

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Шутко В.М.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ДИПЛОМНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА  
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 «ЕЛЕКТРОНІКА»  
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

**Тема: «Генератор, керований наругою з багатоканальним дзеркалом струму  
Уїлсона»**

Виконавець  
студент групи ЕС-207М \_\_\_\_\_ Мільке Денис Геннадійович

Керівник  
професор, д.т.н. \_\_\_\_\_ Уланський Володимир Васильович

Консультант розділу «Охорона праці»  
старший викладач \_\_\_\_\_ Козлітін О.О.

Консультант розділу  
«Охорона навколишнього середовища»  
професор, д.т.н. \_\_\_\_\_ Маджд С.М.

Нормоконтролер  
доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ Сініцин Р.Б.

**КИЇВ 2020**

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Спеціальність 171 «Електроніка»

Освітньо-професійної програми «Електронні системи»

Освітній ступінь «МАГІСТР»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідуючий випускової кафедри

\_\_\_\_\_Шутко В.М.

«\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2020 р.

### **ЗАВДАННЯ**

#### **на виконання дипломної роботи**

Мільке Дениса Геннадійовича

- 1. Тема дипломної роботи :** «Генератор, керований напругою з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона» затверджена наказом ректора від «02» жовтня 2020 р. № 1900/ст
- 2. Термін виконання роботи :** з 5 жовтня 2020 року по 27 грудня 2020 року.
- 3. Вихідні дані до роботи :** діапазон генерованих частот 0.9-1.3 ГГц, напруга живлення 4, фазовий шум не більше -123, споживана потужність не більше 40 мВт.
- 4. Зміст пояснювальної записки:** реферат, список скорочень, вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел.
- 5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу:** графічне представлення результатів дослідження.

## 6. Календарний план-графік

| №   | Етапи виконання дипломної роботи  | Термін виконання етапів | Примітка |
|-----|---|-------------------------|----------|
| 1.  | Пошук та обробка літератури за темою дипломної роботи                           | 10.10.20 - 21.10.20     | Виконано |
| 2.  | Огляд науково – технічної літератури за темою дипломної роботи                  | 22.10.20 - 26.10.20     | Виконано |
| 3.  | Опис LC-генераторів   | 27.10.20 - 29.10.20     | Виконано |
| 4.  | Розробка принципової схеми  | 30.10.19 - 02.11.20     | Виконано |
| 5.  | Вибір середовища САПР   | 03.11.20 - 04.11.20     | Виконано |
| 6.  | Побудова схеми в САПР   | 05.11.20 - 18.11.20     | Виконано |
| 7.  | Аналіз отриманих даних  | 19.11.20 - 30.11.20     | Виконано |
| 8.  | Оформлення електронного варіанту  | 01.12.20                | Виконано |
| 9.  | Подання на кафедру.<br>Усунення недоліків.<br>Оформлення пояснювальної записки. | 05.12.20                | Виконано |
| 10. | Електронна версія доповіді,<br>ілюстративний матеріал доповіді                  | 06.12.20                | Виконано |

## 7. Консультанти з окремих розділів:

| Назва розділу                          | Консультант<br>(посада, П.І.Б.)                    | Дата              |                     | Підпис |
|--|--|-------------------|---------------------|--------|
|  |  | Завдання<br>видав | Завдання<br>прийняв |        |
| Охорона праці                          | Старший викладач Козлітін<br>Олексій Олександрович |                   |                     |        |
| Охорона<br>навколишнього<br>середовища | Професор, д.т.н. Маджд<br>Світлана Михайлівна      |                   |                     |        |

8. Дата видачі завдання: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 року

Керівник дипломної роботи: \_\_\_\_\_ Уланський В.В.

Завдання прийняв до виконання: \_\_\_\_\_ Мільке Д. Г.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Генератор, керований напругою з багатоканальним дзеркалом Уїлсона». 115 сторінок, 37 малюнків, 7 таблиці, 37 використаних джерел.

**Об'єкт дослідження:** об'єктом дослідження є генератори, керовані напругою з різними типами струмових дзеркал.

**Предмет дослідження:** оптимізація топології генератора.

**Мета роботи:** є вивчення особливостей сучасних генераторів, керованих напругою і пристроїв негативного диференційного опору, що існують та використовуються у світі для створення електронних приладів. і задачі дослідження. Створення вдосконалених генераторів, керованих напругою з використанням дзеркал струму та явища негативного диференційного опору. Моделювання вихідних параметрів і порівняння їх з існуючими.

**Актуальність теми:** Електронні пристрої та схеми з негативним диференціальним опором (НДО) широко використовуються в генераторах, пристроях пам'яті, помножувачах частоти, змішувачах тощо. У цій роботі пропонується нова схема ГКН НДО, що включає комбінацію польового транзистора (ПТ) і простого дзеркала струму (СД) з біполярним транзистором (БТ) з декількома виходами. Відмінною особливістю запропонованої схеми є можливість зміни величини НДО за рахунок збільшення кількості виходів в СД тим самим змінюючи параметри ГКН.

**Наукова новизна:** Наукова новизна отриманих результатів отриманих результатів полягає у вдосконаленні технічних характеристик існуючих генераторів які використовують явище НДО.

**Практична цінність:** отримані в роботі результати полягають в тому, що запропонований генератор, керований напругою з багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона приблизно на 9% кращий за ГКН з простим дзеркалом струму.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ                       | 7  |
| ВСТУП   | 8  |
| Розділ 1.    Синусоїдальні LC генератори        | 10 |
| 1.1    Загальні поняття                         | 10 |
| 1.1.1    Вступ                                  | 10 |
| 1.1.2    Природа синусоїдальних коливань        | 12 |
| 1.1.3    Коливальний контур                     | 13 |
| 1.2    Генератор з налаштувальним контуром      | 18 |
| 1.3    Генератор Гартлі                         | 21 |
| 1.4    Генератор Колпітца                       | 23 |
| 1.5    Генератора Клаппа                        | 26 |
| 1.6    Генератор негативного опору              | 28 |
| 1.6    Висновки до розділу                      | 29 |
| Розділ 2.    Аналіз існуючих дзеркал струму     | 30 |
| 2.1    Струмове дзеркало                        | 33 |
| 2.2    Просте дзеркало струму                   | 33 |
| 2.2.1    ПДС з біполярним транзистором          | 33 |
| 2.2.2    ПДС з МОН-транзистором                 | 37 |
| 2.3    Просте дзеркало струму з бета-помічником | 42 |
| 2.3.1    ПДСБ з біполярним транзистором         | 42 |
| 2.3.2    ПДСБ з МОН-транзистором                | 45 |
| 2.4    Каскодне дзеркало струму                 | 45 |
| 2.4.1    КСД з біполярним транзистором          | 45 |
| 2.4.2    КСД з МОН-транзистором                 | 49 |
| 2.5    Струмове дзеркало Уїлсона                | 49 |
| 2.5.1    СДУ з біполярним транзистором          | 49 |
| 2.5.2    СДУ з МОН-транзистором                 | 55 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 2.6       | Висновки до розділу  | 56 |
| Розділ 3. | Топології ГКН з багатоканальними дзеркалами струму   | 57 |
| 3.1       | Вступ  | 57 |
| 3.2       | Принцип роботи НДО пристрою  | 58 |
| 3.3       | ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму   | 63 |
| 3.4       | ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму з бета-помічником                               | 65 |
| 3.5       | ГКН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму   | 68 |
| 3.6       | ГКН з багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона  | 69 |
| 3.7       | ГКН з вдосконаленим багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона                                   | 71 |
| 3.8       | Висновки до розділу  | 73 |
| Розділ 4. | Вибір оптимальної топології генератора, керованого напругою з багатоканальним дзеркалом струму | 75 |
| 4.1       | Вступ  | 75 |
| 4.2       | Цільова функція ефективності високочастотних генераторів                                       | 76 |
| 4.3       | Оцінка ефективності генераторів, керованих напругою з багатоканальними струмовими дзеркалами   | 83 |
| 4.4       | Висновки до розділу  | 84 |
| Розділ 5. | Охорона праці  | 85 |
| 5.1       | Вступ  | 85 |
| 5.2       | Аналіз умов праці на робочому місці  | 86 |
| 5.3       | Розробка заходів з охорони праці   | 88 |
| 5.4       | Пожежна та вибухова небезпека при експлуатації   | 92 |
| 5.5       | Висновки до розділу  | 93 |
| Розділ 6. | Охорона навколишнього середовища   | 94 |
| 6.1       | Вступ  | 94 |
| 6.2       | Аналіз впливу промисловості на навколишнє середовище   | 94 |
| 6.3       | Стандарт ISO 14001   | 97 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 6.4 | Вимоги до системи екологічного менеджменту | 100 |
| 6.5 | Способи зменшення вуглецевого сліду        | 107 |
| 6.6 | Висновки до розділу                        | 109 |
|     | ВИСНОВКИ                                   | 111 |
|     | СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                 | 113 |

### **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

|        |  |
|--------|--|
| ГКН    | Генератор, керований напругою                      |
| НДО    | Негативний диференціальний опір                    |
| ПТ     | Польовий транзистор                                |
| СД     | Струмове дзеркало                                  |
| ВАХ    | Вольт-амперна характеристика                       |
| FOM    | Цільова функція                                    |
| МОН    | Метал-оксид напівпровідник                         |
| ЗНК    | Закон напруги Кірхгофа                             |
| ЗСК    | Закон струму Кірхгофа                              |
| КСД    | Каскодне струмове дзеркало                         |
| СДУ    | Струмове дзеркало Уїлсона                          |
| ВСДУ   | Вдосконалене струмове дзеркало Уїлсона             |
| MESFET | Метал-напівпровідник польовий транзистор           |
| HEMT   | Транзистор з високою електронною рухливістю        |
| PHEMT  | Транзистор з псевдо високою електронною рухливістю |
| ІС     | Інтегральна мікросхема                             |
| ПСД    | Просте струмове дзеркало                           |
| ПСДБ   | Просте струмове дзеркало з бета-помічником         |
| БСД    | Багатоканальне струмове дзеркало                   |
| ADS    | Advance Design Systems                             |
| САПР   | Система автоматизованого проектування і розрахунку |

## ВСТУП

Генератор - це схема, яка створює безперервний, повторюваний, змінний сигнал без будь-якого вводу. Генератори в основному перетворюють односпрямований потік струму від джерела постійного струму в змінну форму хвилі, яка має необхідну частоту, яку визначають компоненти кола.

Генератор, керований напругою (ГКН), з самої назви стає зрозуміло, що вихідна миттєва частота генератора контролюється вхідною напругою. Це свого роду генератор, який може виробляти частоту вихідного сигналу у великому діапазоні (100 Гц до ГГц) в залежності від вхідної напруги постійного струму, яка подається.

Електронні пристрої та схеми з негативним диференціальним опором (НДО) широко використовуються в генераторах, пристроях пам'яті, помножувачах частоти, змішувачах тощо. Такі пристрої та схеми зазвичай мають характеристики струму напруги N-, S- або  $\Lambda$ -типу. У відомих пристроях та схемах НДО практично неможливо збільшити негативний опір, не змінивши тип або розміри транзисторів. Більше того, деякі з них мають три термінали, що передбачають два джерела живлення. У цій роботі пропонується нова схема НДО, що включає комбінацію польового транзистора (ПТ) і простого дзеркала струму (СД) з біполярним транзистором (БТ) з декількома виходами. Відмінною особливістю запропонованої схеми є можливість зміни величини НДО за рахунок збільшення кількості виходів в СД. Виведені математичні вирази для обчислення порогових струмів та напруг ВАХ N-типу для різних типів транзисторів. Розглянуто можливі застосування запропонованої схеми НДО для проектування генератора керованого напругою (ГКН). Розроблений НДО ГКН має дуже низький рівень фазового шуму і має одне з найкращих значень стандартного показника якості (FOM). Ефективність запропонованих генераторів підтверджується результатами моделювання.

Метою роботи є вивчення особливостей сучасних генераторів, керованих напругою і пристроїв негативного диференційного опору, що існують та використовуються у світі для створення електронних приладів. і задачі дослідження. Створення вдосконалених генераторів, керованих напругою з використанням дзеркал струму та явища негативного диференційного опору. Моделювання вихідних параметрів і порівняння їх з існуючими.

Об'єктом дослідження є генератор керований напругою з часто використовуваними типами струмових дзеркал. А саме простого струмового дзеркала, простого з бета-помічником, каскодного, Уїлсона з його вдосконаленням.

В дослідженні використанні методи статистичної обробки інформації, порівняння технічних характеристик для вибору найкращого за FOM ГКН, створення математичних моделей для більш точної побудови ГКН, моделювання побудованої схеми в системах автоматизованого проектування і розрахунку для аналізу вихідних даних.

Наукова новизна отриманих результатів отриманих результатів полягає у вдосконаленні технічних характеристик існуючих генераторів які використовують явище НДО.

Відмінною особливістю цієї схеми є можливість управління НДО без зміни типів або розмірів транзисторів. Ця особливість заснована на властивості простого дзеркала струму збільшувати коефіцієнт посилення струму за рахунок паралельного підключення транзисторів на виході дзеркала. Це сприяє зміні частоти роботи, стійкості до шумів, енергоспоживання.

# РОЗДІЛ 1 СИНУСОЇДАЛЬНІ LC ГЕНЕРАТОРИ

## 1.1. Загальні поняття

### 1.1.1. Вступ

Генератор генерує вихід без будь-якого вхідного сигналу змінного струму. Електронний генератор - це схема, яка перетворює енергію постійного струму в змінний на дуже високій частоті.

Частота, форма хвилі та величина змінного струму потужність, що генерується підсилювачем, регулюється змінним струмом напруга сигналу, що подається на вході, тоді як напруга для генератора управляється компонентами в самій схемі, що означає, що зовнішня керуюча напруга не потрібна.

Генератор змінного струму - це механічний пристрій, який виробляє синусоїдальні хвилі без будь-якого входу. Цей генератор змінного струму використовується для генерації частот до 1000 Гц. Вихідна частота залежить від кількості полюсів і швидкості обертання якоря.

Наступні пункти висвітлюють відмінності між генератором змінного струму та генератором сигналу:

- Генератор змінного струму перетворює механічну енергію в змінний енергії, тоді як генератор перетворює постійне струм енергії в змінному струмі енергія.
- Генератор сигналу може виробляти більш високі частоти в кілька МГц, тоді як генератор змінного струму не може.
- Генератор змінного струму має обертові деталі, тоді як електронний генератор - ні.
- Змінити частоту коливань в генераторі сигналу легко, ніж в генераторі змінного струму.

Генератор сигналу також можна розглядати як протилежні випрямлячам, які перетворюють змінний струм в постійного струму оскільки вони перетворюють постійний струм в змінний.

Електронні генератори класифікуються в основному за наступними двома категоріями:

- Синусоїдальні генератори - генератори, які видають вихідний сигнал із синусоїдальною формою, називаються синусоїдальними або гармонічними генераторами. Такі генератори можуть забезпечувати вихід на частотах від 20 Гц до 1 ГГц.

- Несинусоїдальні генератори - пристрої, які видають вихідний сигнал із квадратною, прямокутною або пилкоподібною формою, називаються несинусоїдальними або релаксаційними генераторами. Такі генератори можуть забезпечувати вихід на частотах від 0 Гц до 20 МГц.

Синусоїдальні генератори можна класифікувати за такими категоріями:

- Генератори з налаштованим контуром - ці генератори використовують налаштований контур, що складається з котушок індуктивності (L) та конденсаторів (C) і використовуються для генерації високочастотних сигналів. Таким чином, вони також відомі як радіочастота R.F. генератори. Такими генераторами є Гартлі, Колпітц, Клапп-генератори тощо.

- RC генератори - там генератори використовують резистори та конденсатори і використовуються для генерації низьких або аудіочастотних сигналів. Таким чином, вони також відомі як аудіочастотні (АЧ) генератори. Такими генераторами є генератори фазового зсуву та мости Вайна.

- Кристалічні генератори - ці генератори використовують кристали кварцу і використовуються для генерації високо стабілізованого вихідного сигналу з частотами до 10 МГц. П'єзогенератор є прикладом кристалічного генератора.

- Генератор з негативним опором - ці генератори використовують характеристику негативного опору для таких пристроїв, як тунельні діоди. Налаштований діодний генератор є прикладом генератора з негативним опором.

### 1.1.2. Природа синусоїдальних коливань

Характер коливань у синусоїдальній хвилі, як правило, буває двох типів. Вони є затухаючими і незатухаючими коливаннями. Електричні коливання, амплітуда яких з часом зменшується, називаються затухаючими коливаннями. Частота затухаючих коливань може залишатися постійною залежно від параметрів схеми. Затухаючі коливання, як правило, створюються коливальними контурами, які виробляють втрати потужності і не компенсують, якщо потрібно.



Рис. 1.1. Затухаючі коливання

Електричні коливання, амплітуда яких залишається незмінною з часом, називаються незатухаючими коливаннями. Частота незатухаючих коливань залишається постійною [1].



Рис.1.2. Незатухаючі коливання

Незатухаючі коливання, як правило, виробляються коливальними контурами, які не виробляють втрат потужності і застосовують методи компенсації, якщо виникають будь-які втрати потужності.

### 1.1.3. Коливальний контур

Підсилювач з позитивним зворотним зв'язком виробляє свій вихід, щоб бути у фазі з входом і збільшує силу сигналу. Позитивні відгуки також називають дегенеративними зворотними зв'язками або прямими зворотними зв'язками. Цей вид зворотного зв'язку робить підсилювач зворотного зв'язку, генератор.

Використання позитивних зворотних зв'язків призводить до того, що підсилювач зворотного зв'язку має коефіцієнт підсилення в замкнутому контурі, більший, ніж коефіцієнт підсилення у відкритому контурі. Це призводить до нестабільності і працює як коливальний контур. Коливальний контур забезпечує постійно змінюваний підсилений вихідний сигнал будь-якої бажаної частоти.

Коливальний контур виробляє електричні коливання потрібної частоти. Простий коливальний контур складається з котушки індуктивності  $L$  і конденсатора  $C$ , обидва з яких разом визначають частоту коливань кола. Щоб зрозуміти поняття коливального контуру, розглянемо наступний контур. Конденсатор у цій схемі вже заряджений за допомогою джерела постійного струму. У цій ситуації у верхній пластині конденсатора є надлишок електронів, тоді як у нижній пластині дефіцит електронів. Конденсатор утримує деяку електростатичну енергію, і на конденсаторі є напруга.

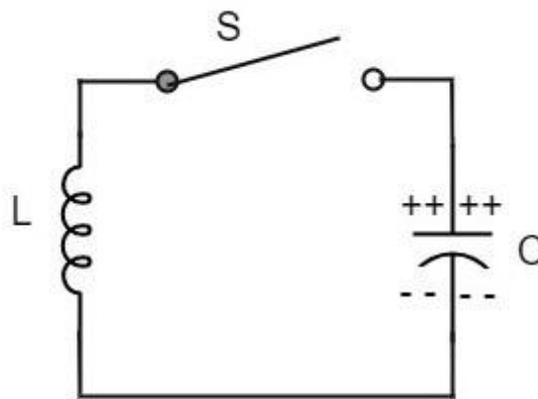


Рис.1.3. Коливальний контур

Коли перемикач  $S$  замкнутий, конденсатор розряджається, а струм протікає через індуктор. Завдяки індуктивному ефекту струм повільно наростає до

максимального значення. Як тільки конденсатор розрядиться повністю, магнітне поле навколо котушки стає максимальним. Після повного розрядження конденсатора магнітне поле починає руйнуватися і створює лічильник ЕРС відповідно до закону Ленца. Конденсатор тепер заряджений позитивним зарядом на верхній пластині та негативним зарядом на нижній пластині. Після повного зарядження конденсатора він починає розряджатися, створюючи магнітне поле навколо котушки, як показано на наступній схемі. Це продовження заряду і розряду призводить до змінного руху електронів або коливального струму. Взаємо обмін енергією між L і C виробляє безперервні коливання.

В ідеальному контурі, де немає втрат, коливання триватимуть нескінченно довго. У практичну коливальну контурі виникають такі втрати, як резистивні та радіаційні втрати в котушці та діелектричні втрати в конденсаторі. Ці втрати призводять до загасання коливань. Частота коливань, створюваних коливальним контуром, визначається компонентами контуру, L і C. Фактична частота коливань - це резонансна частота (або власна частота) кола, яка задана формулою

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

Частота коливань  $f_0$  обернено пропорційна квадратному кореню ємності конденсатора. Отже, якщо значення використовуваного конденсатора велике, періоди заряду та розряду будуть великими. Отже, частота буде нижчою.

Математично частота,

$$f_0 \propto 1/\sqrt{C} \quad (1.2)$$

Частота коливань  $f_0$  пропорційна квадратному кореню самоіндукції котушки. Якщо значення індуктивності велике, протидія зміні поточного потоку більше, і, отже, час, необхідний для завершення кожного циклу, буде довшим, а це означає, що проміжок часу буде довшим, а частота меншою[2].

Математично частота,

$$f_0 \propto 1/\sqrt{L} \quad (1.3)$$

Поєднуючи обидва наведені рівняння,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

Вищевказане рівняння, хоча і вказує вихідну частоту, відповідає власній частоті або резонансній частоті контуру.

Схема генератора - це повний набір усіх частин схеми, яка допомагає виробляти коливання. Ці коливання повинні підтримуватись і повинні бути не заглушеними, як щойно обговорювалося раніше. Спробуємо проаналізувати практичну схему генератора, щоб краще зрозуміти, як працює схема генератора.

Практична схема генератора складається із коливального контура, транзисторного підсилювача та схеми зворотного зв'язку. Наступна принципова схема показує розташування практичного генератора.

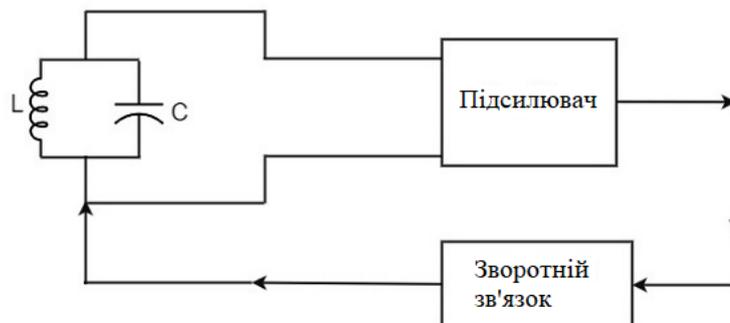


Рис.1.4. Практична схема генератора

Колівальний контур - складається з індуктивності  $L$ , з'єднаної паралельно конденсатору  $C$ . Значення цих двох компонентів визначають частоту кола генератора, і, отже, це називається колом визначення частоти. Транзисторний підсилювач - це вихід коливального контуру підключений до схеми підсилювача, так що коливання, створювані контуром, підсилюються. Отже, потужність цих коливань збільшується підсилювачем. Схема зворотного зв'язку - функція схеми зворотного зв'язку полягає в передачі частини вихідної енергії в LC-контурі у належній фазі. Цей зворотний зв'язок є позитивним в генераторі, тоді як негативний у підсилювачах.

Стабільність частоти генератора є мірою його здатності підтримувати постійну частоту протягом тривалого інтервалу часу. При роботі протягом більш тривалого періоду часу частота генератора може мати відхилення від попередньо встановленого значення або за рахунок збільшення, або за рахунок зменшення.

Зміна частоти генератора може виникнути через наступні фактори:

- Робоча точка активного пристрою, наприклад БТ або ПТ, що використовується, повинна знаходитися в лінійній області підсилювача. Його відхилення вплине на частоту генератора.
- Температурна залежність характеристик компонентів схеми впливає на частоту генератора.
- Зміни в постійному струмі напруга живлення, що подається на активний пристрій, зміщує частоту генератора. Цього можна уникнути, якщо використовується регульоване джерело живлення.
- Зміна вихідного навантаження може спричинити зміну коефіцієнта добротності в контурі, що призведе до зміни вихідної частоти генератора.
- Наявність між елементних ємностей та розсіяних ємностей впливає на вихідну частоту генератора і, отже, на стабільність частоти.

Підсилювач зворотного зв'язку, як правило, складається з двох частин. Вони є підсилювачем і кола зворотного зв'язку. Коло зворотного зв'язку зазвичай складається з резисторів. Поняття підсилювача зворотного зв'язку можна зрозуміти з наступного малюнка нижче.



Рис.1.5. Підсилювача зворотного зв'язку

З наведеного малюнка коефіцієнт підсилення підсилювача представлений як  $A$ . Підсилення підсилювача - це відношення вихідної напруги  $V_o$  до вхідної напруги  $V_i$ . Мережа зворотного зв'язку витягує напругу  $V_f = \beta V_o$  з виходу  $V_o$  підсилювача.

Ця напруга додається для позитивного зворотного зв'язку і віднімається для негативного зворотного зв'язку від напруги сигналу  $V_s$ .

Отже, для позитивних відгуків,

$$V_i = V_s + V_f = V_s + \beta V_o \quad (1.5)$$

Величина  $\beta = V_f / V_o$  називається коефіцієнтом зворотного зв'язку або часткою зворотного зв'язку.

Вихідний сигнал  $V_o$  повинен дорівнювати вхідній напрузі  $(V_s + \beta V_o)$ , помноженій на коефіцієнт підсилення  $A$  підсилювача.

Отже,

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 - A\beta} \quad (1.6)$$

Нехай  $A_f$  - загальний коефіцієнт підсилення (коефіцієнт підсилення із зворотним зв'язком) підсилювача. Це визначається як відношення вихідної напруги  $V_o$  до прикладеної напруги сигналу  $V_s$ , тобто

$$A_f = \frac{V_o}{V_s} \quad (1.7)$$

З наведених вище двох рівнянь можна зрозуміти, що рівняння коефіцієнта підсилення підсилювача зворотного зв'язку із позитивним зворотним зв'язком дається

Де  $A\beta$  - коефіцієнт зворотного зв'язку або коефіцієнт підсилення циклу.

Якщо  $A\beta = 1$ ,  $A_f = \infty$ . Таким чином, коефіцієнт підсилення стає нескінченним, тобто виходить вихід без будь-якого входу. Іншими словами, підсилювач працює як генератор. Умова  $A\beta = 1$  називається критерієм Бархаузена коливань.

## 1.2. Генератор з налаштувальним контуром

Генератори з налаштувальним контуром - це схеми, що виробляють коливання за допомогою контуру налаштування. Контур складається з індуктивності  $L$  та конденсатора  $C$ . Вони також відомі як LC-генератори, генератори резонансних кіл.

Генератори з налаштованим контуром використовуються для створення виходу з частотами від 1 МГц до 500 МГц. Генератори БТ або ПТ використовується як підсилювач з налаштованими колом генератора. За допомогою підсилювача та LC-кола ми можемо передавати сигнал із правильною амплітудою та фазою для підтримки коливань.

Більшість генераторів, що використовуються в радіопередавачах і приймачах, мають LC-генератори. Залежно від способу використання зворотного зв'язку в колі LC-генератори поділяються на такі типи:

- Налаштований колектор або генератор Армстронга - він використовує індуктивний зворотний зв'язок від колектора транзистора до основи. LC-контур знаходиться в колекторній схемі транзистора.

- Налаштований базовий генератор - він використовує індуктивний зворотний зв'язок. Але схема LC знаходиться в базовій схемі.

- Генератор Гартлі - він використовує індуктивний зворотний зв'язок.

- Генератор Колпітца - він використовує ємнісний зворотний зв'язок.

- Генератор Клаппа - він використовує ємнісний зворотний зв'язок.

Тепер ми детально обговоримо всі вищезазначені LC-генератори.

Налаштовані колекторні генератори називаються так, оскільки налаштована схема розміщується в колекторі транзисторного підсилювача. Поєднання  $L$  і  $C$  утворюють налаштований контур. Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_E$  використовуються для забезпечення постійного струму. ухил до транзистора. Конденсатори  $C_E$  і  $C_c$  є конденсаторами обвідного каналу. Вторинний елемент трансформатора забезпечує змінний струм напруга зворотного зв'язку, яка з'являється на переході

базового випромінювача  $R_1$  і  $R_2$ , є змінною. заземлення через конденсатор обвідного каналу  $C$ . У разі відсутності конденсатора частина напруги, індукована у вторинній частині трансформатора, падатиме через  $R_2$ , а не повністю надходить на вхід транзистора.

Оскільки транзистор з конфігурацією  $C_E$  забезпечує зсув фази на  $180^\circ$ , інший зсув фази на  $180^\circ$  забезпечує трансформатор, який робить зсув фази на  $360^\circ$  між вхідною та вихідною напругами. На наступній схемі показано розташування налаштованої схеми колектора. Після подачі живлення струм колектора починає збільшуватися і відбувається зарядка конденсатора  $C$ . Коли конденсатор повністю заряджений, він розряджається через індуктивність  $L_1$ . Зараз виробляються коливання. Ці коливання індукують деяку напругу у вторинній обмотці  $L_2$ . Частота напруги, що індукується у вторинній обмотці, така ж, як і в коливальному контурі і її величина залежить від кількості витків у вторинній обмотці та зчеплення між обома обмотками. Напруга на  $L_2$  подається між базою та випромінювачем і з'являється в підсиленому вигляді в контурі колектора, таким чином долаючи втрати в коливальному контурі. Кількість витків  $L_2$  і зчеплення між  $L_1$  і  $L_2$  настільки відрегульовані, що коливання по  $L_2$  підсилюються до рівня, достатнього для подачі втрат в коливальний контур. Налаштовані колекторні генератори широко використовуються як локальні генератори в радіоприймачах.

Генератор з налаштованою базою називаються так, оскільки налаштована схема розміщена в основі транзисторного підсилювача. Поєднання  $L$  і  $C$  утворюють налаштовану схему або схему визначення частоти. Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_E$  використовуються для забезпечення постійного струму. ухил до транзистора. Паралельне поєднання  $R_E$  і  $C_E$  в колі емітера - це стабілізуючий контур.  $C_C$  - блокуючий конденсатор. Конденсатори  $C_E$  і  $C$  є конденсаторами обвідного каналу. Первинна котушка  $L$  і вторинна котушка  $L_1$  ВЧ трансформатора забезпечують необхідний зворотний зв'язок для колекторних та базових контурів. Оскільки транзистор з конфігурацією  $C_E$  забезпечує зсув фази на  $180^\circ$ , інший зсув

фази на  $180^\circ$  забезпечує трансформатор, який робить зсув фази на  $360^\circ$  між вхідною та вихідною напругами. На наступній електричній схемі показано розташування налаштованої базової схеми генератора.

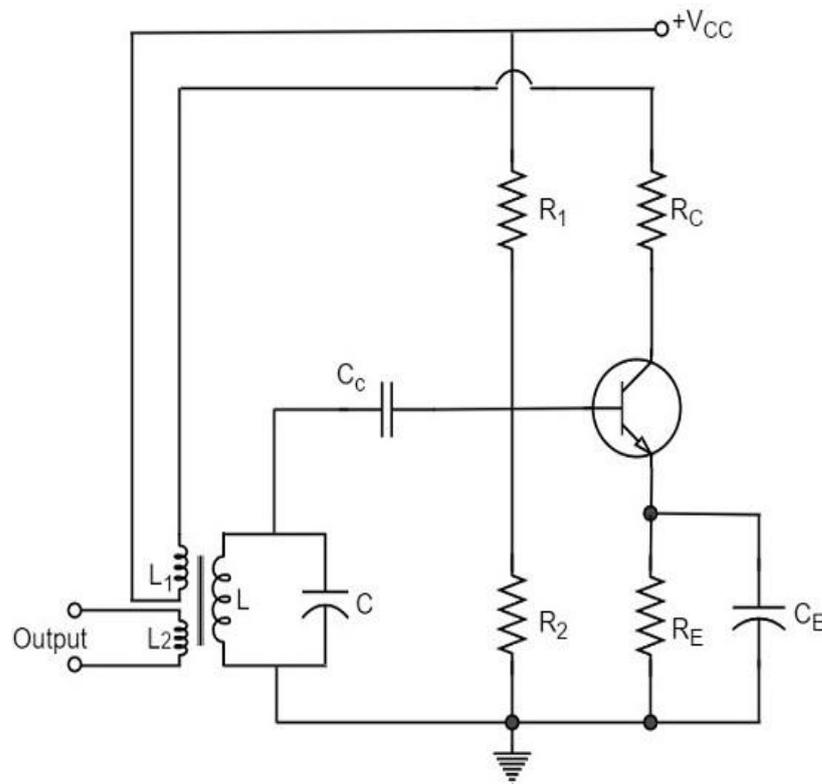


Рис.1.6. Схема налаштованого генератора

При включенні кола струм колектора починає зростати. Оскільки колектор підключений до котушки  $L_1$ , цей струм створює навколо нього деяке магнітне поле. Це індукуює напругу в котушці налаштованого контуру  $L$ . Напруга зворотного зв'язку викликає збільшення напруги випромінювача та струму бази. Таким чином, досягається подальше збільшення струму колектора, і цикл продовжується, поки струм колектора не насититься. Тим часом конденсатор повністю заряджений. Коли струм колектора досягає рівня насичення, в  $L$  відсутня напруга зворотного зв'язку. Оскільки конденсатор повністю заряджений, він починає розряджатися через  $L$ . Це зменшує зміщення основи випромінювача, отже, струм колектора також зменшується. До того часу, коли струм колектора досягне граничного значення, конденсатор  $C$  повністю заряджений з

протилежною полярністю. Коли транзистор тепер відключається, конденсатор  $C$  починає розряджатися через  $L$ . Це збільшує зміщення основи випромінювача. В результаті струм колектора збільшується. Цикл повторюється до тих пір, поки надходить достатньо енергії, щоб покрити втрати в LC-контур. Частота коливань дорівнює резонансній частоті LC-контура.

Основним недоліком кола генератора з налаштованою базою є те, що через низький опір базового випромінювача, який виникає в шунті з налаштованим контуром, коливальний контур навантажується. Це зменшує його  $Q$ , що в свою чергу спричиняє дрейф частоти генератора. Таким чином стабільність стає біднішою. З цієї причини налаштована схема зазвичай не підключається до базової схеми.

### **1.3. Генератор Гартлі**

Дуже популярною схемою генератора, яка в основному використовується в радіоприймачах, є схема генератора Гартлі. Конструктивні деталі та робота генератора Гартлі описані нижче.

На схемі генератора Гартлі, показаній нижче, резистори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_E$  забезпечують необхідні умови зміщення для схеми. Конденсатор  $C_E$  забезпечує змінний струм тим самим забезпечуючи будь-яке виродження сигналу. Це також забезпечує стабілізацію температури.

Конденсатори  $C_c$  і  $C_b$  використовуються для блокування постійного струму, та надати перемінний перелік шлях. Радіочастотний дросель пропонує дуже високий опір струмів високої частоти, що означає, що він замикає постійний струм і відкриває змінний. Отже, він забезпечує постійний струм. навантаження для колектора і зберігає змінну потужність струми з постійного струму джерело постачання [3].

Мережа, що визначає частоту, являє собою паралельний резонансний контур, який складається з котушок індуктивності  $L_1$  і  $L_2$  разом із змінним

конденсатором  $C$ . З'єднання  $L_1$  і  $L_2$  заземлені. Котушка  $L_1$  має один кінець, підключений до основи через  $C_c$ , а інший - до випромінювача через  $C_E$ . Отже,  $L_2$  знаходиться у вихідному колі. Обидві котушки  $L_1$  і  $L_2$  індуктивно пов'язані і разом утворюють автотрансформатор.

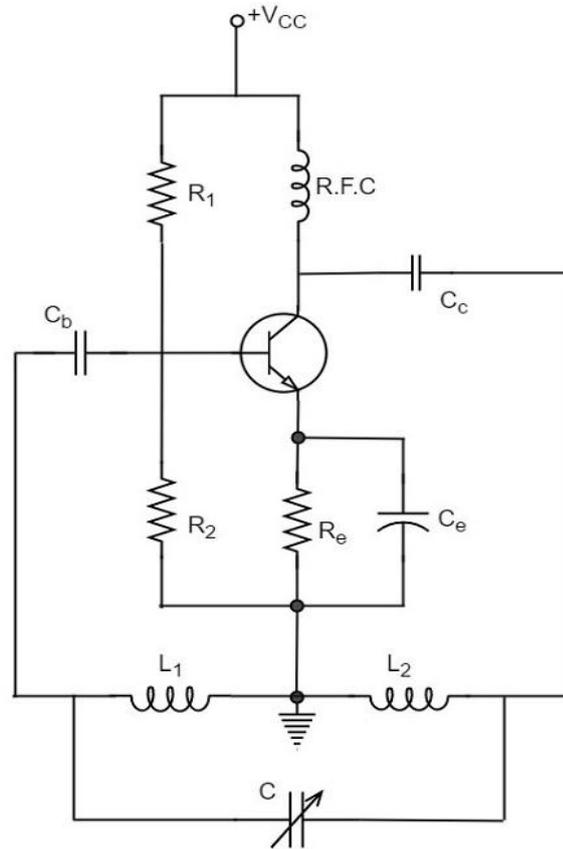


Рис.1.7. Схема генератора Гартлі

Коли подається колекторне живлення, в коливальному контурі створюється перехідний струм. Коливання струму в контурі виробляє змінний струм. Автотрансформатор, виготовлений за допомогою індуктивного зв'язку  $L_1$  і  $L_2$ , допомагає визначити частоту та встановлює зворотний зв'язок. Оскільки транзистор з конфігурацією  $C_c$  забезпечує зсув фази на  $180^\circ$ , інший зсув фази на  $180^\circ$  забезпечує трансформатор, який робить зсув фази на  $360^\circ$  між вхідною та вихідною напругами. Це робить зворотний зв'язок позитивним, що є суттєвим для стану коливань. Коли петля підсилюється  $|\beta A|$  підсилювача більше одиниці, коливання підтримуються в контурі.

Рівняння частоти генератора Гартлі подано як

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C}} \quad (1.8)$$

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M \quad (1.9)$$

Тут  $L_T$  - загальна пов'язана індуктивність;  $L_1$  і  $L_2$  представляють індуктивності 1-ї та 2-ї котушок; а  $M$  являє собою взаємну індуктивність. Взаємна індуктивність обчислюється, коли враховуються дві обмотки.

Переваги генератора Гартлі такі:

- Замість використання великого трансформатора, одна котушка може бути використана як автотрансформатор.
- Частоту можна варіювати, використовуючи або змінний конденсатор, або змінну індуктивність.
- Менша кількість компонентів достатня.
- Амплітуда вихідного сигналу залишається незмінною у фіксованому діапазоні частот.

Недоліками генератора Гартлі є:

- Це не може бути низькочастотний генератор.
- Присутні гармонійні спотворення.

Він використовується для створення синусоїди потрібної частоти. Здебільшого використовується як локальний генератор у радіоприймачах. Він також використовується як RF генератор.

#### **1.4. Генератор Колпітца**

Генератор Колпітца виглядає так само, як генератор Гартлі, але індуктори та конденсатори замінюються один на одного в контурі. Конструктивні деталі та робота генератора Колпітца описані нижче.

Спочатку розглянемо принципову схему генератора Колпітца.

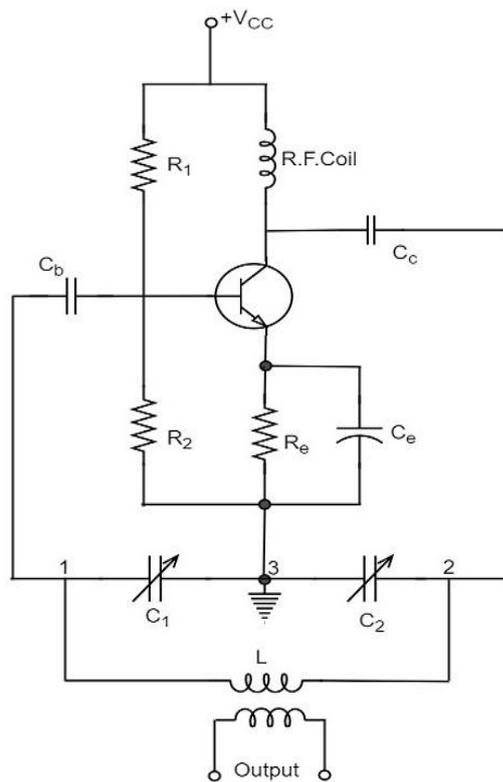


Рис.1.8. Схема генератора Колпітца

Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_e$  забезпечують необхідні умови зміщення для схеми. Конденсатор  $C_E$  забезпечує змінний струм тим самим забезпечуючи будь-яке виродження сигналу. Це також забезпечує стабілізацію температури.

Конденсатори  $C_c$  і  $C_b$  використовуються для блокування постійного струму та надати перемінний перелік шлях. Радіочастотний дросель пропонує дуже високий опір струмів високої частоти, що означає, що він замикає постійний струм і відкривається до н.е. Отже, він забезпечує постійний струм навантаження для колектора і зберігає змінну потужність струми з постійного струму джерело постачання.

Мережа, що визначає частоту, являє собою паралельний резонансний контур, який складається із змінних конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  разом з індуктором  $L$ . З'єднання  $C_1$  і  $C_2$  заземлено. Конденсатор  $C_1$  має один кінець, підключений до основи через  $C_c$ , а інший - до емітера через  $C_e$ . напруга, що розвивається на  $C_1$ , забезпечує регенеративний зворотний зв'язок, необхідний для стійких коливань.

Коли подається колекторне живлення, в коливальному контурі створюється перехідний струм. Коливання струму в контурі виробляє змінний струм та напругу на  $C_1$ , які подаються на перехід базового випромінювача і з'являються в підсиленому вигляді в контурі колектора і подають втрати в коливальній контур.

Якщо термінал 1 має будь-який момент позитивного потенціалу щодо терміналу 3, тоді термінал 2 буде негативним щодо 3 в цей момент, оскільки термінал 3 заземлений. Отже, точки 1 і 2 виходять з ладу на  $180^\circ$ .

Оскільки транзистор із конфігурацією  $C_e$  забезпечує зсув фази на  $180^\circ$ , він здійснює зсув фази на  $360^\circ$  між входною та вихідною напругами. Отже, зворотний зв'язок правильно формується для створення безперервних коливань без затухання. Коли петля підсилюється  $|\beta A|$  підсилювача більше одиниці, коливання підтримуються в контурі. Рівняння частоти генератора Колпітца подано як

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \quad (1.9)$$

$C_T$  - це загальна ємність  $C_1$  і  $C_2$ , з'єднаних послідовно.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.10)$$

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad (1.11)$$

Переваги генератора Колпітца такі:

- Генератор Колпітца може генерувати синусоїдальні сигнали дуже високих частот.
- Він витримує високі та низькі температури.
- Стабільність частоти висока.
- Частоту можна змінювати за допомогою обох змінних конденсаторів.
- Менша кількість компонентів достатня.
- Амплітуда вихідного сигналу залишається незмінною у фіксованому діапазоні частот.

Застосування генератора Колпітца такі:

- Генератор Колпітца може бути використаний як високочастотний генератор синусоїд.
- Це можна використовувати як датчик температури з деякими відповідними схемами.
- Здебільшого використовується як локальний генератор у радіоприймачах.
- Він також використовується як RF генератор.
- Він також використовується в мобільних додатках.
- У нього є багато інших комерційних додатків.

### 1.5. Генератора Клаппа

Ще одним генератором, який є вдосконаленою версією генератора Колпітца, є генератор Клаппа. Ця схема розроблена шляхом внесення декількох змін в генератор Колпітца. Схема відрізняється від генератора Колпітца лише в одному відношенні; він містить один додатковий конденсатор ( $C_3$ ), з'єднаний послідовно з індуктивністю. Додавання конденсатора ( $C_3$ ) покращує стабільність частоти та виключає вплив параметрів транзистора та блукаючих ємностей. На наступній електричній схемі показано розташування транзисторного генератора Клаппа.

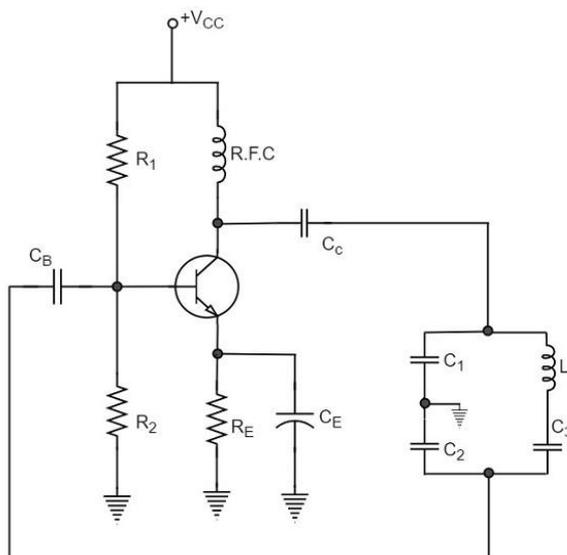


Рис.1.9. Генератор Клаппа

Дія схеми генератора Клаппа відбувається так само, як і генератора Колпітца. Частота генератора задається відношенням,

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.12)$$

Де

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad (1.13)$$

Зазвичай значення  $C_3$  набагато менше  $C_1$  та  $C_2$ . В результаті цього  $C$  приблизно дорівнює  $C_3$ . Отже, частота коливань,

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}} \quad (1.14)$$

Зрозуміло, що генератор Клаппа схожий на генератор Колпітца, однак вони відрізняються між собою за розміщенням індуктивностей та ємностей. Стабільність частоти, хоча і хороша, може бути змінною в генераторі Клаппа. Для побудови генератора зі змінною частотою іноді кращий генератор Клаппа перед генератором Колпітца. Генератори Клаппа використовуються в схемах настройки приймача як частотний генератор. Однією з важливих особливостей генератора є те, що енергія зворотного зв'язку, яка застосовується, повинна знаходитися в правильній фазі до контуру. У розглянутих до цього схемах генераторів у коливальному контурі використана комбінація індуктивності ( $L$ ) та конденсатора ( $C$ ). Ми спостерігали, що LC-комбінація в генераторах забезпечує зсув фази на  $180^\circ$ , а транзистор у конфігурації  $C_E$  забезпечує зсув фази на  $180^\circ$ , щоб зробити загальний зсув фази на  $360^\circ$ , щоб це мало нульову різницю у фазі [4].

Хоча у них мало застосувань, схеми LC мають кілька недоліків, таких як:

- Нестабільність частоти
- Форма сигналу погана
- Не можна використовувати для низьких частот
- Індуктори громіздкі та дорогі

## 1.6. Генератор негативного опору

Генератор, який працює на властивість негативного опору, можна назвати генератором негативного опору. Термін негативний опір відноситься до стану, коли збільшення напруги в двох точках викликає зменшення струму. Деякі з нелінійних пристроїв мають певні властивості опору за певних умов.

Давайте спостерігатимемо поведінку, коли напруга подається на нелінійний пристрій, який має властивість негативного опору.

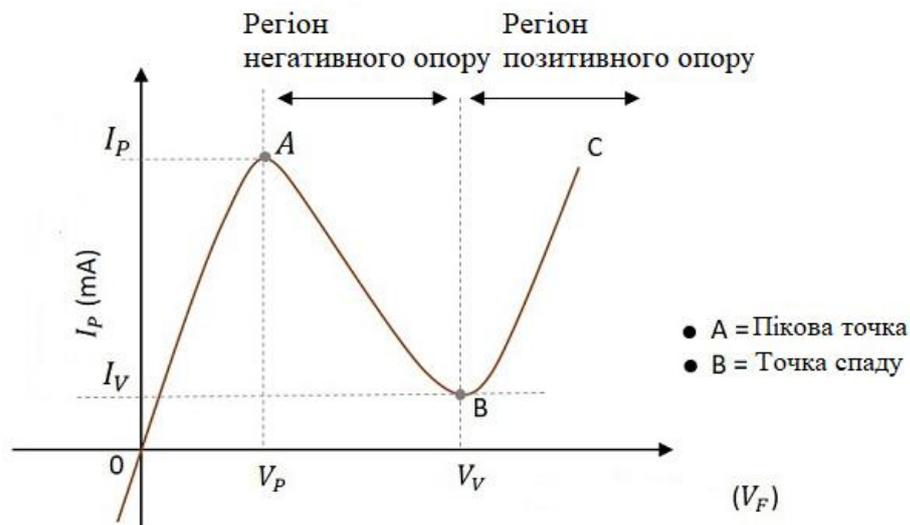


Рис.1.10. ВАХ нелінійного пристрою

Зі збільшенням прямої напруги струм швидко зростає, і він зростає до пікової точки, званої піковою струмом, що позначається  $I_P$ . Напруга в цій точці називається піковою напругою, що позначається  $V_P$ . Ця точка позначена знаком A на наведеному графіку. Точка A називається піковою точкою.

Якщо напруга додатково збільшується понад  $V_P$ , то струм починає зменшуватися. Він зменшується до тих пір, поки не буде позначена точка, яка називається Долинною течією, позначена  $I_V$ . Напруга в цій точці називається напругою долини, що позначається  $V_V$ . Ця точка позначена знаком B на наведеному графіку. Точка B називається точка спаду.

Звідси область між точкою А і точкою В позначає область негативного опору. Як тільки точка долини досягнута і якщо напруга ще більше зростає, то струм починає збільшуватися. Це означає, що область негативного опору закінчилася, і пристрій поводить себе нормально відповідно до закону Ома. Ця область називається областю позитивного опору, що позначено на графіку пунктом В - точкою С.

### **1.7. Висновки до розділу**

Генератор - це схема, яка створює безперервний, повторюваний, змінний сигнал без будь-якого вводу. Генератори в основному перетворюють односпрямований потік струму від джерела постійного струму в змінну форму хвилі, яка має необхідну частоту, яку визначають компоненти кола.

Коливальний контур виробляє електричні коливання потрібної частоти. Простий коливальний контур складається з котушки індуктивності  $L$  і конденсатора  $C$ , обидва з яких разом визначають частоту коливань кола.

Мало генераторів проявляють негативні властивості опору під час своєї роботи. Одноконтактний генератор є найкращим прикладом несинусоїдального генератора (створює форму сигналу розгортки як вихід), який має властивість негативного опору, тоді як тунельний діодний генератор є найкращим прикладом синусоїдального генератора, який має властивість негативного опору.

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДЗЕРКАЛ СТРУМУ

### 2.1. Струмове дзеркало

Дзеркала струму, виготовлені за допомогою активних пристроїв, стали широко застосовуватися в аналогових інтегральних схемах як елементи зміщення, так і пристрої навантаження для каскодів підсилювача. Використання дзеркал струму для зміщення може призвести до вищої нечутливості роботи схеми до коливань джерела живлення та температури. Дзеркала струму часто є більш економічними, ніж резистори, з точки зору площі штампа, необхідного для забезпечення струму зміщення певного значення, особливо коли необхідне значення струму зміщення невелике. При використанні як навантажувального елемента в транзисторних підсилювачах високий опір дзеркала струму призводить до підсилення високої напруги при низьких напругах джерела живлення. [5]

Цей розділ цього розділу описує загальні властивості дзеркал струму та порівнює різні біполярні дзеркала та дзеркала МОН, використовуючи ці властивості. У наступному розділі йдеться про використання поточних дзеркал як елементів навантаження на каскодних підсилювачах. Останній розділ показує, як діючі дзеркала використовуються для побудови підсилювачів, нечутливих до коливань подачі та температури. Нарешті, додаток аналізує наслідки невідповідності пристрою.

Струмове дзеркало - це елемент, що має принаймні три клеми, як показано на рис. 4.1. Загальна клема підключена до джерела живлення, а джерело вхідного струму - до вхідної клеми. В ідеалі вихідний струм дорівнює вхідному струму, помноженому на бажаний коефіцієнт підсилення струму. Якщо коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці, вхідний струм відбивається на виході, що веде до назви дзеркало струму. В ідеальних умовах коефіцієнт підсилення дзеркала струму не залежить від вхідної частоти, а вихідний струм не залежить від напруги

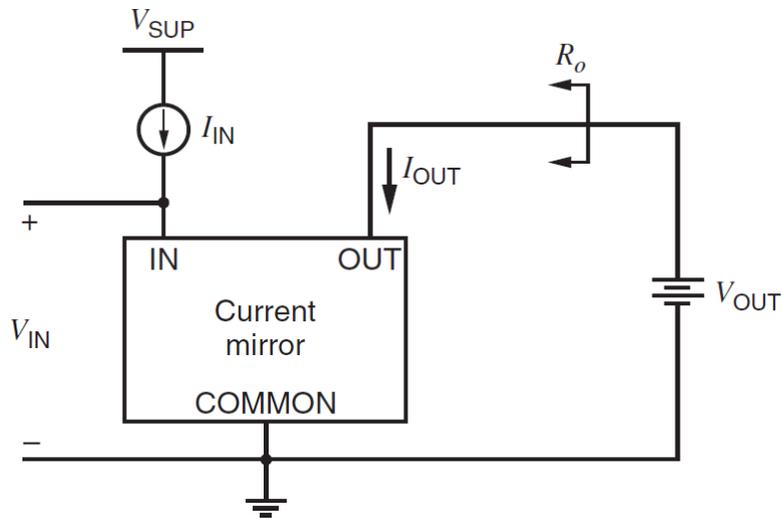
між виходом і загальними клемами. Крім того, напруга між входом і загальними клемами в ідеалі дорівнює нулю, оскільки ця умова дозволяє всій напрузі живлення з'являтися на вхідному джерелі струму, спрощуючи конструкцію на рівні транзистора. Іноді використовується більше одного вхідного та або вихідного терміналів.

На практиці справжні дзеркала струму на рівні транзистора зазнають багатьох відхилень від цієї ідеальної поведінки. Наприклад, коефіцієнт підсилення дзеркала реального струму ніколи не залежить від вхідної частоти. Відхилення від ідеальності, які будуть розглянуті в цій главі, перелічені нижче.

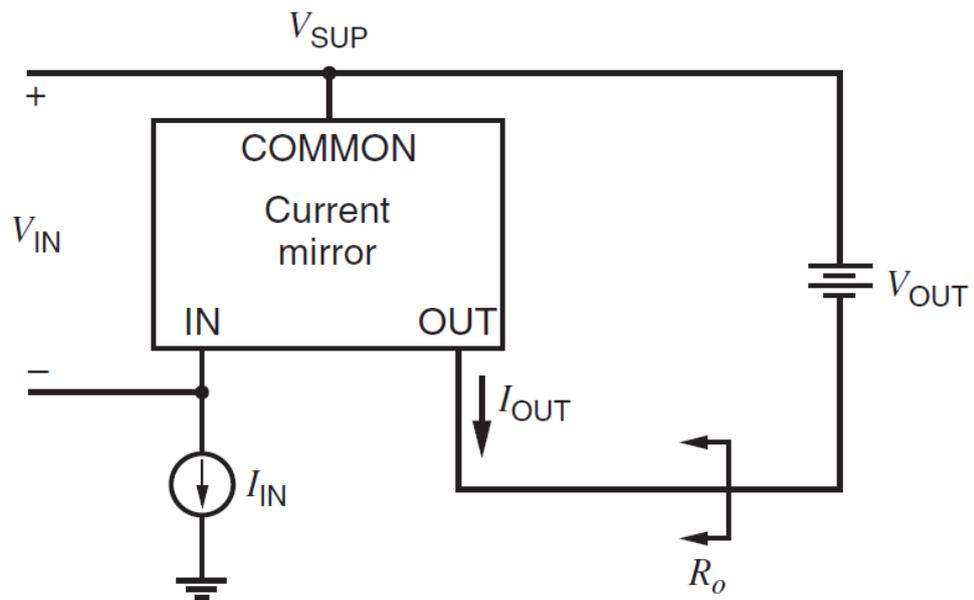
Одне з найважливіших відхилень від ідеальності - це зміна вихідного струму дзеркального струму зі зміною напруги на вихідній клемі. Цей ефект характеризується вихідним опором малого сигналу,  $R_o$ , поточного дзеркала. Нортон-еквівалентна модель вихідного сигналу дзеркала струму включає  $R_o$  паралельно джерелу струму, керованому вхідним струмом. Вихідний опір безпосередньо впливає на продуктивність багатьох кіл, що використовують дзеркала струму. Наприклад, коефіцієнт відхилення у звичайному режимі диференціального підсилювача безпосередньо залежить від цього опору, як і коефіцієнт підсилення контурів активного навантаження. Збільшення вихідного опору зменшує залежність вихідного струму від вихідної напруги і тому є бажаним. Взагалі кажучи, вихідний опір збільшується в практичних схемах, коли вихідний струм зменшується. На жаль, зменшення вихідного струму також зменшує максимальну робочу швидкість. Тому, порівнюючи вихідний опір двох дзеркал струму, їх слід порівнювати при однакових вихідних струмах.

Іншим важливим джерелом помилок є помилка коефіцієнта підсилення, яка полягає у відхиленні коефіцієнта підсилення дзеркала струму від його ідеального значення. Похибка підсилення поділяється на дві частини: (1) систематичну помилку підсилення та (2) помилку випадкового підсилення. Систематична помилка коефіцієнта підсилення,  $\varepsilon$  - похибка коефіцієнта підсилення, яка виникає навіть тоді, коли всі узгоджені елементи в дзеркалі повністю узгоджені і будуть

розраховані для кожного з поточних дзеркал, представлених у цьому розділі. Помилка випадкового підсилення - це помилка підсилення, спричинена ненавмисними невідповідностями між відповідними елементами.



(a)



(б)

Рис.2.1. Струмові дзеркальні блок-схеми з підсиленням на (а) землю та (б) позитивна пропозиція.

Коли джерело вхідного струму підключено до вхідної клеми дзеркала реального струму, воно створює позитивне падіння напруги  $V_{IN}$ , яке зменшує напругу, доступну на вхідному джерелі струму. Мінімізація  $V_{IN}$  є важливою,

оскільки це спрощує конструкцію джерела вхідного струму, особливо в додатках з низьким рівнем живлення. Щоб зменшити  $V_{IN}$ , поточні дзеркала іноді мають більше одного вхідного терміналу. У цьому випадку ми розрахуємо вхідну напругу для кожного вхідного терміналу. Прикладом є дзеркало струму каскоду МОН із високим розмахом.

На практиці необхідна позитивна вихідна напруга  $V_{OUT}$ , щоб вихідний струм залежав головним чином від вхідного струму. Ця характеристика узагальнюється мінімальною напругою на вихідній гілці,  $V_{OUT(min)}$ , що дозволяє вихідним пристроям (пристроєм) працювати в активній області. Мінімізація  $V_{OUT(min)}$  максимізує діапазон вихідних напруг, для яких вихідний опір дзеркала струму майже постійний, що важливо в додатках, де дзеркала струму використовуються як активні навантаження в підсилювачах (особливо при низьких напругах джерела живлення). Коли дзеркала струму мають більше одного вхідного терміналу, кожен вихід повинен бути зміщений вище свого  $V_{OUT(min)}$ , щоб відповідний вихідний струм залежав головним чином від вхідного струму.

## **2.2. Просте дзеркало струму**

### **2.2.1. ПСД з біполярним транзистором**

Найпростіша форма дзеркала струму складається з двох транзисторів. На рис. 2.2 показана біполярна версія цього дзеркала. Транзистор  $Q_1$  підключений діодом, змушуючи напругу на колекторній основі до нуля. У цьому режимі перехід колектор-основа вимкнений в тому сенсі, що там не відбувається інжекції, а  $Q_1$  працює в передній активній області. Припустимо, що  $Q_2$  також працює в прямо активній області, і що обидва транзистори мають кінцевий вихідний опір. Тоді  $I_{OUT}$  контролюється  $V_{BE2}$ , що дорівнює  $V_{BE1}$  за ЗНК. Рівняння ЗНК лежить в основі роботи всіх дзеркал струму. Нехтуючи струмами витоку з'єднання, [7]

$$V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} = V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} \quad (2.1)$$

де  $V_T = kT/q$  – теплова напруга, а  $I_{S1}$  та  $I_{S2}$  – струми насичення транзистора. З (2.1),

$$I_{C2} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_{C1} \quad (2.2)$$

Якщо транзистори однакові,  $I_{S1} = I_{S2}$  і (2.2) показує, що струм, що протікає в колекторі  $Q_1$ , відображається на колекторі  $Q_2$ . ЗСК на колекторі  $Q_1$  дає

$$I_{IN} - I_{IN} - \frac{I_{C1}}{\beta_F} - \frac{I_{C2}}{\beta_F} = 0 \quad (2.3)$$

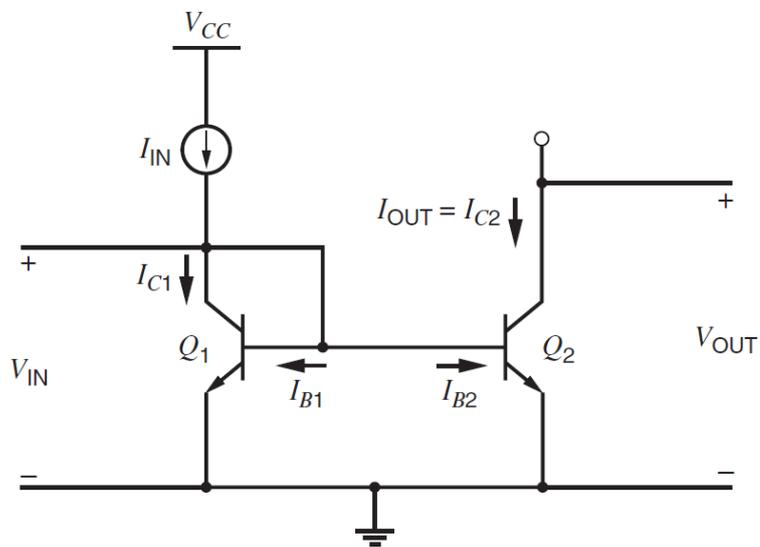


Рис.2.2. Простий біполярний струм дзеркало.

Отже, з однаковими транзисторами,

$$I_{OUT} = I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{IN}}{1 + \frac{2}{\beta_F}} \quad (2.4)$$

Якщо  $\beta_F$  великий, струми бази малі і

$$I_{OUT} = I_{C1} \approx I_{IN} \quad (2.5)$$

Таким чином, для однакових пристроїв  $Q_1$  і  $Q_2$  коефіцієнт підсилення поточного дзеркала становить приблизно одиницю. Цей результат справедливий як для постійного, так і для низькочастотного струму змінного струму. Однак вище частоти дзеркала в 3 дБ базовий струм помітно зростає, оскільки імпеданс

ємності базового випромінювача зменшується, зменшуючи коефіцієнт підсилення дзеркала струму.

$$I_{OUT} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_{C1} = \left( \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_{IN} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{1 + (I_{S2}/I_{S1})}{\beta_F}} \right) \quad (2.6)$$

Коли  $I_{S2} = I_{S1}$ , (2.6) є таким самим, як (2.4). Оскільки струм насичення біполярного транзистора пропорційний площі його випромінювача, перший член у (2.6) показує, що коефіцієнт підсилення дзеркала струму може бути більшим або меншим за одиницю, оскільки площі випромінювачів можуть бути співвідношені. Якщо бажаний коефіцієнт підсилення струму-дзеркала є раціональним числом,  $M/N$ , відношення площі зазвичай встановлюється шляхом підключення  $M$  однакових пристроїв, що називаються одиницями паралельно, до форми  $Q_2$  і  $N$  одиниць паралельно до форми  $Q_1$ , щоб мінімізувати невідповідність, що виникає в результаті літографічних ефектів формування емітерних областей. Однак відношення площі, яке перевищує приблизно п'ять до одного, споживає велику площу матриці, в якій переважає площа більшого з двох пристроїв. Таким чином, інші методи, описані в наступних розділах, є кращими для генерації великих коефіцієнтів струму. Останній доданок у (4.6) пояснює помилку, спричинену кінцевим  $\beta_F$ . Збільшення  $I_{S2}/I_{S1}$  збільшує величину цієї помилки за рахунок збільшення базового струму  $Q_2$  порівняно з  $Q_1$ .

В письмовій формі (2.1) та (2.2) ми припустили, що колекторні струми транзисторів не залежать від їх напруг колектор-емітер. Якщо транзистор зміщений у передньо-активній області, його струм колектора насправді повільно зростає зі збільшенням напруги колектор-емітер. Рис. 2.3 показує вихідну характеристику для  $Q_2$ . Вихідний опір струмового дзеркала в будь-якій заданій робочій точці є зворотним значенням нахилу вихідної характеристики в цій точці. У прямому активному регіоні,

$$R_o = r_{o2} = \frac{V_A}{I_{C2}} \quad (2.7)$$

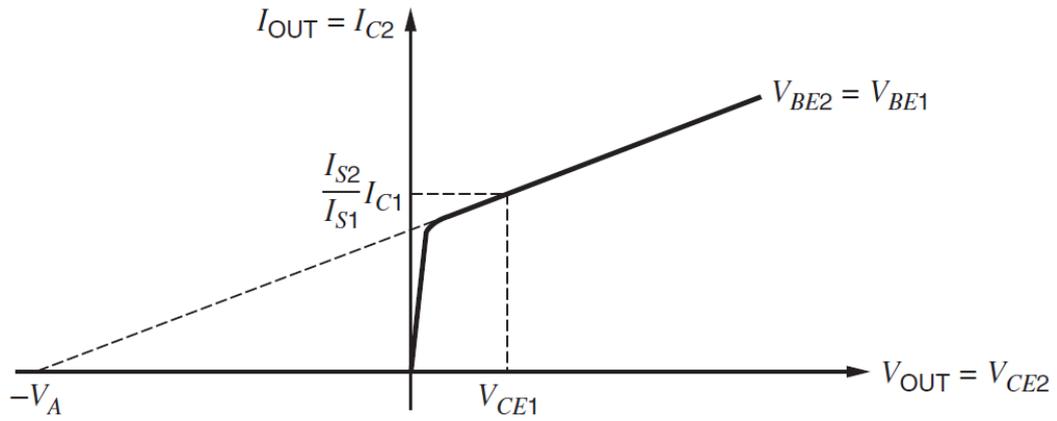


Рис.2.3. вихідна характеристика прн.

Точка, де  $V_{CE2} = V_{CE1}$  і  $V_{BE2} = V_{BE1}$ , позначена на характеристиці. Оскільки струм колектора регулюється напругами базового випромінювача та колектора-випромінювача,  $I_{C2} = (I_{S2}/I_{S1})I_{C1}$  в цей момент. Якщо нахил характеристики в насиченні є постійним, варіацію  $I_{C2}$  для змін у  $V_{CE2}$  можна передбачити прямою лінією, яка проходить через позначену точку. Екстраполяція вихідної характеристики в передньо-активній області назад до осі  $V_{CE2}$  дає перехоплення на  $-V_A$ , де  $V_A$  – рання напруга. Якщо  $V_A \ll V_{CE1}$ , нахил прямої лінії приблизно дорівнює  $(I_{S2}/I_{S1})(I_{C1}/V_A)$ . Отже,

$$I_{OUT} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_{C1} \left( 1 + \frac{V_{CE2} - V_{CE1}}{V_A} \right) = \frac{\frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_{IN} \left( 1 + \frac{V_{CE2} - V_{CE1}}{V_A} \right)}{1 + \frac{1 + (I_{S2}/I_{S1})}{\beta_F}} \quad (2.8)$$

Оскільки ідеальним коефіцієнтом підсилення поточного дзеркала є  $I_{S2}/I_{S1}$ , систематичну похибку коефіцієнта підсилення поточного дзеркала можна розрахувати за (2.8).

$$\varepsilon = \left( \frac{1 + \frac{V_{CE2} - V_{CE1}}{V_A}}{1 + \frac{1 + (I_{S2}/I_{S1})}{\beta_F}} \right) - 1 \approx \frac{V_{CE2} - V_{CE1}}{V_A} - \frac{1 + (I_{S2}/I_{S1})}{\beta_F} \quad (2.9)$$

Перший член у (2.9) походить від кінцевого вихідного опору, а другий член від кінцевого  $\beta_F$ . Якщо  $V_{CE2} \ll V_{CE1}$ , полярності двох членів протилежні. Оскільки

ці два терміни незалежні, однак скасування на практиці мало ймовірно. Перший член домінує, коли різниця напруг колектор-емітер та  $\beta_F$  велика. Наприклад, при однакових транзисторах і  $V_A=130$  В, якщо напруга колектор-емітер  $Q_1$  утримується при  $V_{BE}$  (увімкнено), а якщо напруга колектор-емітер  $Q_2$  дорівнює 30 В, то систематична похибка підсилення  $(30-0,6)/130-2/200 \approx 0,22$ . Таким чином, для кола, що працює при нарузі живлення 30 В, струми дзеркального струму можуть відрізнятись більш ніж на 20 відсотків від тих значень, розрахованих припускаючи, що вихідний опір транзистора і  $\beta_F$  нескінченні. Хоча перший член у (2.9) походить від кінцевого вихідного опору, він не залежить безпосередньо від  $r_{o2}$ , а натомість від колектора-випромінювача та ранніх напруг. Рання напруга не залежить від струму зміщення, і

$$V_{IN} = V_{CE1} = V_{BE1} = V_{BE(on)} \quad (2.10)$$

Оскільки  $V_{BE(on)}$  пропорційний натуральному логарифму струму колектора,  $V_{IN}$  мало змінюється при зміні струму зміщення. Отже, зміна струму зміщення в дзеркалі струму змінює систематичну помилку підсилення, головним чином, через зміни в  $V_{CE2}$ .

Нарешті, мінімальна вихідна напруга, необхідна для підтримання  $Q_2$  у прямому активному регіоні, становить

$$V_{OUT(min)} = V_{CE2(sat)} \quad (2.11)$$

### 2.2.2. ПСД з МОН-транзистором

На рис.2.4 показана МОН-версія простого поточного дзеркала. Напруга стоку на затворі  $M_1$  дорівнює нулю; отже, канал не існує на стоці, і транзистор працює в зоні насичення або в активній області, якщо поріг позитивний. Хоча принцип дії МОН-транзисторів не передбачає зміщення вперед будь-яких діодів,  $M_1$ , як кажуть, є діодом, з'єднаним за аналогією з біполярним корпусом. Припустимо, що  $M_2$  також працює в активній області і що обидва транзистори мають кінцевий вихідний опір. Тоді  $I_{D2}$  контролюється  $V_{GS2}$ , що дорівнює  $V_{GS1}$  за

ЗНК. Рівняння ЗНК лежить в основі роботи всіх дзеркал струму. Напруга джерела затвора для даного МОН-транзистора зазвичай становить розділений на дві частини: поріг  $V_t$  і перевантажувач  $V_{ov}$ . [8]

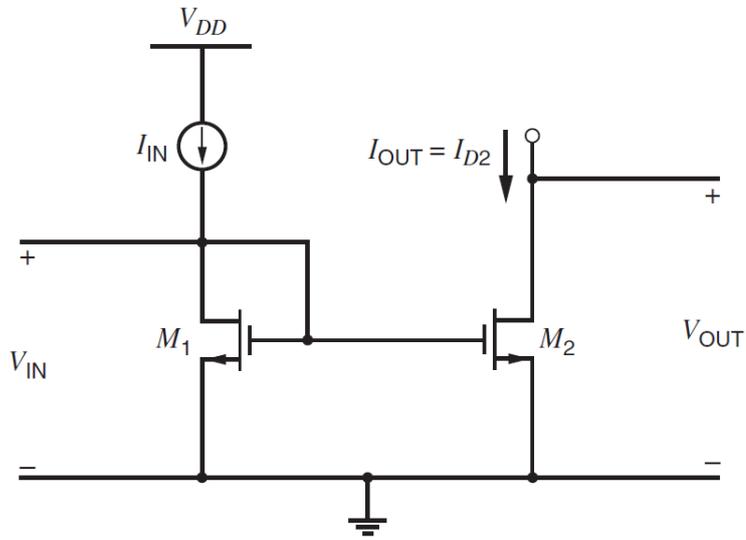


Рис.2.4. Просте дзеркало струму МОН

Припускаючи поведінку квадратного закону, надпривід для  $M_2$  дорівнює

$$V_{ov} = V_{GS2} - V_t = \sqrt{\frac{2I_{D2}}{k'(W/L)_2}} \quad (2.12)$$

Оскільки параметр провідності  $k'$  пропорційний рухливості, а оскільки рухливість падає із збільшенням температури, то надпривід зростає із підвищенням температури. На відміну від цього поріг падає із збільшенням температури.

$$V_{GS2} = V_t + \sqrt{\frac{2I_{D2}}{k'(W/L)_2}} = V_{GS1} = V_t + \sqrt{\frac{2I_{D1}}{k'(W/L)_2}} \quad (2.13)$$

Рівняння 2.13 показує, що надпривід  $M_2$  дорівнює  $M_1$ .

$$V_{ov2} = V_{ov1} = V_{ov} \quad (2.14)$$

Якщо транзистори однакові,  $(W/L)_2 = (W/L)_1$ , а отже

$$I_{OUT} = I_{D2} = I_{D1} \quad (2.15)$$

Рівняння 2.15 показує, що струм, який тече у сток  $M_1$ , відображається у стоці  $M_2$ . Оскільки  $\beta_F \rightarrow \infty$  для МОН-транзисторів, (2.15) і ЗСК на стоці  $M_1$  дають

$$I_{OUT} = I_{D1} = I_{IN} \quad (2.16)$$

Таким чином, для однакових пристроїв, що працюють в активній області з безмежним вихідним опором, коефіцієнт підсилення поточного дзеркала дорівнює одиниці. Цей результат має місце, коли струми затвора дорівнюють нулю; тобто (2.16) є принаймні приблизно правильним для постійного та низькочастотного струмів змінного струму. Однак із збільшенням вхідної частоти струми затвора  $M_1$  і  $M_2$  збільшуються, оскільки кожен транзистор має ненульову ємність джерела затвора. Частина вхідного струму, яка потрапляє в затворні заводи, не надходить у сток  $M_1$  і не відображається на  $M_2$ ; тому коефіцієнт підсилення дзеркала струму зменшується із збільшенням частоти вхідного струму. Решта цього розділу розглядає лише струми постійного струму.

На практиці пристрої не повинні бути однаковими. Тоді з (2.13) та (2.16),

$$I_{OUT} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{D1} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{IN} \quad (2.17)$$

Рівняння 2.17 показує, що коефіцієнт підсилення дзеркала струму може бути більшим або меншим за одиницю, оскільки розміри транзисторів можна співвідносити. Для співвідношення розмірів транзисторів, як ширина, так і довжина, в принципі можуть бути нерівними. Однак на практиці довжини  $M_1$  і  $M_2$  рідко бувають неоднаковими. Оскільки зміщені умови не залежать від протягнутої довжини, відношення двох ефективних довжин каналів дорівнює намальованому відношенню, лише якщо намальовані довжини однакові. Як результат, співвідношення неоднакових довжин каналів залежить від параметрів процесу, які можуть бути недостатньо контрольованими на практиці. Ефективна ширина даного транзистора відрізняється від намальованої ширини через поперечне окислення, що призводить до дзьоба птаха. Отже, співвідношення неоднакової ширини каналу також буде залежати від процесу. Однак у багатьох додатках для більшості транзисторів вибирається найкоротша довжина каналу, дозволена в даній технології, щоб максимізувати швидкість і мінімізувати площу. На відміну від цього, ширина намальованого каналу, як правило, у багато разів перевищує мінімальні розміри, дозволені в даній технології. Отже, щоб

мінімізувати ефект від зміщених термінів, коли коефіцієнт підсилення дзеркального струму розрахований на відмінність від одиниці, ширина в більшості практичних випадків пропорційна, а не довжина. Якщо бажаний коефіцієнт підсилення дзеркала струму є раціональним числом,  $M/N$ , коефіцієнт, як правило, встановлюється шляхом підключення  $M$  однакових пристроїв, що називаються одиницями паралельно, до форми  $M_2$  і  $N$  одиниць паралельно до форми  $M_1$ , щоб мінімізувати невідповідність, що виникає в результаті літографічних ефектів при регіони воріт. Як і в біполярному випадку, співвідношення більше, ніж приблизно п'ять до одного, споживають велику площу матриці, в якій переважає площа великого з двох пристроїв. Таким чином, інші методи, описані в наступних розділах, є кращими для генерації великих коефіцієнтів струму.

В письмовій формі (2.13) та (2.15) ми припустили, що струми стоку транзисторів не залежать від їх напруги джерела стоку. Якщо транзистор зміщений в активній області, його струм стоку фактично збільшується повільно зі збільшенням напруги стоку-джерела. На рис.2.5 показана вихідна характеристика для  $M_2$ . Вихідний опір струмового дзеркала в будь-якій заданій робочій точці є зворотним значенням нахилу вихідної характеристики в цій точці. В активному регіоні

$$R_o = r_{o2} = \frac{V_A}{I_{D2}} = \frac{1}{\lambda I_{D2}} \quad (2.18)$$

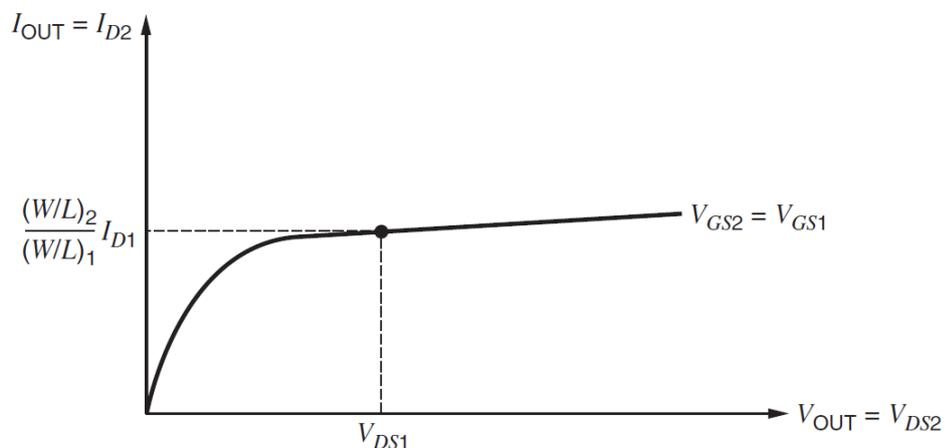


Рис.2.5. Вихідна характеристика простого дзеркала струму МОН.

Точка, де  $V_{DS2} = V_{DS1}$  і  $V_{GS2} = V_{GS1}$ , позначена на характеристиці. Оскільки сток стоку контролюється напругою затвора та джерела стоку,  $I_{D2} = [(W/L)_2 / (W/L)_1] I_{D1}$  в цей момент. Якщо нахил характеристики в насиченні постійний, коливання  $I_{D2}$  для змін у  $V_{DS2}$  можна передбачити прямою лінією, яка проходить через позначену точку. Екстраполяція вихідної характеристики в активній області назад до осі  $V_{DS2}$  дає перехоплення при  $-V_A = -1 / \lambda$ , де  $V_A$  – ранній вольт-вік. Якщо  $V_A \ll V_{DS1}$ , нахил прямої лінії приблизно дорівнює  $[(W/L)_2 / (W/L)_1] [I_{D1} / V_A]$ . Отже,

$$I_{OUT} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{IN} \left( 1 + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{V_A} \right) \quad (2.19)$$

Оскільки ідеальним коефіцієнтом підсилення поточного дзеркала є  $(W/L)_2 / (W/L)_1$ , систематичну похибку коефіцієнта підсилення,  $\varepsilon$ , поточного дзеркала можна розрахувати за (4.19).

$$\varepsilon = \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{V_A} \quad (2.20)$$

Наприклад, якщо напруга стоку-джерела  $M_1$  утримується 1,2 В, а якщо напруга джерела стоку  $M_2$  становить 5 В, то систематична похибка коефіцієнта підсилення становить  $(5-1,2)/10 \approx 0,38$  при  $V_A = 10$  В. Таким чином, для кола, що працює при напрузі живлення 5 В, струми дзеркального струму можуть відрізнятись більш ніж на 35 відсотків від тих значень, розрахованих припускаючи, що вихідний опір транзистора є фінітним. Хоча  $\varepsilon$  походить від кінцевого вихідного опору, він не залежить безпосередньо від  $r_{o2}$ , а натомість від джерела стоку та ранніх напруг. Оскільки рання напруга не залежить від струму зміщення, це спостереження показує, що зміна вхідного струму зміщення в дзеркалі струму змінює систематичну похибку підсилення головним чином через зміни напруги стоку-джерела.

Для простого дзеркала струму МОН вхідна напруга становить

$$V_{IN} = V_{GS1} = V_t + V_{ov1} = V_t + V_{ov} \quad (2.21)$$

При поведінці квадратних законів перенапряга в (2.21) пропорційна квадратному кореню вхідного струму. На противагу цьому (2.10) показує, що весь  $V_{IN}$  у простому біполярному дзеркалі пропорційний натуральному логарифму вхідного струму. Отже, для даної зміни вхідного струму зміна  $V_{IN}$  у простому дзеркалі струму МОН, як правило, більша, ніж у його біполярному аналозі.

Нарешті, мінімальна вихідна напруга, необхідна для утримання  $M_2$  в активній області, становить

$$V_{OUT(\min)} = V_{ov2} = V_{ov} = \sqrt{\frac{2I_{OUT}}{k'(W/L)_2}} \quad (2.22)$$

Рівняння 2.22 передбачає, що  $V_{OUT}$  (хв) залежить від геометрії транзистора і може бути довільно малим у простому МОН-дзеркалі, на відміну від біполярного випадку. Однак якщо перевищення, передбачене (2.22), менше  $2nV_T$ , де  $V_T$  – теплова напруга, результат є невірним, за винятком того, що вказує на те, що транзистори працюють у слабкій інверсії. При кімнатній температурі з  $n = 1,5$ ,  $2nV_T \approx 78$  мВ. Якщо транзистори працюють зі слабкою інверсією,

$$V_{OUT(\min)} \approx 3V_T \quad (2.23)$$

## 2.3. Просте дзеркало струму з бета-помічником

### 2.3.1. ПСДБ з біполярним транзистором

На додаток до зміни вихідного струму, обумовленого кінцевим вихідним опором, другий член у (2.9) показує, що струм колектора  $I_{C2}$  відрізняється від вхідного струму через кінцевий  $\beta_F$ .

Щоб зменшити це джерело помилок, можна додати додатковий транзистор, як показано на рис.2.6. Якщо  $Q_1$  і  $Q_3$  ідентичні, струм випромінювача транзистора  $Q_2$  дорівнює [9]

$$I_{E2} = \frac{I_{C1}}{\beta_F} - \frac{I_{C3}}{\beta_F} = -\frac{2}{\beta_F} I_{C1} \quad (2.24)$$

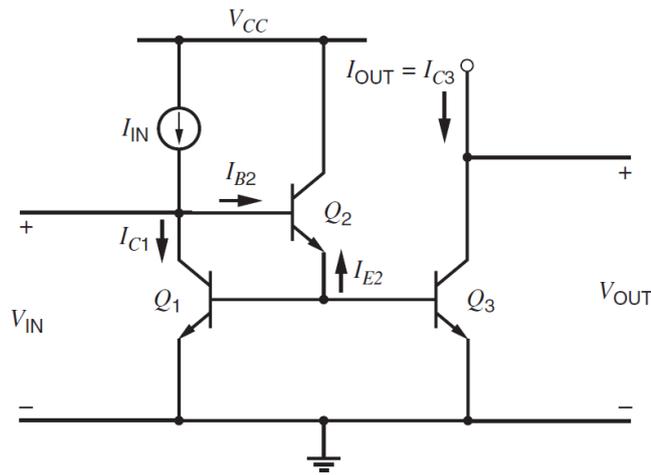


Рис.2.6. Просте дзеркало струму з бета-помічником.

Де  $I_E$ ,  $I_C$  і  $I_B$  визначаються як позитивні при попаданні в транзистор, і де ми нехтуємо ефектами кінцевого вихідного опору. Струм бази транзистора  $Q_2$  дорівнює

$$I_{B2} = \frac{I_{E3}}{\beta_F + 1} = -\frac{2}{\beta_F(\beta_F + 1)} I_{C1} \quad (2.25)$$

Нарешті, ЗСК на колекторі  $Q_1$  дає

$$I_{IN} - I_{C1} - \frac{2}{\beta_F(\beta_F + 1)} I_{C1} = 0 \quad (2.26)$$

Оскільки  $I_{C1}$  і  $I_{C3}$  рівні, коли  $Q_1$  і  $Q_3$  ідентичні,

$$I_{OUT} = I_{C3} = \frac{I_{IN}}{1 + \frac{2}{\beta_F(\beta_F + 1)}} \approx I_{IN} \left( 1 - \frac{2}{\beta_F(\beta_F + 1)} \right) \quad (2.27)$$

Рівняння 2.27 показує, що систематична помилка коефіцієнта підсилення від кінцевого  $\beta_F$  була зменшена в коефіцієнт  $[\beta_F + 1]$ , що є поточним коефіцієнтом підсилення послідовника випромінювача  $Q_2$ . Як результат,  $Q_2$  часто називають бета-помічником. Хоча бета-помічник мало впливає на вихідний опір і мінімальну вихідну напругу дзеркала струму, він збільшує вхідну напругу на напругу базового випромінювача  $Q_2$ :

$$V_{IN} = V_{BE1(on)} + V_{BE2(on)} \quad (2.28)$$

Якщо кілька послідовників випромінювачів каскодуються для подальшого зменшення помилки підсилення, що виникає від кінцевого  $\beta_F$ ,  $V_{IN}$  збільшується на

додаткову напругу базового випромінювача для кожного додаткового послідовника випромінювача, що створює одну межу для використання послідовників каскодного випромінювача.

Струмові дзеркала часто використовують бета-помічник, коли вони побудовані з транзисторами  $pnp$ , оскільки значення  $\beta_F$  для транзисторів  $pnp$  зазвичай менше, ніж для транзисторів  $npn$ . Ще одне застосування конфігурації бета-помічника – це поточні дзеркала з кількома виходами. Приклад з двома незалежними виходами наведено на рис.2.7. Спочатку ігноруйте  $Q_2$  і уявіть, що  $Q_1$  просто підключений діодом. Також нехай тут  $R_1=R_3=R_4=0$ . Тоді коефіцієнт підсилення від вхідного сигналу до кожного виходу визначається в основному відношеннями площ  $I_{S3}/I_{S1}$  та  $I_{S4}/I_{S1}$ . Оскільки бази трьох, а не двох транзисторів з'єднані між собою, тут збільшується загальний струм бази, що збільшує похибку підсилення від входу до будь-якого виходу, що виникає з кінцевого  $\beta_F$ . Крім того, помилки підсилення погіршуються із збільшенням кількості незалежних виходів. Оскільки бета-помічник  $Q_2$  зменшує похибку підсилення від вхідного сигналу до кожного виходу в коефіцієнт  $[\beta_F + 1]$ , він часто використовується в біполярних дзеркалах струму з кількома виходами.

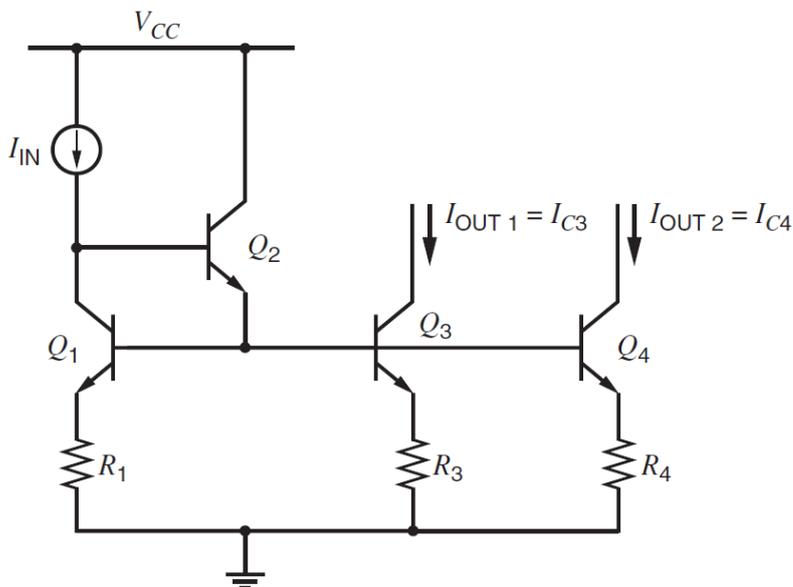


Рис.2.7. Просте дзеркало струму з бета-допоміжним пристроєм, кількома виходами та виродженням випромінювача.

### 2.3.2. ПСДБ з МОН-транзистором

Оскільки  $\beta_F \rightarrow \infty$  для МОН-транзистора, бета-допоміжні пристрої не використовуються в простих дзеркалах поточного МОН для зменшення систематичної помилки підсилення. Однак конфігурація бета-допоміжного пристрою може збільшити пропускну здатність МОН і біполярних дзеркал струму.

## 2.4. Каскодне струмове дзеркало

### 2.4.1. КСД з біполярним транзистором

Р'єднання каскоду досягає дуже високого вихідного опору. Оскільки це бажана характеристика для дзеркала струму, вивчення використання каскодів для високоефективних дзеркал струму є природним. Біполярно-транзисторне дзеркало струму на основі підключення каскоду показано на рис.2.8. Транзистори  $Q_3$  і  $Q_1$  утворюють просте дзеркало струму, а для покращення узгодження можна додати опори випромінювачів. Транзистор  $Q_2$  виступає як частина загальної бази каскоду і передає струм колектора  $Q_1$  на вихід, забезпечуючи високий вихідний опір [9].

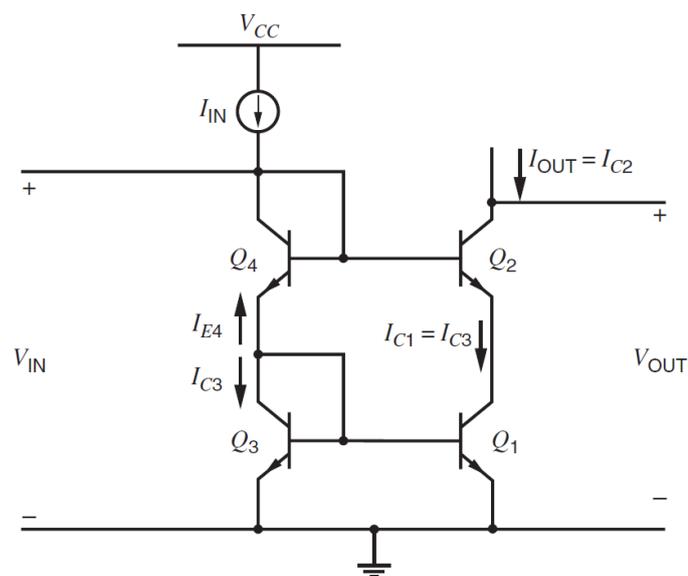


Рис.2.8. Струмове каскодне дзеркало з біполярними транзисторами.

Транзистор  $Q_4$  виконує функцію перемикача рівня діодів і зміщує базу  $Q_2$ , так що  $Q_1$  працює в прямому активній області з  $V_{CE1} \approx V_{CE3} = V_{BE3}$  (увімкнено). Якщо припустити, що опори малого сигналу діодів  $Q_3$  і  $Q_4$  малі  $R_E = r_{o1}$  можна зробити висновок, що

$$R_o = r_{o2} \left( 1 + \frac{g_{m2} r_{o1}}{1 + \frac{g_{m2} r_{o1}}{\beta_0}} \right) \approx \beta_0 r_{o2} \quad (2.37)$$

Оскільки  $g_{m2} r_{o1} \approx g_{m1} r_{o1} \approx \beta_0$ . Цей розрахунок передбачає, що майже весь струм малого сигналу, що надходить у колектор  $Q_2$ , видає його основу, оскільки опір малого сигналу, підключений до випромінювача  $Q_2$ , набагато більший, ніж підключений до його основи. Однак ключовою проблемою цього розрахунку є те, що воно ігнорує ефект простого дзеркала струму, утвореного  $Q_3$  та  $Q_1$ . Нехай  $i_{b2}$  та  $i_{e2}$  представляють збільшення струму бази та емітера  $\pi$  за рахунок  $Q_2$ , спричинене збільшенням вихідної напруги. Тоді прості дзеркальні сили  $i_{e2} \approx i_{b2}$ . Як результат, зміна струму колектора  $Q_2$  розпадається на дві рівні частини і половину потоку в  $r_{\pi2}$ . Аналіз малого сигналу показує, що  $R_o$  в (2.37) зменшується наполовину до

$$R_o \approx \frac{\beta_0 r_{o2}}{2} \quad (2.38)$$

Таким чином, конфігурація каскоду збільшує вихідний опір приблизно на  $\beta_0 / 2$ . Для  $\beta_0 = 100$ ,  $V_A = 130$  В та  $I_{C2} = 1$  мА,

$$R_o = \frac{\beta_0 r_{o2}}{2I_{C2}} = \frac{100(130)}{2mA} = 6.5M\Omega \quad (2.39)$$

У цьому розрахунку вихідного опору ми нехтували ефектами  $r_{\mu}$ . Хоча це припущення легко виправдати у випадку простого дзеркала струму, воно повинно бути тут переглянуте, оскільки вихідний опір настільки високий. Опір колектора-бази  $r_{\mu}$  виникає внаслідок модуляції струму базової рекомбінації як наслідок раннього ефекту. Для транзистора, базовий струм якого повністю складається з струму базової рекомбінації, відсоткова зміна струму бази при зміні  $V_{CE}$  при постійній  $V_{BE}$  дорівнює струму колектора, а  $r_{\mu}$  дорівнює  $\beta_0 r_o$ . У цьому випадку

ефект від  $r_{\mu}$  означав би зменшення вихідного опору дзеркала струму каскоду, наведеного в (2.38), у 1,5 рази.

Однак у фактичних транзисторах pnp з інтегральною схемою лише невеликий відсоток струму бази є результатом рекомбінації в основі. Оскільки лише цей компонент модулюється ефектом раннього, спостережувані значення  $r_{\mu}$  в 10 разів або більше перевищують  $\beta_0 r_o$ . Тому  $r_{\mu}$  має незначний ефект тут з транзисторами pnp. З іншого боку, для бічних транзисторів pnp опір зворотного зв'язку  $r_{\mu}$  набагато менший, ніж для транзисторів pnp, оскільки більша частина базового струму є результатом рекомбінації базової області. Фактичне значення цього опору залежить від ряду змінних процесу та геометрії пристрою, але спостережувані значення коливаються від 2 до 5 разів  $\beta_0 r_o$ . Отже, для дзеркала струму каскоду, сконструйованого з бічними транзисторами pnp, вплив  $r_{\mu}$  на вихідний опір може бути значним. Крім того, при розгляді поточних дзеркал, які дають вихідні опори вище, ніж  $\beta_0 r_o$ , слід враховувати ефекти  $r_{\mu}$ .

У дзеркалі струму каскоду база  $Q_1$  підключена до точки низького опору, оскільки  $Q_3$  підключений діодом. Як результат, зворотний зв'язок від  $r_{\mu 1}$  сильно послаблюється і має незначний вплив на вихідний опір. З іншого боку, якщо опір від основи  $Q_1$  до землі збільшується, а всі інші параметри підтримуються незмінними, локальний зворотний зв'язок від  $r_{\mu 1}$  суттєво впливає на напругу базового випромінювача  $Q_1$  і зменшує вихідний опір. У тій межі, де опір від основи  $Q_1$  до землі стає безмежним,  $Q_1$  діє так, ніби він підключений діодом.

Вхідна напруга дзеркала струму каскоду становить

$$V_{IN} = V_{BE3} + V_{BE4} = 2V_{BE(on)} \quad (2.40)$$

Хоча  $V_{IN}$  тут вище, ніж у (2.10) для простого дзеркала струму, збільшення стає обмеженням лише в тому випадку, якщо напруга джерела живлення зменшується майже до двох падінь діодів.

Мінімальна вихідна напруга, для якої вихідний опір заданий (2.38), має дозволяти зміщувати як  $Q_1$ , так і  $Q_2$  в прямому активному регіоні. Оскільки  $V_{CE1} \sqcup V_{CE3} = V_{BE(on)}$ ,

$$V_{OUT(\min)} = V_{CE1} + V_{CE2(\text{sat})} \square V_{BE(\text{on})} + V_{BE2(\text{on})} \quad (2.41)$$

Порівняння (2.41) та (2.11) показує, що мінімальна вихідна напруга для дзеркала струму каскоду вища, ніж для простого дзеркала струму через падіння діода. Це збільшення є важливим обмеженням мінімальної напруги живлення, коли дзеркало струму використовується як активне навантаження для підсилювача.

Оскільки  $V_{CE1} \square V_{CE3}$ ,  $I_{C1} \square I_{C3}$ , і систематична похибка підсилення, що виникає внаслідок кінцевого вихідного опору транзистора, майже дорівнює нулю. Однак ключовим обмеженням дзеркала струму каскоду є те, що систематична помилка коефіцієнта підсилення, що виникає від кінцевого  $\beta_F$ , гірша, ніж для простого дзеркала струму. З ЗСК на колекторі  $Q_3$ ,

$$-I_{E4} = I_{C3} + \frac{2I_{C3}}{\beta_F} \quad (2.42)$$

З ЗСК на колекторі  $Q_3$ ,

$$I_{IN} = -I_{E4} + \frac{2I_{C2}}{\beta_F} \quad (2.43)$$

Струм колектора  $Q_2$  дорівнює

$$I_{C2} = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} I_{C3} \quad (2.44)$$

Підставляючи (2.42) та (2.44) у (2.43), отримуємо

$$I_{IN} = I_{C3} + \frac{2I_{C3}}{\beta_F} + \frac{I_{C3}}{\beta_F + 1} \quad (2.45)$$

$$I_{OUT} = I_{IN} \left( 1 - \frac{4\beta_F + 2}{\beta_F^2 + 4\beta_F + 2} \right) \quad (2.46)$$

Рівняння 2.47 показує, що систематична похибка підсилення дорівнює

$$\varepsilon = -\frac{4\beta_F + 2}{\beta_F^2 + 4\beta_F + 2} \quad (2.47)$$

Якщо  $\beta_F \gg 1$ , (2.48) спрощується до

$$\varepsilon \square \frac{4}{\beta_F + 4} \quad (2.48)$$

На відміну від цього, систематична помилка підсилення, що виникає внаслідок фінітного  $\beta_F$  у простому дзеркалі струму з однаковими транзисторами, становить приблизно  $-2/\beta_F$ , що за величиною менше, ніж (2.48) передбачає для дзеркала струму каскоду, якщо  $\beta_F > 4$ . Це обмеження струмове дзеркало каскоду долається поточним дзеркалом Вільсона.

## 2.4.2. КСД з МОН-транзистором

Дзеркало струму каскоду широко використовується в технології МОН, де воно не страждає від фінітних ефектів  $\beta_F$ . На рис.2.9 показана найпростіша форма. Вихідний опір малого сигналу становить

$$R_o = r_{o2} [1 + (g_{m2} + g_{mb2}) r_{o1}] + r_{o1} \quad (2.49)$$

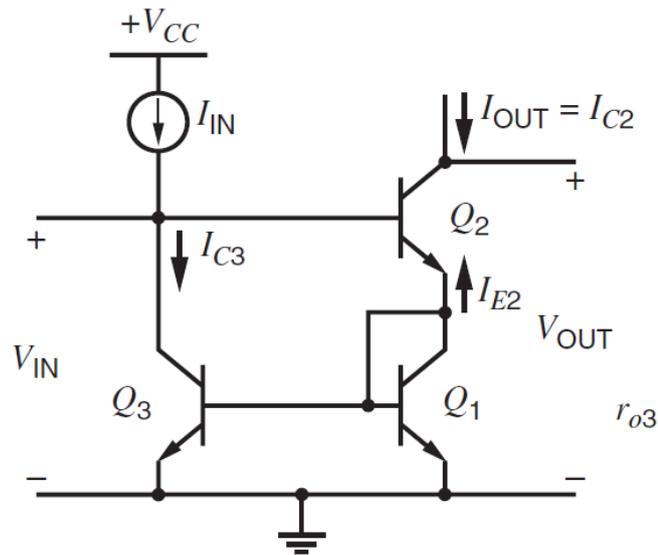
Як було показано в попередньому розділі, біполярне дзеркало струму каскоду не може реалізувати вихідний опір, більший ніж  $\beta_0 r_o / 2$ , оскільки  $\beta_0$  є кінцевим і ненульовим базовим потоком струму малого сигналу в транзисторі каскоду. На відміну від цього, МОН-каскод здатний реалізувати довільно високий вихідний опір за рахунок збільшення кількості накопичених пристроїв каскоду, оскільки  $\beta_0 \rightarrow \infty$  для МОН-транзисторів. Однак струм витoku підкладки МОН може створити резистивний шунт на землю з вихідного вузла, який може домінувати на вихідному опорі для  $V_{OUT} > V_{OUT(min)}$ .

## 2.5. Струмове дзеркало Уїльсона

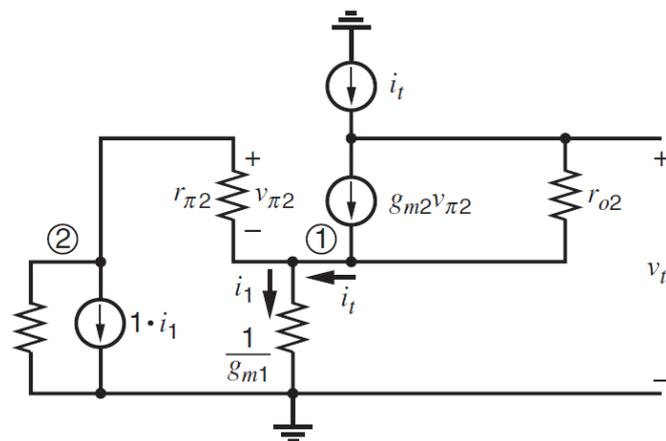
### 2.5.1. СДУ з біполярним транзистором

Основним обмеженням біполярного дзеркала струму каскоду є те, що систематична похибка підсилення, що виникає від кінцевого  $\beta_F$ , була великою, як зазначено в (2.48). Щоб подолати це обмеження, можна використовувати дзеркало струму Вільсона, як показано на рис.2.9 (а). Ця схема використовує негативний

зворотний зв'язок через  $Q_1$ , активуючи  $Q_3$  для зменшення помилки базового струму та підвищення вихідного опору. [9]



(a)



(б)

Рис.2.9. (а) біполярне дзеркало Вільсона. (б) модель малого сигналу.

З якісної точки зору, різниця між вхідним струмом та  $I_{C3}$  проникає в основу  $Q_2$ . Цей базовий струм множиться на  $(\beta_F + 1)$  і потоки потоку в підключеному діодом транзисторі  $Q_1$ , що спричиняє струм такої ж величини до потоку в  $Q_3$ . Таким чином формується шлях зворотного зв'язку, який регулює  $I_{C3}$  так, що він майже дорівнює вхідному струму, зменшуючи систематичну помилку підсилення, спричинену кінцевим  $\beta_F$ . Подібним чином, коли вихідна напруга збільшується, струм колектора  $Q_2$  також збільшується, в свою чергу збільшуючи струм

колектора  $Q_1$ . Як результат, струм колектора  $Q_3$  збільшується, що зменшує базовий струм  $Q_2$ . Зменшення базового струму  $Q_2$ , викликане негативним зворотним зв'язком, зменшує початкову зміну струму колектора  $Q_2$  і збільшує вихідний опір.

Щоб знайти вихідний опір дзеркала струму Вільсона, коли всі транзистори працюють в активній області, ми проаналізуємо модель малого сигналу, показану на рис.2.8(б), в якій тестовий джерело струму застосовується на виході. Транзистори  $Q_1$  і  $Q_3$  утворюють просте дзеркало струму. Оскільки  $Q_1$  підключений до діодів, опір малого сигналу від основи  $Q_1$  до землі становить  $(1/g_{m1})\|r_{\pi1}\|r_{\pi3}\|r_{o1}$ . Припустимо, що невідомий струм  $i_1$  впливає на цей опір. Коли  $g_{m1}r_{\pi1} \ll 1$ ,  $g_{m1}r_{\pi3} \ll 1$  та  $g_{m1}r_{o1} \ll 1$ , цей опір приблизно дорівнює  $1/g_{m1}$ . Транзистор  $Q_3$  може бути змодельований як джерело струму з керованою напругою значення  $g_{m3}v_{\pi3}$  паралельно з  $r_{o3}$ . Оскільки  $v_{\pi3} = v_{\pi1} \approx i_1 / g_{m1}$ , джерело струму з керованою напругою в моделі для  $Q_3$  може бути замінено джерелом струму, керованим струмом,  $(g_{m3} / g_{m1}) (i_1) = 1 (i_1)$ , як показано на рис.2.9 (б). Ця модель відображає поведінку простого дзеркала струму безпосередньо: вхідний струм  $i_1$  відображається на виході джерелом струму, керованим струмом.

Використовуючи цю модель, результуюча напруга  $v_t$  становить

$$v_t = \frac{i_1}{g_{m1}} + (i_1 - g_{m2}v_{\pi2})r_{o2} \quad (2.50)$$

Щоб знайти взаємозв'язок між  $i_1$  і  $v_{\pi2}$ , зверніть увагу, що напруга на  $r_{o3}$  дорівнює  $(i_1/g_{m1} + v_{\pi2})$ , і використовуйте ЗСК у вузлі 2 на рис.2.9 (б), щоб показати, що

$$\frac{v_{\pi2}}{r_{\pi2}} + i_1 + \frac{\frac{i_1}{g_{m1}} + v_{\pi2}}{r_{o3}} = 0 \quad (2.51)$$

$$v_{\pi2} = -i_1 r_{\pi2} \left( \frac{1 + \frac{1}{g_{m1} r_{o3}}}{1 + \frac{r_{\pi2}}{r_{o3}}} \right) \quad (2.52)$$

Щоб знайти зв'язок між  $i_1$  та ним, використовуйте ЗСК у вузлі 1 на рис.2.9 (б), щоб показати це

$$i_t = i_1 - \frac{v_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} \quad (2.53)$$

Підстановка (2.52) у (2.53) та переставлення дає

$$i_1 = \frac{i_t}{1 + \left( \frac{1 + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}}}{1 + \frac{r_{\pi 2}}{r_{o3}}} \right)} \quad (2.54)$$

Підстановка (2.54) у (2.52) та переставлення дає

$$v_{\pi 2} = -i_1 r_{\pi 2} \left( \frac{1 + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}}}{2 + \frac{r_{\pi 2}}{r_{o3}} + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}}} \right) \quad (2.55)$$

Підстановка (2.54) та (2.55) у (2.50) та перестановка дає

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} = \frac{1}{g_{m1} \left[ 1 + \left( \frac{1 + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}}}{1 + \frac{r_{\pi 2}}{r_{o3}}} \right) \right]} + r_{o2} + \frac{g_{m2}r_{\pi 2}r_{o2} \left( 1 + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}} \right)}{2 + \frac{r_{\pi 2}}{r_{o3}} + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}}} \quad (2.56)$$

Якщо  $r_{o3} \rightarrow \infty$ , струм малого сигналу, що виділяється в колекторі  $Q_3$ , дорівнює  $i_1$  і (4.90) зменшується до

$$R_o = \frac{1}{g_{m1}(2)} + r_{o2} + \frac{g_{m2}r_{\pi 2}r_{o2}}{2} \square \frac{\beta_0 r_{o2}}{2} \quad (2.57)$$

Цей результат такий самий, як (2.38) для поточного дзеркала каскоду. У дзеркалі струму каскоду струм малого сигналу, що протікає в основі  $Q_2$ , віддзеркалюється через  $Q_3$  до  $Q_1$ , так що струми малого сигналу і випромінювачі, що залишають  $Q_2$ , приблизно рівні. З іншого боку, у дзеркалі струму Вільсона струм малого сигналу, який тече в емітер  $Q_2$ , віддзеркалюється через  $Q_1 - Q_3$ , а потім тече в основу  $Q_2$ . Хоча причинно-наслідковий зв'язок тут протилежний такому у дзеркалі струму каскоду, вихідний опір незмінний, оскільки струми

основи малого сигналу та випромінювачі, що залишають  $Q_2$ , все одно змушені бути рівними. Отже, струм колектора малого сигналу  $Q_2$ , який тече через зміни вихідної напруги, все ще розпадається на дві рівні частини з половиною потоку в  $\Gamma_{\pi 2}$ .

З метою аналізу постійного струму ми припускаємо, що  $V_A \rightarrow \infty$  і що транзистори ідентичні. Тоді вхідна напруга становить

$$V_{IN} = V_{CE3} = V_{BE1} + V_{BE2} = 2V_{BE(on)} \quad (2.58)$$

як у (2.40) для поточного дзеркала каскоду. Крім того, мінімальна вихідна напруга, для якої обидва транзистори у вихідній гілці працюють у прямому прямому напрямку, становить

$$V_{OUT(min)} = V_{CE1} + V_{CE2(sat)} = V_{BE(on)} + V_{CE2(sat)} = 2V_{BE(on)} \quad (2.59)$$

У конфігурації, показаній на рис.2.9 (а), систематична похибка підсилення, що виникає внаслідок кінцевого вихідного опору, не дорівнює нулю, оскільки  $Q_3$  та  $Q_1$  працюють із напругами колектор-емітер, які відрізняються напругою базового випромінювача  $Q_2$ . З кінцевим  $V_A$  і кінцевим  $\beta_F$ ,

$$-I_{E2} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B3} = I_{C1} \left( 1 + \frac{1}{\beta_F} \right) + \frac{I_{C3}}{\beta_F} \quad (2.60)$$

Оскільки ми припустили, що транзистори однакові і  $V_A \rightarrow \infty$ ,

$$I_{C3} = I_{C1} \quad (2.61)$$

Підставляючи (2.61) у (2.60), отримуємо

$$-I_{E2} = I_{C1} \left( 1 + \frac{2}{\beta_F} \right) \quad (2.62)$$

Тоді, використовуючи (2.62), струм колектора  $Q_2$  дорівнює

$$I_{C2} = -I_{E2} \left( \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} \right) = I_{C1} \left( 1 + \frac{2}{\beta_F} \right) \left( \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} \right) \quad (2.63)$$

Переставляючи (2.63) отримуємо

$$I_{C1} = I_{C2} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\beta_F}\right) \left(\frac{\beta_F}{1 + \beta_F}\right)} \right] \quad (2.64)$$

З ЗСК в основі  $Q_2$ ,

$$I_{C3} = I_{IN} - \frac{I_{C2}}{\beta_F} \quad (2.65)$$

Далі ми знаходимо це

$$I_{OUT} = I_{C2} = I_{IN} \left( \frac{2}{\beta_F^2 + 2\beta_F + 2} \right) = \frac{I_{IN}}{1 + \frac{2}{\beta_F(\beta_F + 2)}} \quad (2.66)$$

У конфігурації, показаній на рис.2.9 (а), систематична похибка підсилення, що виникає внаслідок кінцевого вихідного опору, не дорівнює нулю, оскільки  $Q_3$  і  $Q_1$  працюють з напругами колектор-емітер, які відрізняються напругою базового випромінювача  $Q_2$ .

$$I_{OUT} \approx I_{IN} \left( 1 - \frac{2}{\beta_F^2 + 2\beta_F + 2} \right) \left( 1 + \frac{V_{CE1} - V_{CE3}}{V_A} \right) \approx I_{IN} \left( 1 - \frac{2}{\beta_F^2 + 2\beta_F + 2} \right) \left( 1 - \frac{V_{BE2}}{V_A} \right) \quad (2.67)$$

Отже, систематична помилка підсилення є

$$\varepsilon \approx - \left( \frac{2}{\beta_F^2 + 2\beta_F + 2} + \frac{V_{BE2}}{V_A} \right) \quad (2.68)$$

Порівняння (2.68) з (2.49) показує два ключові моменти. По-перше, систематична похибка коефіцієнта підсилення, що виникає від кінцевого  $\beta_F$  у дзеркалі струму Вільсона, набагато менше, ніж у дзеркалі струму каскоду. По-друге, систематична похибка коефіцієнта підсилення, що виникає через кінцевий вихідний опір, гірша у дзеркалі струму Вільсона, показаному на рис.2.9 (а), ніж у дзеркалі струму каскоду. Однак це обмеження не є принциповим, оскільки його можна подолати введенням нового транзистора, підключеного до діодів, між колектором  $Q_3$  і базою  $Q_2$  для вирівнювання напруг колектора-емітера  $Q_3$  і  $Q_1$ .

## 2.5.2. СДУ МОН-транзистором

Дзеркала струму Вільсона також використовуються в технології МОН, як показано на рис.2.10. Ігноруючи  $M_4$ , схема роботи по суті ідентична біполярному випадку з  $\beta_F \rightarrow \infty$ . Один із способів розрахувати вихідний опір – дозволити  $r_{\pi 2} \rightarrow \infty$ , що дає [9]

$$R_o = \frac{1}{g_{m1}} + r_{o2} + g_{m2}r_{o2} \left( 1 + \frac{1}{g_{m1}r_{o3}} \right) r_{o3} \square (1 + g_{m2}r_{o3})r_{o2} \quad (2.69)$$

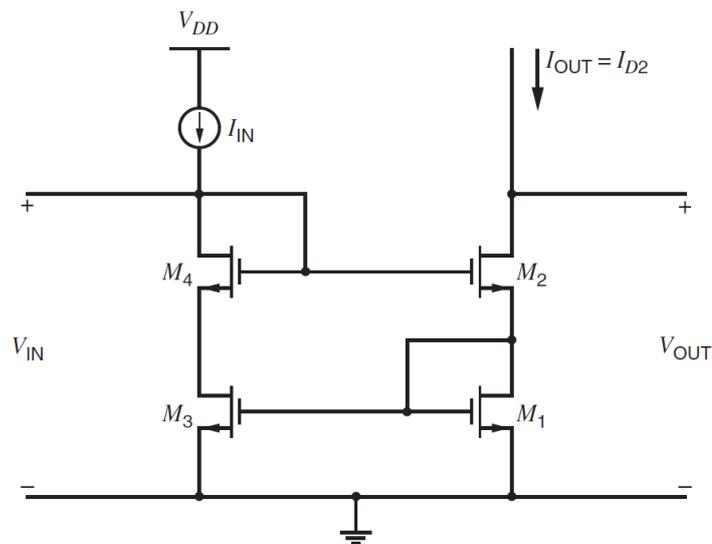


Рис.2.10. Удосконалене дзеркало струму Вільсона МОН з додатковим пристроєм, таким чином, що напруги стоку  $M_1$  і  $M_3$  рівні.

Оскільки розрахунок базується на моделі малого сигналу для біполярного струмового дзеркала Вільсона на рис.2.9 (б), воно ігнорує ефект тіла в транзисторі  $M_2$ . Повторення аналізу з генератором ефектів тіла паралельно з  $r_{o2}$  дає

$$R_o \square (2 + g_{m2}r_{o3})r_{o2} \quad (2.70)$$

Вплив тіла на  $M_2$  мало впливає на (2.70), оскільки  $M_1$  підключений діодом, а отже напруга від джерела  $M_2$  до землі є майже постійним.

Хоча  $\beta_F \rightarrow \infty$  для транзисторів МОН, систематична похибка коефіцієнта підсилення не дорівнює нулю без  $M_4$ , оскільки напруга джерела стоку  $M_3$  відрізняється від напруги  $M_1$  напругою затвора-джерела  $M_2$ . Отже, без  $M_4$ ,

$$\varepsilon = \frac{V_{DS1} - V_{DS3}}{V_A} = -\frac{V_{GS2}}{V_A} \quad (2.71)$$

Транзистор  $M_4$  вставляється послідовно з  $M_3$ , щоб вирівняти напруги стоку  $M_3$  та  $M_1$ , щоб

$$\varepsilon \approx 0 \quad (2.72)$$

Для  $M_4$  вихідний опір все ще задається (2.70), якщо всі транзистори працюють в активній області. Крім того, введення  $M_4$  не змінює ні мінімальну вихідну напругу, для якої застосовується (2.70). Ігноруючи ефект частинок та припускаючи однакові перевантаження на всіх транзисторах, мінімальна вихідна напруга становить

$$V_{OUT(\min)} = V_{GS1} + V_{ov2} = 2V_t + V_{ov} \quad (2.73)$$

За тих самих умов вхідна напруга становить

$$V_{IN} = V_{GS1} + V_{GS2} = 2V_t + 2V_{ov} \quad (2.74)$$

## 2.6. Висновки до розділу

Дзеркала струму, виготовлені за допомогою активних пристроїв, стали широко застосовуватися в аналогових інтегральних схемах як елементи зміщення, так і пристрої навантаження для каскодів підсилювача. Використання дзеркал струму для зміщення може призвести до вищої нечутливості роботи схеми до коливань джерела живлення та температури. Дзеркала струму часто є більш економічними, ніж резистори, з точки зору площі штампа, необхідного для забезпечення струму зміщення певного значення, особливо коли необхідне значення струму зміщення невелике. При використанні як навантажувального елемента в транзисторних підсилювачах високий опір дзеркала струму призводить до підсилення високої напруги при низьких напругах джерела живлення.

## РОЗДІЛ 3 ТОПОЛОГІЇ ГКН З БАГАТОКАНАЛЬНИМИ ДЗЕРКАЛАМИ СТРУМУ

### 3.1. Вступ

У наш час пристрої та схеми негативного диференціального опору широко використовуються в осциляторах, пам'яті, дільниках частоти та схемах множників. Наявність негативного опору в електричному ланцюзі дає можливість не розсіювати електричну енергію у вигляді тепла, а генерувати електричну енергію, навіть якщо вона має лише дві клеми, а не три, як у транзисторів. Існує два типи негативного опору, а саме, диференціальний та статичний. Іноді НДО також називають негативним динамічним опором. НДО – це перша похідна напруги відносно струму в робочій точці. Характеристики струмової напруги в області НДО можуть бути створені двома способами. Перший спосіб передбачає використання спеціальних електронних пристроїв, таких як діод Ганна, тунельний діод, трьохвивідні графенові НДО-пристрої та інші. По-друге, вольт-амперні характеристики в області НДО створюються штучно за допомогою спеціальних електронних схем. Однак відомі електронні схеми NDR мають деякі недоліки, що обмежують їх використання.

Далі пропонується нова схема НДО, заснована на ПТ у поєднанні з декількома простими СД, в яких величина негативного опору легко контролюється за допомогою зміни кількості виходів СД. Дано опис, математичне та чисельне моделювання схеми НДО. Електронна схема НДО може бути використана при проектуванні генератора, ГКН, підсилювача тощо. Найбільш перспективне застосування пов'язані з генерацією надвисокочастотних сигналів з низьким фазовим шумом.[10]

### 3.2. Принцип роботи НДО пристрою

На рис.3.1.(а) показана схема НДО, яка складається з двох резисторів зміщення  $R_a$  і  $R_b$ , ПТ ( $Q_0$ ) і простих СД з виходами  $n - 1$  (колектори транзисторів  $Q_2, Q_n$ ). Далі ми припускаємо, що транзистори  $Q_1, Q_n$  відповідають. На малюнку показані вольт-амперні характеристики схеми НДО, де загальний струм  $I_0$  є функцією напруги живлення  $V_{xy}$ . Крутизна ВАХ між точками  $\beta$  і  $\gamma$  залежить від кількості виходів СД. Крива 1 відповідає одному виходу СД, тобто використовуються лише транзистори  $Q_1$  і  $Q_2$ . У цьому конкретному випадку диференціальний опір між точками  $\beta$  і  $\gamma$  є позитивним, і схема не має області НДО. При виборі відповідних транзисторів, схема може мати область НДО навіть з одним СД-виходом [11].

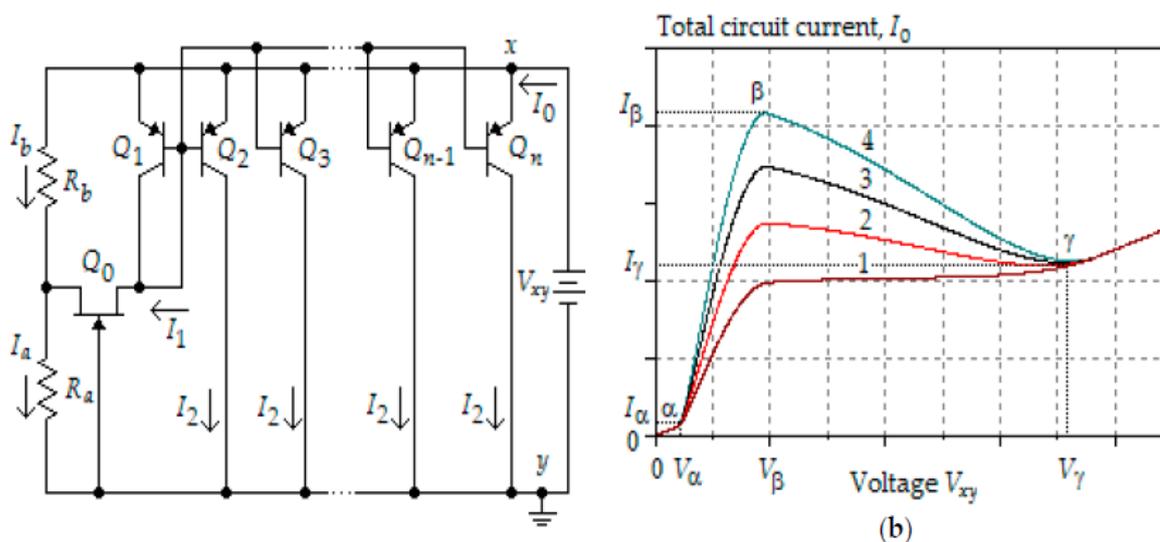


Рисунок 3.1. (а) Схема негативного диференціального опору з кількома простими дзеркалами струму; (б) ВАХ типу N кола.

Як видно на рис.3.1, зі збільшенням кількості виходів СД до двох і далі до чотирьох диференціальний опір стає негативним, а нахил характеристики в області НДО збільшується.

Характеристики струмової напруги на рис.3.1.(б) включають чотири області між точками  $0$  і  $V_\alpha$ ,  $V_\alpha$  і  $V_\beta$ ,  $V_\beta$  і  $V_\gamma$  і  $V_\gamma$  і  $\infty$ . Область НДО розташована між

точками  $V_\beta$  і  $V_\gamma$ . Давайте розглянемо загальний принцип роботи схеми. Коли напруга  $V_{xy}$  змінюється від 0 до  $V_\alpha$ , усі транзистори в колі вимкнені. При напрузі живлення  $V_\alpha$  всі транзистори вмикаються, і до напруги  $V_\beta$  струм  $I_1$  підвищується, а загальний струм  $I_0$  також збільшується. Струм  $I_2$  є дзеркальною копією  $I_1$ , і він поводить як  $I_1$ . Коли напруга живлення  $V_\beta$ , струм  $I_1$  досягає максимуму, що також відповідає максимуму загального струму  $I_0$ . Коли напруга  $V_{xy}$  змінюється від  $V_\beta$  до  $V_\gamma$ , струм  $I_1$  зменшується через збільшення негативної напруги між затвором і джерелом транзистора  $Q_0$ . У той же час збільшення струму  $I_b$  не покриває цього зменшення струму  $I_1$ . В результаті загальний струм  $I_0$  зменшується до напруги  $V_\gamma$ , при якій напруга між затвором і джерелом транзистора  $Q_0$  досягає напруги відключення і  $Q_0$  вимикається, і, отже, транзистори  $Q_1, Q_n$  також вимикаючі. Коли напруга живлення вище  $V_\gamma$ , загальний струм  $I_0$  повністю визначається напругою  $V_{xy}$  та опорами  $R_a$  та  $R_b$ . Тому в інтервалі  $(V_\gamma, \infty)$  диференціальний опір ВАХ є позитивним [11].

Визначимо координати  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$ . У першій області ВАХ, між точками 0 і  $V_\alpha$ , усі транзистори вимкнені, а загальний струм залежить від значення резистора  $R_a$  і  $R_b$  та напруги живлення  $V_{xy}$ .

$$I_0 = \frac{V_{xy}}{R_a + R_b} \quad (3.1)$$

Порогова напруга  $V_\alpha$  визначається шляхом застосування рівняння закону напруги Кірхгофа до кола, зображеного на рисунку 3.1 (а), коли транзистор  $Q_0$  увімкнений і  $V_{DS0} = 0$ , де  $V_{DS0}$  – напруга джерела стоку  $Q_0$ .

$$V_\alpha = V_{EB} + I_a R_a \quad (3.2)$$

де  $V_{EB}$  – напруга на основі емітера транзисторів ( $\overline{Q_1, Q_n}$ ) і  $I_a$  – струм через резистор  $R_a$ . Оскільки при напрузі  $V_\alpha$  струм  $I_a$  дорівнює  $I_0$ , то рівняння (3.2) перетворюється в такий вигляд:

$$V_{\alpha} = \frac{V_{EB}(R_a + R_b)}{R_b} \quad (3.3)$$

Поєднуючи (1) та (3), отримуємо:

$$I_{\alpha} = \frac{V_{EB}}{R_b} \quad (3.4)$$

Коли напруга  $V_{xy}$  трохи перевищує  $V_a$  транзистори  $Q_1$ ,  $Q_n$  вмикаються, і транзистор  $Q_0$  починає працювати в області триодів, де:

$$V_{DS0} < V_{GS0} + V_{P0} \quad (3.5)$$

де  $V_{GS0}$  і  $V_{P0}$  – відповідно напруга джерела затвора та відключення  $Q_0$ . Застосовуючи ЗНК від  $+V_{xy}$  до землі, ми отримуємо:

$$V_{xy} = V_{EB} + V_{DS0} + I_a R_a \quad (3.6)$$

З (3.6) ми знаходимо струм  $I_a$  таким:

$$I_a = \frac{V_{xy} - V_{EB} - V_{DS0}}{R_a} \quad (3.7)$$

Як впливає із схеми на рис.3.1(а):

$$I_b = I_a - I_1 \quad (3.8)$$

Підстановка (3.7) на (3.8) дає:

$$I_b = \frac{V_{xy} - V_{EB} - V_{DS0}}{R_a} - I_1 \quad (3.9)$$

Застосовуючи ЗНК навколо циклу ( $R_b$ ,  $Q_0$ ,  $Q_1$ ), отримуємо:

$$-I_b R_b + V_{DS0} + V_{EB} = 0 \quad (3.10)$$

Підставивши (3.9) в (3.10) і виконавши деякі математичні перетворення, отримаємо:

$$V_{DS0} = \frac{R_b V_{xy}}{R_a + R_b} - I_1 (R_a \parallel R_b) - V_{EB} \quad (3.11)$$

Напруга затвора-джерела транзистора  $Q_0$  визначається як:

$$V_{GS0} = -I_a R_a \quad (3.12)$$

Напругу  $V_{GS0}$  ми отримуємо, поєднуючи (3.7), (3.11) і (3.12) і виконуючи необхідні перетворення.

$$V_{GS0} = \frac{R_a V_{xy}}{R_a + R_b} - I_1 (R_a \square R_b) \quad (3.13)$$

Підставивши  $V_{DS0}$  з (3.11) в (3.7), ми визначимо, що:

$$I_a = \frac{V_{xy}}{R_a + R_b} + \frac{I_1 R_b}{R_a + R_b} \quad (3.14)$$

Ми знаходимо струм  $I_0$ , застосовуючи діючий закон Кірхгофа до вузла у у схемі на рис.3.1(а).

$$I_0 = I_a + (n-1)I_2 \quad (3.15)$$

Замінивши (3.14) на (3.15), ми отримаємо загальне рівняння загального струму ланцюга.

$$I_0 = (n-1)I_2 + \frac{I_1 R_b}{R_a + R_b} + \frac{V_{xy}}{R_a + R_b} \quad (3.16)$$

Оскільки струм  $I_2$  близький до опорного струму  $I_1$ , можна припустити, що  $I_2 \approx I_1$ . У цьому випадку рівняння (16) перетворюється у такий вигляд:

$$I_0 \approx I_1 \left( n-1 + \frac{R_b}{R_a + R_b} \right) \frac{dI_1}{dV_{xy}} + \frac{1}{R_a + R_b} \quad (3.17)$$

Нахил ВАХ в області негативного опору визначається першою похідною струму  $I_0$  щодо напруги  $V_{xy}$ .

$$\frac{dI_0}{dV_{xy}} \approx \left( n-1 + \frac{R_b}{R_a + R_b} \right) \frac{dI_1}{dc} + \frac{1}{R_a + R_b} \quad (3.18)$$

Як видно з (3.18), нахил справді пропорційний кількості виходів дзеркала струму  $n$ . Отже, змінюючи  $n$ , можна зменшити або збільшити нахил ВАХ між порогами напруги  $V_\beta$  і  $V_\gamma$ .

Підставивши (3.11) і (3.13) в (3.5), ми виявимо, що коли транзистор  $Q_0$  працює в триодному режимі, між напругою живлення  $V_{xy}$  і напругами  $V_{EB}$  і  $V_{P0}$  виконується така залежність:

$$V_{xy} < V_{EB} - V_{P0} \quad (3.19)$$

Коли напруга  $V_{xy}$  зростає більше, ПТ  $Q_0$  досягає області насичення, де:

$$V_{DS0} \geq V_{GS0} + V_{P0} \quad (3.20)$$

Порогова напруга  $V_\beta$  досягається на межі між тріодом і зоною насичення транзистора  $Q_0$ , тобто коли:

$$V_{DS0} = V_{GS0} + V_{P0} \quad (3.21)$$

Підставивши (3.11) і (3.13) в (3.21), отримаємо порогову напругу  $V_\beta$

$$V_\beta = V_{EB} - V_{P0} \quad (3.22)$$

Ми визначаємо пороговий струм  $I_\gamma$ , замінюючи (3.22) на (3.17).

$$I_\beta \approx I_1 \left( n - 1 + \frac{R_b}{R_a + R_b} \right) + \frac{V_{EB} - V_{P0}}{R_a + R_b} \quad (3.23)$$

Як видно на рис.3.1 (б), нахил характеристик струмової напруги в областях  $(0, V_\alpha)$  та  $(V_\gamma, \infty)$  однаковий. Це означає, що на порозі напруги  $V_\gamma$  транзистор  $Q_0$  вимкнений, а  $I_1 = 0$ . Транзистор  $Q_0$  вимикається, коли  $V_{GS0} = V_{P0}$ . Підставляючи  $V_{P0}$  замість  $V_{GS0}$  у (13) і вирішуючи отримане рівняння щодо  $V_{xy}$ , отримуємо:

$$V_{xy} = V_\gamma = - \left( 1 + \frac{R_b}{R_a} \right) V_{P0} \quad (3.24)$$

Пороговий струм  $I_\gamma$  ми знаходимо, підставляючи  $V_{xy}$  з (3.24) в (1).

$$I_\gamma = \frac{|V_{P0}|}{R_a} \quad (3.25)$$

Як видно з (3.11), (3.13), (3.14), (3.16), (3.17) і (3.23), для розрахунку струмів і напруг, пов'язаних з пороговими значеннями ВАХ кола, це необхідно знати поточний  $I_1$ . Моделювання струму  $I_1$  залежить від типу  $Q_0$ . Транзистор  $Q_0$  може бути N-канальним JFET-транзистором з польовим ефектом від металу і напівпровідника (MESFET), транзистором з високою електронною рухливістю (НЕМТ) або псевдоморфним транзистором з високою рухливістю електронів (РНЕМТ). В області напруги  $(V_\beta, V_\gamma)$  транзистор  $Q_0$  працює в режимі насичення. Тому ми повинні моделювати поточний  $I_1$  для випадку, коли  $Q_0$  працює в режимі насичення [12].

Як відомо, робота JFET в режимі насичення досить добре описується рівнянням Шоклі.

Підставивши  $V_{GS0}$  з (3.13) у рівняння Шоклі, вийде:

$$I_1 = \left( I_{DSS} \left( 1 + \frac{AV_{xy} + BI_1}{V_{P0}} \right) \right)^2 \quad (3.26)$$

де  $I_{DSS}$  – струм стоку-джерела насичення при нульовій напрузі затвор-джерело,  $A$  і  $B$  визначаються наступним чином:

$$A = R_a / (R_a + R_b), B = R_a \square R_b \quad (3.27)$$

Вирішуючи (3.26) щодо струму  $I_1$ , отримуємо таке квадратне рівняння:

$$\frac{I_{DSS} B^2}{V_{P0}^2} I_1^2 + \left[ 2I_{DSS} \left( 1 + \frac{AV_{xy}}{V_{P0}} \right) \frac{B}{V_{P0}} - 1 \right] I_1 + I_{DSS} \left( 1 + \frac{AV_{xy}}{V_{P0}} \right)^2 = 0 \quad (3.28)$$

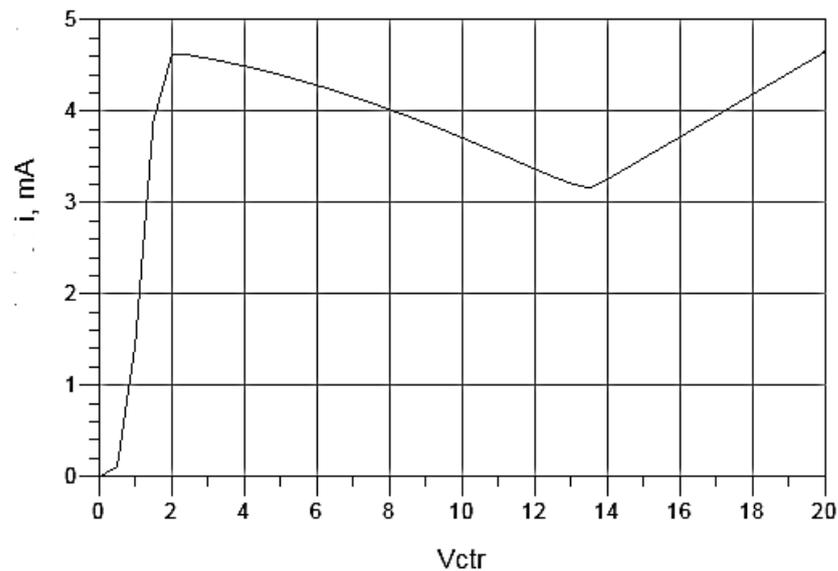
Рівняння (3.28) має два позитивні корені. Допустимим коренем є значення поточного  $I_1$ , яке менше ніж  $I_{DSS}$ .

### 3.3. ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму

В генераторах керованих напругою негативного диференціального опору приставлених на сьогодні практично не існує можливості збільшення негативного опору без зміни типу транзисторів або розмірів транзисторів. Негативного опору може бути недостатньо для запуску схеми генератора. Струмове дзеркало допомагає змінити значення негативного диференціального опору, що в свою чергу розширює сфери застосувань [13].

На рис. 3.2 показано НДО ГКН багатоканальним простим дзеркалом струму. Резистори  $R_1$  і  $R_2$  створюють дільник напруги. Напруга на  $R_2$  контролює напругу від затвора до джерела транзистора  $Q_1$ . СД, транзистор  $Q_1$  і резистори  $R_1$  і  $R_2$  працюють як двотермінальний НДО-пристрій, що забезпечує N-тип ВАХ. Багатоканальне СД створене за допомогою відповідних ВТ р-п-р транзисторів  $Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$  ( транзистори  $Q_4, Q_5$  виконують роль додаткових гілок).





(б)

Рис.3.3 ВАХ генератора (а) з трьома каналами струмового дзеркала; (б) з одним каналом

Великий інтерес представляє визначення типу СД, який краще використовувати в схемі ГКН. Як відомо [15], СД мають різну вхідну напругу ( $V_{IN}$ ), вихідний опір ( $R_O$ ), залежність  $I_{OUT}$  проти  $I_{IN}$  і пропускну здатність. Ці параметри можуть вплинути на роботу ГКН. Ось чому робочі характеристики ГКН з різними СД будуть порівнюватися за допомогою загальноживаного FOM. Він узагальнює важливі характеристики, тобто фазовий шум  $L(\Delta f)$  та енергоспоживання  $P_c$ , для справедливого порівняння

$$FOM = L(\Delta f) - 20\log(f_0/\Delta f) + 10\log(P_c/1mW) \quad (3.29)$$

Другий член (5) полягає у нейтралізації ефекту зміщення частоти  $\Delta f$  у фазовому шумі з урахуванням центральної частоти  $f_0$ .

На малюнках 3-7 показані ГКН з найбільш часто використовуваними СД. Ці СД були обрані з урахуванням простоти, точності та близькості їх характеристик до ідеальних значень. Найпростіша конфігурація ГКН, яка базується на простому дзеркалі струму (ПСД) [15], показана на рис.3.2. Для цього ГКН  $V_{CC2}$  – порогова напруга та  $I_t$  – вихідний струм представлені як

$$V_{CC2} \approx V_{EB} - V_P \quad (3.30)$$

$$I_i = I_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{I_{IN}}{1 + 2/\beta_F} + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.31)$$

де  $\beta_F$  – коефіцієнт підсилення струму транзистора р-п-р.

### 3.4. ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму з бета-помічником

Багатоканальне СД створене за допомогою відповідних ВІТ р-п-р транзисторів  $Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$  ( транзистори  $Q_4, Q_5$  виконують роль додаткових гілок). Транзистор  $Q_6$  використовується для зменшення залежності вихідного струму від підсилення струму.

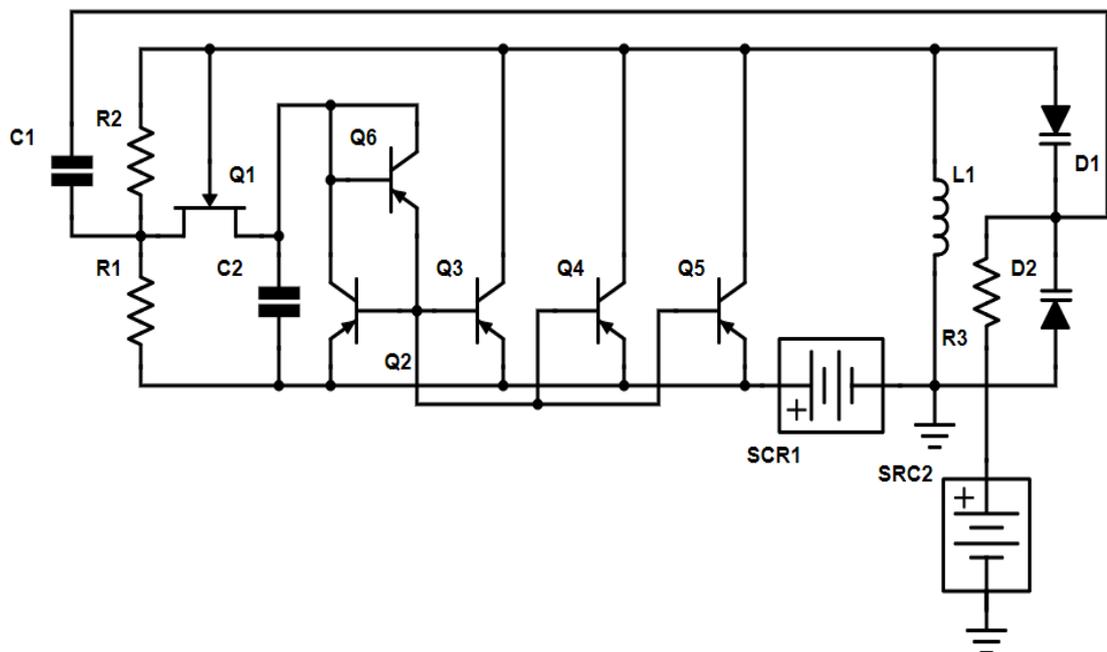


Рис.3.4. ГКН з багатоканальним простим дзеркалом з бета-помічником

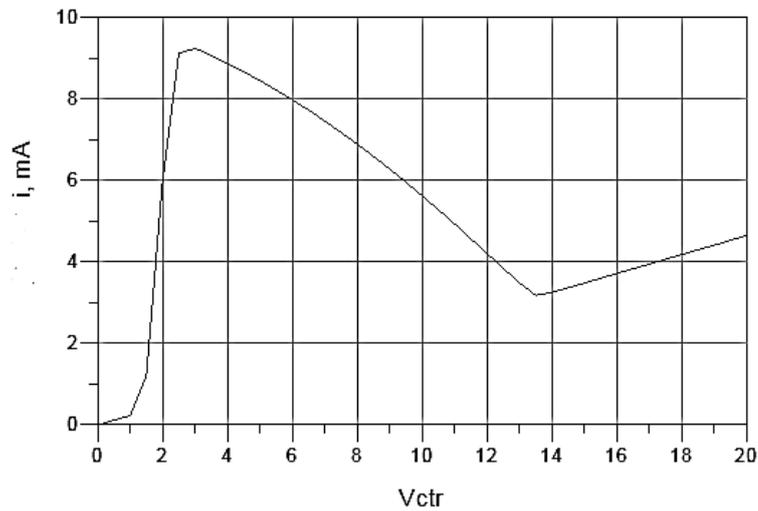
Для зменшення залежності кінцевого струму  $I_t$  від  $\beta_F$ , ПСД з бета-помічником пристроєм (ПСДБ) [15] використовується в схемі VCO на рис.3.4. Для цього ГКН можна легко довести, що

$$V_{CC2} \approx 2V_{EB} - V_P \quad (3.32)$$

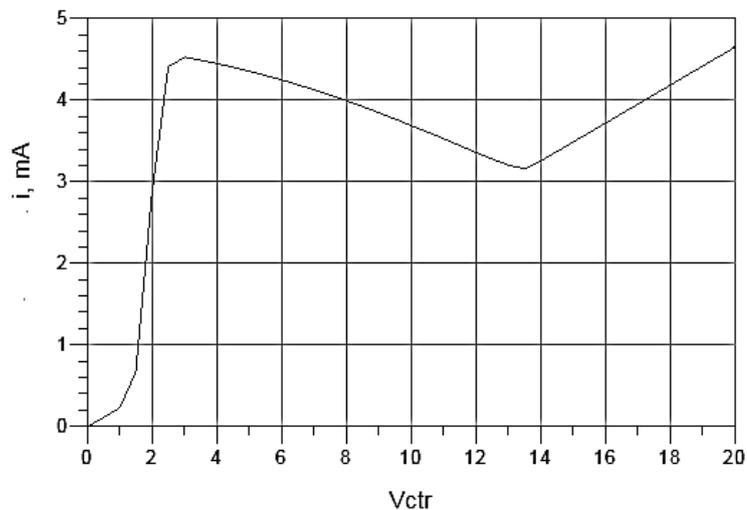
Порівнюючи (3.32) з (3.30), ми виявляємо, що порогова напруга  $V_{CC2}$  збільшується на одне падіння діода в колі на рис.3.4

$$I_i = I_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{I_{IN}}{1 + 2/\beta_F(\beta_F + 1)} + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.33)$$

На рис.3.5 можна побачити залежність НДО від зміни кількості гілок



(a)



(б)

Рис.3.5 ВАХ генератора (а) з трьома каналами струмового дзеркала; (б) з одним каналом

### 3.5. ГКН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму

Транзистори  $Q_3$  і  $Q_1$  утворюють просте дзеркало струму, а для покращення узгодження можна додати опори випромінювачів. Транзистор  $Q_2$  виступає як частина загальної бази каскоду і передає струм колектора  $Q_1$  на вихід, забезпечуючи високий вихідний опір.

Транзистор  $Q_4$  виконує функцію діодного перемикача рівнів наруги і зміщує базу  $Q_2$ , так що  $Q_1$  працює в прямій активній області. Транзистори  $Q_4$ ,  $Q_5$ ,  $Q_7$  та  $Q_8$  створюють додаткові гілки каскодного струмового дзеркала.

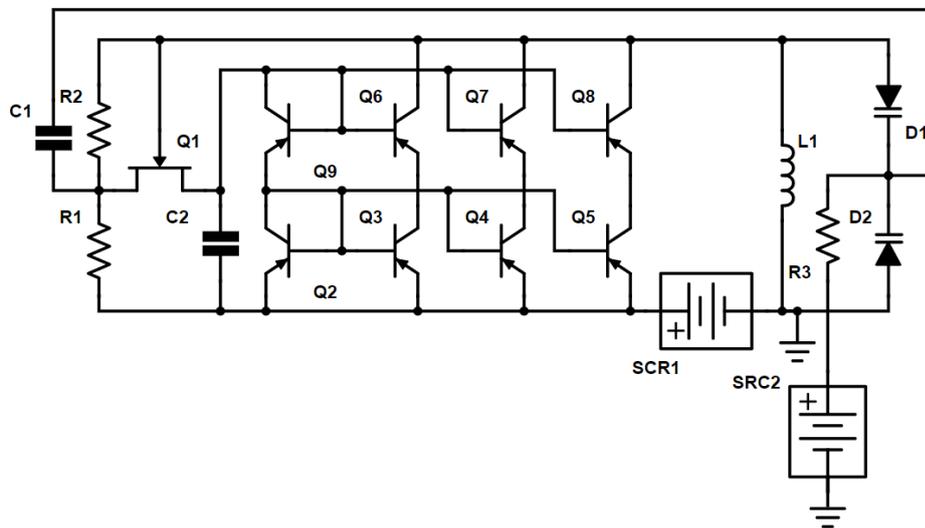
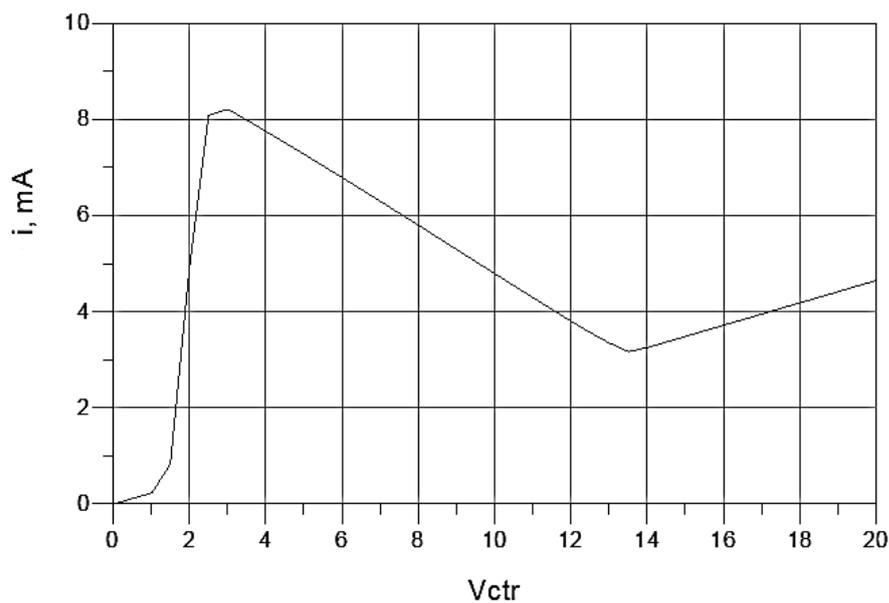
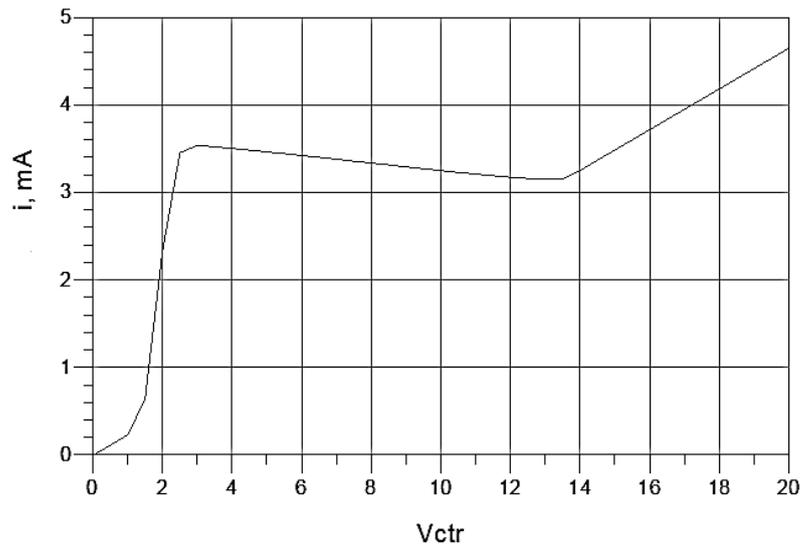


Рис.3.6. ГКН з багатоканальним каскодним струмовим дзеркалом



(a)



(б)

Рис.3.7. ВАХ генератора (а) з трьома каналами струмового дзеркала; (б) з одним каналом

Схема ГКН з дзеркалом струму каскоду (КСД) показана на рис.3.6. Як добре відомо [15], КСД досягає набагато вищого вихідного опору порівняно з ПСД і ПСДБ. Легко показати, що вираз (3.33) тепер представляється як

$$I_i = I_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + I_{IN} \left( 1 - \frac{4\beta_F + 2}{\beta_F^2 + 4\beta_F + 2} \right) + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.34)$$

Оскільки  $V_{IN} = 2V_{EB}$ , порогова напруга  $V_{CC2}$  обчислюється за (3.32).

### 3.6. ГКН з багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона

Транзистори  $Q_2$ ,  $Q_3$  та  $Q_6$  виконують роль струмового дзеркала Уїлсона.  $Q_4$ ,  $Q_5$ ,  $Q_7$  та  $Q_8$  це додаткові гілки струмового дзеркала Уїлсона. Коливальний контур складається з двох варакторів  $D_1$ ,  $D_2$  та котушки індуктивності  $L_1$ . Змінюючи напругу, що подається на варактори  $D_1$  та  $D_2$  ми можемо змінювати ємність в коливальному контурі тим самим змінюючи частоту.

На рис. 3.9. видно як відрізняються ВАХ генератора з багатоканальним та одноканальним струмовим дзеркалом.

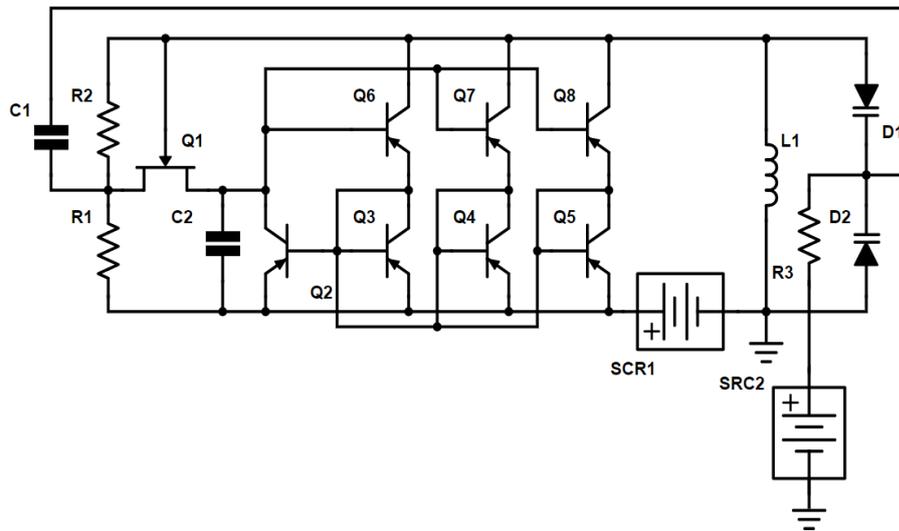


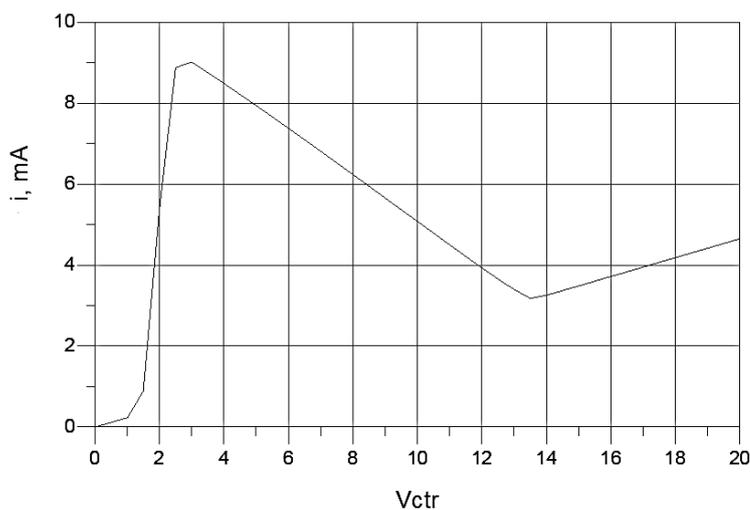
Рис.3.8. ГКН з багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона

Основне дзеркало струму Уїлсона (СДУ) має на відміну від КСД набагато меншу залежність  $I_{OUT}$  від  $\beta_F$ . Схема ГКН з СДУ показана на рис.3.8. Для цього ГКН вихідний струм  $I_t$  заданий

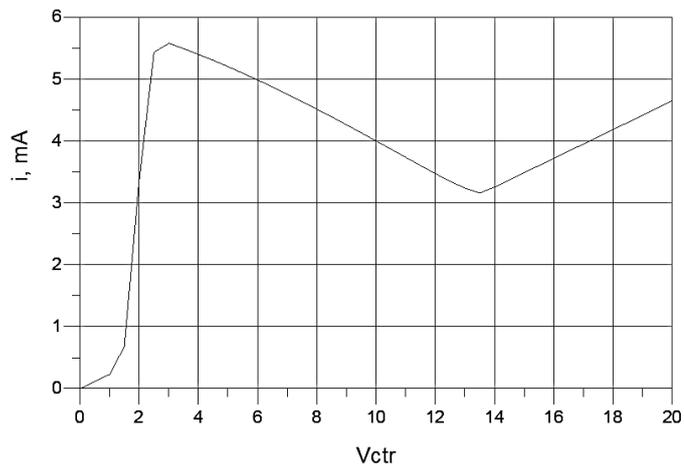
$$I_t = I_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + I_{IN} \left( 1 - \frac{2}{\beta_F^2 + 4\beta_F + 2} \right) \left( 1 + \frac{V_{CE1} - V_{CE2}}{V_A} \right) + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.35)$$

де  $V_{CE1}$  і  $V_{CE2}$  – напруги колектор-емітер транзисторів  $Q_2$  і  $Q_3$ , а  $V_A$  – рання напруга.

Як і у випадку з ГКН з ПСДБ, порогова напруга  $V_{CC2}$  обчислюється за (3.32).



(a)



(б)

Рис.3.9. ВАХ генератора (а) з трьома каналами струмового дзеркала; (б) з одним каналом

### 3.7. ГКН з вдосконаленим багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона

Додавши четвертий транзистор до простого дзеркала струму Уїлсона на рис.3.10, ми отримали модифіковане або вдосконалене дзеркало Уїлсона. Покращена вхідна точність вихідного струму досягається вирівнюванням напруг колектора  $Q_2$  та  $Q_3$  при  $1 V_{BE}$ .

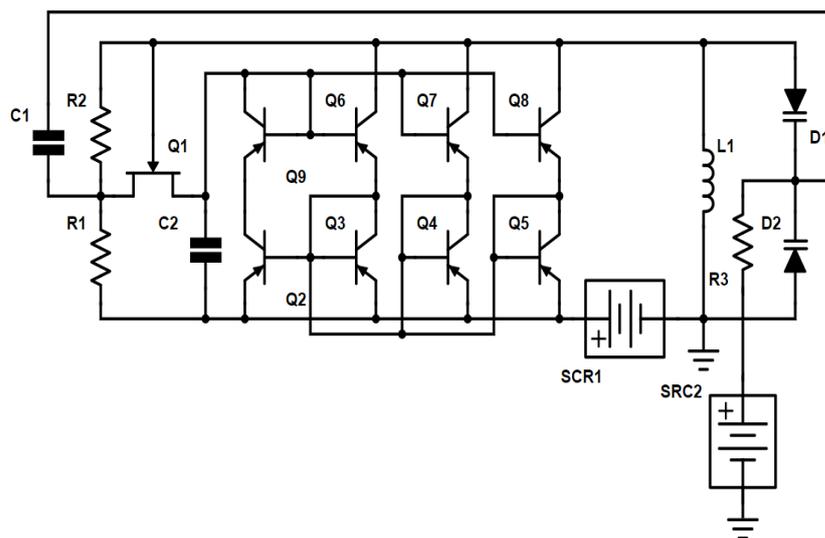


Рис.3.10. ГКН з вдосконаленим багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона

Це лише значення максимального підйому струму і різницю напруг кожного з транзисторів  $Q_2$  і  $Q_3$  залишкових незбалансованих впливів в дзеркалі.

Транзистори  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$  та  $Q_9$  виконують роль повного струмового дзеркала Уїлсона. Транзистори  $Q_4$ ,  $Q_5$ ,  $Q_7$  та  $Q_8$  це додаткові гілки повного струмового дзеркала Уїлсона. Коливальний контур складається з двох варакторів  $D_1$ ,  $D_2$  та котушки індуктивності  $L_1$ . Змінюючи напругу, що подається на варактори  $D_1$  та  $D_2$  ми можемо змінювати ємність в коливальному контурі тим самим змінюючи частоту.

На рис.3.10 показана топологія ГКН із вдосконаленим БТ дзеркалом струму Уїлсона (ВСДУ). Впровадження нового транзистора  $Q_9$ , поєднаного базою та колектором, вирівнює напруги колектор-емітер  $V_{CE1}$  і  $V_{CE2}$ , так що (3.35) тепер зменшено до [11]

$$I_t = I_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + I_{IN} \left( 1 - \frac{2}{\beta_F^2 + 4\beta_F + 2} \right) + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.36)$$

Слід зазначити, що якщо  $\beta_F \rightarrow \infty$ , то струм  $I_t$ , як це випливає з (3.31), (3.33), (3.34) та (3.36), зменшується до

$$I_t = I_{IN} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.37)$$

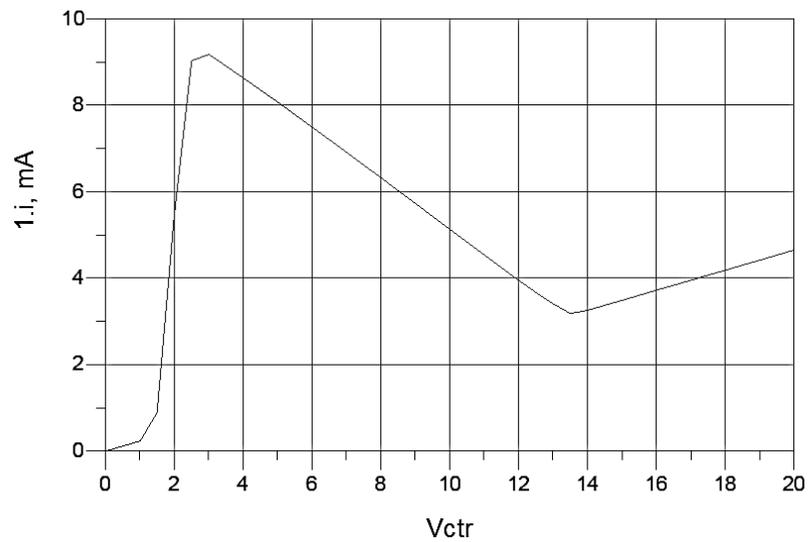
Оскільки струм  $I_{IN}$  є струмом стоку транзистора  $Q_1$ , тобто  $I_{IN} = I_D$ , то (3.37) можна переписати як

$$I_t = I_D \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.38)$$

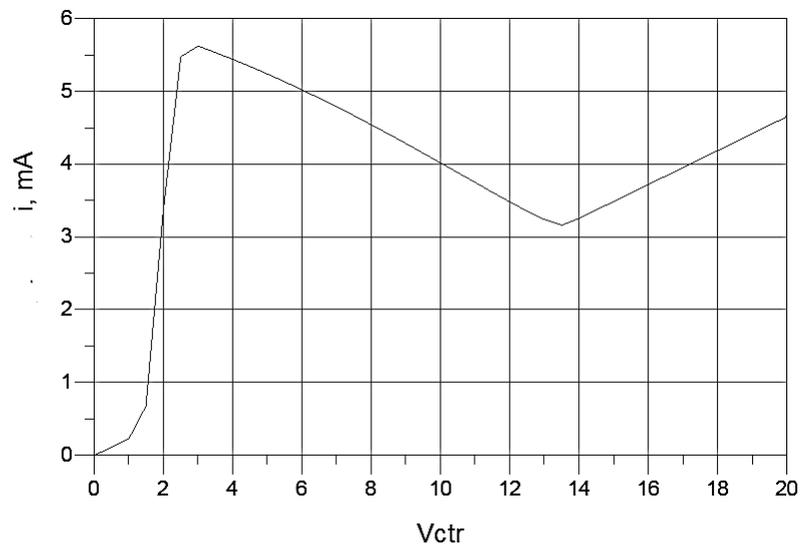
З (3.38) випливає, що для великих значень  $\beta_F$  ( $\beta_F \gg 1$ ) вихідний струм не залежить від  $\beta_F$ , що бажано. У разі  $R_2 \gg R_1$  вираз (3.38) зменшується до

$$I_t \approx 2I_D + \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.39)$$

На рис.3.11 можна побачити ВАХ ГКН з вдосконаленим багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона.



(a)



(б)

Рис.3.11. ВАХ генератора (а) з трьома каналами струмового дзеркала; (б) з одним каналом

### 3.8. Висновок до розділу

У цьому розділі були приведені схеми генераторів з багатоканальним дзеркалом струму, а саме ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму, ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму з бета-помічником, ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму, ГКН з багатоканальним каскодним

дзеркалом, ГКН з багатоканальним струмовим дзеркалом Уїлсона та ГКН з багатоканальним вдосконаленим дзеркалом струму Уїлсона. Були приведені математичні моделі та ВАХ цих схем.

В генераторах керованих напругою негативного диференціального опору приставлених на сьогодні практично не існує можливості збільшення негативного опору без зміни типу транзисторів або розмірів транзисторів. Негативного опору може бути недостатньо для запуску схеми генератора. Струмове дзеркало допомагає змінити значення негативного диференціального опору, що в свою чергу розширює сфери застосувань.

## РОЗДІЛ 4. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТОПОЛОГІЇ ГЕНЕРАТОРА, КЕРОВАНОГО НАПРУГОЮ З БАГАТОКАНАЛЬНИМ ДЗЕРКАЛОМ СТРУМУ

### 4.1. Вступ

У цій роботі представлено порівняння чотирьох запропонованих генераторів з регулятором напруги з негативним диференціальним опором для використання мікрохвильових частотах. Схеми ГКН містять транзистор РНЕМТ і дзеркало струму БТ (СМ). Рівняння для розрахунку струму терміналу виводиться для кожного ланцюга генератора. Порівняння ГКО проводиться з використанням загальноживаного показника заслуг (FOM).

Генератори, керовані напругою, широко використовуються в сучасних трансиверах зв'язку та синтезованих генераторах радіочастотних сигналів. Значна кількість досліджень була присвячена осциляторам на основі транзисторів GaAs. Більшість із цих генераторів мають топологію Колпітта або Клаппа. Такі генератори класифікуються як генератори, що мають негативний вхідний опір. Існує принципово інший клас генераторів, які мають ампервольтну характеристику типу N. Такі генератори часто використовують тунель або діод Ганна. Самозбудження в таких генераторах виникає, коли негативний диференціальний опір, індукований в коливальному контурі, компенсує втрати в колі. Існує кілька транзисторних кіл, які мають N - тип I-V характеристик. У роботі [16] запропонований ГНК заснований на транзисторі з високою рухливістю електронів та вдосконаленому СД-транзисторі р-МОН Вільсона. Модельована схема ГКН має дуже хороше значення FOM. Однак транзистор р-МОН може бути реалізований лише як інтегральна схема (ІС) у мікрохвильовому діапазоні частот. Таким чином, запропонована схема ГКН вимагає дискретного транзистора з високою рухливістю електронів та дзеркала струму ІС. Така комбінація електронних компонентів ускладнює впровадження ГКН.

У цій роботі проаналізовано чотири ГКН GaAs ПТ з різними БТ СД. Модельований фазовий шум і споживання енергії ГКН. За допомогою часто використовуваного FOM вибирається найкраща конфігурація.

#### 4.2. Цільова функція ефективності високочастотних генераторів

Через те, що СД мають різну вхідну напругу, вихідний опір, залежність вихідного опору до вхідного і пропускну здатність. Ці параметри можуть вплинути на роботу ГКН. Ось чому робочі характеристики ГКН з різними БСД будуть порівнюватися за допомогою FOM. Цільова функція для ГКН з багатоканальним дзеркалом струму визначається як

$$FOM = L(\Delta f) - 20\log(f_0/\Delta f) + 10\log(P_c/1mW) \quad (4.1)$$

Для моделювання ГКН було використано САПР Advanced Design Systems (ADS). На рис. 4.1 показано НДО ГКН багатоканальним простим дзеркалом струму. Резистори  $R_1 = 300 \text{ Ом}$  і  $R_2 = 4 \text{ кОм}$  створюють дільник напруги. Напруга на  $R_2$  контролює напругу від затвора до джерела транзистора ATF34143 (Agilent(Hewlett-Packard))  $X_1$ . СД, транзистор  $X_1$  і резистори  $R_1$  і  $R_2$  працюють як двотермінальний НДО-пристрій, що забезпечує N-тип ВАХ. Багатоканальне СД створене за допомогою відповідних MRFC521 (Motorola Solutions) БТ p-n-p транзисторів  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8$ , ( транзистори  $Q_5, Q_6, Q_7, Q_8$  виконують роль додаткових гілок). Варакторні діоди SMV1104-34 (Alpha Industries)  $SNP_1$  і  $SNP_2$  та котушка індуктивності 1008CS (Ceramic Chip Inductor)  $L_1 = 4.7 \text{ нГн}$  є основними елементами коливального контуру ГКН. Невеликий конденсатор  $C_1 = 5 \text{ пФ}$  використовується як додатковий позитивний зворотний зв'язок. Великий конденсатор  $C_2 = 70 \text{ нФ}$  підключений між стоком  $X_1$  і землею, щоб зменшити фазовий шум ГКН.[11]

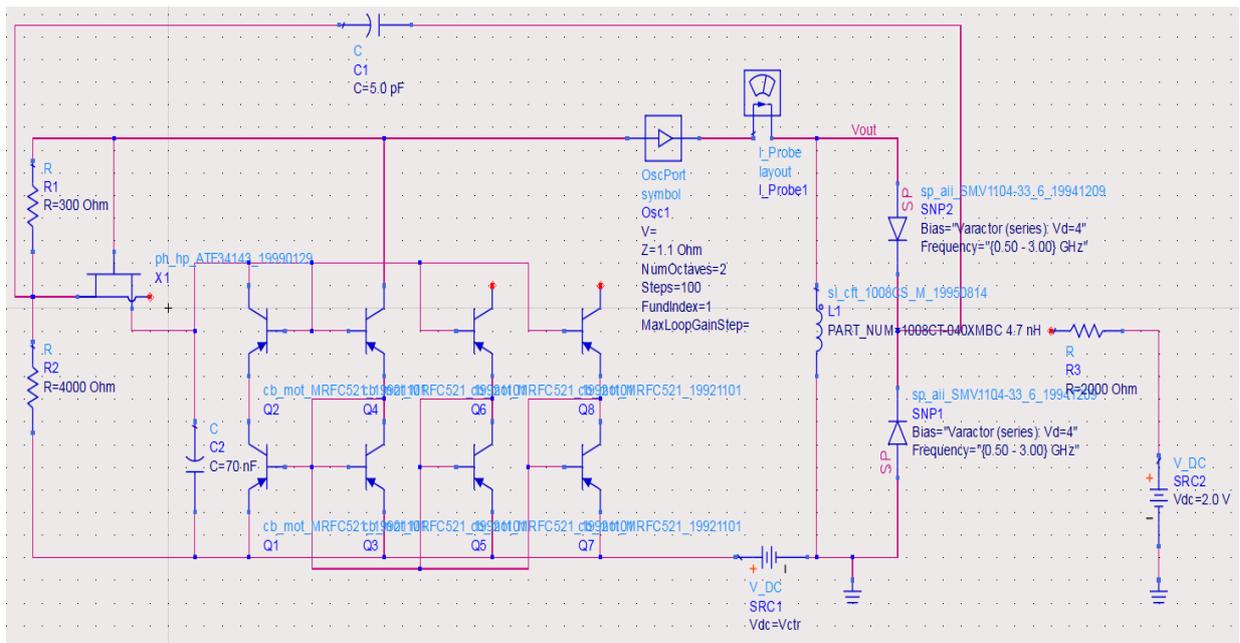


Рис.4.1. Схема ГНК з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона побудована в САПР ADS

На рис. 4.2. зображено ВАХ ГНК з багатоканальним вдосконаленим дзеркалом струму Уїлсона. Три графіки показують зміну струму при збільшенні кількості гілок. Червоний показує при відсутності додаткових гілок  $n=0$ , синій при одній додатковій гілці  $n=1$ , рожевий при двох додаткових  $n=2$ .

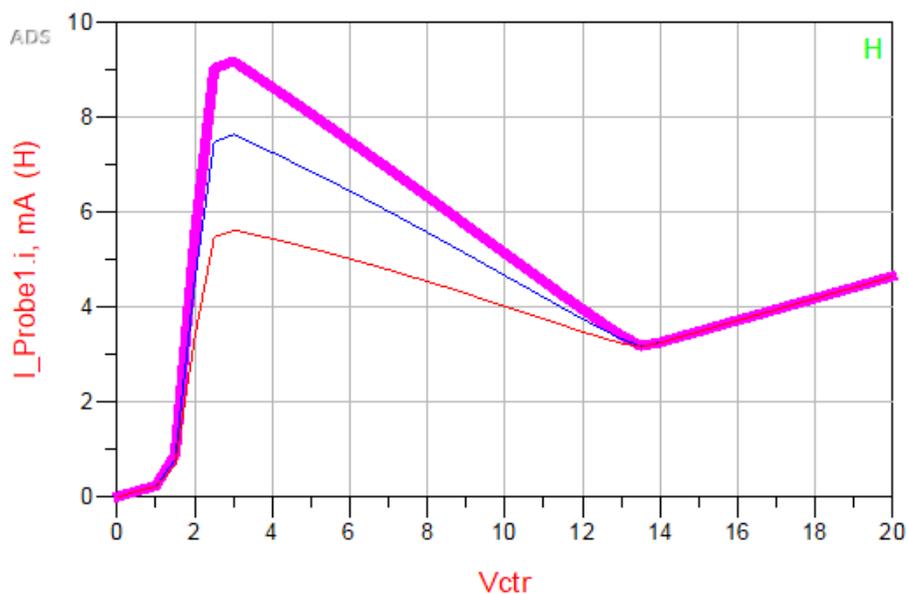


Рис.4.2. ВАХ ГНК з багатоканальним вдосконаленим дзеркалом струму Уїлсона

В таблиці 1 можна побачити результати моделювання ГНК з багатоканальним вдосконаленим дзеркалом струму Уїлсона, а саме фазовий шум  $L(\Delta)$ , цільову функцію FOM, струм  $I_{dc}$  та робочу частоту  $f_0$ .

Таблиця 1

| $L(\Delta)$ | $f_0$ | $V_{ctr}$ | $I_{dc}$ | $n$ | $V_d$ | FOM      |
|-------------|-------|-----------|----------|-----|-------|----------|
| -123        | 1157  | 4         | 5,44     | 0   | 2     | -190,466 |
| -127        | 1016  | 4         | 7,25     | 1   | 2     | -191,15  |
| -112        | 926   | 4         | 8,63     | 2   | 2     | -155,96  |
| -143        | 1237  | 4         | 5,44     | 0   | 4     | -210,643 |
| -138        | 1064  | 4         | 7,25     | 1   | 4     | -202,701 |
| -129        | 963   | 4         | 8,63     | 2   | 4     | -191,354 |
| -127        | 1287  | 4         | 5,44     | 0   | 6     | -194,377 |
| -144        | 1097  | 4         | 7,25     | 1   | 6     | -209,119 |
| -128        | 984   | 4         | 8,63     | 2   | 6     | -191,418 |
| -123        | 1311  | 4         | 5,44     | 0   | 8     | -191,148 |
| -144        | 1109  | 4         | 7,25     | 1   | 8     | -209,368 |
| -114        | 993   | 4         | 8,63     | 2   | 8     | -158,567 |
| -121        | 1323  | 4         | 5,44     | 0   | 10    | -189,968 |
| -149        | 1111  | 4         | 7,25     | 1   | 10    | -214,229 |
| -112        | 998   | 4         | 8,63     | 2   | 10    | -175,388 |
| -116        | 1330  | 4         | 5,44     | 0   | 12    | -182,956 |
| -150        | 1111  | 4         | 7,25     | 1   | 12    | -214,146 |
| -117        | 1001  | 4         | 8,63     | 2   | 12    | -181,122 |

На рис.4.3. показано побудовану в ADS схему ГКН з прости дзеркало струму.  $X_1$ -ATF34143,  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  - MRFC521,  $L_1$  - 1008CS-4.7.  $C_1 = 5$  пФ,  $C_2 = 100$  нФ.

На рис. 4.2. зображено ВАХ ГНК з багатоканальним простим дзеркалом струму. Три графіки показують зміну струму при збільшенні кількості гілок. Червоний показує при відсутності додаткових гілок  $n=0$ , синій при одній додатковій гілці  $n=1$ , рожевий при двох додаткових  $n=2$ .

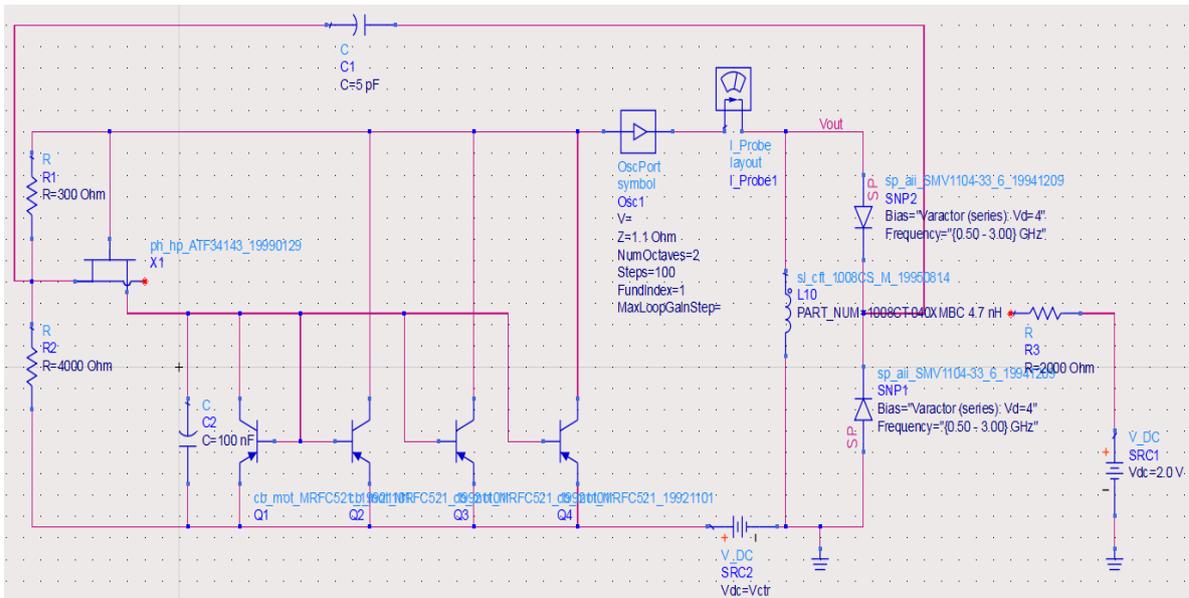


Рис.4.3. Схема ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму

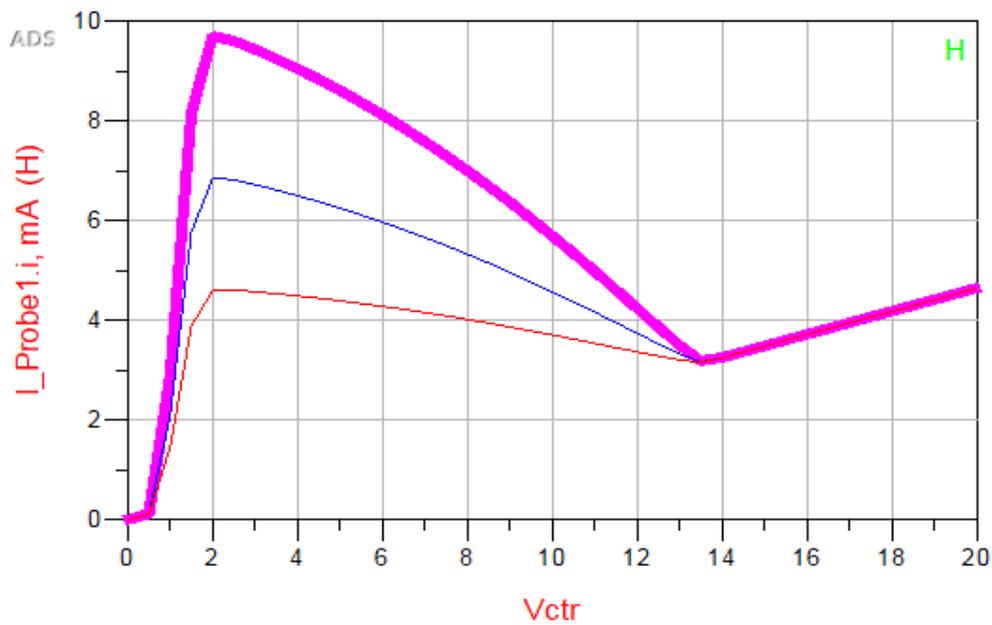


Рис.4.4. ВАХ ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму

В таблиці 2 можна побачити результати моделювання ГКН з багатоканальним простим дзеркалом струму, а саме фазовий шум  $L(\Delta)$ , цільову функцію FOM, струм  $I_{dc}$  та робочу частоту  $f_0$ .

Таблиця 2

| $L(\Delta)$ | $f_0$ | $V_{ctr}$ | $I_{dc}$ | $n$ | $V_d$ | FOM      |
|-------------|-------|-----------|----------|-----|-------|----------|
| -121        | 1181  | 4         | 4,49     | 0   | 2     | -188,246 |
| -133        | 999   | 4         | 6,5      | 1   | 2     | -196,973 |
| -143        | 838   | 4         | 9,05     | 2   | 2     | -203,734 |
| -136        | 1264  | 4         | 4,49     | 0   | 4     | -204,128 |
| -151        | 1035  | 4         | 6,5      | 1   | 4     | -216,725 |
| -171        | 851   | 4         | 9,05     | 2   | 4     | -214,012 |
| -135        | 1311  | 4         | 4,49     | 0   | 6     | -203,981 |
| -139        | 1052  | 4         | 6,5      | 1   | 6     | -204,152 |
| -149        | 866   | 4         | 9,05     | 2   | 6     | -211,991 |
| -131        | 1335  | 4         | 4,49     | 0   | 8     | -199,239 |
| -137        | 1102  | 4         | 6,5      | 1   | 8     | -203,188 |
| -158        | 867   | 4         | 9,05     | 2   | 8     | -220,425 |
| -130        | 1348  | 4         | 4,49     | 0   | 10    | -198,043 |
| -144        | 1104  | 4         | 6,5      | 1   | 10    | -210,122 |
| -142        | 869   | 4         | 9,05     | 2   | 10    | -204,365 |
| -130        | 1354  | 4         | 4,49     | 0   | 12    | -198,578 |
| -144        | 1106  | 4         | 6,5      | 1   | 12    | -208,514 |
| -154        | 879   | 4         | 9,05     | 2   | 12    | -215,782 |

На рис.4.3. показано побудовану в ADS схему ГКН з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона.  $X_1$ -ATF34143,  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  - MRFC521,  $L_1$  - 1008CS-4.7.  $C_1 = 5$  пФ,  $C_2 = 200$  нФ.

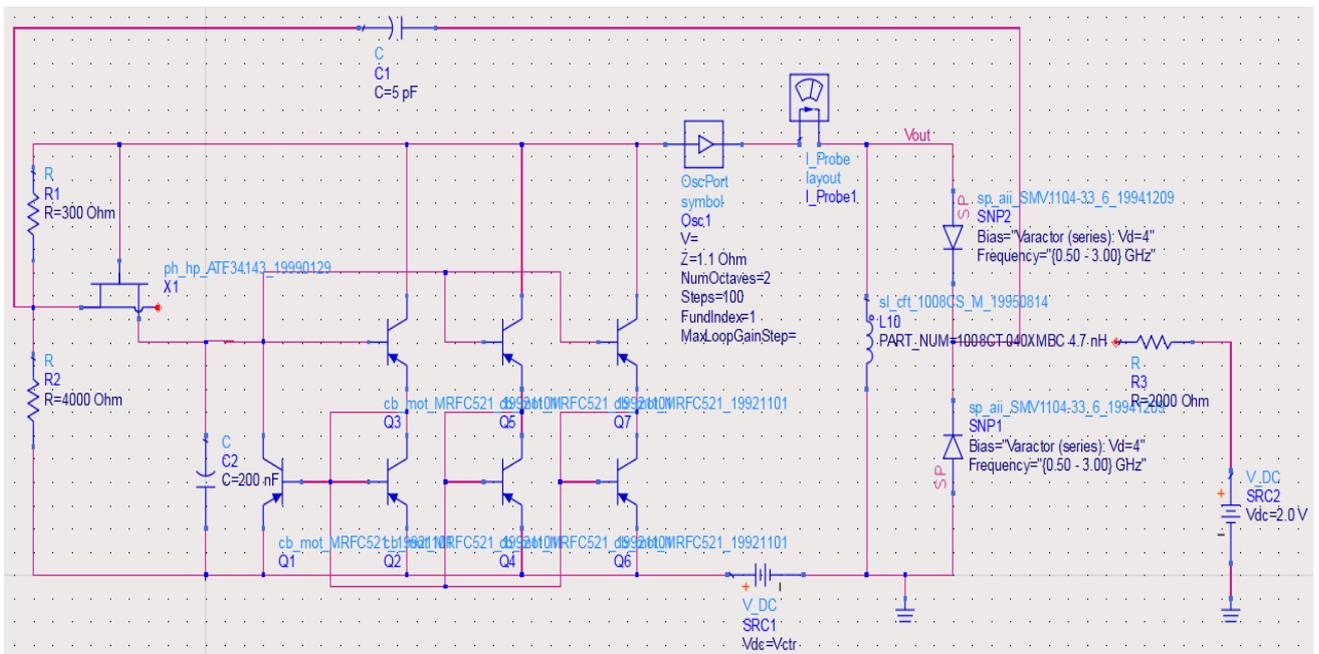


Рис.4.3. Схема ГКН з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона

На рис. 4.4. зображено ВАХ ГНК з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона. Три графіки показують зміну струму при збільшенні кількості гілок. Червоний показує при відсутності додаткових гілок  $n=0$ , синій при одній додатковій гілці  $n=1$ , рожевий при двох додаткових  $n=2$ .

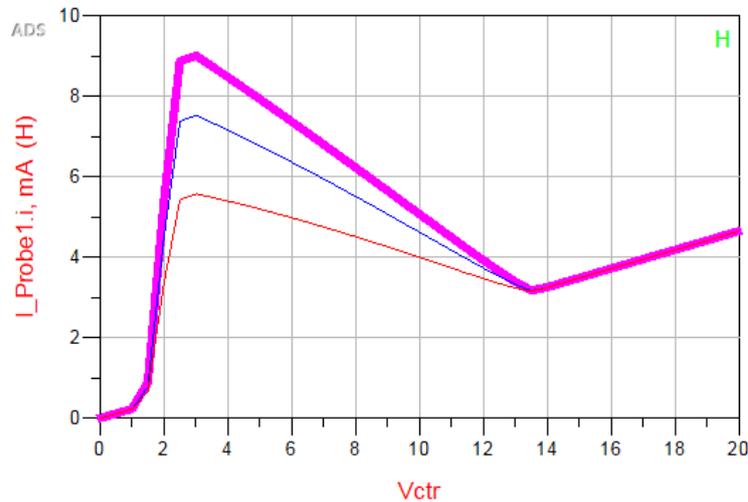


Рис.4.6. ВАХ ГНК з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона

Таблиця 3

| $L(\Delta)$ | $f_0$ | $V_{ctr}$ | $I_{dc}$ | $n$ | $V_d$ | FOM      |
|-------------|-------|-----------|----------|-----|-------|----------|
| -128        | 1158  | 4         | 4,49     | 0   | 2     | -195,67  |
| -135        | 1018  | 4         | 6,5      | 1   | 2     | -200,748 |
| -113        | 927   | 4         | 9,05     | 2   | 2     | -156,755 |
| -141        | 1238  | 4         | 4,49     | 0   | 4     | -209,483 |
| -123        | 1065  | 4         | 6,5      | 1   | 4     | -187,96  |
| -124        | 964   | 4         | 9,05     | 2   | 4     | -202,074 |
| -117        | 1289  | 4         | 4,49     | 0   | 6     | -192,683 |
| -135        | 1097  | 4         | 6,5      | 1   | 6     | -215,634 |
| -112        | 985   | 4         | 9,05     | 2   | 6     | -156,282 |
| -129        | 1312  | 4         | 4,49     | 0   | 8     | -202,039 |
| -142        | 1109  | 4         | 6,5      | 1   | 8     | -214,769 |
| -109        | 994   | 4         | 9,05     | 2   | 8     | -182,731 |
| -127        | 1348  | 4         | 4,49     | 0   | 10    | -201,064 |
| -149        | 1112  | 4         | 6,5      | 1   | 10    | -219,649 |
| -108        | 999   | 4         | 9,05     | 2   | 10    | -183,461 |
| -122        | 1331  | 4         | 4,49     | 0   | 12    | -195,954 |
| -148        | 1113  | 4         | 6,5      | 1   | 12    | -220,295 |
| -117        | 1002  | 4         | 9,05     | 2   | 12    | -179,775 |

В таблиці 3 можна побачити результати моделювання ГНН з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона а саме фазовий шум  $L(\Delta)$ , цільову функцію FOM, струм  $I_{dc}$  та робочу частоту  $f_0$ .

На рис.4.5. показано побудовану в ADS схему ГНН з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона.  $X_1$ -ATF34143,  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  - MRFC521,  $L_1$  - 1008CS-4.7.  $C_1 = 5$  пФ,  $C_2 = 200$  нФ.

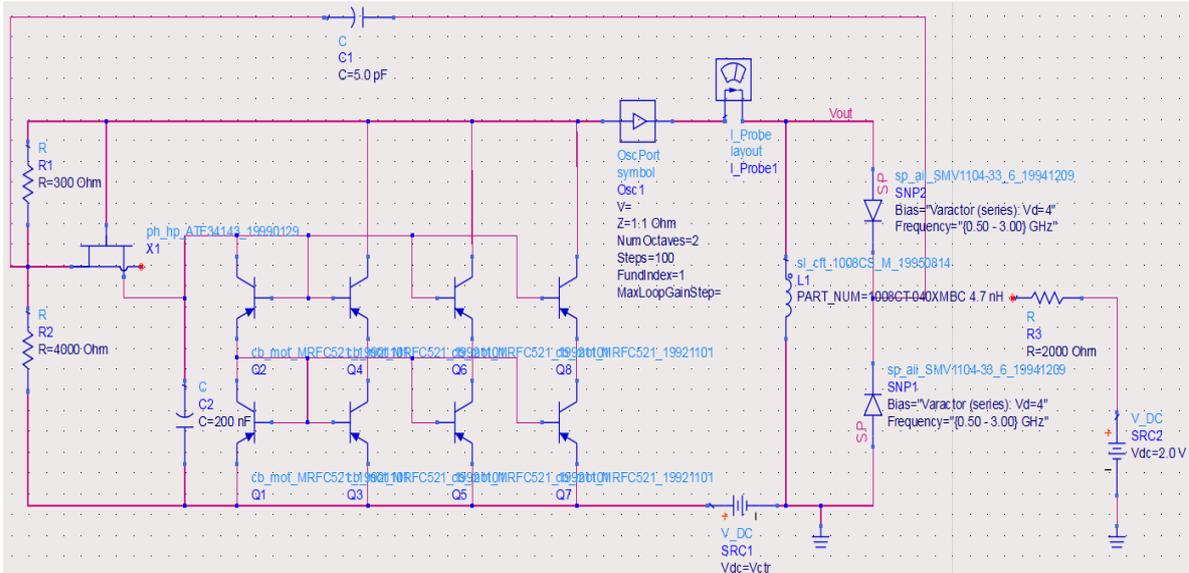


Рис.4.5. Схема ГНН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму

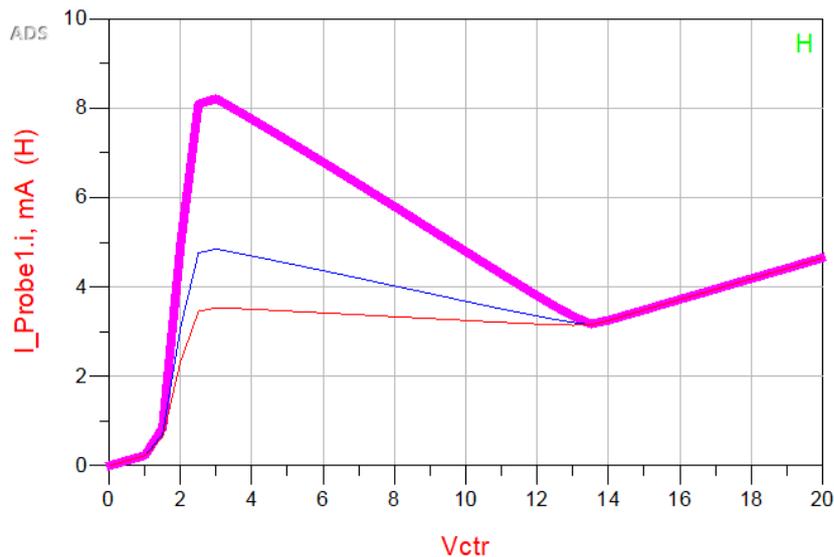


Рис.4.6. ВАХ ГНН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму

На рис. 4.6. зображено ВАХ ГКН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму. Три графіки показують зміну струму при збільшенні кількості гілок. Червоний показує при відсутності додаткових гілок  $n=0$ , синій при одній додатковій гілці  $n=1$ , рожевий при двох додаткових  $n=2$ .

В таблиці 3 можна побачити результати моделювання ГКН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму а саме фазовий шум  $L(\Delta)$ , цільову функцію FOM, струм  $I_{dc}$  та робочу частоту  $f_0$ .

Таблиця 4

| $L(\Delta)$ | $f_0$ | $V_{ctr}$ | $I_{dc}$ | $n$ | $V_d$ | FOM      |
|-------------|-------|-----------|----------|-----|-------|----------|
| -122        | 1201  | 4         | 3,5      | 0   | 2     | -172,138 |
| -137        | 1048  | 4         | 4,7      | 1   | 2     | -184,674 |
| -112        | 941   | 4         | 7,75     | 2   | 2     | -156,567 |
| -120        | 1294  | 4         | 3,5      | 0   | 4     | -170,786 |
| -115        | 1108  | 4         | 4,7      | 1   | 4     | -163,158 |
| -110        | 981   | 4         | 7,75     | 2   | 4     | -154,928 |
| -118        | 1355  | 4         | 3,5      | 0   | 6     | -169,186 |
| -113        | 1143  | 4         | 4,7      | 1   | 6     | -161,428 |
| -106        | 1005  | 4         | 7,75     | 2   | 6     | -151,138 |
| -117        | 1383  | 4         | 3,5      | 0   | 8     | -168,364 |
| -112        | 1159  | 4         | 4,7      | 1   | 8     | -160,549 |
| -107        | 1015  | 4         | 7,75     | 2   | 8     | -152,224 |
| -117        | 1397  | 4         | 3,5      | 0   | 10    | -168,451 |
| -112        | 1167  | 4         | 4,7      | 1   | 10    | -160,609 |
| -109        | 1019  | 4         | 7,75     | 2   | 10    | -154,259 |
| -116        | 1404  | 4         | 3,5      | 0   | 12    | -167,495 |
| -110        | 1171  | 4         | 4,7      | 1   | 12    | -158,638 |
| -96         | 1024  | 4         | 7,74     | 2   | 12    | -141,298 |

### 4.3. Оцінка ефективності ГНК з БСД

Для того, щоб вибрати найкращу топологію ГКН з чотирьох зображених на рис. 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, моделювання проводили для кожного кола ГКН. N-канальний ATF34143 був використаний у всіх ГКН як транзистор  $X_1$ . Поточні дзеркала були побудовані з використанням р-n-p ВТ MRFC521. У коливальному контурі ГКН використовувались варактори з гіперактивним переходом SMB1104-34. Ємність варактора становить близько 6.5 пФ при 1 В і 2,1 пФ при зворотній

напрузі діода 6 В. В усіх коливальних контурах ГКН використовувався радіочастотний індуктор на чіпі з індуктивністю 4.7 нГн (0201DS-3N3XJEU). Значення резисторів  $R_1$  та  $R_2$  були обрані відповідно 0,3 кОм та 4 кОм. Робоча точка постійного струму була вибрана в регіоні з негативним диференціальним опором при  $V_{CC} = 4$  В для всіх кіл ГКН. У якості конденсатора  $C_2$  у всіх ланцюгах ГКН використовувався багатошаровий керамічний конденсатор TDK з різними потенціалами. Значення конденсатора  $C_1$  було налаштовано для кожної конфігурації ГКН таким чином, що воно забезпечувало мінімальне значення фазового шуму. Враховуючи цю умову, конденсатор TDK C0603C0G1E050C (5 пФ) був використаний для ГКН ПСД, СДУ та ВСДУ; конденсатори C0603C0G1E070D (8 пФ) були обрані для ГКН.

Таблиця 5

| Тип ГКН<br>(кл. дод.<br>гілок) | $f_{\min}, f_{\max}$<br>(МГц)<br>$V_d=2V, 12V$ | Частота<br>підстройки<br>(МГц) | $L$ ( $10^5$ Hz)<br>(dBc/Hz)<br>$V_d = 2V, 12V$ | $P$ (mW) | $FOM$ (dBc)<br>$V_d = 2V, 12V$ |
|--------------------------------|--|--------------------------------|---|----------|--------------------------------|
| ВСДУ (0)                       | 1157, 1330                                     | 173                            | -123, -116                                      | 21,76    | -190.5,-183                    |
| ВСДУ (1)                       | 1016, 1111                                     | 95                             | -127, -150                                      | 29       | -191.2,-214.2                  |
| ВСДУ (2)                       | 926, 1001                                      | 75                             | -112, -117                                      | 34,56    | -156, -181,1                   |
| ПСД (0)                        | 1158, 1354                                     | 196                            | -121, -130                                      | 18       | -188.3, -198.6                 |
| ПСД (1)                        | 999, 1106                                      | 107                            | -133, -144                                      | 27       | -197, -208.5                   |
| ПСД (2)                        | 838, 901                                       | 63                             | -143, -154                                      | 37       | -203,8, -215,9                 |
| СДУ (0)                        | 1158, 1331                                     | 173                            | -105.2, -134.4                                  | 17,96    | -195.7, -196                   |
| СДУ (1)                        | 1018, 1113                                     | 95                             | -105.2, -134.4                                  | 26       | -200.8, -220.5                 |
| СДУ (2)                        | 927, 1002                                      | 75                             | -113, -117                                      | 36       | -156,8, -179,8                 |
| КСД (0)                        | 1201, 1404                                     | 203                            | -122, -116                                      | 14       | -172.2, -167.5                 |
| КСД (1)                        | 1048, 1171                                     | 123                            | -137, -110                                      | 18,8     | -184.7, -158.6                 |
| КСД (2)                        | 941, 1024                                      | 83                             | -112.5, -96                                     | 31       | -156,6, -141,3                 |

#### 4.4. Висновок до розділу

Представлено порівняльний аналіз ГКН НДО чотирма з часто використовуваними дзеркалами струму. It кола аналітично змодельований з точки зору вхідного та вихідного струму дзеркала струму для кожного кола ГКН. Продемонстровано ГКН з чотирма різними дзеркалами струму а саме з

багатоканальним каскодним дзеркалом струму, багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона, багатоканальним простим дзеркалом струму, багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона побудована. Було визначено експлуатаційні характеристики.

Найгірший показник у ГКН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму без додаткових гілок FOM залежно від  $V_d$  (2V, 12V) змінюється від -172.2 до -167.5.

Розрахувавши FOM для кожної топології ГКН, було встановлено, що найкращі показники мають ГКН з дзеркалом струму Вільсона. Цей ГКН має діапазон частот від 1,018 до 1,113 ГГц з максимальним фазовим шумом у діапазоні -149 дБн/Гц при зміщенні 100 кГц у діапазоні налаштування і забезпечує щонайменше 19,2 дБм вихідної потужності. FOM ГКН з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона FOM залежно від  $V_d$  (2V, 12V) змінюється від -200.8 до -220.5.

## РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1. Вступ

Охорона праці - це система забезпечення безпеки роботи, збереження життя і здоров'я працюючих, в процесі усієї їхньої трудової діяльності.

Охорона праці на сьогодні є однією з головних систем на підприємствах різного напрямку будь-яких форм власності. Дотримуючись елементарних правил безпечного виконання робіт і вимоги охорони праці, роботодавець може домогтися істотного зниження виробничого травматизму, практично до 95%. Відсоток, ймовірності складе людський фактор, від якого складно піти. Саме таке процентне співвідношення випадків травматизму виникають через недотримання вимог охорони праці, як з боку роботодавця, так і з боку працівника.

Охорона праці як система зачіпає практично кожен бік життя людей. Вона переплітається з великою кількістю технічних і гуманітарних наук, виконуючи одне з найбільш важливих завдань - збереження життя і здоров'я людини при виконанні будь-яких робіт.

Охорона праці включає в себе цілий комплекс заходів, що мають нормативно-правове забезпечення. До числа таких заходів відносяться організаційно-технічні, соціально-економічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні.

При роботі в сфері охорони праці слід керуватися, перш за все, Законом України про охорону праці. Крім того, Конституцією України, Кодексом законів про працю України, Законом України «Про загальнообов'язкове державне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», а також інших нормативно-правових актів, що регулюють відносини в сфері охорони праці, а також чинних міжнародних договорів, за згодою Верховної Ради України.

## 5.2. Аналіз умов праці на робочому місці

Електрична травма - це фізіологічна реакція, спричинена електричним струмом, що проходить через тіло. Травма залежить від щільності струму, опору тканин і тривалості контакту. Дуже малі струми можуть бути непомітними або викликати легке поколювання. Шок, спричинений слабким та нешкідливим струмом, може здригати людину та спричинити травму через ривок або падіння. Більш сильні струми можуть викликати певний ступінь дискомфорту або болю, тоді як більш інтенсивні струми можуть спричинити мимовільні скорочення м'язів, не даючи людині звільнитися від джерела електрики. Ще більші струми призводять до пошкодження тканин і можуть спричинити фібриляцію шлуночків або зупинку серця. Якщо смерть настає внаслідок ураження електричним струмом, причиною смерті зазвичай називають ураження електричним струмом.

Електрична травма виникає при контакті частини тіла з електрикою, через яку через тканини людини проходить достатній струм. Найчастішою причиною є контакт з електричною проводкою або пристроями. У випадках впливу високої напруги, наприклад, на башті електропередачі, прямий контакт може не знадобитися, оскільки напруга може "перестрибнути" повітряний зазор на електричний пристрій.

Після електричної травми від побутового струму, якщо людина не має симптомів, не має основних проблем із серцем і не вагітна, подальших тестів не потрібно. В іншому випадку може бути проведена електрокардіограма, аналіз крові на перевірку серця та дослідження сечі на ознаки розпаду м'язів.

Важливою характеристикою шуму є його частотний склад. Якщо в складі шуму переважають звуки з частотою коливань до 400 Гц, такий шум називається низькочастотним, якщо переважають звуки з частотою 400 – 1000 Гц – середньочастотним, якщо понад 1000 Гц – високочастотним. Низькочастотний шум інтенсивністю до 100 дБ не викликає відчутної несприятливої дії на орган

слуху; для середньочастотного шуму ця норма становить 85 – 90 дБ; для високочастотного – 75 – 85 дБ. Неприятливі суб'єктивні відчуття і вплив на організм людини зумовлює високочастотний шум.

Шум несприятливо впливає на людину. У робітників, які мають справу з гуркотливими машинами та механізмами, виникають стійкі порушення слуху, що нерідко призводить до професійних захворювань (глухуватості і глухоти). Найбільша втрата слуху спостерігається протягом перших десяти років роботи, і з плином часу ця небезпека зростає. Тривала дія шуму на організм людини призводить до розвитку хронічної перевтоми, зниження працездатності, виникнення таких симптомів як поганий сон, сонливість, зниження слуху, порушення терморегуляції. Усе це може спричинити аварію на виробництві. Короткочасний, навіть одноразовий вплив шуму високої інтенсивності може спричинити повну загибель спірального органу або розрив барабанної перетинки, що супроводжується почуттям закладеності та різким болем у вухах. Наслідком баротравми нерідко буває повна втрата слуху.

Шум впливає на систему травлення і кровообігу, серцево-судинну систему. У разі постійного шумового фону до 70 дБ виникає порушення ендокринної та нервової систем, до 90 дБ — порушує слух, до 120 дБ — призводить до фізичного болю, який може бути нестерпним. Шум не лише погіршує самопочуття людини, а й знижує продуктивність праці на 10—15 %. У зв'язку з цим боротьба з ним має не лише санітарно-гігієнічне, а й велике техніко-економічне значення.

### **5.3. Розробка заходів охорони праці**

Ізоляція струмоведучих частин електроустановок – це основний захід захисту. Ізоляція буває робоча, подвійна, підсилена. Робоча ізоляція електроустановок – це електрична ізоляція струмоведучих частин електроустановки, що забезпечує її нормальну роботу і захист від ураження електричним струмом (ГОСТ 12. 1. 009-76).

В процесі експлуатації ізоляція піддається різним ушкодженням (механічним, хімічним, тепловим), а також старінню, в результаті чого погіршуються її властивості – зменшується активний опір. Тому необхідний контроль ізоляції, який проводиться вимірюванням активного опору ізоляції мегаометром. Вимірювання опору ізоляції окремих ділянок мережі, трансформаторів, електродвигунів тощо проводиться на вимкненій установці.

Опір кожної ділянки в мережах напругою до 1000 В повинен бути не менше 0,5 МОм на фазу. Недоступність струмоведучих частин для випадкового дотику забезпечується розміщенням струмоведучих частин на недосяжній висоті і огороженням. В електроустановках до 1000В розміщення струмоведучих частин на недоступній висоті: всередині приміщення – 3,5м; назовні – 6м.

Блокування попереджує помилкові дії електроперсоналу і перекриває доступ до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. При небезпеці ураження струмом електроустановка автоматично вимикається.

Застосування малої напруги. Малою напругою вважаються напруга не вище 42 В змінного і 110 В постійного струму. Напруга 42 В застосовується в приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних і зовні приміщень для живлення ручного інструменту, переносних ламп, верстатних ламп. Напруга 12 В застосовується для живлення переносних ламп в особливо небезпечних приміщеннях при несприятливих умовах (при роботі в металевій ємності, кабельному колодязі тощо).

Електричний розподіл мереж спрямований на підвищення захисної дії ізоляції струмопровідних частин, що досягається або зменшенням ємності мереж, або переходом від мереж з заземленою нейтраллю до мереж з ізольованою нейтраллю.

Одним з важливих профілактичних засобів попередження стомлення при дії шуму є чергування періодів роботи і відпочинку. Відпочинок знижує негативний вплив шуму на працездатність лише в тому випадку, якщо його тривалість та кількість відповідають умовам, в яких відбувається найефективніше відновлення

нервових центрів. Важливе значення для осіб, зайнятих на роботах із шумом, має короткочасний відпочинок під час роботи, а також організоване дозвілля поза робочим часом. Захист від високочастотного шуму забезпечують засоби індивідуального захисту (навушники, заглушки для вух та ін.).

Важливе значення у попередженні розвитку шумової патології мають попередні (під час прийняття на роботу) і періодичні (протягом трудової діяльності) медичні огляди. Згідно з наказом Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.2007 № 246 «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій» таким оглядам підлягають особи, які працюють на виробництвах, де шум перевищує гранично допустимий рівень, тобто умови праці є шкідливими згідно з наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014р.№248 Про затвердження Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу».

Для проектування системи штучного освітлення скористаємося методом світлового потоку, оскільки будемо розраховувати рівномірне загальне освітлення приміщення при освітленості тільки в горизонтальній площині. Висота приміщення  $H = 3$  м, висота робочої поверхні столу  $h_p = 0.9$  м, висота звісу світильника від стелі  $h_z = 0.1$  м.

Визначаємо висоту звісу світильника над робочою поверхнею  $h$ :

$$h = H - h_p - h_z = 2 \text{ м} \quad (5.1)$$

Ширина приміщення  $W = 10$  м, довжина приміщення  $L = 20$  м, визначаємо освітлювану площу приміщення:

$$S = W \cdot L = 200 \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

Визначаємо індекс приміщення:

$$i = \frac{S}{h \cdot (W + L)} = 3.17 \quad (5.3)$$

Коефіцієнти відбиття від стелі 70%, від стін – 50%, від підлоги – 10%.

Вибираємо характеристики, що відповідають типу лампи – ЛЕЦ(754) напруга 110 +/- 11В, тривалість горіння – 5200 годин, світловий потік після 100 годин горіння 4000 лм.

Параметри вибраного світильника: довжина  $D_{ce} = 625\text{мм}$ , ширина  $Ш_{ce} = 625\text{мм}$ , висота  $B_{ce} = 100\text{мм}$ , чотири лампи типу ЛЕЦ(754) потужністю по 18 Вт кожна, світловий потік  $\Phi = 4000$  лм;

З урахуванням індексу приміщення, коефіцієнтів відбиття стелі, стін, підлоги і типу обраного світильника визначаємо коефіцієнт світлового потоку  $\eta = 40$ , коефіцієнт затінення  $K_3 = 1.4$ , коефіцієнт затінення для даного приміщення з фіксованим положенням інженера-програміста  $K_\gamma = 0.9$ , коефіцієнт нерівномірності освітлення  $Z = 1.3$ , кількість люмінесцентних ламп в світильнику  $n = 4$ , освітленість  $E = 300\text{лк}$ .

Розраховуємо потрібну кількість світильників:

$$N_c = \frac{100 \cdot E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot \Phi \cdot \eta \cdot K_\gamma} = 22,12 \quad (5.4)$$

З розрахунків видно, що для даного приміщення з ПЕОМ потрібно  $N=23$  світильників типу ЛГ1071-4x18-57.

При розміщенні світильників з люмінесцентними лампами, останні розміщуються рядами – паралельно рядам обладнання або віконним рамам. Перед проектуванням системи штучного освітлення потрібно перевірити фактичну освітленість у приміщенні при числі світильників 4:

$$E_\phi = \frac{N_c \cdot n \cdot \Phi \cdot \eta \cdot K_\gamma}{100 \cdot S \cdot K_3 \cdot Z} = 364 \quad (5.5)$$

отримана фактична освітленість приміщення забезпечує рекомендовану освітленість приміщення.

#### **5.4. Пожежна та вибухова небезпека при експлуатації**

Функціонування будь-якого підприємства неможливе без облаштування його електроустановками. До них належать електричне обладнання, апарати управління, пускорегулювання, контрольно-вимірювальні та освітлювальні прилади, електродвигуни, електропроводи, кабелі тощо. Щоб унеможливити виникнення пожежі, кожна складова систем електроустановок потребує уваги з позиції дотримання правил пожежної безпеки.

Застосування, монтаж, наладка та експлуатація електроустановок повинна відповідати вимогам чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ), Правил техніки безпеки під час експлуатації електроустановок споживачів (ПТБ), ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» та інших нормативних документів.

Власник підприємства зобов'язаний забезпечити обслуговування та технічну експлуатацію електроустановок. Особа, призначена відповідальною за їхній протипожежний стан (головний енергетик, енергетик, інженерно-технічний працівник відповідної кваліфікації), зобов'язана:

- організовувати та проводити профілактичні огляди та планово-попереджувальні ремонти електрообладнання й електромереж, а також своєчасне усунення порушень, які можуть призвести до пожежі;

- забезпечувати правильність застосування електрообладнання, кабелів, електропроводок залежно від класу пожежо- та вибухонебезпечності зон і умов навколишнього середовища, а також справний стан апаратів захисту від коротких замикань, перевантажень та інших небезпечних режимів робіт;

- організовувати навчання та інструктажі чергового персоналу з питань пожежної безпеки під час експлуатації електроустановок.

## 5.5. Висновки до розділу

Застосування, монтаж, наладка та експлуатація електроустановок повинна відповідати вимогам чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ), Правил техніки безпеки під час експлуатації електроустановок споживачів (ПТБ), ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» та інших нормативних документів.

Одним з важливих профілактичних засобів попередження стомлення при дії шуму є чергування періодів роботи і відпочинку. Відпочинок знижує негативний вплив шуму на працездатність лише в тому випадку, якщо його тривалість та кількість відповідають умовам, в яких відбувається найефективніше відновлення нервових центрів. Захист від високочастотного шуму забезпечують засоби індивідуального захисту (навушники, заглушки для вух та ін.).

Потрібно проводити заняття з теоретичної частини з вивченням особливостей нормативів по організації цілісної роботи по забезпеченню, підтримці та контролю пожежної безпеки на підприємстві, а також вимог до документації.

## **РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

### **6.1. Вступ**

Електроніка, як правило, не перше, що спадає на думку, коли ви думаєте про утилізацію, але так повинно бути. Від ламп, фенів і блендерів до банкоматів, систем безпеки та медичних пристроїв, персональних комп'ютерів, смартфонів і мережевого устаткування - ми взаємодіємо з електронікою або покладаємося на неї практично весь день - ймовірно, більше, ніж будь-хто хотів би визнати.

Тому не дивно, що електронні відходи - це найдинамічніший світової потік відходів.

У 2014 році порахували і виявили, що у всьому світі викидається достатньо електроніки, щоб заповнювати стадіон Пола Брауна від дерну до вершини кожен день протягом усього року. І це було багато років тому. Чим швидше ми бачимо розвиток технологій, тим більше від них позбавляємося.

Вплив світової електронної залежності на навколишнє середовище позначається на кожному етапі життєвого циклу. Перш ніж ми перейдемо до цього, необхідно прояснити одне: «навколишнє середовище» означає не тільки дика місцевість і всі рослини і тварини, які в ній живуть. Він включає повітря, яким дихають люди, і воду, яку ми п'ємо. Сюди входять наші запаси їжі. Він включає в себе наші спільноти і наше здоров'я. Маючи це на увазі, давайте подивимося на життєвий цикл електроніки і на те, як кожен етап впливає на навколишнє середовище.

### **6.2. Аналіз впливу промисловості на навколишнє середовище**

Щоб задовольнити зростаючий попит на використання електронного обладнання, вітчизняні та іноземні фірми активно інвестували в будівництво багатьох заводів і виробничих цехів для поставки електронних компонентів

іноземним підприємствам електронної промисловості. Це дає багато переваг для розвитку вітчизняної електронної промисловості, а також створює умови для залучення іноземних компаній для інвестицій.

Однак паралельно зростає залишкова вартість електронної промисловості і негативно позначається на довкіллі, якщо з нею не звертатися своєчасно і розумно. Отже, яка поточна ситуація в решті електронної промисловості? Який вплив на навколишнє середовище і рішення цієї проблеми?

За даними Європейського агентства з навколишнього середовища (ЄАНС), кількість електронних відходів, утилізованих в світі щороку, досягло 40 мільйонів тонн, що в даний час зростає в три рази швидше, ніж інші види відходів. Основна причина цього - тривале зростання використання електронних товарів. Згідно зі звітом Emarketer за 2014 рік, тільки з точки зору стільникових телефонів у всьому світі налічується 1,64 мільярда користувачів, ця цифра, за оцінками, збільшиться до 2,56 мільярда, що еквівалентно одній третини населення світу в 2018 році. Це показує кількість людей, які все частіше використовують електронні пристрої.

Крім того, технологія постійно оновлюється і вдосконалюється, що призводить до скорочення очікуваного терміну служби електронних продуктів, що, в свою чергу, вимагає безперервного виробництва електронних компонентів для нового обладнання. Це також вважається одним з основних джерел електронних відходів, які різко збільшуються. Це має великий вплив на економіку і життя людей, особливо на екологічні проблеми в інвестованих країнах.

Інша частина виробництва електронних компонентів, а також виробництво устаткування, в основному відбувається з двох основних джерел: відходи в процесі поховання та поховання від повсякденної діяльності робочих на заводі.

Остаточний склад виробництва електронних компонентів містить багато домішок, металів і токсичних хімікатів. Крім того, щоденні відходи, викликані потребами в харчуванні і санітарії робочих, також містять безліч органічних сполук і шкідливих бактерій. Обидва типи відходів є основними причинами

несприятливого впливу на навколишнє середовище без належної і розумної обробки.

Давайте розрахуємо вуглецевий слід від пристрою спроектованого в дипломній роботі. Для цього спочатку ми порахуємо середню потужність за годину

$$P_a = \frac{P_{c0} + P_{c1} + P_{c2}}{3} \quad (6.1)$$

де  $P_{c0}$  – споживання ГКН без додаткових гілок СД,  $P_{c1}$  – споживання ГКН з однією додатковою гілкою СД,  $P_{c2}$  – споживання ГКН з двома додатковими гілками СД.

Тепер ми можемо порахувати яку кількість викидів вуглекислого газу буде виробляти пристрій

$$m_{CO_2} = P_a h_{24} \frac{d_{30} CDE}{1000} \quad (6.2)$$

де  $h_{24}$  – кількість годин у добі,  $d_{30}$  – кількість днів у місяці, CDE – викид вуглекислого газу в залежності від палива.

Таблиця 6

|                    | ВСДУ     | ПСД   | СДУ   | КСД      |
|--------------------|----------|-------|-------|----------|
| $P_{c0}$ , мВт*год | 21,76    | 17,96 | 17,96 | 14       |
| $P_{c1}$ , мВт*год | 29       | 26    | 26    | 18,8     |
| $P_{c2}$ , мВт*год | 34,52    | 36,2  | 36,2  | 31       |
| $P_a$ , мВт*год    | 28,42667 | 26,72 | 26,72 | 21,26667 |

Вугілля за кіловат електроенергії викидає 900 грам вуглекислого газу, природній газ – 200 грам, сонячні панелі – 100 грам, гідроелектростанції – 20 грам [37].

Таблиця 7

|                                | ВСДУ   | ПСД    | СДУ    | КСД    |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Вугілля, гр $CO_2$             | 18,42  | 17,315 | 17,315 | 13,781 |
| Природній газ, гр $CO_2$       | 4,0934 | 3,8477 | 3,8477 | 3,0624 |
| Сонячні панелі, гр $CO_2$      | 2,0467 | 1,9238 | 1,9238 | 1,5312 |
| Гідроелектростанція, гр $CO_2$ | 0,4093 | 0,3848 | 0,3848 | 0,3062 |

### 6.3. Стандарт ISO 14001

ISO 14001 - це міжнародний стандарт, який формулює вимоги до ефективної системи екологічного менеджменту (СЕМ). У нормативі не написано: як саме компанія повинна діяти, щоб управляти екологічними аспектами своєї роботи, там швидше можна знайти зручну структуру, а навколо неї ви вже будете СЕМ під свої специфічні потреби. ISO 14001 - один зі стандартів серії ISO 14000 Міжнародної організації зі стандартизації (ISO - International Organization for Standardization,). Це добровільний стандарт, за яким організації можуть проходити сертифікацію, якщо побажають. Інтеграція СЕМ на основі ISO 14001 з іншими системами менеджменту, зазвичай з СМК (Система менеджменту якості, - ред.) По ISO 9001, може ще більше допомогти компаніям в досягненні цілей, які вони перед собою ставлять. ISO визначає систему екологічного менеджменту як «частина загальної системи менеджменту підприємства, за допомогою якої можна управляти екологічними аспектами, виконувати встановлені вимоги в сфері охорони навколишнього середовища, управляти ризиками і використовувати можливості, що відкриваються».

Сукупність основних процесів ефективної СЕМ з ISO 14001 застосовується з використанням так званого управлінського циклу PDCA (Плануй-Роби-Перевірй-Дій), Щоб реалізувати постійне поліпшення роботи організації в екологічному відношенні [28].

ISO 14001 діє до: 2015 може використовувати будь-яка організація, яка прагне запровадити СЕМ, а потім покращувати і підтримувати її в робочому стані. Впровадження системи - хороший спосіб домогтися вироблення екологічної політики і проходження прийнятим екологічним вимогам. Норматив ISO 14001 можна впровадити в будь-якій організації. Специфіка його застосування буде диктуватися низкою факторів: розміром організації або компанії, галуззю, в якій працює організація, екологічною політикою, специфікою продукції або послуг, місцем розташування.

У найзагальнішому вигляді можна виділити наступні теми, на яких зупиняється стандарт ISO на системи екологічного менеджменту: середовище організації; лідерство; планування; підтримка; операції; оцінка ефективності. Різні редакції ISO 14001: 14001: 2004 проти 14001 діє до: 2015 Редакція 2015 року містить у цілий ряд змін в порівнянні з попередніми версіями. Тут ми представимо тільки деякі факти, спираючись на думку Теи Данмайр - експерта з Технічної консультативної групи США, яка співпрацює з технічним комітетом ISO, що відповідає за розробку ISO 14001 діє до: 2015. Свій аналіз змін в новій редакції Теа представила в 2014 році, зупинившись на вплив, який оновлені вимоги можуть мати на СЕМ компаній-користувачів стандарту. В рамках великої спільної роботи щодо зближення структури всіх стандартів ISO на системи менеджменту, редакція ISO 14001 діє до: 2015 перероблена відповідно до «Структурою верхнього рівня» (High Level Structure). А використання ряду єдиних обов'язкових понять, включення однаково сформульованих вимог, щоб вони підходили до кількох стандартам, а не тільки до ISO 14001, загальні назви розділів. Також Данмайр перерахувала 10 ключових моментів, в яких відбулися важливі зміни в порівнянні з попередніми редакціями: Розширення області застосування систем екологічного менеджменту (scope and coverage). Більша увага до взаємодії з зовнішніми по відношенню до організації сторонами. Змінилися вимоги до лідерства керівництва в системі. Стало більше вимог про відповідність законодавству. У новій редакції з'являється концепція управління та оцінки ризиків. Нові вимоги до документації. «Розрослися» вимоги до операційного управління. Змінилися вимоги до компетентності і поінформованості. Тепер необхідно краще аналізувати вплив тих чи інших факторів на програму внутрішнього аудиту. Ціни на сертифікацію виростуть (мабуть, в оригіналі мається на увазі, що нова редакція зажадає більш складної і довгої перевірки, від чого залежить і ціна).

Експерти закликають організації, які сертифіковані по ISO 14001: 2004 почати адаптувати свою систему до ISO 14001 діє до: 2015. Редактори нормативу

на СЕМ передбачили трирічний перехідний період. Щоб почати працювати з ISO 14001 діє до: 2015 потрібно: вивчити стан вашої системи якості; придбати офіційний текст ISO 14001 діє до: 2015; замовити навчання по ISO 14001; проконсультуватися щодо подальших кроків з вашим органом по сертифікації; сертифікуватися по ISO 14001.

Застосування стандарту ISO на СЕМ може принести безліч вигод організації та її системі екологічного менеджменту. Організації та компанії, які працюють з ISO 14001, періодично повідомляють, що: поліпшили ефективність витрачання своїх ресурсів; скоротили витрати; скоротили собівартість продукції; стали проводити систематичні вимірювання свого впливу на навколишнє середовище; отримали конкурентну перевагу шляхом оптимізації своєї ланцюга поставок; відкрили для себе нові горизонти розвитку бізнесу; домоглися стабільної реалізації законодавчих вимог; підвищили рівень довіри зацікавлених в роботі організації осіб і клієнтів; зменшили свій негативний вплив на навколишнє середовище; послідовно виконують взяті на себе екологічні зобов'язання.

Інтегровані системи можуть поліпшити роботу, одночасно знизивши ризик плутанини між своїми окремими елементами. В цьому випадку ті чи інші елементи системи за стандартом ISO 9001 будуть не заважати, а доповнювати компоненти СЕМ по ISO 14001. Сфери відповідальності, які потрібно закріпити за співробітниками в разі, якщо ви вирішили створити велику загальну систему, будуть наступними: розробка політики і постановка вимірних цілей; картування процесів організації та складання посадових інструкцій; виділення достатніх для процесів СЕМ ресурсів; управління спільною документацією всіх підсистем інтегрованої системи; призначення представника керівництва і координаторів (coordinators), по одному для системи якості та СЕМ. При додаванні елементів системи ISO 14001 до вже існуючих компонентів СМК потрібно відповідним чином перебудувати процеси планування, щоб вони стали охоплювати і екологічну проблематику. Процеси контролю: інспекційні перевірки і випробування теж при створенні інтегрованої системи перебудовують, адже тепер

потрібно оцінювати відповідність і екологічним вимогам теж. Не забудьте, що за ISO 14001 потрібно досягти відповідності очікуванням клієнтів і регуляторів і той факт, що ви, по суті, доповнюєте СМК, не скасовує необхідності виконати цю вимогу ISO 14001. Впровадити елементи СЕМ в процеси внутрішніх аудитів та навчання. ISO 14001 можна інтегрувати і з іншими стандартами, не тільки з ISO 9001. Наприклад, можливе створення загальної системи менеджменту із застосуванням OHSAS 18001 і ISO 14001 або ISO 14001 та ISO 13485 [29].

#### **6.4. Вимоги до системи екологічного менеджменту**

Організація повинна розробити, документально оформити, впровадити, підтримувати і послідовно покращувати систему екологічного менеджменту відповідно до вимог цього державного стандарту і визначити, як будуть виконуватися ці вимоги. Організація повинна визначити і документально оформити межі своєї системи екологічного менеджменту [30].

Найвище керівництво повинне визначити екологічну політику організації та забезпечити, щоб у встановлених межах системи екологічного менеджменту ця політика:

а) відповідає характеру, масштабу і впливів на навколишнє середовище її діяльності, продукції або послуг;

б) включила зобов'язання щодо послідовного поліпшення та запобігання забрудненню;

в) містила зобов'язання щодо відповідності застосовним до організації вимогам законодавства та іншим вимогам, з якими вона погодилася і які відносяться до екологічних аспектів її діяльності;

г) передбачала основу для встановлення та перегляду екологічних цілей і завдань;

д) була документально оформлена, впроваджена і підтримувалася в актуальному стані;

е) доводилася до відома всіх осіб, які працюють для організації, або від її імені;

ж) була доступна для громадськості.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и)

а) ідентифікації екологічних аспектів своєї діяльності, продукції та послуг в рамках встановлених меж системи екологічного менеджменту, які вона може контролювати і на які вона приблизно може впливати, з урахуванням планованих або нових розробок, нових або змінених видів діяльності, продукції та послуг, і

б) визначення тих аспектів, які надають або можуть надавати значний вплив на навколишнє середовище (тобто значущих екологічних аспектів).

Організація повинна документально оформляти цю інформацію і підтримувати її в актуальному стані.

Організація повинна гарантувати, що значущі екологічні аспекти беруться до уваги при впровадженні та функціонуванні її системи екологічного менеджменту.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и)

а) ідентифікації та отримання доступу до законодавчих та інших вимог, які вона самостійно зобов'язалася виконувати і які відносяться до екологічних аспектів організації, і

б) визначення, як ці вимоги застосовуються до її екологічних аспектів.

Організація повинна гарантувати, що ці застосовні законодавчі та інші вимоги беруться до уваги при впровадженні та функціонуванні її системи екологічного менеджменту.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані документально оформлені екологічні цілі і завдання для кожного відповідного підрозділу та рівня в рамках цієї організації.

Цілі і завдання повинні бути вимірні, там де це можливо, і повинні бути узгоджені з екологічною політикою, включаючи зобов'язання щодо запобігання забрудненню, зобов'язання відповідності застосовним законодавчим і іншим вимогам, зобов'язання по послідовному поліпшенню.

При встановленні та перегляді своїх екологічних цілей і завдань організація повинна враховувати законодавчі та інші вимоги, а також свої значущі екологічні аспекти. Необхідно також брати до уваги технологічні можливості організації, а також фінансові, експлуатаційні вимоги і вимоги ділових кіл, точку зору зацікавлених сторін [31].

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані програму (и) досягнення її цілей і завдань. Програма повинна включати:

- а) розподіл відповідальності за досягнення екологічних цілей і завдань для кожного відповідного підрозділу та рівня в рамках організації;
- б) кошти і терміни, в які вони повинні бути досягнуті.

Керівництво організації повинно надати ресурси, необхідні для впровадження, функціонування та поліпшення системи екологічного менеджменту. Ресурси включають в себе людські ресурси, спеціальні знання і досвід, інфраструктуру організації, технологію і фінансові ресурси.

Обов'язки, відповідальність і повноваження повинні бути визначені, документально оформлені і доведені для сприяння ефективному екологічному менеджменту.

Найвище керівництво повинне призначати свого спеціального представника (одного або декількох), який незалежно від інших обов'язків повинен мати певні обов'язки, відповідальність і повноваження для:

- а) забезпечення виконання вимог системи екологічного менеджменту відповідно до цього міжнародного стандарту;
- б) надання звітів про функціонування системи екологічного менеджменту, включаючи рекомендації щодо поліпшення, для аналізу вищому керівництву.

Організація повинна забезпечити, що персонал, який виконує роботи, які можуть мати значний вплив на навколишнє середовище, повинен володіти компетентністю, зумовленої відповідною освітою, підготовкою та / або практичним досвідом і повинен зберігати відповідні записи.

Організація повинна визначати потреби в навчанні персоналу, пов'язані з її екологічними аспектами і системою екологічного менеджменту. Організація повинна проводити навчання або вживати інших заходів, щоб задовольнити потребу в навчанні, а також повинна зберігати відповідні записи.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и), що дозволяє персоналу організації або співробітникам, які працюють від її імені, розуміти:

а) важливість відповідності екологічній політиці, процедурам і вимогам системи екологічного менеджменту,

б) значимі екологічні аспекти та пов'язані з ними справжні чи потенційні впливу на навколишнє середовище, користь для навколишнього середовища від підвищення ефективності роботи кожного співробітника,

в) свої обов'язки, і відповідальність в досягненні відповідності вимогам системи екологічного менеджменту, і

г) потенційні наслідки відступів від встановлених процедур.

По відношенню до своїх екологічних аспектів і системи екологічного менеджменту організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и):

а) обміну інформацією всередині організації між її різними рівнями і підрозділами;

б) отримання, документального оформлення та відповіді на відповідну інформацію або запити від зовнішніх зацікавлених сторін.

Організація повинна прийняти рішення про необхідність повідомлення зовнішнім сторонам про екологічні аспекти її діяльності і повинна документально

оформити своє рішення. У разі, якщо таке рішення прийнято, організація повинна розробити і застосовувати методи для таких зовнішніх взаємодій.

Документація системи екологічного менеджменту повинна включати: а) екологічну політику, цілі і завдання,

б) опис меж системи екологічного менеджменту,

в) опис основних елементів системи екологічного менеджменту та їх взаємодії, а також посилання на пов'язані з цим документи,

г) документи, зокрема протоколи, які вимагає цей державний стандарт, і

д) документи, зокрема протоколи, що їх організація визначила як необхідні для забезпечення ефективного планування, функціонування та контролю над процесами, які пов'язані з її значущими екологічними аспектами.

Документи, необхідні системою екологічного менеджменту та цей державний стандарт повинні контролюватися. Записи є особливим типом документів і повинні контролюватися відповідно до вимог

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и) з тим, щоб:

а) документи затверджувалися на предмет їх адекватності до їх поширення,

б) переглядалися і оновлювалися в міру необхідності, затверджувалися заново,

в) забезпечити, що зміни і поточний статус зміни документа визначені,

г) забезпечити, щоб поточні версії відповідних документів були доступні в місцях їх використання,

д) забезпечити, щоб документи були зрозумілими і простоти ідентифікації документів,

е) забезпечити, щоб документи зовнішнього походження, що їх організація вважає важливі для планування і функціонування системи екологічного менеджменту, були визначені, і їх поширення контролювалося

ж) запобігати ненавмисне використання застарілих документів і використовувати по відношенню до них відповідне позначення, якщо вони зберігаються для будь-яких цілей.

Організація повинна ідентифікувати і планувати операції, які пов'язані з ідентифікованими значущими екологічними аспектами, відповідно до її екологічною політикою, цілями і завданнями для забезпечення того, щоб вони виконувалися в заданих умовах за допомогою:

а) розробки, виконання та підтримки документованої процедури для ситуацій, коли відсутність процедур може привести до відступів від екологічної політики, цілей і завдань, і

б) відображення в процедурах критеріїв діяльності;

в) розробки, виконання та підтримки процедур, пов'язаних з ідентифікованими значущими екологічними аспектами товарів і послуг, що використовуються організацією, і доведення до постачальників, включаючи підрядників, відповідних процедур і вимог.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и) визначення і реагування щодо можливих аварійних ситуацій і аварій, які можуть впливати на навколишнє середовище.

Організація повинна реагувати на реальні аварії і аварійні ситуації і запобігати або знижувати пов'язані з ними несприятливі екологічні впливи.

Організація повинна періодично аналізувати, і, в разі необхідності переглядати свої процедури підготовленості до аварійних ситуацій та реагування на них, особливо після виникнення аварій або аварійних ситуацій.

Організація також повинна періодично перевіряти на практиці такі процедури, там, де це можливо.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и) регулярного моніторингу та вимірювання основних характеристик своїх операцій, які можуть істотно впливати на навколишнє середовище. Процедура (и) повинна включати документальне оформлення

інформації для моніторингу результатів діяльності, відповідний операційний контроль і відповідність екологічним цілям і задачам організації.

Організація повинна забезпечити, щоб обладнання, яке використовується для здійснення моніторингу та вимірювань, пройшло калібрування та повірку і підтримувалося в робочому стані, а відповідні записи зберігалися.

Дотримуючись свого зобов'язання про відповідність, організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и) періодичної оцінки відповідності застосовним до неї законодавчим вимогам.

Організація повинна зберігати записи результатів періодичних оцінок.

Організація повинна оцінювати відповідність іншим вимогам, з якими вона погодилася. Організація може об'єднати цю оцінку з оцінкою відповідності із законодавством або розробити для цього окрему процедуру.

Організація повинна зберігати записи результатів періодичних оцінок.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и) по виявленню поточних і потенційних невідповідностей та прийняття коригувальних і запобіжних дій. Процедура повинна визначати вимоги щодо:

а) визначенню і виправленню невідповідностей та вжиття заходів щодо пом'якшення їх несприятливих екологічних наслідків,

б) вивчення невідповідностей, визначення їх причин і вжиття необхідних заходів для того, щоб уникнути їх появи,

в) оцінка необхідності здійснення дій щодо запобігання невідповідностей і виконання необхідних дій щоб уникнути їх появи,

г) документування результатів виконаних коригувальних і запобіжних дій,

д) аналіз ефективності вжитих коригувальних і запобіжних дій.

Вжиті дії повинні відповідати важливості проблем і виявленому впливу на навколишнє середовище.

Організація повинна забезпечити, що всі необхідні зміни внесені в документацію системи екологічного менеджменту.

Організація повинна розробити та підтримувати в робочому стані записи, необхідні для доведення відповідності вимогам її системи екологічного менеджменту та даним міжнародним стандартом, а також записи за досягнутими результатами.

Організація повинна розробити, виконувати і підтримувати в робочому стані процедуру (и) по ідентифікації, зберігання, забезпечення збереження, пошуку, ведення та видалення записів. Записи повинні бути розбірливі, ідентифіковані та простежуваності.

Організація повинна забезпечити, що внутрішні аудити системи екологічного менеджменту проводилися в запланований час, з тим, щоб: а) визначити:

1) відповідає чи ні система екологічного менеджменту із запланованими заходами з екологічного менеджменту, в тому числі вимогам цього стандарту, і

2) впроваджена і функціонує належним чином система екологічного менеджменту, а також

б) надати інформацію про результати аудиту керівництву.

Програма (и) аудиту повинна плануватися, розроблятися, виконуватися і підтримуватися організацією, з урахуванням екологічної важливості різних видів її діяльності і результатів попередніх аудитів.

## **6.5. Способи зменшення вуглецевого сліду**

Перший спосіб це використання джерел енергії, що поновлюються. REGO сертифікат – гарантує, що джерело енергії, що поставляється вам, на 100% отримано з поновлюваних джерел. При використанні ринкового методу розрахунку протоколу GHG для визначення вашого вуглецевого сліду основна увага приділяється паливної суміші ваших джерел електроенергії. Отже, якщо ви використовувати поновлювані джерела енергії, ваші викиди на електроенергію будуть нульовими.

Встановивши систему GPS-стеження, можна забезпечити збір даних, які допоможуть проаналізувати використання транспорту що використовується на виробництві і зробити його більш ефективним. Аналіз телематичних даних може дати інформацію про критерії для майбутніх рішень про покупку / оренду.

Вибір більш економічних транспортних засобів або транспортних засобів з альтернативним паливом, таких як альтернативні види палива або електромобілі. Доступні державні субсидії для субсидування вартості нових автомобілів з низьким рівнем викидів. Як і щодо вартості електромобілів, уряд також пропонує субсидії тим, хто встановлює будинку зарядні пристрої.

Навчання водіїв техніці екологічного водіння може заощадити паливо і знизити викиди. Таким чином, це складається з навчання водіїв тому, як керувати автомобілем, з великою увагою до дорожніх умов і з великою увагою до економії палива.

Можна підвищити ефективність освітлення приміщень. Заміна освітлення в будівлі на більш енергоефективні варіанти, такі як світлодіодні, може мати велике значення. По можливості переконатися, що використовується природне освітлення. Природне світло економить енергію і покращує сон, а також дозволяє уникнути ризиків для здоров'я, пов'язаних з неприродним освітленням, таких як підвищена реакція на стрес.

Сонячний захист і прозора плівка можуть допомогти, зводячи до мінімуму відблиски і надмірне нагрівання. Існує також безліч доступних технологій, таких як датчики руху, які автоматично гарантують виключення світла, якщо кімнати не використовуються. Регульоване світло - ще один спосіб переконатися, що світло не досягає максимальної яскравості, коли це не потрібно. Це також повинно допомогти знизити витрати на електроенергію.

Можна встановити пластикові фіранки. Найпростіша і економічна система утримання гарячого повітря, яку використовує Google і включає в себе установку металевих заглушок на ряди і вінілові пластикові фіранки, такі як ті, які

використовуються в шафках для м'яса. Вони обмежують змішування повітря з різними температурами.

Треба оптимізувати системи опалення та охолодження. Встановити контроль температури, щоб забезпечити правильний час обігріву та кондиціонування відповідно до температури зовнішнього повітря. Це може звести до мінімуму перегрів або охолодження. Важливо забезпечити мінімальну температуру в нічний час. Якщо системи опалення та охолодження конкурують один з одним, можна втратити багато енергії, цього можна уникнути, встановивши систему управління будівлею.

Переконатися, що персонал навчений роботі з місцевими нагрівальними і охолоджуючими пристроями, щоб уникнути різких коливань температури або позбавити можливості вручну регулювати термостат. Потрібно слідкувати за тим, щоб котел регулярно обслуговувався, щоб забезпечити його максимальну ефективність. Крім того, регулярно очищати ребра опалювальних і охолоджувальних приладів.

Можна встановити віконну плівку, яка пропускає світло, але відбиває тепло влітку. Це дає вам перевагу природного світла, не викликаючи підвищеної потреби в кондиціонуванні повітря. Цю плівку взимку можна перевернути, щоб тепло відбивалося в кімнату.

Впроваджуючи політику стійких закупівель, пластикові відходи зменшаться. Наступний крок до скорочення кількості пластику - це виглядати так, як ніби ви видаляєте всі одноразові пластикові вироби, і це ваша бізнес-модель.

## **6.6. Висновки до розділу**

В цьому розділі було розраховано вуглецевий слід ГКН з чотирма часто використовуваними дзеркалами струму, (просте дзеркало струму, дзеркало струму Уїлсона, каскодного дзеркала струму та вдосконаленого дзеркала струму Уїлсона). Максимальне значення було досягнуте в ГКН з ВДСУ з використанням

енергії з вугільної електростанції и становить 18,42 грам CO<sub>2</sub> за місяць при умові, пристрій буде працювати безперервно. Можна зробити висновок, що ці генератори не суттєво впливають на навколишнє середовище.

ISO 14001 - це міжнародний стандарт, який формулює вимоги до ефективної системи екологічного менеджменту (СЕМ). У нормативі не написано: як саме компанія повинна діяти, щоб управляти екологічними аспектами своєї роботи, там швидше можна знайти зручну структуру, а навколо неї ви вже будете СЕМ під свої специфічні потреби. [32].

Застосування стандарту ISO на СЕМ може принести безліч вигод організації та її системі екологічного менеджменту. Організації та компанії, які працюють з ISO 14001, періодично повідомляють, що: поліпшили ефективність витрачання своїх ресурсів; скоротили витрати; скоротили собівартість продукції; стали проводити систематичні вимірювання свого впливу на навколишнє середовище; отримали конкурентну перевагу шляхом оптимізації своєї ланцюга поставок; відкрили для себе нові горизонти розвитку бізнесу; домоглися стабільної реалізації законодавчих вимог; підвищили рівень довіри зацікавлених в роботі організації осіб і клієнтів; зменшили свій негативний вплив на навколишнє середовище; послідовно виконують взяті на себе екологічні зобов'язання..

Організація повинна розробити, документально оформити, впровадити, підтримувати і послідовно покращувати систему екологічного менеджменту відповідно до вимог цього державного стандарту і визначити, як будуть виконуватися ці вимоги. Організація повинна визначити і документально оформити межі своєї системи екологічного менеджменту.

Для зменшення вуглецевого сліду підприємства мають: використовувати , відновлювальні джерела енергії, оптимізувати системи опалення та охолодження, підвищити ефективність освітлення приміщень, встановити пластикові фіранки, навчати персонал економії електроенергії та палива, встановити віконну плівку, вбирати більш економічний вид транспорту, скоротити використання одноразового пластику та бумаги.

## ВИСНОВКИ

Генератори - це дешевий і простий спосіб генерування певної частоти сигналу. Наприклад, RC-генератор використовується для генерації низькочастотного сигналу, LC-генератор використовується для генерації високочастотного сигналу. Частоту коливань можна змінювати, варіюючи значення компонентів.

Генератор, керований напругою (ГКН), з самої назви стає зрозуміло, що вихідна миттєва частота генератора контролюється вхідною напругою. Це свого роду генератор, який може виробляти частоту вихідного сигналу у великому діапазоні (від кількох сотен Гц до ГГц) в залежності від вхідної напруги постійного струму, яка подається.

Використовується в різних радіо, телевізорах та інших комунікаційних пристроях. Використовується в комп'ютерах, металошукачах, електрошокерів, інверторах, ультразвукових та радіочастотних пристроях. Використовується для генерації тактових імпульсів для мікропроцесорів та мікроконтролерів.

Дзеркала струму, виготовлені за допомогою активних пристроїв, стали широко застосовуватися в аналогових інтегральних схемах як елементи зміщення, так і пристрої навантаження для каскодів підсилювача. Використання дзеркал струму для зміщення може призвести до вищої нечутливості роботи схеми до коливань джерела живлення та температури. Дзеркала струму часто є більш економічними, ніж резистори, з точки зору площі штампа, необхідного для забезпечення струму зміщення певного значення, особливо коли необхідне значення струму зміщення невелике. При використанні як навантажувального елемента в транзисторних підсилювачах високий опір дзеркала струму призводить до підсилення високої напруги при низьких напругах джерела живлення. В нашому випадку дзеркало буде збільшувати НДО ГКН.

Відмінною особливістю цієї схеми є можливість управління NDR без зміни типів або розмірів транзисторів. Ця особливість заснована на властивості

простого дзеркала струму збільшувати коефіцієнт посилення струму за рахунок паралельного підключення транзисторів на виході дзеркала

Представлено порівняльний аналіз ГКН НДО з чотирма часто використовуваними дзеркалами струму. І<sub>1</sub> кола аналітично змодельований з точки зору вхідного та вихідного струму дзеркала для кожного кола ГКН. Продемонстровано ГКН з чотирма різними дзеркалами струму а саме з багатоканальним каскодним дзеркалом струму, багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона, багатоканальним простим дзеркалом струму, багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона побудована. Було визначено експлуатаційні характеристики.

Розрахувавши FOM для кожної топології ГКН, було встановлено, що найкращі показники мають ГКН з дзеркалом струму Вільсона. Цей ГКН має діапазон частот від 1.018 до 1.113 ГГц з максимальним фазовим шумом у діапазоні -149 дБк / Гц при зміщенні 100 кГц у діапазоні налаштування і забезпечує щонайменше 19,2 дБм вихідної потужності. FOM ГКН з багатоканальним дзеркалом струму Уїлсона FOM залежно від  $V_d$  (2V, 12V) змінюється від -200.8 до -220.5.

Найгірший показник у ГКН з багатоканальним каскодним дзеркалом струму без додаткових гілок FOM залежно від  $V_d$  (2V, 12V) змінюється від -172.2 до -167.5. Цей ГКН має діапазон частот від 1.201 до 1.404 ГГц з максимальним фазовим шумом у діапазоні -128 дБк / Гц при зміщенні 100 кГц у діапазоні налаштування і забезпечує щонайменше 5,2 дБм вихідної потужності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] A. Schore Pd.D. LC-Oscillator, Jhon F. Rider Publiser, inc., pp. 66, 1957.
- [2] A. S. Sedra and K. C. Smith, Microelectronics Circuits, 5th ed., New York: Oxford University Press, 2004
- [3] M. Odyniec, RF AND MICROWAVE OSCILLATOR DESIGN, 685 Canton street, Norwood, ARTECH House microwave Library, 2002.
- [4] R. Ludwig, P. Bretchko, and G. Bogdanov, RF Circuit Design: Theory and Applications. 2nd ed., New Jersay: Pearson Prentice Hall, 2009, 704p.
- [5] Y. P. Tsividis. Operation and Modeling of the MOS Transistor, McGraw Hill, New York, 1987.
- [6] M. Nagata. "Constant Current Circuits," Japanese Patent 628,228, May 6, 1971.
- [7] T. M. Frederiksen. "Constant Current Source," U.S. Patent 3,659,121, April 25, 1972.
- [8] C. Y. Kwok. "Low-Voltage Peaking Complementary Current Generator," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-20, June 1985
- [9] Gray, P.R.; Hurst, P.J.; Lewis, S.H.; Meyer, R.G. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2001; 875p.
- [10] U.L. Rohde, A.K. Poddar, and G. Bock, The design of modern microwave oscillators for wireless applications. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005, 561p.
- [11] Applications V.V. Ulansky S.F. Ben Suleiman 1H.M. Elsherif, M.F. Abusaid Optimization of NDR VCOs for Microwave, IEEE ELNANO-2016, 2016
- [12] A. Grebennikov, RF and Microwave Transistor Oscillator Design. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007, 441p.
- [13] F. Ellinger, Radio-Frequency Integrated Circuits and Technologies. Berlin: Springer, 2007, 507p.
- [14] I.M. Gottlieb, "Practical Oscillator Handbook", Elsevier, 1997, 292p.

- [15] P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, and R. G. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. 4th ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001, 875p.
- [16] V. Ulansky, “Low phase noise HEMT microwave voltage-controlled oscillator”, in *Proc. of IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium*, pp. 55-58, Aug. 2011.
- [17] Tseng, P.; Chen, C.H.; Hsu, S.A.; Hsueh, W.J. Large negative differential resistance in graphene nanoribbon superlattices. *Phys. Lett. A* 2018, 382, 1427–1431.
- [18] Liang, D.S.; Gan, K.J. New D-Type Flip-Flop Design using negative differential resistance circuits. In *Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications*, Hong Kong, China, 23–25 January 2008; pp. 1–8.
- [18] Chen, S.L.; Griffin, P.B.; Plummer, J.D. Negative differential resistance circuit design and memory applications. *IEEE Trans. Electron Devices* 2009, 56, 634–640.
- [19] Semenov, A. Mathematical model of the microelectronic oscillator based on the BJT-MOSFET structure with negative differential resistance. In *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kiev, Ukraine, 18–20 April 2017; pp. 146–151.
- [20] Kumar, U. Simulation of a novel bipolar-FET type-S negative resistance circuit. *Act. Passiv. Electron. Compon.* 2003, 26, 129–132.
- [21] Chua, L.O.; Yu, J.; Yu, Y. Bipolar-JFET-MOSFET negative resistance devices. *IEEE Trans. Circuits Syst.* 1985, 32, 46–61.
- [22] Ulansky, V.V.; Ben Suleiman, S.F.; Elsherif, H.M.; Abusaid, M.F. Optimization of NDR VCOs for microwave applications. In *Proceedings of the 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 19–21 April 2016; pp. 353–357.
- [23] Shin, S.; Kim, K.R. Novel five-state latch using double-peak negative differential resistance and standard ternary inverter. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016, 55, 1–6.

[24] Gan, K.J.; Tsai, C.S.; Liang, D.S.; Wen, C.M.; Chen, Y.H. Tri-valued memory circuit using MOS-BJT-NDR circuits fabricated by standard SiGe process. Jpn. J. Appl. Phys. 2006, 45, 1–4.

[25] Wu, C.Y.; Lai, K.N. Integrated L-type differential negative resistance MOSFET device. IEEE J. Solid-State Circuits 1979, 14, 1094–1101.

[26] Ulansky, V. Low phase-noise HEMT microwave voltage-controlled oscillator. In Proceedings of the IEEE

[27] Jagger, R.C.; Blalock, T.N. Microelectronic Circuit Design, 2nd ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2004.

[28] ISO 14001:2004. Системи менеджмента окружающей среды. Требования и руководство по применению. Введен с 01.09.04.

[29] ISO 14001:1996. Системи менеджмента окружающей среды. Требования и руководство по применению. Введен с 15.04.96.

[30] ISO 9001:2000. Системи управления качеством. Основные положения. Введен с 01.10.00.

[31] ISO 19011:2002. Указания относительно осуществления аудитов системы управления качеством и экологического управления. Введен с 01.04.02.

[32] ISO 14015 Екологічна оцінка цехів і підрозділів. У розробці

[33] ISO 14031:1996. Оцінювання екологічної ефективності. Загальні вимоги. Чинний від 15.06.96.

[34] ISO 14040:1997. Оцінка життєвого циклу. Принципи й структура. Чинний від 01.10.97.

[35] ISO 14042:2000. Оцінка життєвого циклу. Оцінка впливу. Чинний від 01.11.00.

[36] ДСТУ ISO 14004-97. Системи управління навколишнім середовищем. Загальні провідні вказівки по принципах управління, системам і коштам забезпечення. Чинний від 01.01.98.

[37] POSTNOTE 383 June 2011 Carbon Footprint of Electricity Generation