

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені**  
**ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Охріменко Г.М.**

**ЗВІТ**

**Моделювання операційних підсилювачів з позитивним  
зворотнім зв'язком**

**Київ. КНУ ім. Т. Шевченка, 2021**

**УДК 007.008 (005.21)**

ББК 73Ц

I-72

**Укладачі:** Г. М. Охріменко

I-72            Звіт. Моделювання операційних підсилювачів з позитивним зворотнім зв'язком./ укл. Г. М. Охріменко. – К. : КНУ ім. Т. Шевченка, 2021. – 10 с. (Укр. мов.)

Наведено загальний звіт виконання роботи з моделювання електронних схем у програмі LTspice™.

**УДК 006.020 (004.21)**

**ББК 73Ц**

© Київський Національний  
Університет імені Тараса Шевченка,  
2021

## **РЕФЕРАТ**

Звіт про моделювання підсилювачів з позитивним зворотнім зв'язком: 10 с., 8 рис.

Мета роботи – ознайомитися з властивостями схем на операційних підсилювачах (ОП), охоплених позитивним зворотним зв'язком, опанувати способи генерації електричних сигналів за допомогою схем з ОП.

Об'єкт дослідження – операційні підсилювачі.

Предмет дослідження – теоретичні основи, принципи роботи, фізичний зміст і застосування операційних підсилювачів.

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

**ЕЛЕКТРОННИЙ СИГНАЛ, ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ, ПОЗИТИВНИЙ ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК, LTSPICE.**

## **Зміст**

1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА .....	8
ВИСНОВКИ.....	10
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	10

# 1. Теоретичні відомості

**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  $\Phi = 180^\circ$ ), то зворотний зв'язок називають негативним (НЗЗ). Якщо ж він подається на вхід у фазі до вхідного сигналу ( $\Phi = 0^\circ$ ), то такий зворотний зв'язок називають позитивним (ПЗЗ).

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 одєї і тієї ж мікросхеми. 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.

Під «ідеальним» розуміють такий підсилювач, який має:

- 1) нескінченний коефіцієнт підсилення за напругою диференціального вхідного сигналу ( $K \rightarrow \infty$ );
- 2) нескінченний вхідний імпеданс ( $Z_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ );
- 3) нульовий вихідний імпеданс ( $Z_{\text{вих}} = 0$ );
- 4) рівну нулевій напругу на виході ( $U_{\text{вих}} = 0$ ) при рівності напруг на вході ( $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$ );
- 5) нескінченний діапазон робочих частот.

**Компаратор** – це електронний пристрій порівняння двох аналогових сигналів:  $U_{\text{вх1}}$  та  $U_{\text{вх2}}$ . При цьому на виході схеми формуються тільки два значення вихідного сигналу: а) напруга на виході максимальна ( $U_{\text{вих}} = U_{\text{max}}$ ), якщо різниця напруг між вхідними сигналами є додатньою ( $U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}} > 0$ ); б)

напруга на виході мінімальна ( $U_{\text{вих}} = U_{\text{min}}$ ), якщо різниця напруг між вхідними сигналами є від'ємною ( $U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}} < 0$ ).

**Передавальна характеристика компаратора** – залежність вихідної напруги компаратора від напруги на його вході.

**Рівень включення (виключення) компаратора** – значення напруги на вході компаратора  $U_{\text{вх}} = U_{\text{вкл}}$ , при якій вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  змінює своє значення від мінімального  $U_{\text{min}}$  до максимального  $U_{\text{max}}$  (при включенні); при виключенні  $U_{\text{вх}} = U_{\text{викл}}$  і вихідна напруга змінюється від  $U_{\text{max}}$  до  $U_{\text{min}}$ .

**Генератори** – це електронні пристрої, які формують на виході змінну напругу потрібної форми. На відміну від підсилювачів, у таких пристроїв немає входу. Їх вихідний сигнал з'являється у відповідь на підключення до них джерела живлення. Форма генерованої напруги може бути різноманітною: гармонічною, прямокутною, пилкоподібною або будь-якою іншою.

Сконструюємо ланку позитивного зворотного зв'язку, подавши сигнал з виходу операційного підсилювача на його неінвертувальний вхід (Рис. 1) за допомогою подільника напруги  $R_1, R_2$ . При цьому коефіцієнт зворотного зв'язку  $\beta = R_1/(R_1 + R_2)$ . Якщо  $K_0 \cdot \beta > 1$ , то флуктуація сама себе підсилюватиме і амплітуда на виході зростатиме. Врешті-решт на виході встановиться напруга, що дорівнює напрузі насичення ОП (негативній чи позитивній, в залежності від полярності початкової флуктуації). Процес встановлення відбувається достатньо швидко або, як кажуть, лавиноподібно (для більшості реальних інтегральних ОП – від десятків мікросекунд до долей мікросекунди).

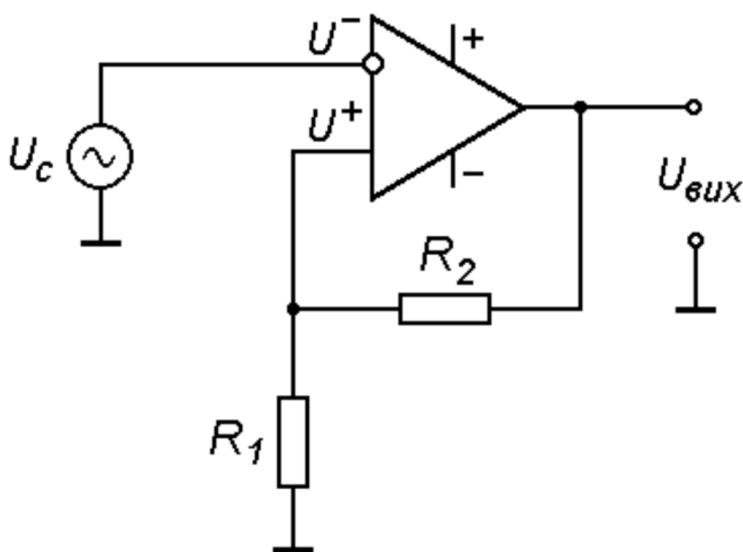
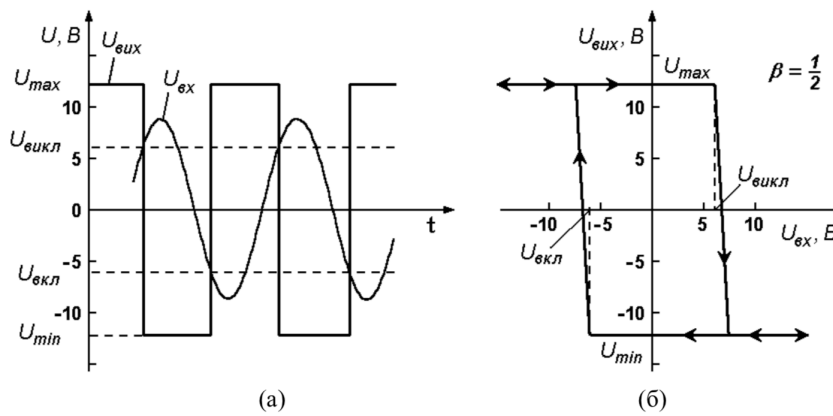


Рис. 1 Тригер Шміта

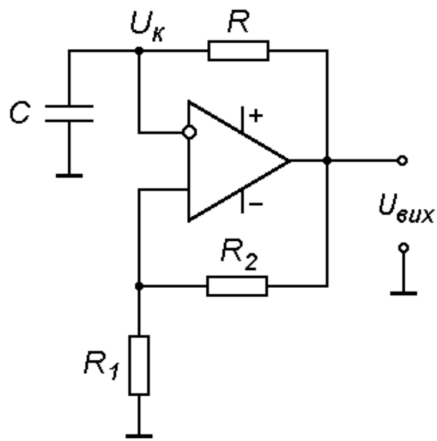


Залежність від часу вхідної і вихідної напруг тригера Шміта (а) та його передавальна характеристика (б) з петлею гістерезису ( $\beta = 0,5$ ).

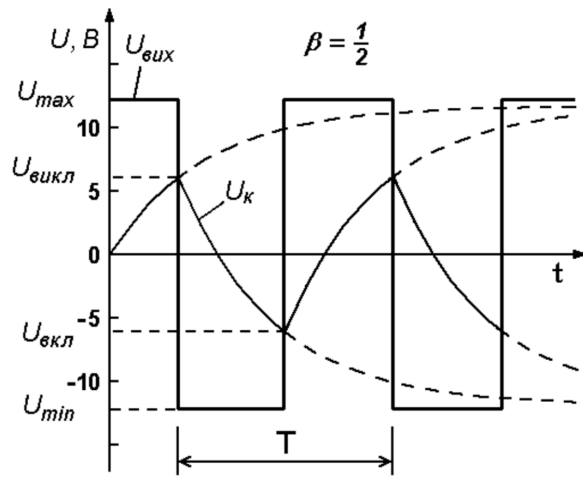
Рис. 2

Наявність неоднозначності, або гістерезису, є невід'ємною рисою будь-якого пристрою, який містить ланку позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ). Ширина петлі гістерезису визначається рівнем  $U^+$  на неінвертувальному вході ОП, який, у свою чергу, залежить від коефіцієнта зворотного зв'язку  $\beta$ . Чим менше  $\beta$ , тим вужча петля гістерезису. Пристрій, який має два стабільних стани у відповідь на зміну вхідного сигналу називають *тригером*. За відсутності зовнішнього впливу тригер може перебувати у кожному з двох стабільних станів нескінченно довго, тобто він являє собою *бістабільний елемент*. Перехід з одного стабільного стану в інший буде відбуватися лише під дією зовнішнього збурення.

Для того щоб побудувати генератор електричних сигналів прямокутної форми, потрібно до тригера Шміта додати частотно залежну ланку негативного зворотного зв'язку (Рис. 3). Стала часу ланки  $\tau = RC$  перевищує час лавиноподібного переходу тригера з одного стабільного стану в інший. Отже при включенні живлення початкова флуктуація завдяки дії ланки ПЗЗ лавиноподібно переводить ОП в насичення, тобто в один із стабільних станів. Припустимо, що цей стан відповідає додатній напрузі на виході ОП ( $U_{\text{вих}} = U_{\text{max}} = +12 \text{ В}$ ). Ця напруга починає через резистор  $R$  заряджати конденсатор  $C$  таким чином, що на обкладинці конденсатора, з'єднаний з інвертувальним входом, зростає додатна напруга. Зростання продовжується до тих пір, поки не буде перевищено значення напруги, яка встановилася на неінвертувальному вході. В цей момент схема “перекидається” і вихідна напруга лавиноподібно досягає значення  $U_{\text{вих}} = U_{\text{min}} = -12 \text{ В}$ . Тепер ця напруга починає перезаряджати конденсатор від'ємним струмом до тих пір, поки напруга на інвертувальному вході ОП не досягне від'ємної величини, рівної напрузі на неінвертувальному вході ОП. Схема знову переходить у новий стан, який веде до нового процесу перезарядки конденсатора.



Генератор прямокутних імпульсів (мультивібратор).



Форма імпульсів на виході мультивібратора і на конденсаторі.

Рис. 3

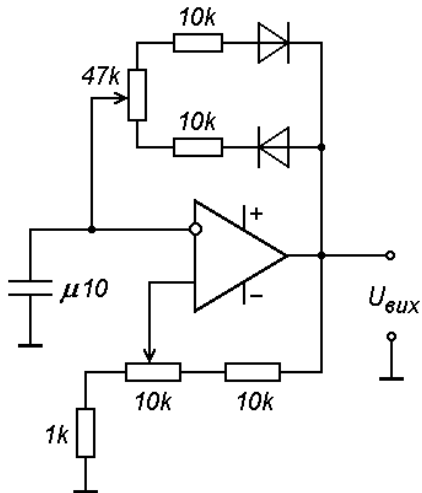


Рис. 6. Мультівібратор з плавно регульованими прогальністю і частотою імпульсів.

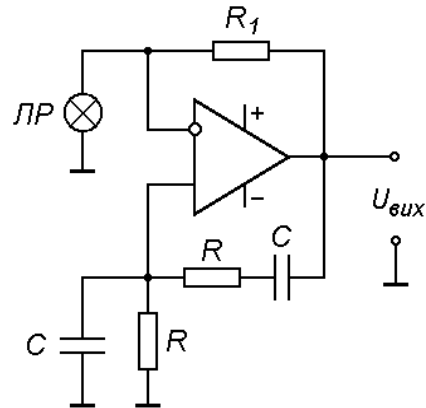


Рис. 7. Генератор гармонічних коливань з лампочкою розжарення.

Рис. 4

## 2. Практична частина

### Релаксаційний генератор



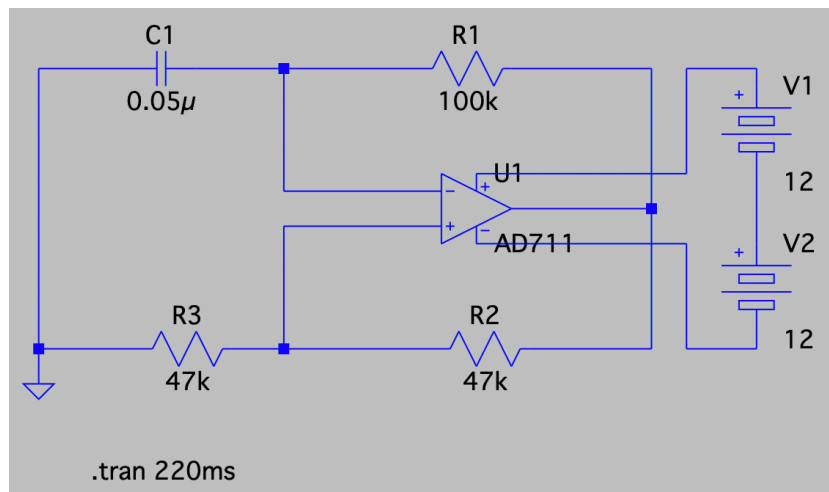


Рис. 5 Схема установки

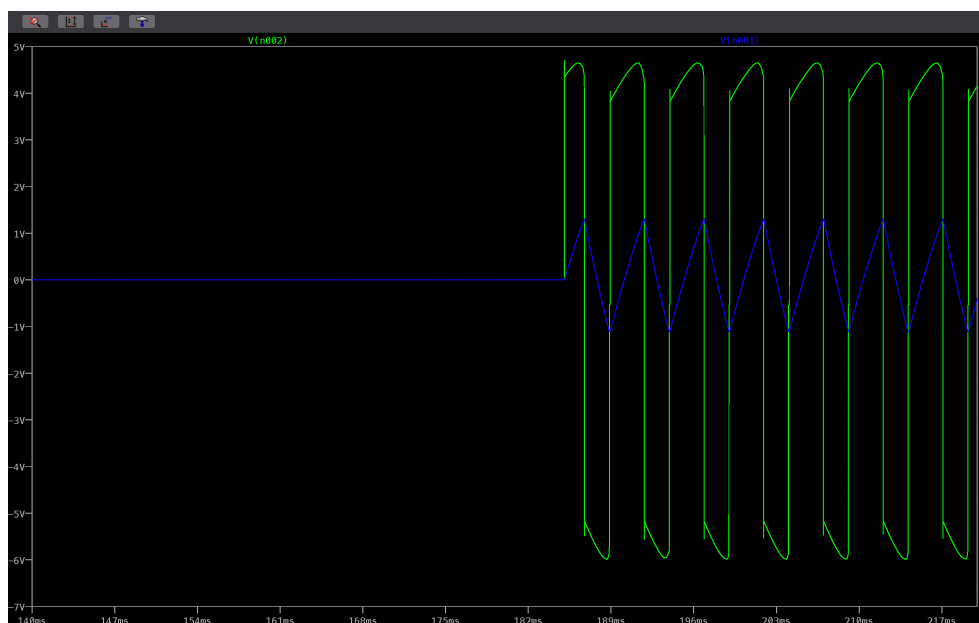


Рис. 6 ВАР запуску генератора

## Генератор гармонічних коливань

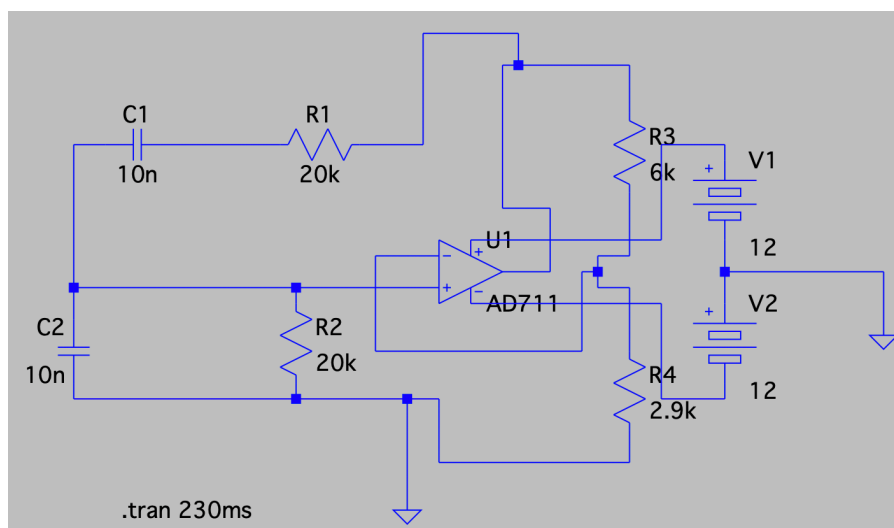


Рис. 7 Схема установки

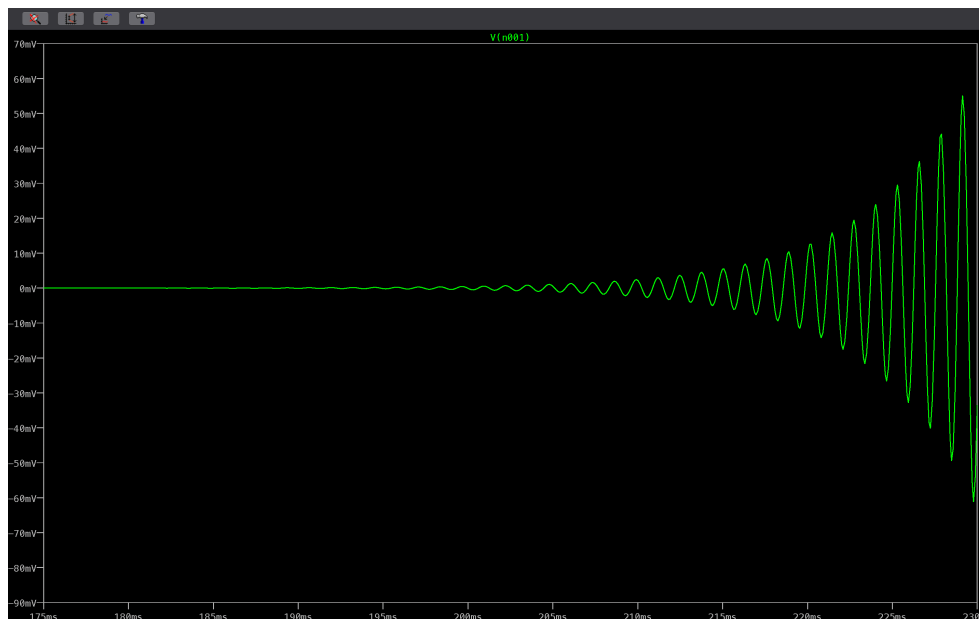


Рис. 8 ВАХ запуску генератора

## Висновки

У ході даної лабораторної роботи ми ознайомилися з властивостями схем на операційних підсилювачах (ОП), охоплених позитивним зворотним зв'язком та опанували способи генерації електричних сигналів за допомогою схем з ОП. Для цього ми змоделювали дві схеми, а саме: релаксаційний генератор (або мультивібратор) та генератор гармонічних коливань. Робота першого заснована на гистерезисі зразка найпростішого триггеру Шміта, що описаний у теоретичних відомостях вище. Як видно з відповідної ВАХ установки, реальна залежність напруги гарно узгоджується з теорією. Щодо ж генератора синусоїдального сигналу, то був помічений характерний час наростання потрібної амплітуди напруги при включенні. Для його роботи були створені умови для генерації на виході сигналу лише однієї частоти, однієї гармоніки. До ланки ПЗЗ операційного підсилювача включено смуговий фільтр, нульовий зсув фаз у якому реалізується на частоті максимуму коефіцієнта передачі. Генерація, природно, буде розвиватися на цій частоті.

## Список використаної літератури

1. Методичні вказівки до практикуму «Основи радіоелектроніки» для студентів фізичного факультету / Упоряд. О.В.Слободянюк,
2. Ю.О. Мягченко, Ю.М. Дулич, А.В.Хачатрян “Вивчення радіоелектронних схем методом комп’ютерного моделювання” : Методичне видання. – К.: 2006.- с.