

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ З НЕГАТИВНИМ
ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Качур Артем

23 квітня 2021 р.

Зміст

1	Реферат	3
2	Вступ	4
3	Моделювання	5
3.1	Теоретична частина	5
3.2	Моделювання в LTspice	13
4	Висновок	17

1 Реферат

Звіт про виконання лабораторної роботи: 17 с., 4 ч., 18 рис.

Об'єкт дослідження – процеси проходження струму крізь ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ З НЕГАТИВНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ.

Мета роботи – ознайомитися з властивостями операційних підсилювачів, опанувати способи підсилення електричних сигналів схемами з ОП, охопленим негативним зворотним зв'язком та способи виконання математичних операцій за допомогою схем з ОП.

Методи дослідження – це метод співставлення: одночасне спостереження вхідного та вихідного сигналів на екрані двоканального осцилографа із наступним вимірюванням і порівнянням їх параметрів.

2 Вступ

У цій роботі досліджуються способи підсилення електричних сигналів та моделювання математичних операцій (наприклад, інтегрування сигналу) за допомогою універсального підсилювача електричних сигналів на основі інтегральної мікросхеми, який називається операційним підсилювачем.

Операційний підсилювач (англ. operational amplifier) – це диференціальний підсилювач постійного струму, який в ідеалі має нескінченний коефіцієнт підсилення за напругою і нульову вихідну напругу за відсутності сигналу на вході, великий вхідний опір і малий вихідний, а також необмежену смугу частот підсилюваних сигналів. Раніше такі високоякісні підсилювачі використовувалися виключно в аналогових обчислювальних пристроях для виконання математичних операцій, наприклад, складання та інтегрування. Звідси і походить їх назва – операційні підсилювачі (ОП).

Створення зворотного зв'язку полягає в тому, що частина вихідного сигналу підсилювача повертається через ланку зворотного зв'язку (ЗЗ) на його вхід. Якщо сигнал зворотного зв'язку подається на вхід у протифазі до вхідного сигналу (різниця фаз $\Phi = \pi/2$), то зворотний зв'язок називають негативним (НЗЗ). Якщо ж він подається на вхід у фазі до вхідного сигналу ($\Phi = 0$), то такий зворотний зв'язок називають позитивним (ПЗЗ).

3 Моделювання

3.1 Теоретична частина

У сучасній електроніці для конструювання різних електронних пристроїв (підсилювачів, детекторів, перетворювачів і т. д.) використовуються інтегральні мікросхеми (англ. integrated circuit, microcircuit chip). Шляхом комутації (створення певних електричних з'єднань) виводів інтегральних мікросхем і додавання кількох зовнішніх дискретних елементів (резисторів, конденсаторів, діодів і т. п.) вдається створити великий набір різноманітних електронних схем на основі одієї і тієї ж мікросхеми.

Основною інтегральною мікросхемою для створення аналогових електронних пристроїв є операційний підсилювач (ОП). ОП являє собою мікросхему, що за своїми розмірами і ціною практично не відрізняється від окремого транзистора, хоча вона й містить кілька десятків транзисторів, діодів і резисторів.

Завдяки практично ідеальним характеристикам ОП реалізація на їх основі різних схем виявляється значно простішою і дешевшою, ніж на окремих транзисторах і резисторах

Операційним підсилювачем називають багатокаскадний диференціальний підсилювач постійного струму, який має в діапазоні частот до кількох десятків кілогерц коефіцієнт підсилення більший за 10^4 і за своїми властивостями наближається до уявного «ідеального» підсилювача. Під «ідеальним» розуміють такий підсилювач, який має:

1. нескінченний коефіцієнт підсилення за напругою диференціального вхідного сигналу ($K \rightarrow \infty$);
2. нескінченний вхідний імпеданс ($Z_{bx} \rightarrow \infty$);
3. нульовий вихідний імпеданс ($Z_{bx} = 0$);
4. рівну нулеві напругу на виході ($U_{bx} = 0$) при рівності напруг на вході ($U_{bx1} = U_{bx2}$);
5. нескінченний діапазон робочих частот.

Характеристики реального ОП не такі ідеальні, як хотілося б. Однак, для практичних цілей ці характеристики близькі до ідеальних: коефіцієнт підсилення для низьких частот (за постійним струмом) $K > 10^4$; вхідний опір $R_{bx} > 10^6$ Ом; вихідний опір $R_{bx} < 10^2$ Ом; коефіцієнт підсилення падає до 1 на частоті порядку 1 МГц; напруга зміщення U_{zm} (визначається як напруга, яку потрібно подати на вхід ОП, щоб вихідна напруга стала рівною нулеві) для більшості ОП не перевищує 10 мВ, а для прецизійних – 10 мкВ.

Прототипом ОП може слугувати класичний диференціальний підсилювач з двома входами і несиметричним виходом.

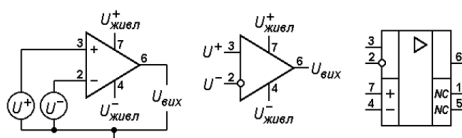


Рис. 1. Варіанти умовних позначень операційних підсилювачів на принципових електричних схемах.

Можливі варіанти умовних позначень, прийнятих для всіх типів ОП, наведені на Рис. 1. Символи “+” і “-” біля входів підсилювача вказують на відносну фазу вихідного сигналу. Якщо вхідний сигнал подавати на вхід “+” (такий вхід називають неінвертувальним), то фаза вихідного сигналу буде такою ж, що й вхідного (тобто не відбувається інверсії фази). Якщо ж вхідний сигнал подавати на вхід “-” (такий вхід називають інвертувальним), то фаза вихідного сигналу буде протилежною до фази вхідного (відбувається інверсія фази). Інвертувальний вхід на схемах часто позначають кружком. Крім вхідних виводів, на схемах вказують також ті, до яких підключають напругу живлення. Нумери біля виводів вказують відповідні ніжки реальної мікросхеми. Найчастіше зустрічаються два варіанти виконання інтегральних ОП: у металевому корпусі (Рис. 2) і пластмасовому (Рис. 2).

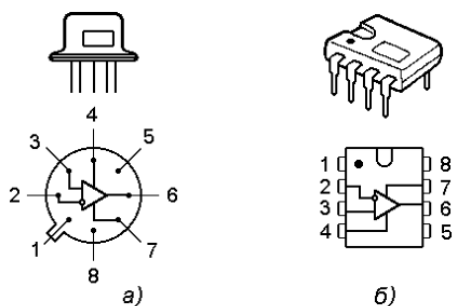


Рис. 2. Два варіанти конструкції корпусу ОП: а) металевий; б) пластмасовий. На рисунках вказано нумерацію виводів мікросхем ОП.

Рівняння, що наближено описує роботу ОП, має вигляд:

$$U_{\text{вих}} \approx K_0 (U^+ - U^-) = K_0 U_{\text{сх}} \quad (1)$$

де K_0 – модуль коефіцієнта підсилення диференціального сигналу ОП, U^+ і U^- – напруги на неінвертувальному та інвертувальному входах, відповідно, відносно землі. На Рис. 3 наведена залежність вихідної напруги ОП від різниці вхідних напруг. Оскільки важко ідеально збалансувати диференціальний підсилювач, то на виході ОП навіть за відсутності вхідного сигналу є відмінна від нуля напруга, яку називають напругою зміщення U_{zm} (пунктирна лінія). При великому K_0 , який має ОП, навіть дуже малий сигнал на вході може призвести до обмеження підсиленого сигналу на виході (Рис. 4).

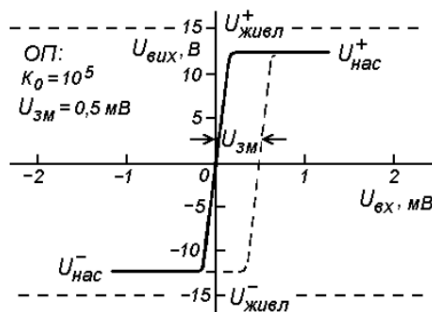


Рис. 3. Залежність вихідної напруги ОП від вхідної. На рисунку вказані напруга зміщення та напруги насичення ОП.

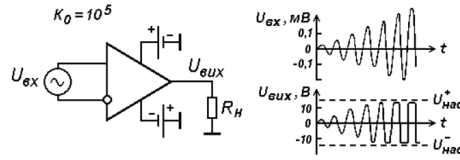


Рис. 4. Реакція ОП на синусоїдний сигнал, що наростає з часом.

Якщо на обидва входи відносно землі подати один і той же сигнал (синфазний сигнал), то вихідний сигнал ідеального ОП повинен дорівнювати нулеві. У реального ж ОП вихідний сигнал буде відмінним від нуля. Отже, точне рівняння, що описує роботу реального ОП, буде мати вигляд

$$U_{\text{вих}} = K_0 (U^+ - U^- + U_{3M}) + K_{\text{сиф}} U_{\text{сиф}}, \quad (2)$$

де $K_{\text{сиф}}$ – коефіцієнт передачі синфазного сигналу, а $U_{\text{сф}} = (U^+ - U^-)/2$ – синфазна вхідна напруга. Як правило, $K_{\text{сф}}$ зростає при зростанні частоти сигналу. У більшості ОП на низьких частотах коефіцієнт послаблення синфазного сигналу $K_0/K_{\text{сф}} = 10^4 \sim 10^5$.

У реальних ОП, як правило, коефіцієнт підсилення K_0 зменшується зі зростанням частоти сигналу. Для стійкої роботи схем на основі ОП він повинен мати на високих частотах таку ж частотну характеристику, що й одноланковий фільтр нижніх частот. Ця вимога повинна виконуватися аж до частоти, при якій $K_0 = 1$. Для виконання цієї умови схема ОП повинна містити фільтр нижніх частот з дуже низькою частотою зрізу. На Рис. 5 наведена типова частотна залежність коефіцієнта підсилення такого “скоригованого за частотою” ОП.

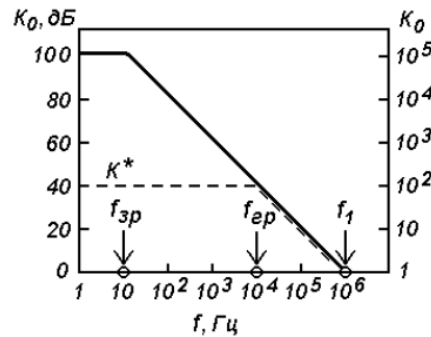


Рис. 5. АЧХ ОП з частотною корекцією (суцільна лінія – ОП без зворотного зв’язку, пунктирна – ОП зі зворотним зв’язком).

Частотні залежності коефіцієнта підсилення K_0 та зсуву фаз Φ між вихідною і вхідною напругами для ОП з частотною корекцією (тобто його АЧХ та ФЧХ) описуються формулами

$$K_0(f) = \frac{K_0(0)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3p}}\right)^2}}, \quad \Phi(f) = \arctg\left(\frac{f}{f_{3p}}\right) \quad (3)$$

де $K_0(0)$ – коефіцієнт підсилення ОП на низьких частотах ($f \ll f_{3p}$, при цьому $\Phi = 0$), f_{3p} – частота зрізу. На частоті зрізу ($f = f_{3p}$) маємо $K_{0zr} = K_0/\sqrt{2}$, $\Phi = \pi/4$.

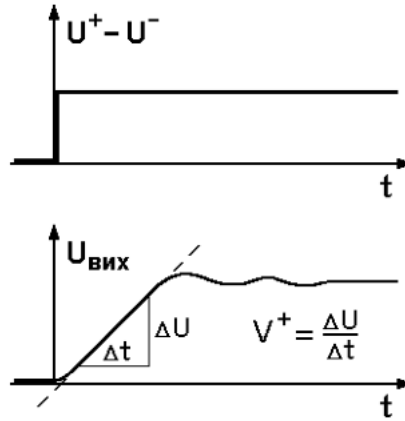


Рис. 6. Перехідна характеристика ОП.

На високих частотах коефіцієнт підсилення спадає зі зростанням частоти за законом $K_0(f) = \frac{K_0(0)f_{sp}}{f}$, а зсув фаз $\Phi = -\pi/2$

Корисно пам'ятати, що для частот вище частоти зрізу виконується співвідношення:

$$K_0(0)f_{sp} = f_I, \quad (4)$$

тут f_{zr} – частота зрізу, f_1 – частота одиничного підсилення, на якій модуль коефіцієнта підсилення $K_0(f_1) = 1$. Як випливає з (4), частота f дорівнює добутку коефіцієнта підсилення при низьких частотах $K_0(0)$ на ширину робочої смуги частот. Тобто, чим більший коефіцієнт підсилення $K_0(0)$, тим вужчою буде робоча смуга частот.

Важливими є амплітудна та перехідна характеристики реальних ОП – діапазон вихідних напруг та швидкість зростання вихідної напруги. Діапазон вихідних напруг ОП залежить від напруги живлення $U_{живл}$, яке для найпоширеніших сучасних ОП є двополярним і становить від 3 В до 15 В. Звичайно $U_{вих}$ змінюється в межах від $U^+_{живл} - 2$ В до $U^-_{живл} + 2$ В. Якщо $U_{живл} = 15$ В, то тоді -13 В $U_{вих} + 13$ В. Приклад реакції реального ОП на зростаючий синусоїдальний сигнал наведено на Рис. 4. Зверніть увагу на обмеження амплітуди вихідного сигналу. Гранична вихідна напруга ОП називається напругою насичення ($U_{+нас}$, $U_{-нас}$). Частотна характеристика ОП визначає його інерційні властивості лише тоді, коли ОП працює в лінійному режимі. Але коли на вхід ОП подається напруга, яка перевищує величину, необхідну для його насичення, то ОП переходить в насичений стан не миттєво, а з певною, властивою кожному конкретному типу ОП граничною швидкістю V (Рис. 6). Для поширених ОП швидкість наростання вихідної напруги $V = 1$ В/мкс, для швидкодіючих ОП $V = 10^3$ В/мкс. Швидкості переходу в позитивний V_+ чи в негативний V_- насичені стани можуть відрізнятися. Скінченне значення V накладає обмеження на здатність ОП підсилювати гармонічний сигнал навіть у лінійному режимі. Для гармонічного сигналу з частотою f і амплітудою U_0 на виході ОП маємо $V_{max} = 2\pi f U_0$. Тобто, ОП здатен забезпечити підсилення тільки для таких вхідних синусоїдальних сигналів, швидкість наростання яких V_{max} не перевищує V для даного типу ОП. Наприклад, для ОП з $V = 1$ В/мкс, який працює в лінійному режимі, величина вихідної напруги на частоті $f = 100$ кГц не може перевищити $U_0 = 1,6$ В. На частоті $f = 350$ кГц максимально можлива вихідна напруга буде лише $U_0 = 0,45$

В.

Будь-який реальний пристрій на базі ОП завжди має у своєму складі власне сам ОП та ланку зворотного зв'язку, характеристики якої і визначають призначення цього пристрою.

Принцип введення зворотного зв'язку полягає в тому, що частина вихідної напруги $U_{вих}$ повертається через ланку зворотного зв'язку (ЗЗ) на вхід. Якщо напруга зворотного зв'язку $U_{зз} = U_{вих}$ віднімається від вхідної напруги, то такий зворотний зв'язок називають негативним (НЗЗ) (англ. negative feedback, degenerative feedback). Якщо ж вона додається до вхідної напруги, то такий ЗЗ називають позитивним (ПЗЗ) (англ. positive feedback). Коефіцієнт називається коефіцієнтом зворотного зв'язку (англ. feedback factor). Якщо $\beta = 1$, то зворотний зв'язок називають повним, тобто вся вихідна напруга знову подається на вхід підсилювача. Зазначимо, що в загальному випадку коефіцієнт зворотного зв'язку є величиною комплексною: $\tilde{\beta} = \tilde{U}_z / \tilde{U}_{bx}$

Виявляється, що характеристики будь-якої схеми з оперативним підсилювачем, охопленим колом зворотного зв'язку, визначаються не параметрами самого ОП, а характеристиками зовнішнього по відношенню до ОП кола зворотного зв'язку, тобто під'єднуючи до одного й того ж ОП різні зовнішні елементи (резистори, конденсатори, діоди і т. п.), можна одержати цілу низку пристроїв різного функціонального призначення.

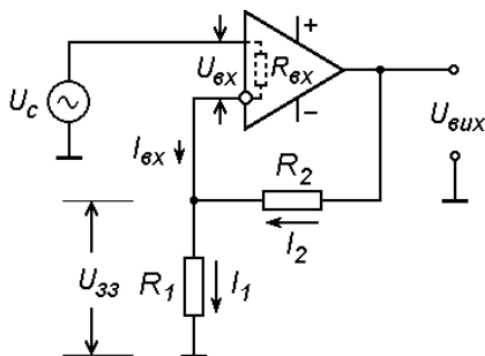


Рис. 7. Дія негативного зворотного зв'язку на прикладі найпростішого варіанту неінвертувального підсилювача (послідовний НЗЗ за напругою).

Розглянемо дію негативного зворотного зв'язку на прикладі так званого неінвертувального підсилювача, найпростіший варіант якого наведено на Рис.7. Напругу U_c джерела сигналу подають на неінвертувальний вхід ОП. Частину вихідної напруги, яку знімають з подільника R_1, R_2 , подають на інвертувальний вхід ОП, реалізуючи таким чином негативний зворотний зв'язок. Коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку $\beta = R_1 / (R_1 + R_2) < 1$. Внутрішня схема ОП замінена вхідним опором $R_{вх}$ (для спрощення покладемо $R_{вх}$). Згідно зі схемою,

$$U_{Bx} = U_c - U_{зз} = U_c - \beta U_{вих} \quad (5)$$

де U_z – напруга НЗЗ, яка подається у вхідну ланку підсилювача (це напруга на опорі R_1). З урахуванням того, що

$$U_{вих} = K_0 U_{\theta x} = K_0 (U_c - \beta U_{вих}) \quad (6)$$

можемо записати формулу для коефіцієнта підсилення ОП з ланкою зворотного зв'язку:

$$K'' = U_{6ux}/U_c = K_0/(I + \beta K_0) \quad (7)$$

Для зручності аналізу розділимо чисельник і знаменник в (7) на K_0 :

$$K^* = (1/\beta)/(1 + 1/\beta K_0) \quad (8)$$

Якщо $K_0 \gg 1$, що досить легко виконати при достатньо великому K_0 , то

$$K^* = (1/\beta) \quad (9)$$

Таким чином, коефіцієнт підсилення K^* ОП з негативним зворотним зв'язком при достатньо великому K_0 визначається лише параметрами ланки НЗЗ і не залежить від характеристик самого ОП !

Для нашого неінвертувального підсилювача одержимо

$$K^* = 1/\beta = (R_l + R_2)/R_1. \quad (10)$$

Зазначимо, що формула (7) є універсальною для всіх схем з ОП, незалежно від того, яким би чином не будувалася ланка зворотного зв'язку. Більш того, вона придатна і для випадку позитивного зворотного зв'язку, для чого треба лише змінити знак “+” на “-” в знаменнику.

Наведемо найважливіше правило, яке визначає поведінку операційного підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком: напруга на виході ОП прямує до такого значення (абсолютна величина та полярність напруги), при якому різниця напруг між обома його входами стає рівною нулю. Можна сказати, що ОП “оцінює” стан входів і за допомогою зовнішньої схеми зворотного зв'язку передає напругу з виходу на вхід так, щоб в результаті різниця напруг між входами прямувала до нуля.

З рівняння (7) випливає, що похибка встановлення K^*

$$dK^*/K^* = (dK_0/K_0) \cdot (1/\beta K_0) \quad (11)$$

де dK_0 – нестабільність коефіцієнта підсилення ОП, пов'язана із зміною температури, напруги джерела живлення, часом, технологічними вадами і т.д. Отже, чим більше K_0 , тим точніше і стабільніше бажане K^* у порівнянні із стабільністю K_0 вихідного ОП, тобто НЗЗ забезпечує стабільність коефіцієнта підсилення. Величина K_0 носить назву петльового підсилення. Видно, що найбільше значення петльового підсилення для схеми на Рис. 7 досягається при $\beta = 1$, а отже $K^* = 1$, тобто для так званого повторювача напруги

Оскільки на великих частотах диференціальний коефіцієнт підсилення ОП K_0 падає (Рис. 5), то і K^* буде підтримуватися на рівні 100 (пунктирна лінія) , тільки до частоти, що близька до $f_{gr} = 10^4$ Гц, коли K_0 стане рівним одиниці. Для частот, більших за f_{gr} , $K^* = K_0$. Однак, смуга частот сигналів, які підсилює підсилювач з НЗЗ, розшириться порівняно з ОП без зворотного зв'язку в K_0 разів і складатиме тепер 10 кГц. Якщо ж потрібен підсилювач зі смугою в 10 разів ширшою, наприклад, 100 кГц, то застосовують один за одним два підсилювача з $K^* = 10$. Повторювач напруги має смугу частот до 1 МГц.

Можна довести, що застосування негативного зворотного зв'язку впливає на вхідний та вихідний опір (імпеданс) пристрою в залежності від способу введення НЗЗ. Всі способи побудови зворотного зв'язку відрізняються між собою за тим, як сигнал ЗЗ знімається з виходу і яким чином подається на вхід. В нашому прикладі на Рис. 7 напруга з виходу знімається паралельно навантаженню і тому її називають

зворотним зв'язком за напругою. Якщо ж послідовно з навантаженням включити невеликий опір і знімати з нього напругу зворотного зв'язку, то такий НЗЗ буде носити назву зворотного зв'язку за струмом.

Звернемося знову до нашого підсилювача на Рис. 7 і подивимося, як подається напруга зворотного зв'язку на вхід. Добре видно, що U_{zz} включена послідовно з $U_{вх}$ відносно напруги сигналу. Такий зворотний зв'язок називають послідовним. Якщо ж напруга зворотного зв'язку подається на вхід паралельно $U_{вх}$, то такий зворотний зв'язок називають паралельним.

Таким чином, підсилювач на Рис. 7 має повну назву «підсилювач з послідовним негативним зворотним зв'язком за напругою». Неважко підрахувати, що існують чотири варіанти побудови схем зворотного зв'язку, кожна з яких відрізняє пристрій, побудований на її основі, за розмірністю коефіцієнта перетворення, а отже за функціональним призначенням. Причиною цьому є вплив способу введення НЗЗ на вхідний та вихідний опір (імпеданс) отриманого пристрою.

Можна показати, що для схеми на Рис. 7:

$$\begin{aligned} R_{\theta x}^* &= R_{Bx}(1 + \beta K_0) \\ R_{\theta ux}^* &= R_{\theta ux} / (1 + \beta K_0), \end{aligned} \quad (12)$$

тобто вхідний опір приблизно в K_0 разів більший, а вихідний – у стільки ж разів менший, відповідно, за опір ОП без петлі зворотного зв'язку. Такий перетворювач з боку входу є “ідеальним” вимірювачем напруги тому, що має високий вхідний опір, а з боку виходу – “ідеальним” джерелом напруги, тому, що його вихідний опір дуже малий. Таким чином, реалізується функція підсилювача напруги з безрозмірним коефіцієнтом підсилення за напругою:

$$K^* = \frac{U_{вих}}{U_c} = K_u \quad (13)$$

На Рис. 8 наведені схеми решти варіантів введення НЗЗ, які реалізують функції:

- а перетворювача струм-напруга (трансформатор опору, паралельний НЗЗ за напругою),
- б перетворювач напруга-струм (трансформатор провідності, послідовний НЗЗ за струмом),
- в підсилювач струму (паралельний НЗЗ за струмом).

У випадках а) і б) коефіцієнт перетворення – величина розмірна, звідси і відповідна назва перетворювача.

Наведені основні варіанти (Рис. 7, 8) введення негативного зворотного зв'язку є основою побудови й аналізу великого розмаїття схем із застосуванням ОП того чи іншого конкретного призначення. Розглянемо ті з них, які зустрічаються найчастіше.

Ми вже згадували про повторювач напруги. З формули (13) одиничний коефіцієнт підсилення реалізується в тих випадках, коли $R_1 \gg R_2$. Задовольнити цю нерівність на практиці можна у найпростіший спосіб так, як показано на Рис. 9. Завдяки виключно високому вхідному опору і низькому вихідному, така схема часто застосовується як узгоджувальний елемент або буфер.

Якщо необхідно інвертувати фазу сигналу на виході підсилювача, застосовують інвертувальний підсилювач (Рис. 10). Коефіцієнт підсилення такого пристрою буде дорівнювати:

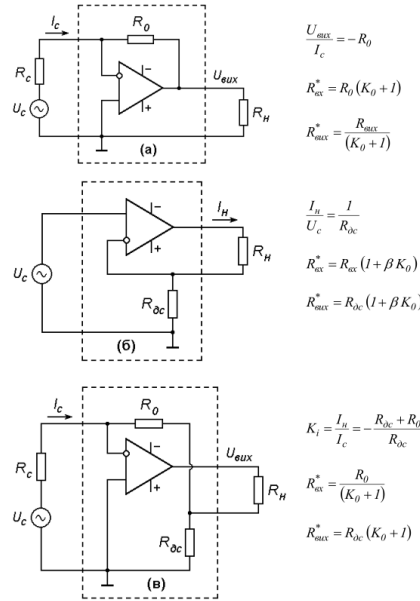


Рис. 8. Варіанти введення негативного зворотного зв'язку: а) перетворювач струм-напруга (паралельний НЗЗ за напругою); б) перетворювач напруга-струм (послідовний НЗЗ за струмом); в) підсилювач струму (паралельний НЗЗ за струмом). Опір $R_{\text{дс}}$ – датчик струму

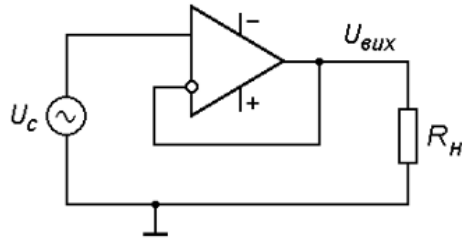


Рис. 9. Повторювач напруги.

$$K^* = -\frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

Застосування операційних підсилювачів у поєднанні з реактивними елементами дозволяє зробити точнішими операції інтегрування і диференціювання сигналів, ніж це можна зробити за допомогою RC-фільтрів.

Інтегратор використовується для одержання вихідного сигналу, пропорційного інтегралу вхідної напруги. Коло НЗЗ інтегратора на основі ОП являє собою інтегровальну RC-ланку – фільтр нижніх частот (вихідна напруга знімається з конденсатора (Рис. 11)). На виході інтегратора маємо

$$U_{\text{вих}}(t) - U_{\text{вих}}(0) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_c(t) dt \quad (15)$$

Диференціатор дозволяє одержати вихідну напругу, пропорційну швидкості зміни вхідної. Коло НЗЗ диференціатора на основі ОП являє собою диференціальну RC-

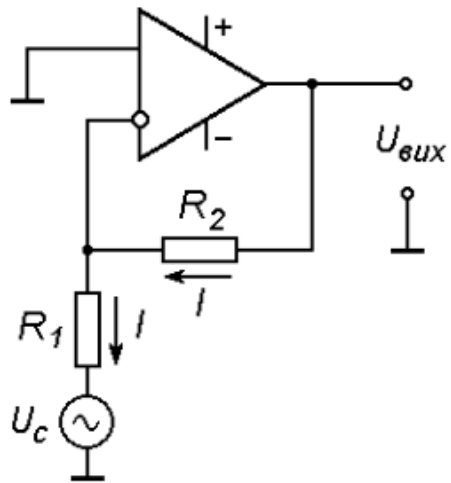


Рис. 10. Інвертувальний підсилювач.

ланку – фільтр верхніх частот (вихідна напруга знімається з резистора (Рис. 12)). Вихідний сигнал диференціатора визначається похідною вхідного сигналу по часу

$$U_{vux}(t) = -RC \frac{dU_c(t)}{dt} \quad (16)$$

Введення в ланки зворотного зв'язку нелінійних елементів (діодів, транзисторів) дозволяє побудувати досить точні функціональні перетворювачі – прилади, які дають на виході певну функцію (експоненційну, логарифмічну і т. п.), аргументом якої є вхідна напруга.

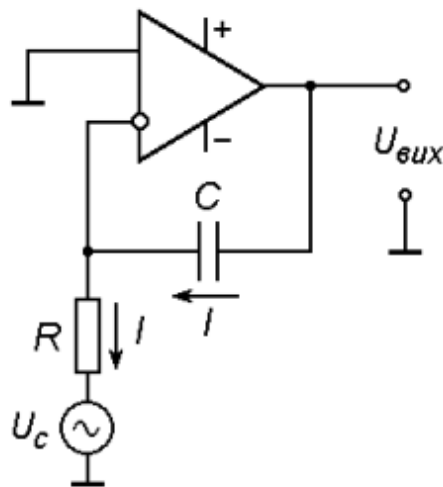


Рис. 11. Інтегратор.

3.2 Моделювання в LTspice

Зкомпонуємо схеми.

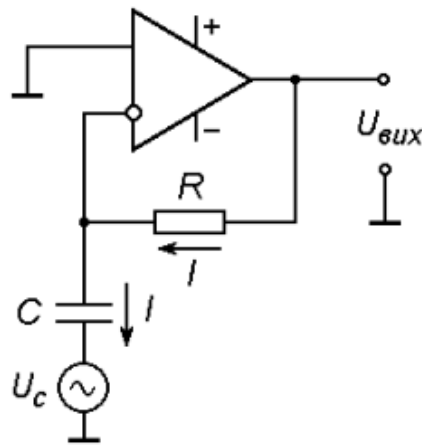


Рис. 12. Диференціатор.

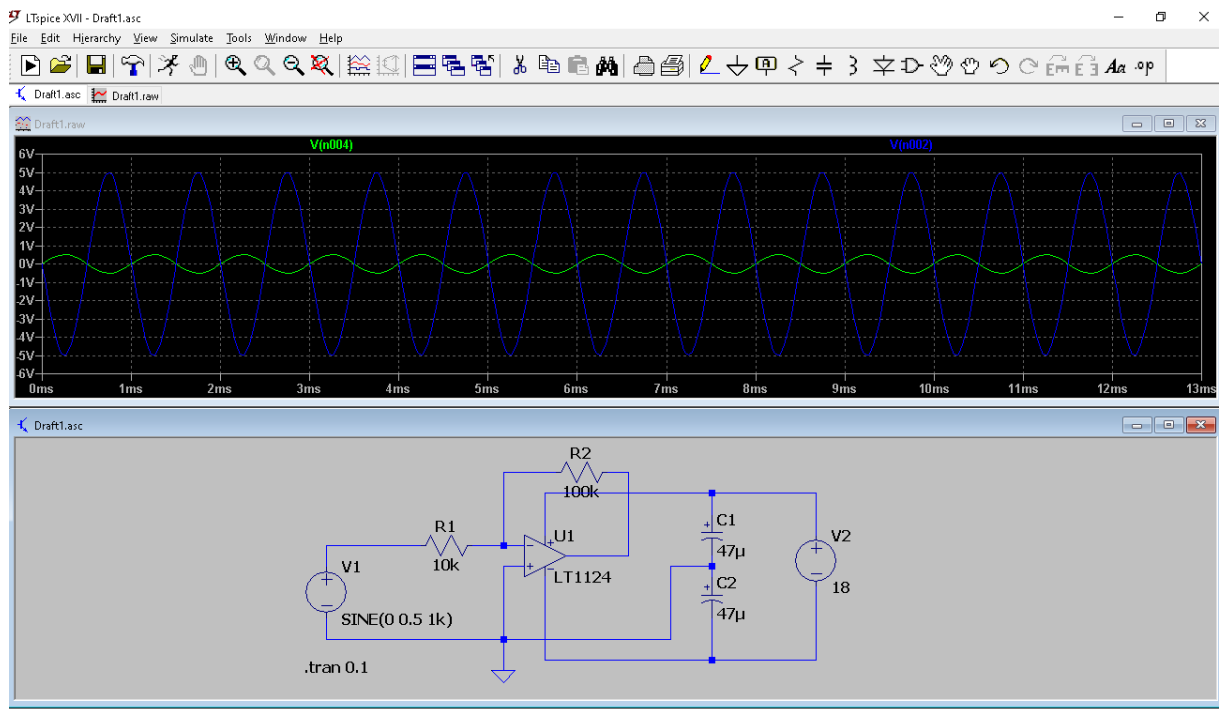


Рис. 13. Схема моделі інвертувального підсилювача

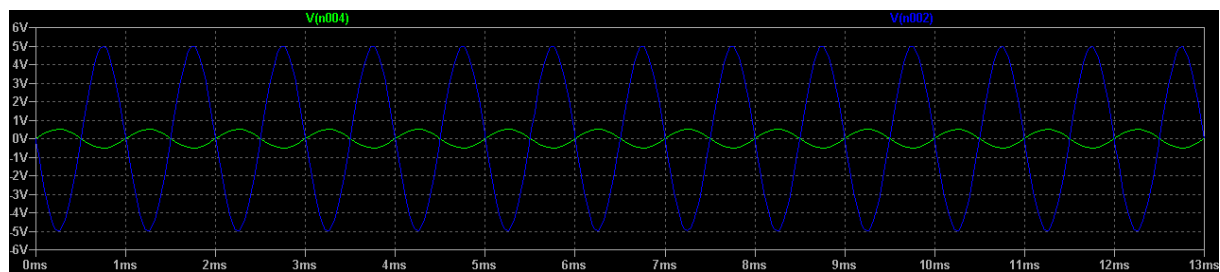


Рис. 14. Інвертувальний орратр осцилограма

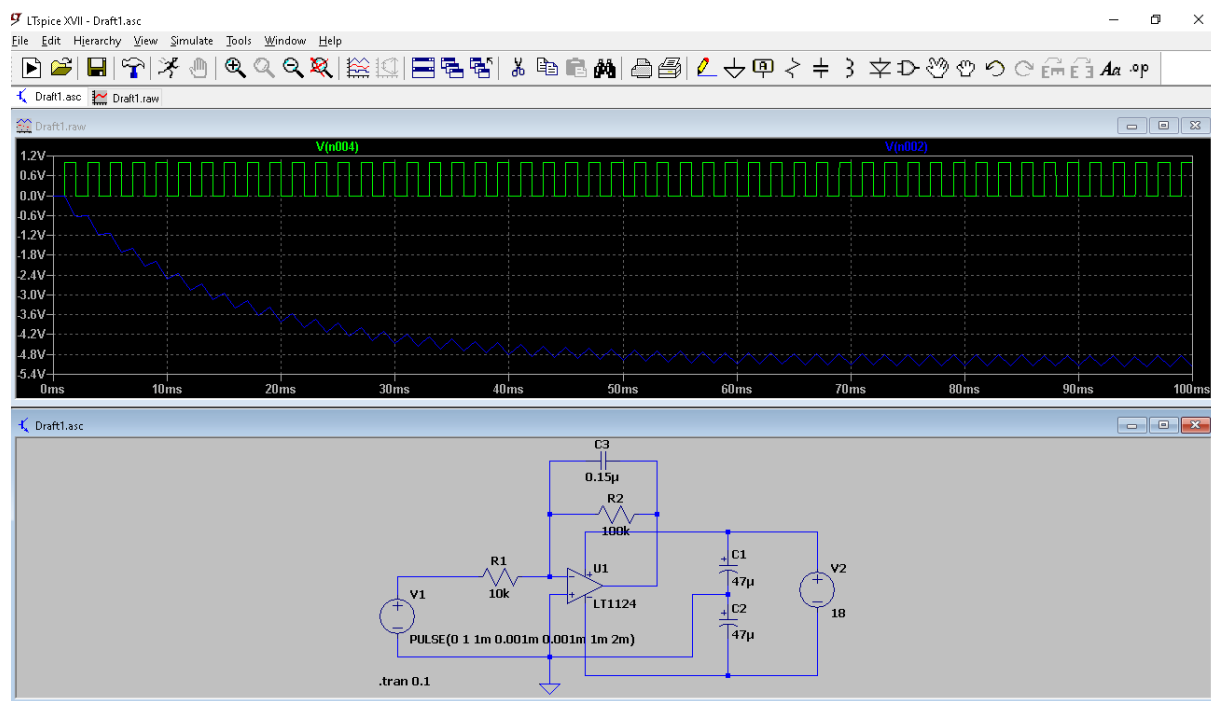


Рис. 15. Схема моделі інтегратора на базі інвертувального підсилювача

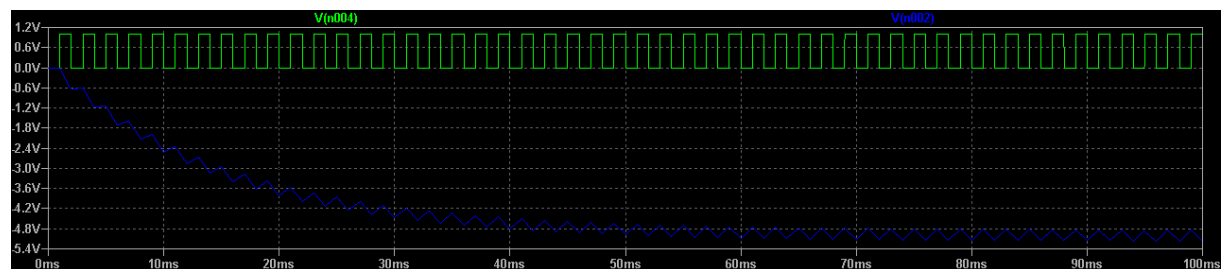


Рис. 16. Інтегратор ортрап осцилограма

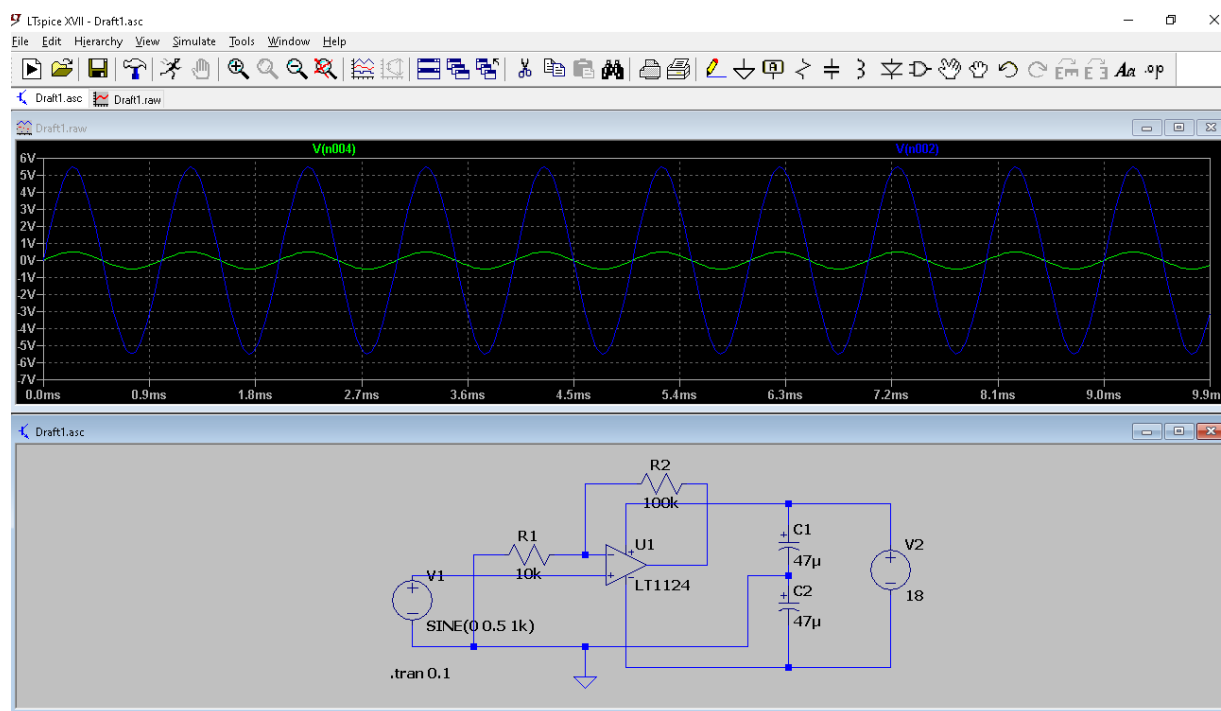


Рис. 17. Схема моделі неінвертувального підсилювача

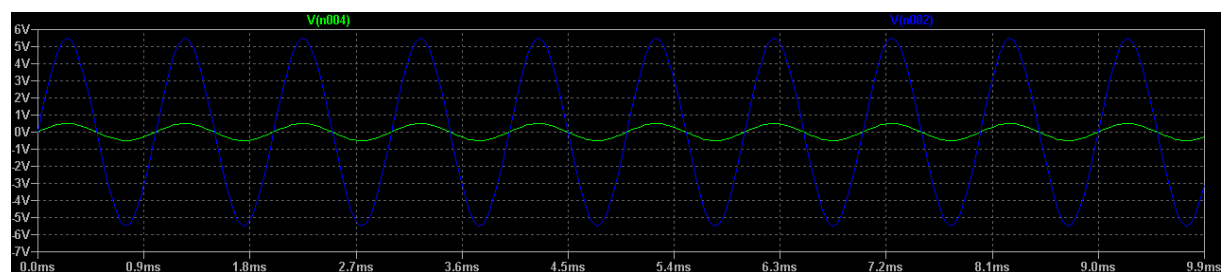


Рис. 18. Неінвертувальний оррапр осцилограма

4 Висновок

В ході роботи ознайомився з властивостями операційних підсилювачів, опанував способи підсилення електричних сигналів схемами з ОП, охопленим негативним зворотним зв'язком та способи виконання математичних операцій за допомогою схем з ОП.