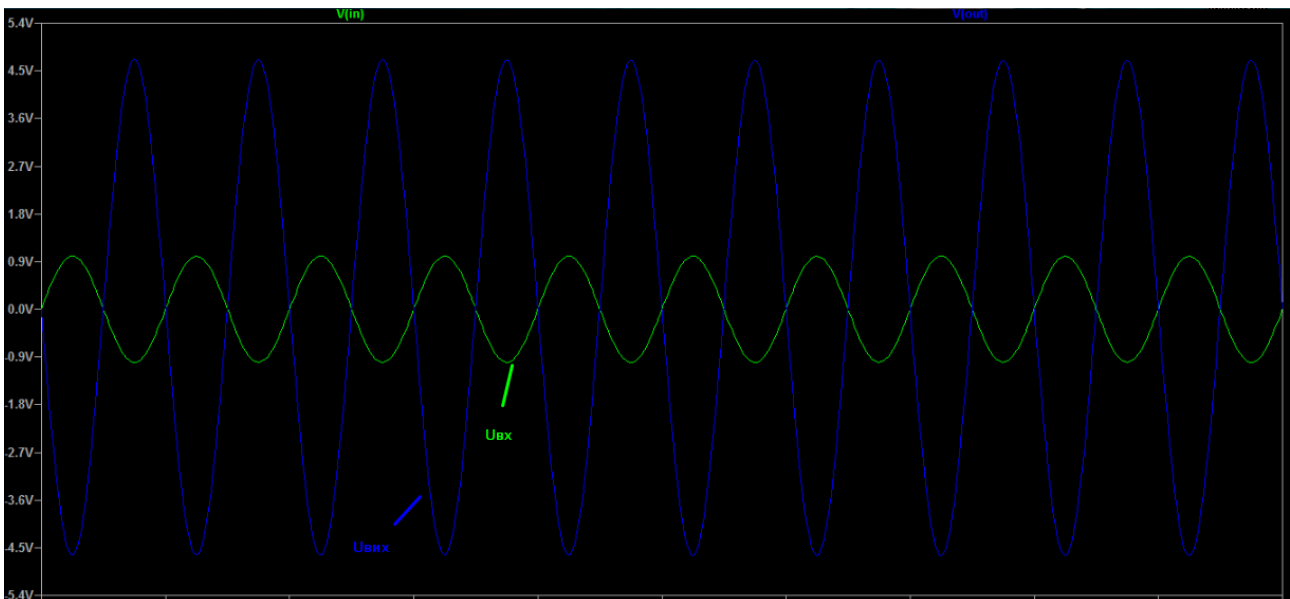


Рис.6. Графічний результат моделювання

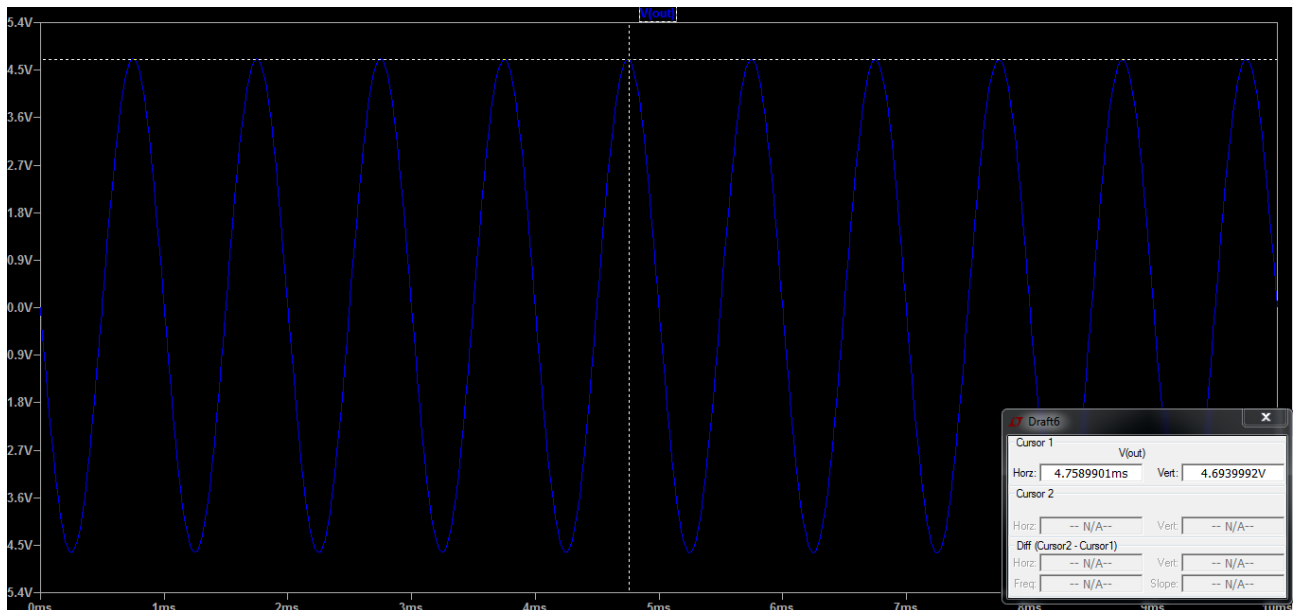


Рис. 7. Вихідний сигнал при поданому на вхід амплітудою 1В

З отриманих результатів видно, що підсилювач, як і повинно, є інвертуючим, так як ми використовуємо інвертуючий вхід операційного підсилювача. Також слід зазначити, що коефіцієнт підсилення відповідає раніше розрахованому значенню –  $-4,7$ .

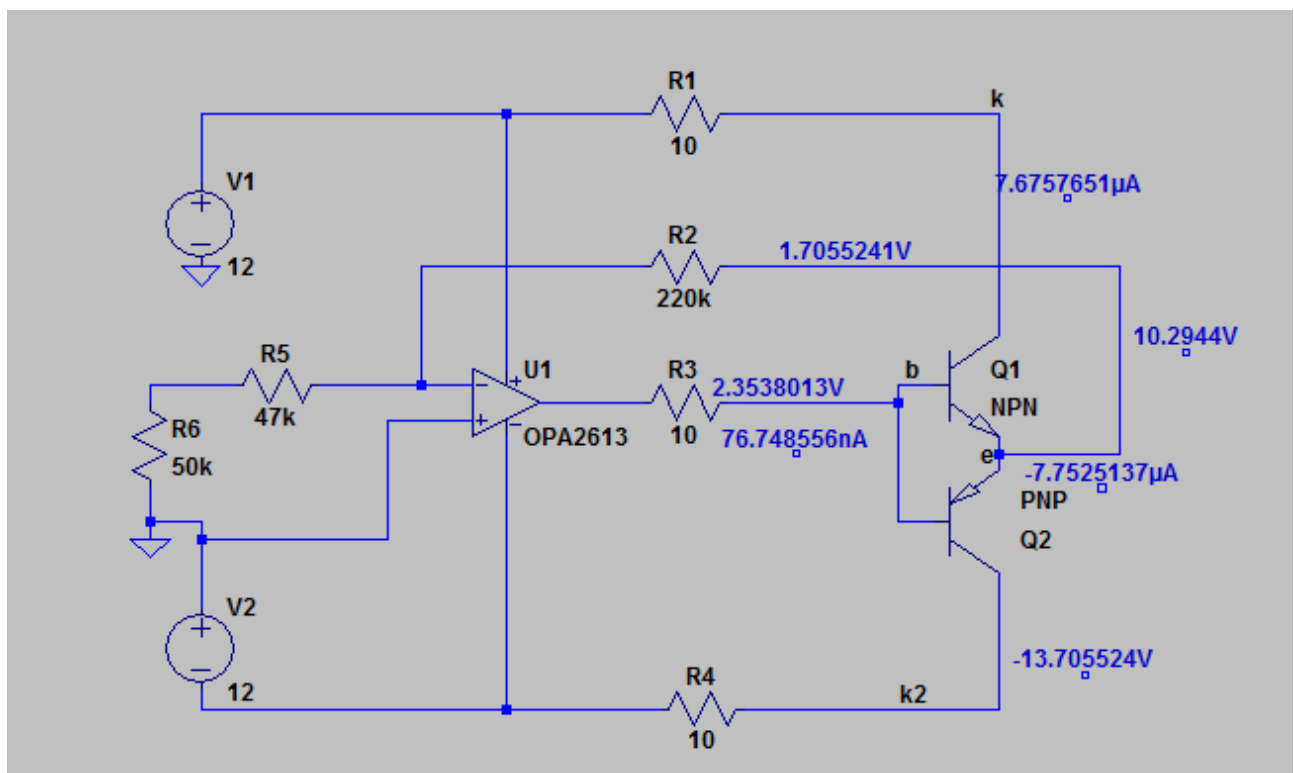


Рис. 8. Моделювання одного з каналів в режимі великого сигналу

Моделювання в режимі великого сигналу відображено на рис. 8. Виходячи з того, що вихід операційного підсилювача налаштований на те, щоб різниця входних напруг буда рівна нулю та неінвертуючий вхід замкнений на землю, отже, на ньому нуль, схема буде працювати так, щоб і на інвертуючому вході теж був встановлений нульовий потенціал. Зворотній зв'язок заводиться через емітери комплементарної пари, а отже транзистори будуть відкриті, при моделюванні виявлено наступні значення:

- напруга на виході операційного підсилювача рівна 2,4 В;
- $U_{BE} = 2,4 - 1,7 = 0,7\text{В};$
- $I_E = 7,75 \text{ мкА};$
- $I_K = 7,67 \text{ мкА};$
- $I_B = 76,7 \text{ нА};$
- $U_{KE1} = 10,3\text{В};$
- $U_{KE2} = -13,7\text{В};$

З отриманих результатів видно, що підсилювач працює в режимі АВ, та буде викликати мінімальні нелінійні спотворення. Також можна помітити, що транзистор в LTspice має коефіцієнт підсилення струму бази рівний – 100. Транзистори утворюють подільник напруги, якщо вони відкриті однаково, то і падіння напруги на переходах колектор-емітер буде однакове, в даному випадку n-p-n транзистор відкритий більше за p-n-p, через те, що на виході підсилювача позитивний потенціал.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЛАДУ

Окрім відображених на фотографіях етапах роботи над прототипом є один з найважливіших – розводка плати, може виконуватись автоматично автотросуванням або вручну в програмах типу Spring Layout, що мають дуже простий, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

Для нанесення захисного покриття на плату використано фотопапір з лазерним друком розведеної плати. За допомогою праски легко переноситься на текстоліт, треба тільки уважно продумати момент віддзеркалення.

Травлення проводимо в суміші з перекисі водню 100 мг, 30 мг лимонної кислоти та трохи солі. Сіль можна додавати впродовж травлення, якщо процес сповільнюється, а також гарним каталізатором слугує тепло, тобто можна покращити перебіг реакції, якщо помістити плату у водяну баню.

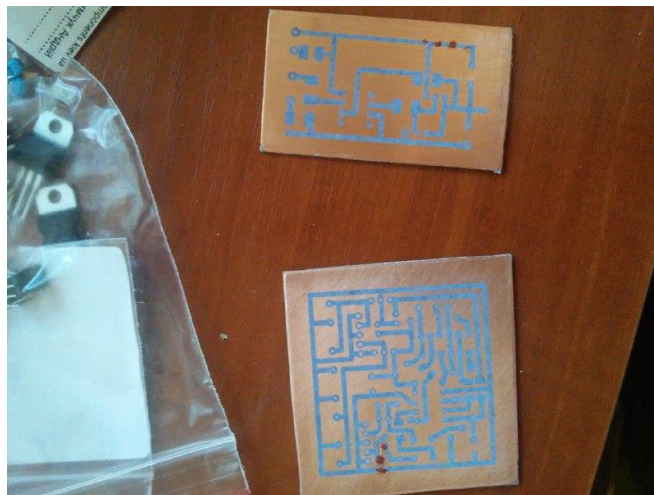


Рис. 9. Нанесення захисного покриття

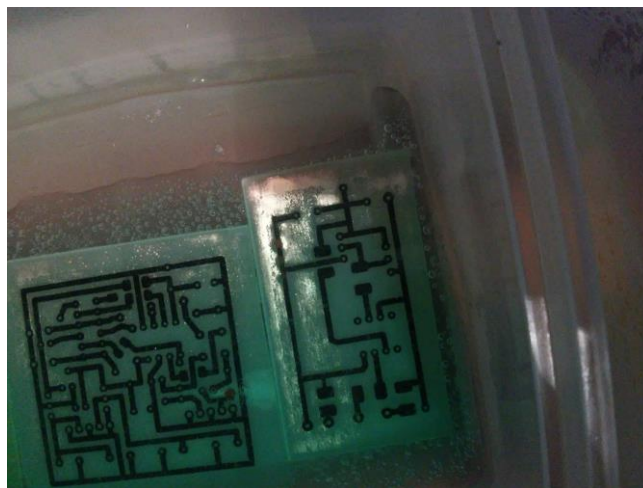


Рис. 10. Витравлення

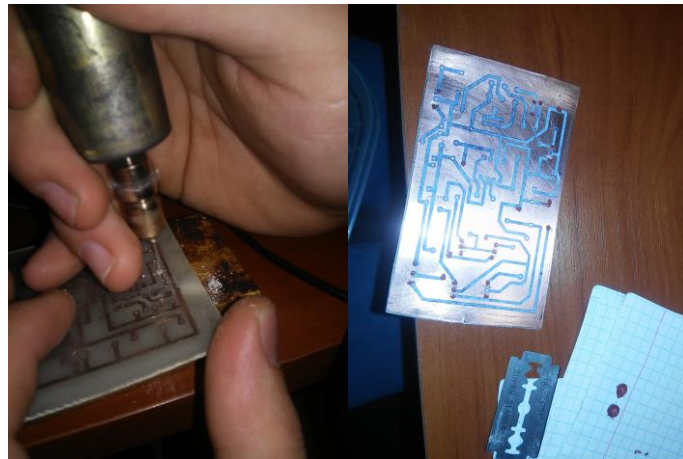


Рис. 11. Підготовка отворів під навісні компоненти та очистка плати

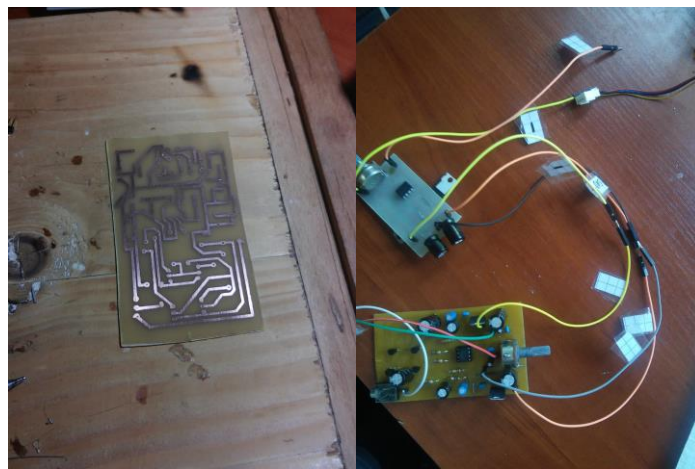


Рис. 12. Лудіння та пайка компонентів

Виміри на практиці зійшлися зі зробленими при моделюванні в програмі LTspice та підтвердили те, що коефіцієнт підсилення даної схеми  $-4,7\text{V}$ :

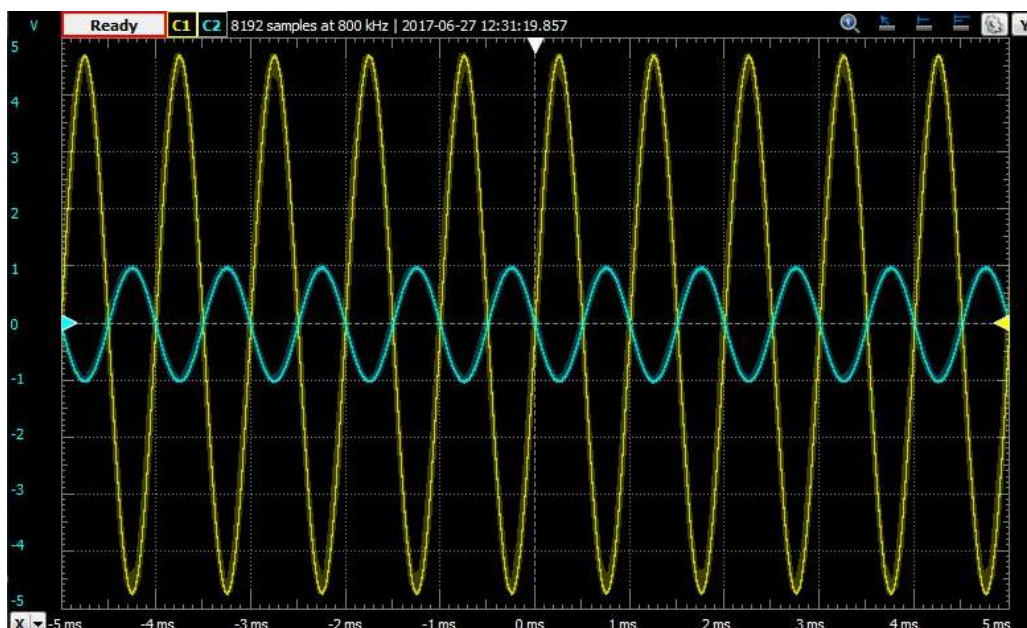


Рис. 13. Отримані на практиці значення напруги на вході та виході



Також для перевірки роботи негативного зворотного зв'язку було знято напругу База-Емітер n-p-n транзистора на першому каналі:

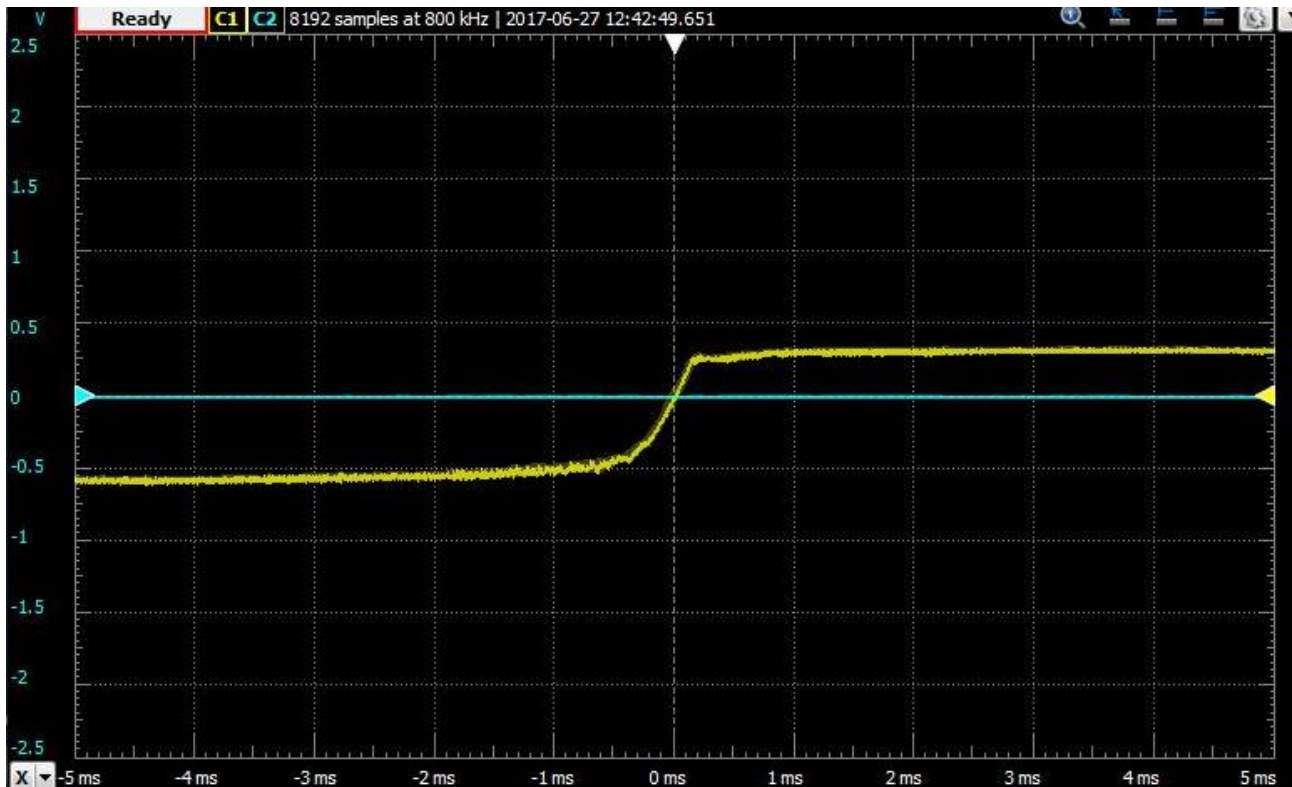


Рис. 14.Пряме зміщення переходу  $U_{BE}$

При моделюванні напруга була прийнята за 0,6 В, але слід врахувати, що модель транзистора використана при моделюванні є стандартною, а не аналогом використаного при побудові прототипу.

## **Висновок**

Зі зробленої роботи можна побачити, що операційний підсилювач може використовуватись дуже різносторонньо, навіть в цьому проекті спочатку використали для стабілізації в схемі перетворювача, а потім для підсилення в схемі підсилювача. Є багато різних видів та прикладів застосування, що є надто великою темою.

Слід зазначити, що чим більший номінал резистору зворотнього зв'язку – тим гірша стабільність роботи схеми. Також свій вплив можуть мати паразитні ємності та неякісний монтаж.

Даний підсилювач працює в режимі АВ, тобто потребує мінімальної напруги на вході, щоб перейти в робочу зону, а значить нелінійні спотворення будуть мінімальними.

### **Список використаних джерел**

1. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. –М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.- 528с.
2. П. Хоровиц, У. Хилл Искусство схемотехники, 3-е издание, Москва «Мир», 1986 – 593с.
3. Титце, Шенк Полупроводниковая схемотехника, 12ое издание, Том I; Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832с.