

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.

ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ

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

**Тема: «Широкосмуговий підсилювач з низьким рівнем шуму в КМОН
технології 0.12 мкм »**

Виконавець
студент групи ЕС-207М _____ Соколовський Кирило Борисович

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 дипломного проекту

Соколовського Кирила Борисовича

- 1. Тема дипломної роботи :** «Ширококутний підсилювач з низьким рівнем шуму в КМОН технології 0.12 мкм»
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 :** Вихідні дані до роботи: підсилювач класу А, діапазон частот від 10 МГц до 15 ГГц, напруга живлення 1,2 В, коефіцієнт корисної дії не менше 25 %.
- 4. Зміст пояснювальної записки:** реферат, список скорочень, вступ, 7 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 - 20.10.20	Виконано
2.	Огляд науково – технічної літератури за темою дипломної роботи	21.10.20 - 24.10.20	Виконано
3.	Аналіз класичних класів підсилювачів потужності	25.10.20 - 29.10.20	Виконано
4.	Проектування топології транзисторів та конденсаторів	30.10.19 - 03.11.20	Виконано
5.	Аналіз схеми ширококутового підсилювача	04.11.20 - 07.11.20	Виконано
6.	Проектування топології ширококутового підсилювача	08.11.20 - 19.11.20	Виконано
7.	Аналіз отриманих даних	20.11.20 - 30.11.20	Виконано
8.	Оформлення електронного варіанту	01.12.20	Виконано
9.	Подання на кафедрі. Усунення недоліків. Оформлення пояснювальної записки.	05.12.20	Виконано
10.	Електронна версія доповіді, ілюстративний матеріал доповіді	06.12.20	Виконано

7. Консультанти з окремих розділів:

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

8. Дата видачі завдання: «__» _____ 2020 року

Керівник дипломної роботи: _____ Уланський В.В.

Завдання прийняв до виконання: _____ Соколовський К. Б.

РЕФЕРАТ

Магістерська дипломна робота: 117 с., 49 рис., 46 формул, 1 табл., 37 джерел.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ, ДІЛЬНИК НАПРУГИ НА КМОН ТРАНЗИСТОРАХ, МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ШИРОКОСМУГОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА.

Об'єкт дослідження – підсилювач потужності з широкою смугою пропускання та низьким рівнем шуму на КМОН дільнику напруги.

Мета дослідження полягає в визначенні топології підсилювача потужності з широкою смугою пропускання та низьким рівнем шуму, що відрізняється від відомих класичних підсилювачів потужності за рахунок підсилення за струмом, його коефіцієнт підсилення за напругою складає одиницю - це дозволяє відмовитись від коливального LC контуру та таким чином зробити полосу пропускання широкою й зменшити шуми.

Методи дослідження – теоретично-аналітичний огляд технічних особливостей підсилювача потужності з широкою смугою пропускання та низьким рівнем шуму.

Наукова новизна одержаних результатів: виконано порівняльний аналіз характеристик та надано рекомендації доцільності ефективного використання підсилювача потужності з широкою смугою пропускання та низьким рівнем шуму в залежності від типу задач.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
Список скорочень	7
Список рисунків	8
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ВСТУП: ОПИС ПРОБЛЕМИ.....	12
1.1. Аналіз характеристик підсилювачів потужності (коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт нелінійних спотворень, і т.п.).....	13
1.2. Цілі дипломного проекту.....	13
1.3. Організація проекту	14
РОЗДІЛ 2: АНАЛІЗ КЛАСИЧНИХ СХЕМ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ НА МОН ТРАНЗИСТОРАХ.....	15
2.1. Вступ	15
2.2. Підсилювач потужності класа А на МОН транзисторах.....	17
2.3. Підсилювач потужності класа В на МОН транзисторах.....	19
2.4. Підсилювач потужності класа АВ на МОН транзисторах.....	21
2.5. Підсилювач потужності класа С на МОН транзисторах.....	23
РОЗДІЛ 3: ТОПОЛОГІЇ КОНДЕНСАТОРІВ І ТРАНЗИСТОРІВ В КМОН ТЕХНОЛОГІЇ 120 НМ	31
3.1. Вступ	31
3.2. Топології конденсаторів.....	32
3.3. Конденсатор типу кремній ¹ /кремній ² (poly1/poly2).....	41
3.4. Інтер/металевий конденсатор.....	43
3.5. Топології nМОН і рМОН транзисторів в КМОН технології.....	44
РОЗДІЛ 4: АНАЛІЗ СХЕМИ ШИРОКОСМУГОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА	52
4.1. Вступ	52
4.2. Дільник напруги на КМОН транзисторах.....	52
4.3. Схема КМОН диференціального підсилювача	52
4.4. Схема широкосмугового підсилювача.....	54

РОЗДІЛ 5: КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ.....	
ТОПОЛОГІЇ ШИРОКОСМУГОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА.....	62
5.1. Вступ	62
5.2. Проектування топології КМОН дільника напруги.....	62
5.3. Проектування топології диференціального підсилювача.....	65
5.4. Проектування топології конденсатора.....	66
5.5. Топологія широкосмугового підсилювача.....	67
5.6. Моделювання топології широкосмугового підсилювача.....	68
5.7. Підсумки розділу.....	72
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	73
6.1. Перелік небезпечних та шкідливих факторів у робочій зоні.....	75
6.2. Технічні та організаційні заходи щодо зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	76
6.3 Інструкція з техніки безпеки, пожежної та вибухової безпеки.....	80
6.4. Підсумки розділу.....	89
РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	91
7.1. Основні засади охорони навколишнього середовища.....	92
7.2. Аналіз проблеми впливу широкосмугових підсилювачів на стан довкілля.....	94
7.3. Аналіз основних джерел впливу та їх наслідків на людину та її оточення при виробництві підсилювачів потужності.....	95
7.4. Аналіз основних джерел впливу та їх наслідків на людину та її оточення при роботі підсилювача потужності.....	98
7.5. Рекомендації щодо зниження цих негативних чинників.....	104
7.6. Утилізація підсилювачів та електронного обладнання загалом.....	105
7.7. Зниження вуглецевого сліду продукту.....	108
7.8. Підсумки розділу.....	110
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	114

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ -	Амплітудно-частотна характеристика
АФЧХ	Амплітудно-фазочастотна характеристика
ВАХ	Вольт-ампер характеристики
ДВС	Джерело вхідного сигналу
ЗЗ	Зворотний зв'язок
ККД	Коефіцієнт корисної дії
КМОН	Комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник
МДН	Метал-діелектрик-напівпровідник
МОН	Метал-оксид-напівпровідник
ПП	Підсилювач потужності
ПЗЗ	Позитивний зворотний зв'язок
ФЧХ	Фазочастотна характеристика
ФВЧ	Фільтр високих частот
ФНЧ	Фільтр низьких частот

СПИСОК РИСУНКІВ

- Рис. 1.1 Структурна схема підсилювача напруги
- Рис 1.2. Амплітудна характеристика підсилювача
- Рис. 1.3. Класифікація підсилювачів за шириною смуги пропускання
- Рис. 2.1. Загальна модель підсилювача потужності
- Рис. 2.2. Конструкція підсилювача потужності класу А з дуже великим MOS-пристроєм
- Рис. 2.3. Статична характеристика підсилювача потужності
- Рис. 2.4. Моделювання підсилювача потужності класу А: моделювання у часовій області
- Рис. 2.5. Форми сигналів напруги та струму стоку в ідеальному класі В
- Рис. 2.6. Статична характеристика підсилювача потужності класу А
- Рис. 2.7. Часові діаграми підсилювача класу В
- Рис. 2.8. Схема підсилювача потужності класу АВ та деталі вхідного сигналу
- Рис. 2.9. Кут провідності підсилювача потужності класу АВ більший 90, але менше 180
- Рис. 2.10. Часові діаграми підсилювача класу АВ
- Рис. 2.11. Порівняння спектрів напруги підсилювачів потужності класу АВ та В
- Рис 3.1. Топології діодних конденсаторів
- Рис 3.2. Поперечні перерізи діодів N + / P- та P + / N +КМОН конденсатор nМОН і рМОН типу
- Рис 3.3. Топологія рМОН конденсатора
- Рис 3.4. Поперечний переріз рМОН конденсатора вздовж осі X1-X1
- Рис 3.5. Поперечний переріз рМОН конденсатора вздовж осі X2-X2
- Рис 3.6. Поперечний переріз рМОН конденсатора вздовж осі X3-X3
- Рис 3.7. Топологія nМОН конденсатора
- Рис. 3.8. Топологія конденсатора poly / poly
- Рис. 3.9. Переріз конденсатора poly / poly²
- Рис. 3.10. Топологія Інтер/металевого конденсатора
- Рис. 3.11. Переріз Інтер/металевого конденсатора
- Рис. 3.12. Умовне позначення транзисторів
- Рис 3.13. Етапи формування топології МОП-транзистора
- Рис 3.14 Поділ МОП-транзистора на сегменти

- Рис 3.15. Топологія nМОН транзистора
- Рис 3.16. Переріз рМОН транзистора
- Рис 3.17. Гребінчастий МОН транзистор
- Рис.4.1. Схема дільника напруги рМОН і nМОН транзисторах та еквівалентна схема .
- Рис 4.2. Диференційна пара виконана на рМОН транзисторах
- Рис.4.3. Схема широкосмугового підсилювача
- Рис.5.1. Топології КМОН дільника напруги
- Рис.5.2. Топологія диференційного підсилювача зі збільшеною довжиною каналу транзистору
- Рис.5.3. Топологія диференційного підсилювача з використанням фіктивних елементів
- Рис.5.4. Фінальна топологія диференційного підсилювача
- Рис.5.5. Топологія інтер-металевого конденсатору
- Рис.5.6. Переріз топології металевого конденсатору
- Рис.5.7. Топологія широкосмугового підсилювача
- Рис.5.8. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 10 MHz на якій змодельований вхідний струм ,напруга та FTT
- Рис.5.9. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 10 MHz на якій змодельований вихідний струм ,напруга та FTT
- Рис.5.10. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 100 MHz
- Рис.5.11. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 1000 MHz
- Рис.5.12. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 2 GHz
- Рис.5.13. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 5 GHz
- Рис.5.14. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 10 GHz
- Рис.5.15. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 17 GHz

ВСТУП

Як правило, в радіоелектроніці не використовують підсилювачі поодиноці, найчастіший варіант їх використання - це в системі. Тобто в нас є приймач сигналу (антена), коли вона приймає сигнал - його потужність мізерна, тобто складова струму та напруги потребує підсилення. В першу чергу підсилюють напругу, бо з сигналом, котрий має більш високу амплітуду напруги, простіше працювати, тобто далі його підсилювати.

На наступному кроці підсилення потрібно підсилити струм і в цьому дипломному проекті ми розробимо топологію подібного підсилювача. В системі підсилення сигналу, попередніх підсилювачів, тобто тих, котрі підсилюють за напругою може бути багато - класи таких підсилювачів ми розглянемо у другому розділі дипломного проекту. Як правило, такі підсилювачі мають вузьку смугу пропускання, тобто налаштовані на певний частотний діапазон.

Логічно було б припустити, що і підсилювачів струму потрібно багато - кожний для своєї частоти, але при такому підході система підсилення буде дуже дорогою, мати великі габарити та споживати багато енергії. Покращити систему підсилення сигналу можливо за допомогою використання широкосмугового підсилювача потужності, тобто підсилювача, котрий підсилює струм в діапазоні частот, в котрий входять діапазони попередніх підсилювачів .

До широкосмугового підсилювача також висувають вимоги по шумам, тобто на всьому частотному діапазоні його роботи вони мають бути низькими. Сигнал, котрий підсили за струмом, повністю готовий до роботи, якщо його потрібно обробити, то як правило його подають на дільник частоти і після цього він готовий до аналізу цифровими методами.

Також до переваг використання широкосмугового підсилювача в системі підсилення слід віднести можливість модернізації системи - якщо діапазон широкосмугового підсилювача має запас по частотам, тобто система

підсилення сигналу при додаванні попереднього підсилювача (напруги), котрий налаштований на підсилення сигналу якогось нового протоколу зв'язку, зможе працювати з цим протоколом.

Наукова новизна: Розроблено топологію підсилювача потужності з широкою смугою пропускання та низьким рівнем шуму, що відрізняється від відомих класичних підсилювачів потужності за рахунок підсилення за струмом, його коефіцієнт підсилення за напругою складає одиницю - це дозволяє відмовитись від коливального LC контуру та таким чином зробити полосу пропускання широкою й зменшити шуми.

Практична цінність: отримані в роботі результати дозволяють робити засоби зв'язку дешевше та менше за габаритами завдяки використанню спроектованого підсилювача потужності, завдяки реалізації топології підсилювача в МОН технології 0.12 мкм даний підсилювач буде просто розмістити у найкомпактніших пристроях.

РОЗДІЛ 1. ВСТУП: ОПИС ПРОБЛЕМИ

Підвищений попит на лінійні радіочастотні підсилювачі потужності (далі - підсилювачі потужності), що охоплює частотний діапазон 1,5-2,8 ГГц, вимагає розробки нових методів проектування широкосмугових, лінійних і високоефективних підсилювачів потужності, які працюють в ОВО режимі. Крім того, вже давно однією з ключових проблем для їх розробників, яка частково викликана зі складністю управління Імпеданс гармонійних навантажень, стало підвищення ефективності таких підсилювачів потужності [1].

Ця проблема пов'язана складністю вимірювання сигналів на надвисоких частотах, що ускладнює визначення їх оптимальної форми. При розробці широкосмугових підсилювачів ця проблема ускладнюється ще більше, оскільки гармоніки більш низькою робочою частоти знаходяться в робочій смузі частот такого підсилювача. Ці властиві широкосмуговим підсилювачів складності реалізації можуть бути ще більш посилені неточними методами проектування, що призводить до численних ітераціям вельми витратним не тільки по часу, але і приносять прямі матеріальні збитки, що позначаються на вартості проекту в цілому [1].

Властивості підсилювачів визначає сукупність параметрів і характеристик, користуючись якими можна аналізувати їхню роботу і проектувати нові пристрої. Підсилювач зручно розглядати як активний чотирьополіусник, до вхідних затискачів якого приєднується джерело вхідного сигналу у вигляді джерела напруги (E_C, \underline{Z}_C) (рис.1.1), а до вихідних затискачів – опір навантаження \underline{Z}_H :

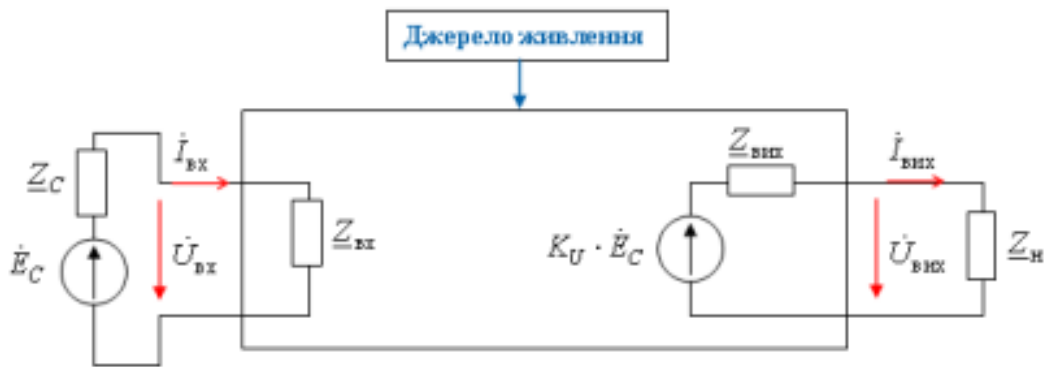


Рис.1.1 Структурна схема підсилювача напруги

Отже, ця схема дозволяє нам зрозуміти принцип підсилювача напруги, який ми розрахуємо в наступному підрозділі.

1.1 Аналіз характеристик підсилювачів потужності

Підсилювачі можуть мати різні за значеннями коефіцієнти підсилення, K_U, K_I, K_p . Принциповим є лише те, що коефіцієнт підсилення за потужністю завжди більший за одиницю ($K_p > 1$), інакше пристрій втрачає своє призначення як підсилювач. З цього виходить обов'язкова умова, що хоча б один із двох інших коефіцієнтів підсилення (K_U, K_I) має бути більшим за одиницю коефіцієнт підсилення за напругою визначається за формулою (1.1):

$$K_U = \frac{U_{\text{ВНХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (1.1)$$

Коефіцієнт підсилення за струмом визначається за формулою (1.2):

$$K_I = \frac{I_{\text{ВНХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \quad (1.2)$$

Коефіцієнт підсилення за потужністю визначається за формулою (1.3):

$$K_p = \frac{P_{\text{ВНХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = K_U \cdot K_I \quad (1.3)$$

До основних параметрів підсилювачів належать також вхідний опір $Z_{вх}(\omega)$ (1.4) і вихідний опір $Z_{вих}(\omega)$ (1.5) .

$$Z_{вх}(\omega) = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} \quad (1.4)$$

$$Z_{вих}(\omega) = \frac{U_{нх} - U_{вих}}{I_{вх}} \quad (1.5)$$

Значення вхідних і вихідних опорів потрібно враховувати при узгодженні підсилювача як з джерелом вхідного сигналу, так і з навантаженням.

Коефіцієнт корисної дії визначається за формулою (1.6):

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{спож}} \quad (1.6)$$

Важливими характеристиками підсилювачів є:

- амплітудна характеристика;
- амплітудно-частотна характеристика;
- фазочастотна характеристика.

Амплітудна характеристика підсилювача $U_{вих} = f(U_{вх})$, вказані на (рис 1.2) - це залежність амплітуди вихідної напруги від амплітуди вхідної синусоїдної напруги з фіксованою частотою в області середніх частот підсилювача. Амплітудна характеристика дозволяє приблизно оцінити межі лінійності підсилення.

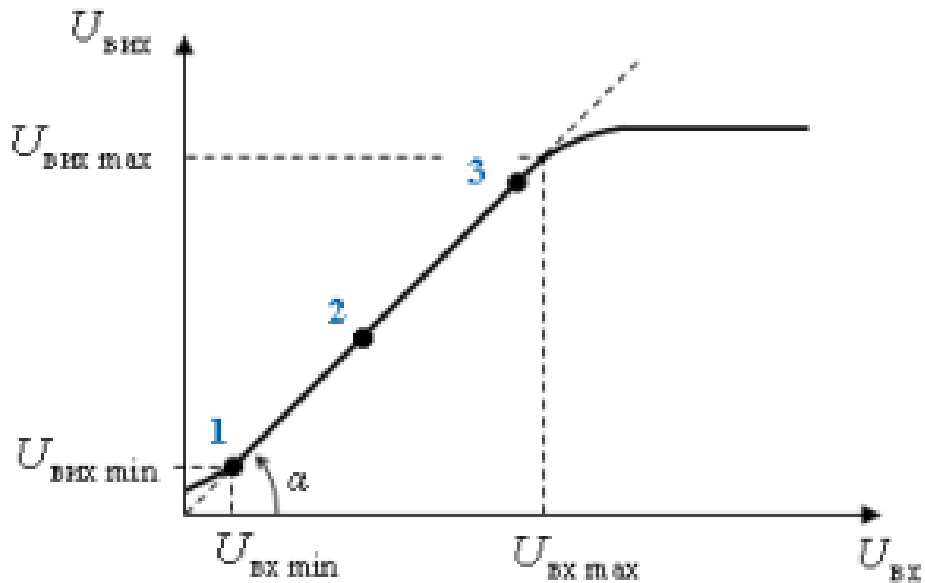


Рис 1.2 Амплітудна характеристика підсилювача

На ділянці 1-3 спостерігається пропорційна залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного. Це робочий діапазон амплітуд вхідного сигналу ($U_{ВХ.max} - U_{ВХ.min}$), на якому амплітудна характеристика прямолінійна, а кут її нахилу визначається коефіцієнтом підсилення на фіксованій частоті вхідного збудження. Ділянка амплітудної характеристики ліворуч від точки 1 ($U_{ВХ} < U_{ВХ.min}$) не використовується через неможливість відрізнити корисний сигнал від власних шумів підсилювача (пульсацій напруг джерел живлення, теплових процесів). За межами робочого діапазону праворуч від точки 3 ($U_{ВХ} > U_{ВХ.max}$) пропорційність між $U_{ВХ}$ та $U_{ВХН}$ порушується внаслідок нелінійних спотворень.

Динамічний діапазон характеризує діапазон амплітуд (діючих значень) вхідного сигналу, в межах якого підсилювач здатен створювати пропорційні значення вихідної напруги (1.7):

$$D = \frac{U_{ВХ.max}}{U_{ВХ.min}} \quad (1.7)$$

Відхилення форми вихідного сигналу від форми вхідного сигналу називають спотвореннями. Розрізняють нелінійні й лінійні спотворення. Нелінійні спотворення виникають через нелінійність вхідних і вихідних ВАХ активних елементів. Нелінійні спотворення вхідного сигналу збільшуються зі збільшенням амплітуди вхідного сигналу. У складі вихідної напруги при нелінійних спотвореннях з'являються вищі гармоніки, які обумовлюють несинусоїдну її форму. Рівень нелінійних спотворень кількісно оцінюється коефіцієнтом нелінійних спотворень (1.8) підсилювача, який визначається як відношення діючого значення усіх вищих гармонік вихідного сигналу до діючого значення вихідного сигналу:

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{U_{вих(2)}^2 + U_{вих(3)}^2 + U_{вих(4)}^2 + \dots}}{\sqrt{U_{вих1}^2 + U_{вих2}^2 + \dots + U_{вих(n)}^2}} * 100\% \quad (1.8)$$

Лінійні спотворення вхідних сигналів, які мають складний спектр, обумовлені неоднаковими значеннями коефіцієнта підсилення $\underline{K} = K(\omega_j)$ на різних частотах, що спричинює різне підсилення окремих гармонік вхідного сигналу. Через це форми вихідного сигналу та вхідного відрізняються. Неоднаковість підсилення пояснюється залежністю реактивних опорів елементів підсилювача від частоти і частотною залежністю параметрів напівпровідникових приладів. Для оцінки лінійних спотворень використовують амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) і фазочастотні характеристики (ФЧХ) коефіцієнтів підсилення.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) являє собою залежність модуля коефіцієнта підсилення напруги, від частоти від частоти ($K(\omega)$) або $K(f)$ АЧХ підсилювача визначає його властивості у всьому частотному діапазоні і має велику інформативну здатність. Реальний підсилювач неоднаково підсилює сигнали різних частот. Розрахунок підсилювача здійснюють так, щоб забезпечити підсилення вхідного сигналу без спотворень для заданого діапазону частот, який називають діапазоном середніх частот для конкретного підсилювача. Тобто у цьому діапазоні АЧХ реального підсилювача збігається з АЧХ ідеального підсилювача. Зменшення коефіцієнта підсилення в області низьких частот пояснюється наявністю конденсаторів зв'язку між каскадами, а в області високих частот – зменшенням коефіцієнта передачі струму транзистора. Лінійні частотні спотворення чисельно оцінюються коефіцієнтом частотних спотворень, який визначається як відношення модулів коефіцієнтів підсилення на середній частоті смуги пропускання $K_0(f_0)$ і заданій робочій частоті $K(f)$ як зображено у формулі (1.9)

$$M = \frac{K_0(f_0)}{K(f)} \quad (1.9)$$

де

f_0 – частота смуги середніх частот.

Чим більший від одиниці коефіцієнт частотних спотворень M , тим більшими є частотні спотворення амплітуди вхідного сигналу. Діапазон частот, для яких коефіцієнт частотних спотворень не перевищує допустимих значень, називають смугою пропускання підсилювача- $\Delta f = f_v - f_n$. Границі смуги пропускання підсилювача називають відповідно нижньою f_n і верхньою f_n граничними частотами

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) підсилювача – це залежність фазового зсуву між вихідним і вхідним сигналами від частоти (1.10) :

$$\varphi(f) = \varphi_{\text{вих}}(f) - \varphi_{\text{вх}}(f) \dots \dots \dots (1.10)$$

На (рис. 1.3.) суцільною лінією наведена ФЧХ коефіцієнта підсилення за напругою багатокаскадного транзисторного підсилювача з ємнісним зв'язком між каскадами у припущенні активного навантаження, а штрих-пунктирною $\varphi(\omega) = -\tau \cdot \omega$ – ФЧХ для ідеального підсилювача



Рис. 1.3.Класифікація підсилювачів за шириною смуги пропускання

Аналіз підсилювачів дасть нам змогу розрахувати найкращу схему для проектування широкопasmового підсилювача.

1.2. Цілі дипломного проекту

Кінцевою метою цього проекту є проектування широкопasmового підсилювача. Також до цілей цього проекту слід віднести аналіз ділянки напруги МОН транзисторах та диференційного підсилювача. З точки зору підвищення рівня знань в проектуванні за допомогою програми Microwind слід віднести до цілей надбання навичок мінімізації паразитного зміщення та нелінійності за рахунок використання фіктивних елементів.

Широкополосні підсилювачі застосовуються як посилення гармонійних сигналів з широкою смугою частот, так посилення імпульсних сигналів з крутим фронтом і діапазономдлительностей імпульсів [5].

Проте методи дослідження, розрахунку проектування широкосмугових підсилювачів гармонійних сигналів і імпульсних сигналів різні. Розрахунок широкосмугових підсилювачів гармонійних сигналів виготовляють основі спектральних, а імпульсних підсилювачів з урахуванням тимчасових уявлень [5].

1.3. Організація проекту

В другому буде проведений аналіз класичних схем підсилювачів потужності на МОН транзисторах які докладно описані для того, щоб надати читачеві деяке розуміння та порівняння. Це порівняння використовується, щоб пояснити, чому був обраний широкосмуговий підсилювач а також деякі його переваги та недоліки порівняно з іншими класами. В третьому розділі буде розглянуто топології nМОН і рМОН транзисторів та конденсаторів КМОН технології 120 нм для розуміння їх будови, принципу дії, сильних сторін та недоліків. Четвертий розділ буде присвячений аналізу широкосмугового підсилювача, в цій частині будуть розглянуті його складові, а саме дільник напруги на КМОН транзисторах, схема КМОН диференціального підсилювача та схема широкосмугового підсилювача. В п'ятій частині буде виконано комп'ютерне проектування та моделювання топології широкосмугового підсилювача та його частин.

РОЗДІЛ 2: АНАЛІЗ КЛАСИЧНИХ СХЕМ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ НА МОН ТРАНЗИСТОРАХ

2.1 Вступ

Існує чотири типи підсилювачів потужності, що відрізняються, насамперед, упередженими умовами, які можна назвати «класичними» через їх історичну перевагу. Вони позначені класом А, АВ, В і С, і все це можна зрозуміти, вивчивши окрему модель, зображену на (рис. 2.1). У цій загальній моделі резистор R_L представляє навантаження, на яку подається вихідна потужність. "Велика, жирна" індуктивність, $L \gg L_c$, подає живлення постійного струму до стоку і вважається достатньо великою, щоб струм через нього був по суті постійним.

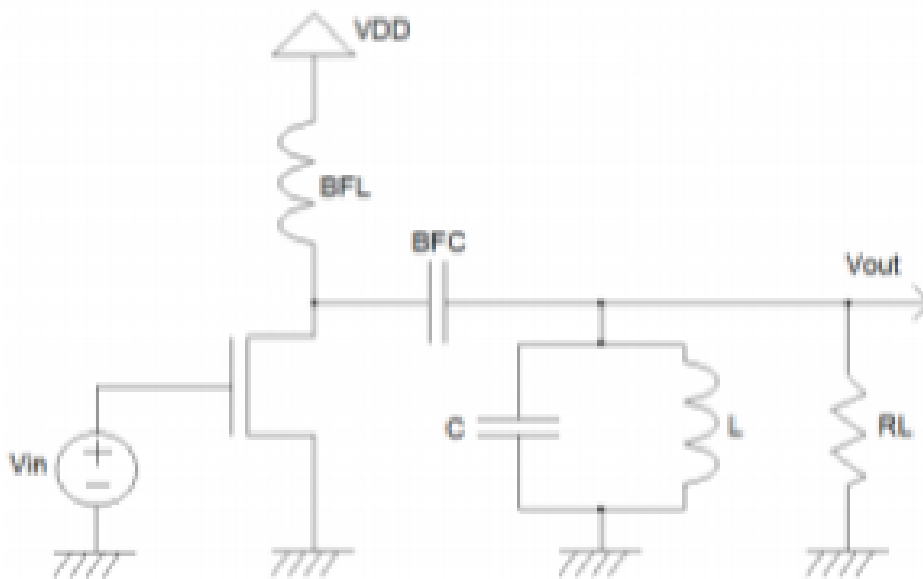


Рис. 2.1. Загальна модель підсилювача потужності

Стік підключений до контуру бака через конденсатор BFC , щоб запобігти розсіюванню постійного струму в навантаженні. Однією з переваг цієї конкретної конфігурації є те, що вихідна ємність транзистора може поглинатися в резервуар, як у звичайному підсилювачі з малим сигналом.

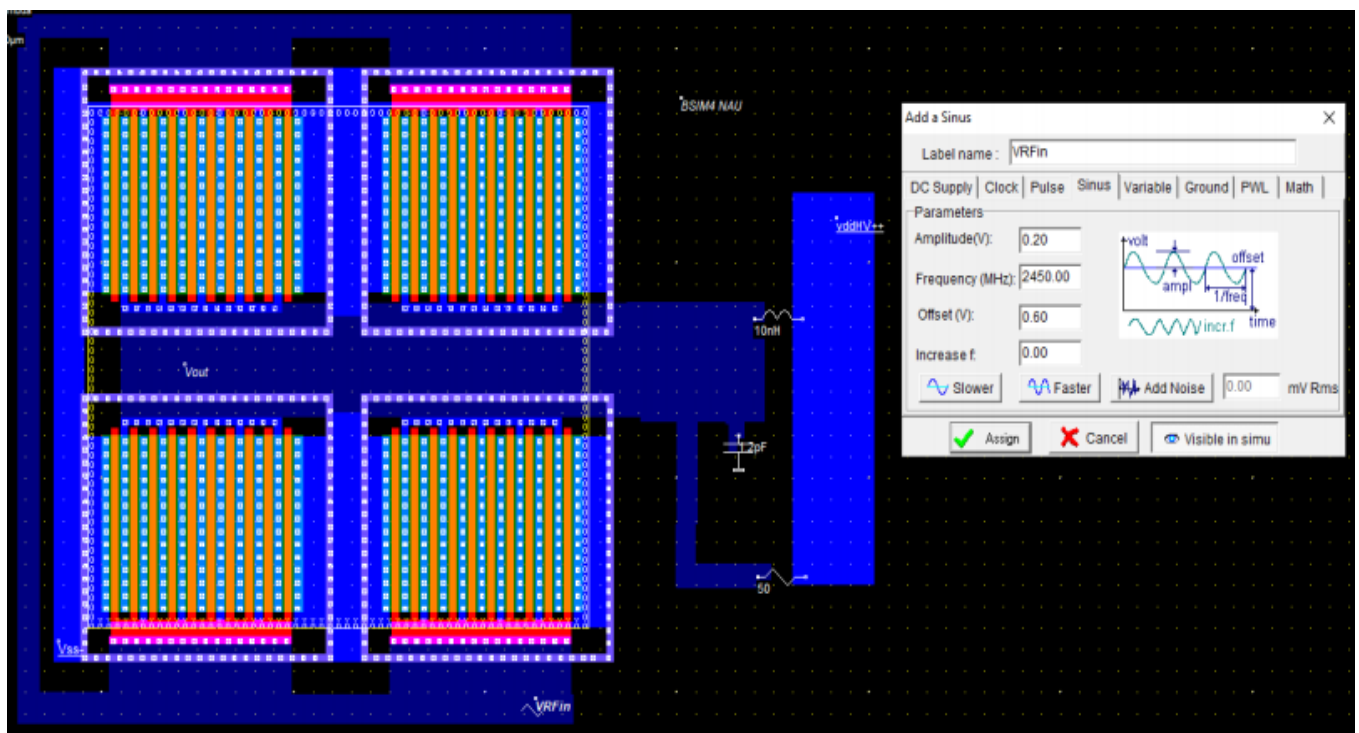
Фільтрація, передбачена резервуаром, скорочує викиди поза діапазоном, спричинені постійно присутніми нелінійностями. Це врахування особливо важливо тут, оскільки ми більше не обмежуємось роботою з малим сигналом, і тому повинні очікувати певних спотворень. Для спрощення аналізу ми припускаємо, що бак має достатньо високий Q , щоб напруга на резервуарі добре апроксимувалася синусоїдою, навіть якщо вона живиться несинусоїдальними струмами. Це припущення обов'язково передбачає вузьку смугову роботу. Хоча широкосмугові підсилювачі потужності, безумовно, також представляють інтерес,

2.2 Підсилювач потужності класу А на МОН транзисторах

При проектуванні класу передбачається, що рівні зміщення вибираються таким чином, щоб транзистор працював (квазі) лінійно. Для біполярної реалізації це умови виконуються за рахунок вилучення режимів відсічки та насичення; для реалізації в MOS, транзистор підтримується в робочих регіонах насичення. Основні відмінності між підсилювачами потужності класу А і підсилювачем слабкого сигналу заключаються в тому, що сигнальні токи в підсилювачах потужності складають значущу частину рівня зміщення, і через це слід очікувати потенційно послідовних спотворень. При вузько смуговій роботі, як бачимо із загальної моделі схеми, резервуарна схема вирішує проблему спотворень, потенційно пов'язану з великими коливаннями, так що в цілому лінійний режим робота переважає. Хоч лінійність безумовно бажана, підсилювач класу А забезпечує її за рахунок ефективності, через те що завжди присутнє розсіювання із-за струму зміщення, що відбувається, навіть при відсутності сигналів. Максимальний теоретичний КПД стоку складає всього 50%. При більш низькій амплітуді вихідної напруги ефективність значно падає, і через пристрій розсіюється більша потужність. Потім слід також відзначити, що 50% -ний КПД посилювача потужності класу А є абсолютним

максимумом за умов, що досягається повна амплітуда напруги, відсутні втрати у узгоджувальному ланцюгу та відсутня амплітудна модуляція. Отже КПД стоку в 30-35% взагалі не є незвичним для практичних посилювачів класу А. Підсилювач класу А поляризований таким чином, що транзистор завжди проводить струм. Пристрій MOS працює майже лінійно. Зразок посилювача потужності, поляризованого за класом А, показаний на (рис. 2.2) МОП-схема потужності спроектована дуже велика для підвищення енергоефективності.

Рис. 2.2. Конструкція підсилювача потужності класу А з дуже великим MOS-пристроєм



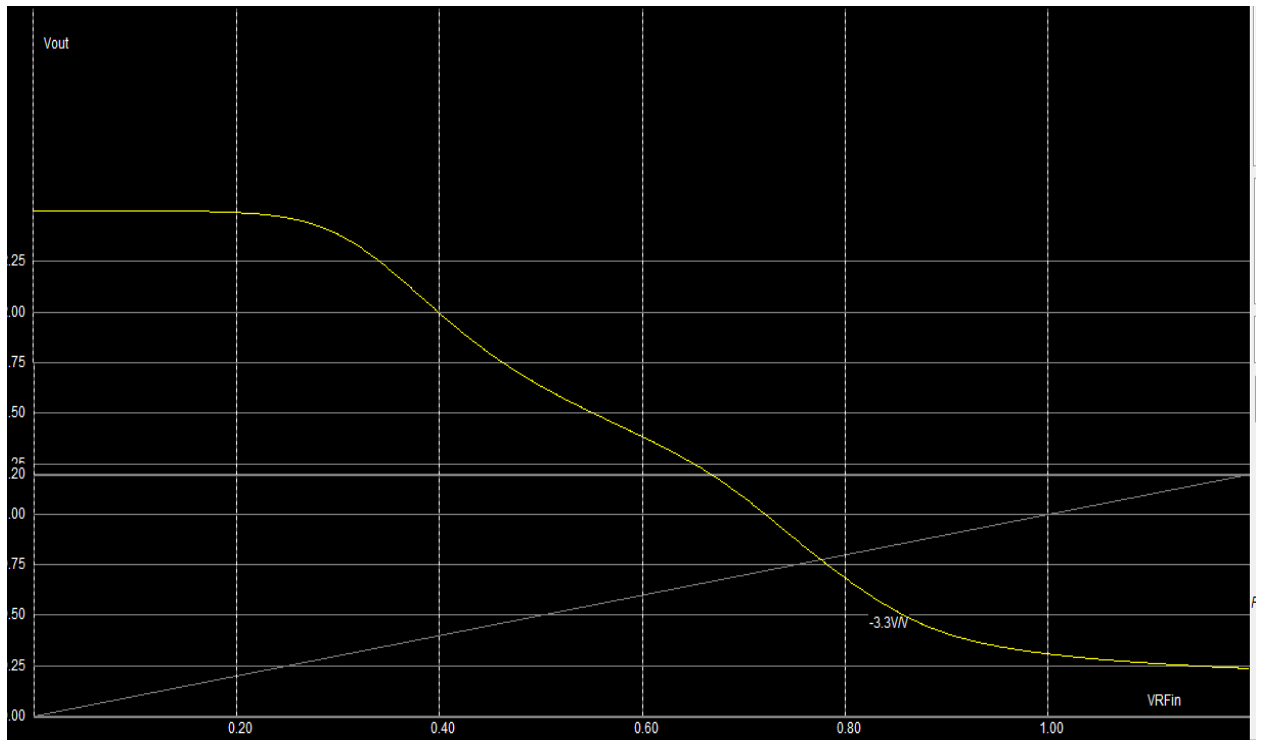


Рис. 2.3. Статична характеристика підсилювача потужності

Як видно з (рис. 2.3) , напруга зміщення вибирається таким чином, що транзистор проводить протягом повного циклу вхідний радіосигнал, тобто кут провідності становить 360 градусів. Поведінка струму стоку, вхідної та вихідної напруги показано на (рис. 2.4). Ми можемо бачити, що коефіцієнти струму коливаються між 8 мА та 38 мА, тобто MOS-пристрій завжди є провідним, що відповідає підсилювачам класу А. Основним недоліком підсилювачів класу А є високий струм зміщення, що призводить до низької ефективності. Іншими словами, більша частина енергії, що постачається джерелом живлення, розсіюється неефективно. Основною перевагою є лінійність підсилювача, що ілюструється спектром синусоїдального виходу V_{out} , як видно з (рис. 2.4):

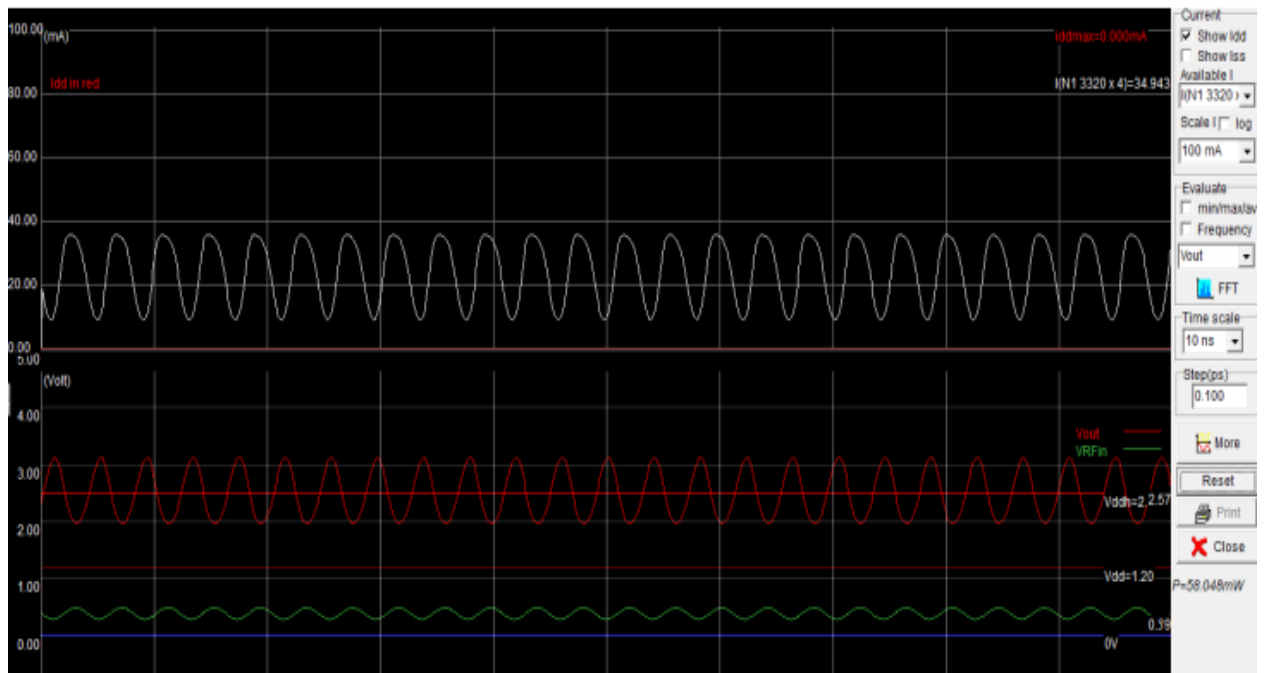


Рис. 2.4. Моделювання підсилювача потужності класу А: моделювання у часовій області

Ефективність підсилювачів класу А через неперервну роботу вкрай низька і може знижуватись до значень в 25%, що робить такі моделі непридатними для підсилення сигналів великих потужностей. Теоретичне значення ККД – до 50%. Також даний клас має високі вимоги до джерела живлення: сигнал від джерела живлення повинен бути відфільтрований, тому що транзистор знаходиться у відкритому стані постійно і будь-які завади від джерела живлення підсилюються, і передаються на вихід [2].

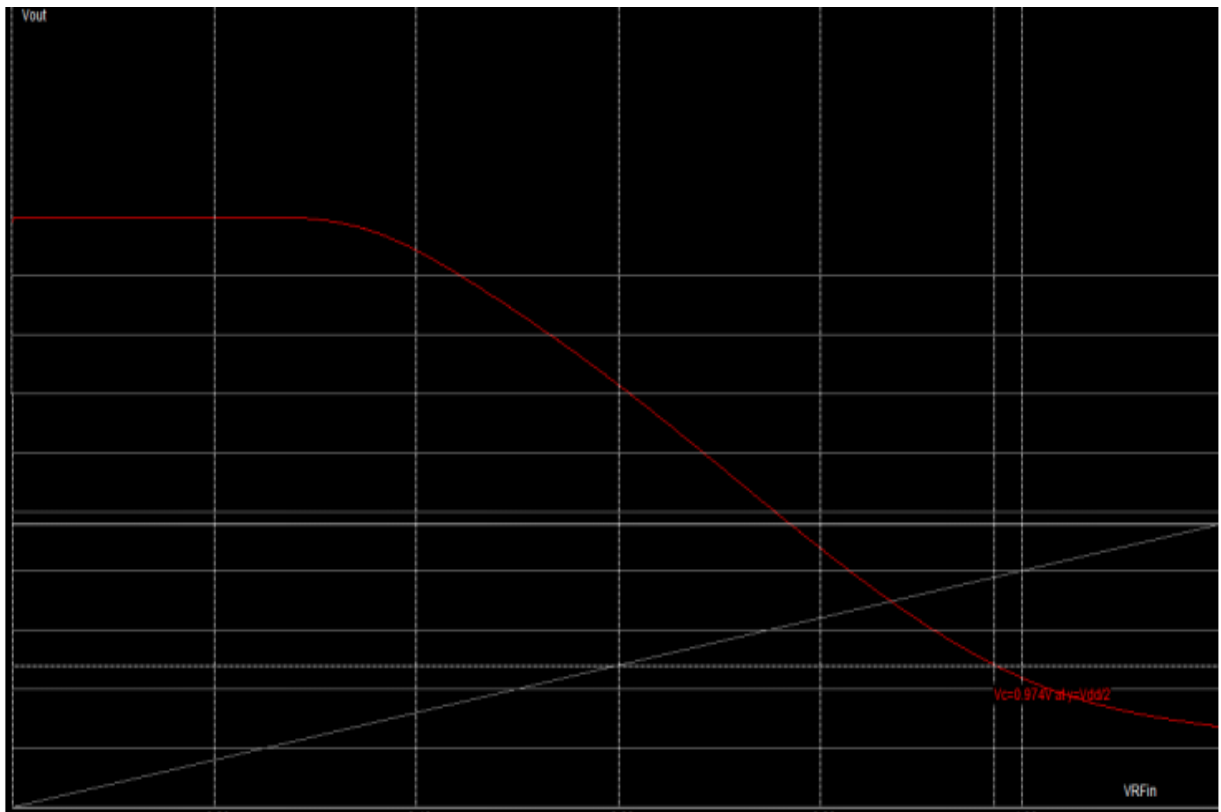


Рис. 2.6. Статична характеристика підсилювача потужності класу А

2.3 Підсилювач потужності класу В на МОН транзисторах

Підсилювач потужності класу В є “Сестрою” підсилювача потужності класу А. Клас В, має той самий тип базової схеми, що і клас А, але має різне зміщення. У класі В напруга зміщення регулюється таким чином, що транзистор проводить лише струм половини ВЧ-циклу, тобто при пороговій напрузі, такий що кут провідності становить 180 градусів. При переривчастій роботі транзистора ми можемо очікувати великих спотворень на вихідній напрузі і високої добротності.

Створивши підсилювач класу В конструктори намагалися уникнути проблем з тепловими втратами і низькою ефективністю. Найпростіша схема класу В складається з 2-х біполярних (польових) транзисторів, кожен з яких підсилює тільки половину вихідного сигналу. У підсилювачі класу В постійний струм зміщення на базі відсутній, транзистори проводять струм

тільки при наявності відповідного керуючого сигналу, а струм спокою на цих транзисторах вкрай малий. Ці фактори призводять до більшого значення ефективності підсилювача, ніж у класу А, але вихідний сигнал при цьому має нелінійні спотворення [2].

Резервуар необхідний на виході, щоб отримати досить синусоїдальний сигнал назад. Аналогічно для підсилювача класу В, як і для підсилювача класу А, ми можемо проаналізувати форму напруги стоку та форму струму, показані на (рис. 2.5), де передбачається, що струм стоку є синусоїдальним для тієї частини періоду, коли транзистор проводить, що є досить грубим наближенням, оскільки різка зміна. Коефіцієнт корисної дії для клас В становить $\pi/4$ тобто 78.5 відсотків

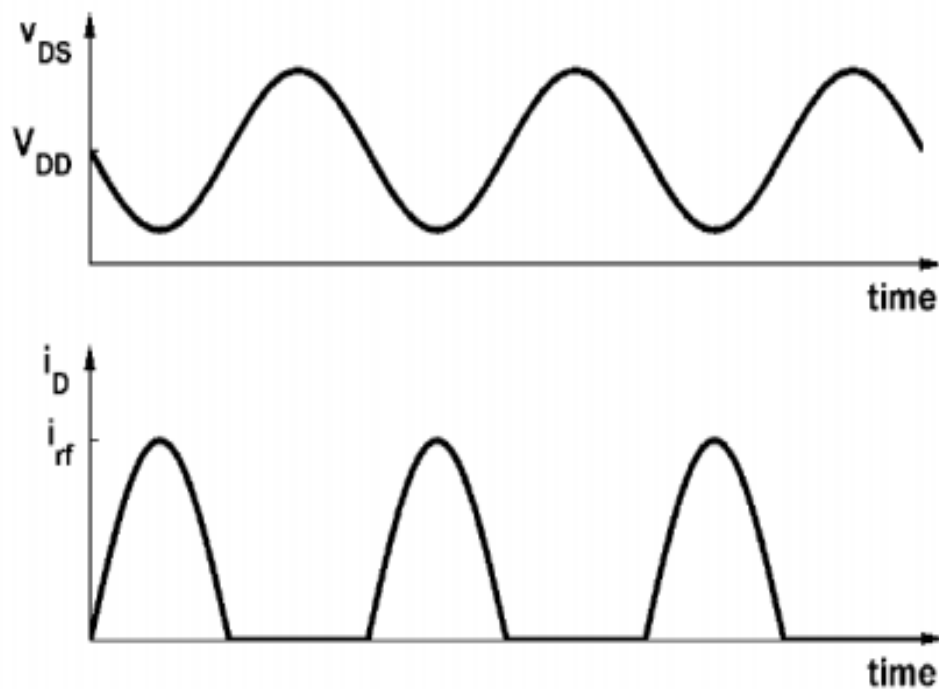


Рис. 2.5. Форми сигналів напруги та струму стоку в ідеальному класі В

Зрозуміло, що підсилювачі класу В досягають значно вищої ефективності, ніж клас А підсилювачі, але за рахунок більших спотворень. Тому є багато практичних підсилювачів потужності на основі суміші класу А і класу В з кутом провідності від 180 до 360 градусів, щоб отримати прийнятний компроміс між лінійністю та ефективністю. Статична

характеристика підсилювача потужності та зміщення для роботи класу В показано на (рис. 2.6), зміщення вхідного сигналу становить та дорівнює пороговій напрузі MOS, $V_{RFIN} = V_{th} = 0,4$ В. Отже, в негативні півцикли вхідна напруга не проходить, оскільки транзистор MOS не проводить. З іншого боку, позитивні півцикли вхідної змінної напруги вмикають MOS-транзистор і ініціюють імпульси на стоці, які показані на верхній діаграмі на (рис. 2.7). Часові діаграми вхідні та вихідні напруги також показані на (рис. 2.7). Таким чином, струм, що протікає в силовому MOS, показує пік струму протягом позитивної половини вхідного періоду. Під час негативної половини вхідного періоду силовий MOS вимкнений, а LC-резонатор передає потужність на 50 Ом резистивне навантаження.

Основним недоліком є сильне спотворення вихідної напруги, яке було значно менше помітно при поляризації класу А.

Оскільки для кожного транзистора існує своє напруга насичення бази-емітера (як правило, позитивне для pnp і негативне для npn), то в момент, коли керуюча напруга знаходиться в інтервалі між цими значеннями, обидва транзистори закриті, тому зникає частина сигналу, що підсилюється [2].

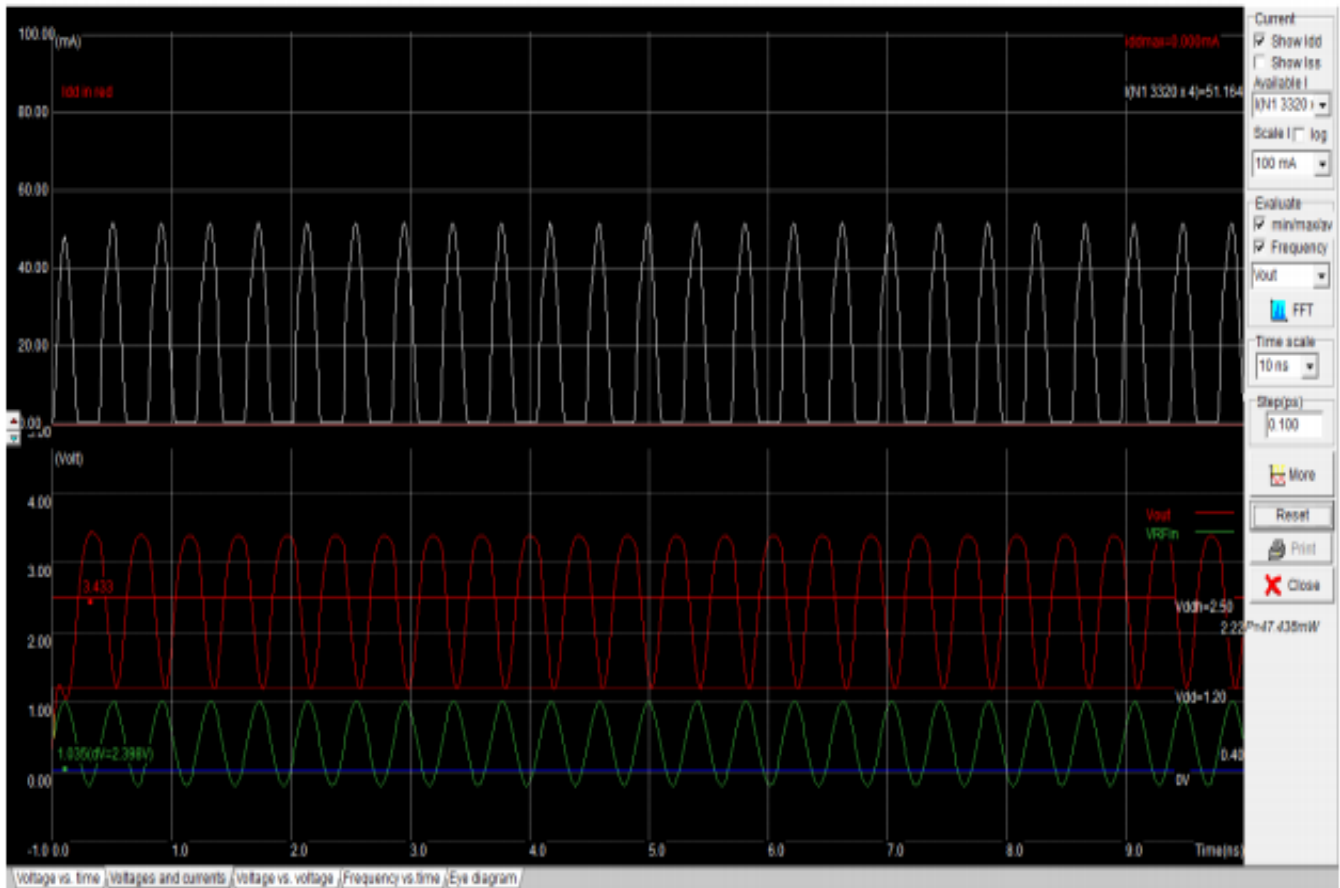


Рис. 2.7. Часові діаграми підсилювача класу В

2.4. Підсилювач потужності класу АВ на МОН транзисторах

Підсилювач класу В значно знижує теплові втрати і підвищує ефективність, але поступається при цьому по параметру лінійності вихідного сигналу класу А. З метою вирішення обох проблеми розроблений підсилювач класу АВ, який поєднує в собі обидва ці режими і є найбільш поширеним класом лінійного підсилювача. Оскільки, робота класу А має перевагу в незначному спотворенні, а клас В має перевагу у більш високій ефективності. Операція класу АВ є компромісом між цими двома крайнощами. Клас АВ відповідає провідності між половиною циклу та повним циклом, тобто кут провідності дорівнює більше 180 градусів, але менше 360 градусів. Схема підсилювача потужності класу АВ та вхідний сигнал показаний на (рис. 2.8).

Статична характеристика підсилювача потужності та зміщення для роботи класу **AB** показані на (рис. 2.9). Як видно з (рис. 2.9), зміщення вхідного сигналу більше, ніж порогова напруга MOS:

$$V_{RFIN} > V_{th} = 0,4 \text{ В.}$$

Отже, частина негативних напівперіодів вхідної напруги обрізається оскільки MOS-транзистор не проводить, коли

$$V \cdot R \cdot Fin < V \cdot t \cdot h \quad (2.1.)$$

З іншого боку, позитивні проходять півцикли вхідної змінної напруги. Пропущені частини вхідного сигналу ініціюють імпульси струму стоку, які показані на верхній схемі на (рис 2.10). Амплітуди цих імпульсів струму більші, ніж для підсилювача класу **B**, як це впливає з (рис 2.10), де показано порівняння спектрів напруги підсилювачів потужності класу **AB** та **B**. Як видно, при однаковій вхідній змінній напрузі амплітуда першої гармоніки більша для підсилювача потужності класу **AB**, але амплітуда другої гармоніки більша для підсилювача потужності класу **B**. Це означає, що підсилювач класу **AB** має менше спотворень порівняно з підсилювач класу **B** [4].

За відсутності напруги зсуву підсилювальний елемент працює в режимі класу **B**, якщо цю напругу дещо збільшити, то він увійде в режим класу **AB**. Виходить, що при досить малій амплітуді сигналу підсилювальні елементи двотактного вихідного каскаду працюють в режимі класу **A**, залишаючись весь час відкритими, а за більшої амплітуди - працюють поперемінно, так що один з них входить в режим відсічення, в той час як струм через інший збільшується. У момент перемикання обох елементів істотно зростає спотворення сигналу. Залежно від зсуву і рівня вихідного сигналу, кожен з підсилюючих елементів працює від 50 до 100% всього часу [3].

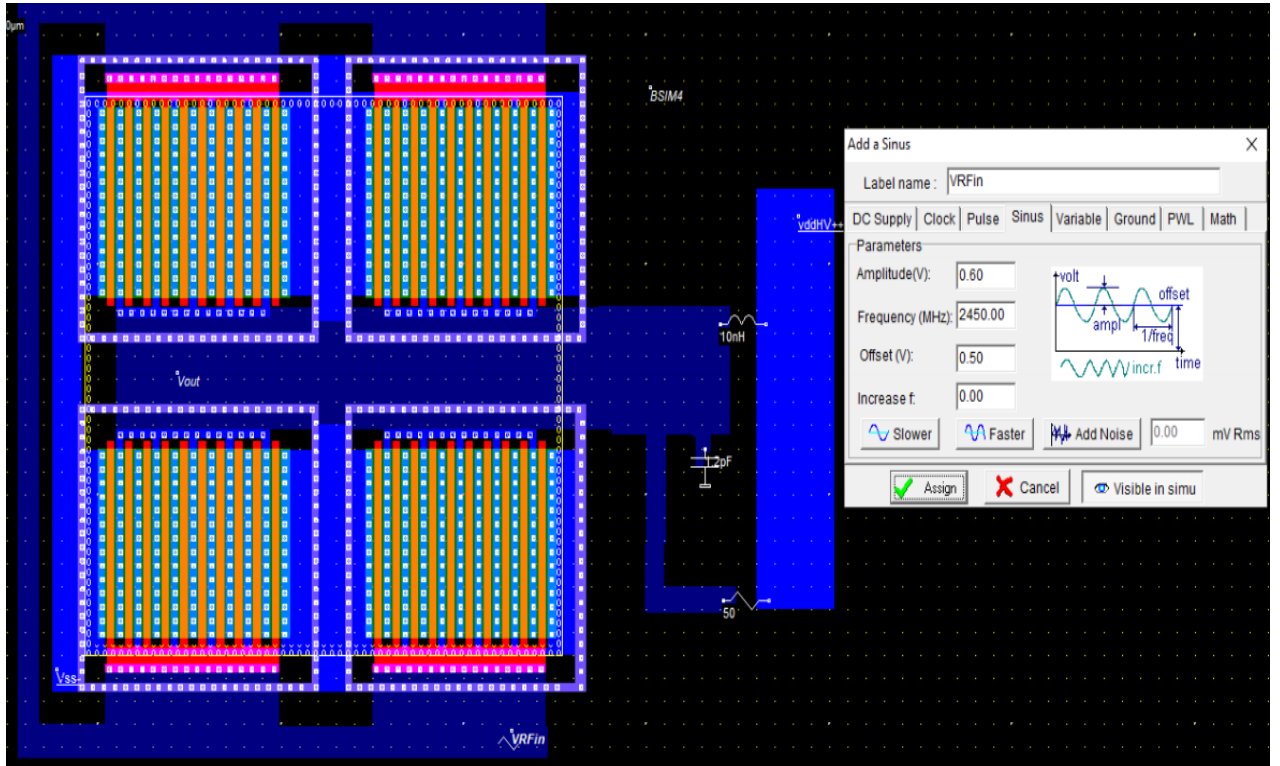


Рис. 2.8. Схема підсилювача потужності класу АВ та деталі вхідного сигналу

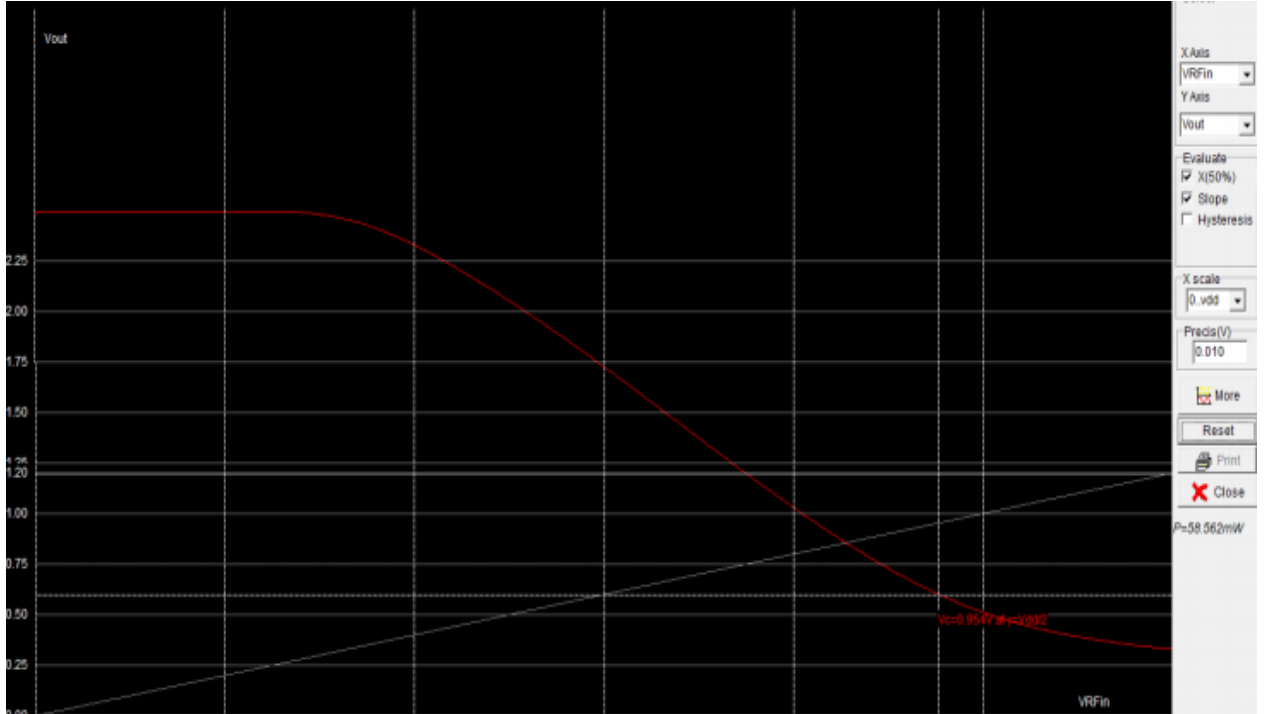


Рис. 2.9. Кут провідності підсилювача потужності класу АВ більший 90о, але менше 180

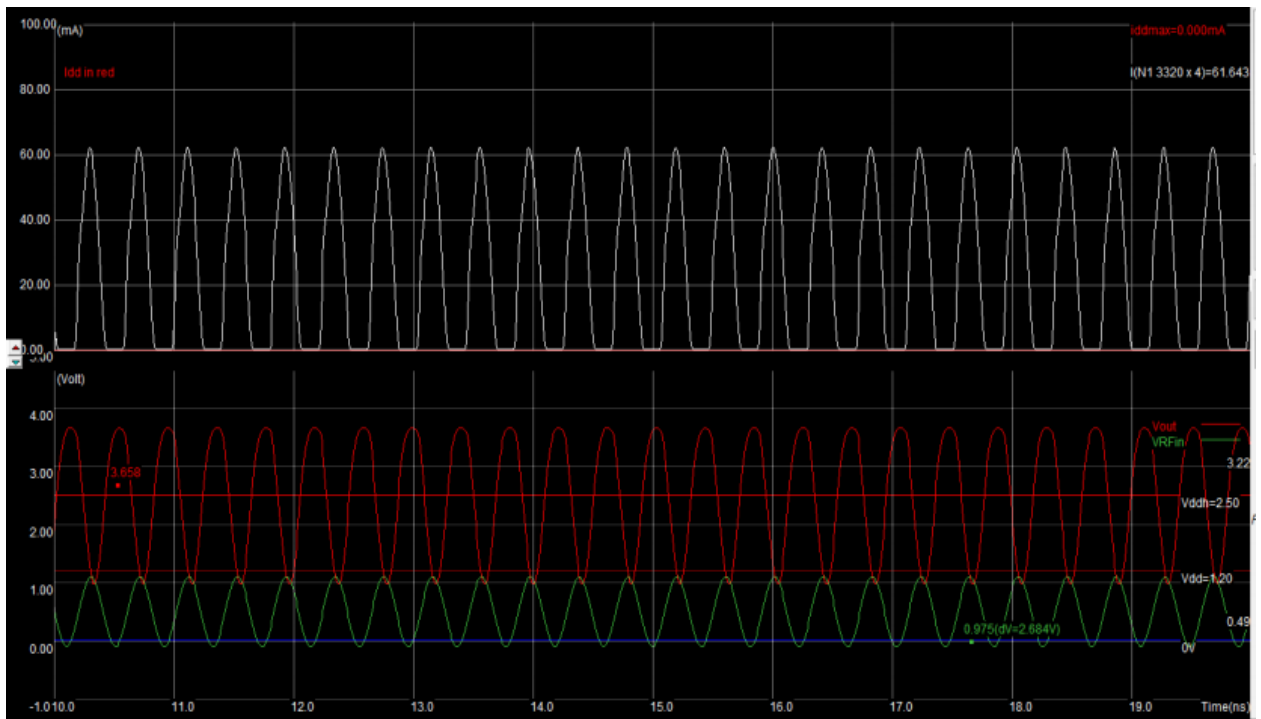


Рис. 2.10. Часові діаграми підсилювача класу АВ

(A)

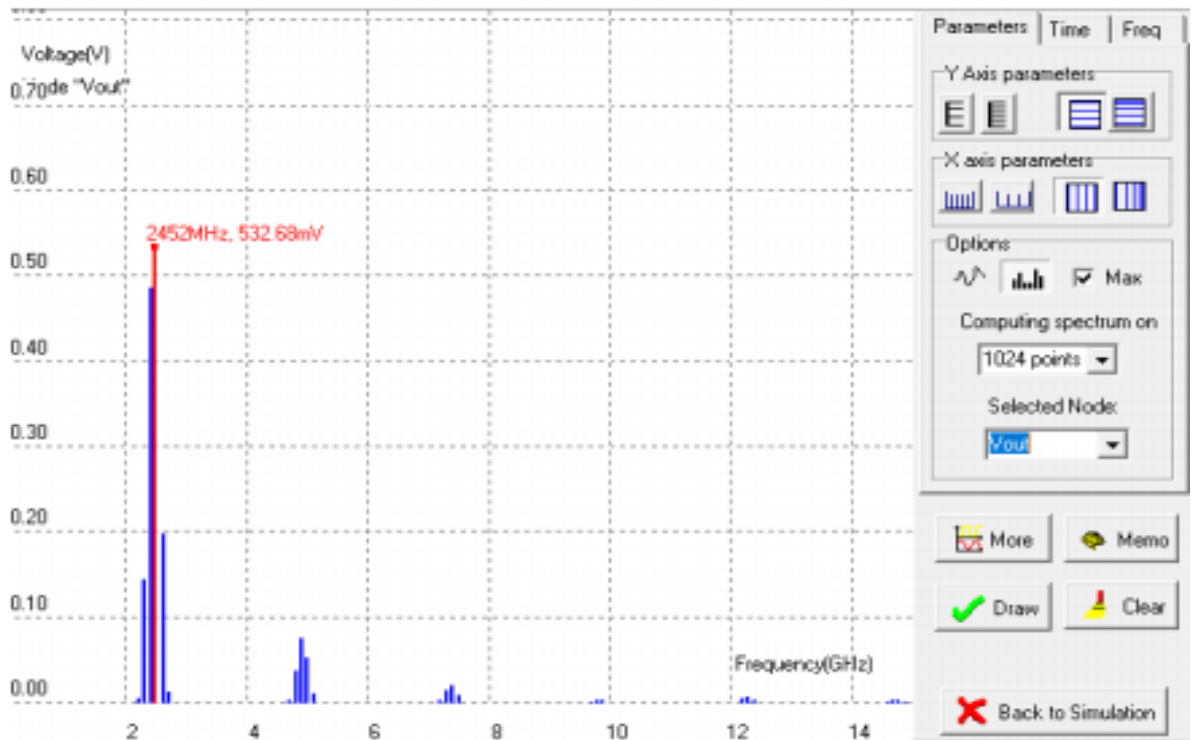


Рис. 2.11. (а) Порівняння спектрів напруги підсилювачів потужності класу АВ та В

(B)

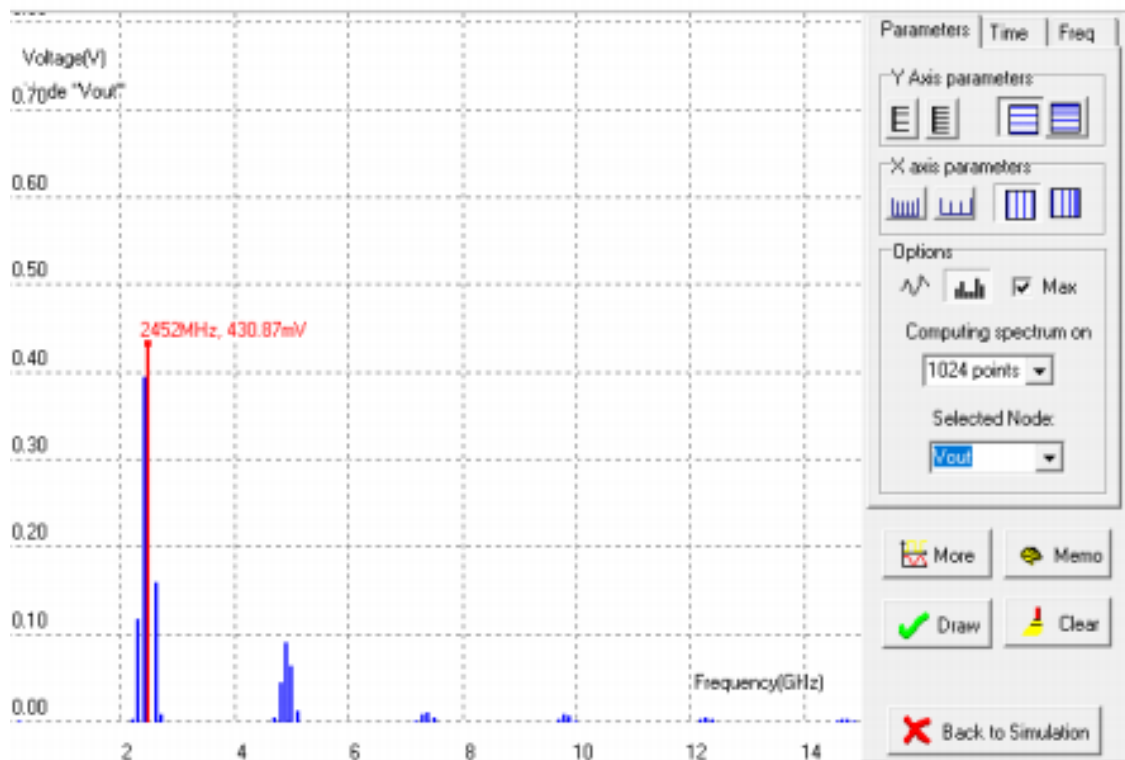


Рис. 2.11. (b) Порівняння спектрів напруги підсилювачів потужності класу АВ та В

Середнє значення ефективності таких підсилювачів приблизно таке ж, як і у класу **В** - близько 70-80%, але вони сильно виграють за якістю та чистоті вихідного сигналу. Завдяки цим властивостям, а також відносній простоті конструкції і налагодження, даний клас лінійних підсилювачів використовується найбільш часто [3].

2.5. Підсилювач потужності класу С на МОН транзисторах

У підсилювачі потужності класу С зміщення затвора влаштовано так, щоб транзистор проводив менше половини часу. Отже, струм стоку складається з періодичної послідовності імпульсів. Оскільки у нас все ще є вихідний резервуар із високим Q , напруга на вантажі залишається істотною

синусоїдальний. Тому напруга стоку та струм стоку виглядають так, як показано на (рис. 2.12).

Коли кут провідності зменшується до нуля, ККД наближається до 100%. Поки це здається багатообіцяючим, коефіцієнт підсилення та вихідна потужність, на жаль, також, як правило, прагне до нуля час, оскільки основний компонент у постійно звужуються струмках струм стоку зменшується. Крім того, з рівняння для пікового струму стоку видно, що нормована здатність підсилювача класу С керувати потужністю наближається до нуля коли кут провідності наближається до нуля. Всі ці компроміси змушують досягти ефективності менш ніж 100% на практиці, оскільки ми, як правило, хочемо мати розумну кількість вихідної потужності, а також високу ефективність [11].

Підведемо підсумки підсилювач класу А завжди має відкритий затвор, через це його ефективність не може перевищувати більше 50%, але на практиці цей показник рідко перевищує 25-30%, але плюс цього підсилювача його лінійність; його можна використовувати в аудіоапаратурі через лінійність. Клас В має вищу ефективність, котра теоретично дорівнює 78%, але він спричиняє нелінійні спотворення, струм протікає через нього лише половину періоду. Клас АВ об'єднує переваги класів А і В, він має ефективність близько 50% і спотворення згладжуються. Клас С має найвищу ефективність, але також і найсильніші спотворення, оскільки зміщення в ньому встановлені таким чином, щоб він був закритим протягом більше половини періоду вхідного сигналу, від 0 до 180 градусів. Оскільки транзистор більшу частину часу закритий, втрати на ньому зведені до мінімуму, а ефективність завдяки цьому в ідеальному випадку може досягати 100%, але платити за це доведеться зі спотвореннями [7].

РОЗДІЛ 3: ТОПОЛОГІЇ КОНДЕНСАТОРІВ І ТРАНЗИСТОРІВ В КМОН ТЕХНОЛОГІЇ 120 НМ

3.1. Вступ

При проектуванні широкосмугового підсилювача потужності використовувалися конденсатори і транзистори в КМОН (комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник) технології 120 нм. У цій частині ми розглянемо топології конденсаторів та транзисторів в КМОН технології.

Історично склалося так, що у виробництві дліноканальних КМОП ІМС використовувалася технологія з кишнями р- типу, яка вимагає мінімального числа технологічних операцій. КМОП-технологія з кишнями р- типу забезпечує кращу симетрію параметрів n- і р- канальних транзисторів. Однак в даний час для короткоканальних субмікронних транзисторів використовується технологія з кишнями n- типу. Вона дозволяє отримувати підвищені робочі характеристики n- канальних МОН-транзисторів, які в цьому випадку виготовляються в підкладці без інверсії її типу провідності [4].

3.2. Топології конденсаторів

Конденсатори використовуються в аналоговому дизайні для побудови фільтрів, компенсація, роз'єднання і т. подібне. В ідеалі, значення конденсатора не повинно залежати від умови зміщення, щоб ефект фільтрації знаходився на постійних частотах, в цьому розділі буде показано топології :

- діодних конденсаторів nМОН і рМОН типу;
- КМОН конденсаторів nМОН і рМОН типу;
- конденсатор типу кремній1/кремній2 (poly1/poly2);
- між металевий конденсатор [4].

Діоди у зворотному режимі демонструють поведінку конденсатора. Однак значення ємності сильно залежить від умов зміщення. Проста дифузія

N^+ на P -підкладці - це діод NP , який можна розглядати як конденсатор, доки область N^+ поляризована при напрузі, вищій за напругу P -підкладки, що зазвичай буває, коли підкладка заземлена (0 В). У технології CMOS 0,12 мкм ємність становить близько 300 аФ/мкм² (1 атто-Фарад дорівнює 10^{-18} Фараду). Коротко нагадаємо роботу діода. Сильний струм протікає з області P в область N , коли різниця напруг значно вища за порогову напругу V_T . Наприклад, діод P^- / N^+ знаходиться в таких умовах, коли V_P значно вищий, ніж $V_N + V_T$, де V_T становить приблизно 0,3 В на 0,12 мкм [8]. Струм обмежений послідовним опором діода, який становить від 100 Ом до 1000 Ом, залежно від поверхні діода. Слід зазначити, що між P і областю N до тих пір, поки $V_P < V_N + V_T$. В таких умовах діод можна розглядати як ємність. Порядок паразитичного струму знаходиться між нано-ампером та піко-ампером (10^{-9} - 10^{-12} А). Оскільки підкладка заземлена, V_N завжди вище, ніж V_P , що означає, що комбінація N^+ / P^- еквівалентна конденсатору. Топології діодних конденсаторів показані на рис. 3.1. Дифузія N^+ через підкладковий діод-конденсатор показана в лівій частині (рис. 3.1). Дифузія P^+ через підкладковий діодний конденсатор показана в правій частині на рис. 3.1. Поперечні перерізи діодів N^+ / P^- та P^+ / N^+ показані на (рис. 3.2).

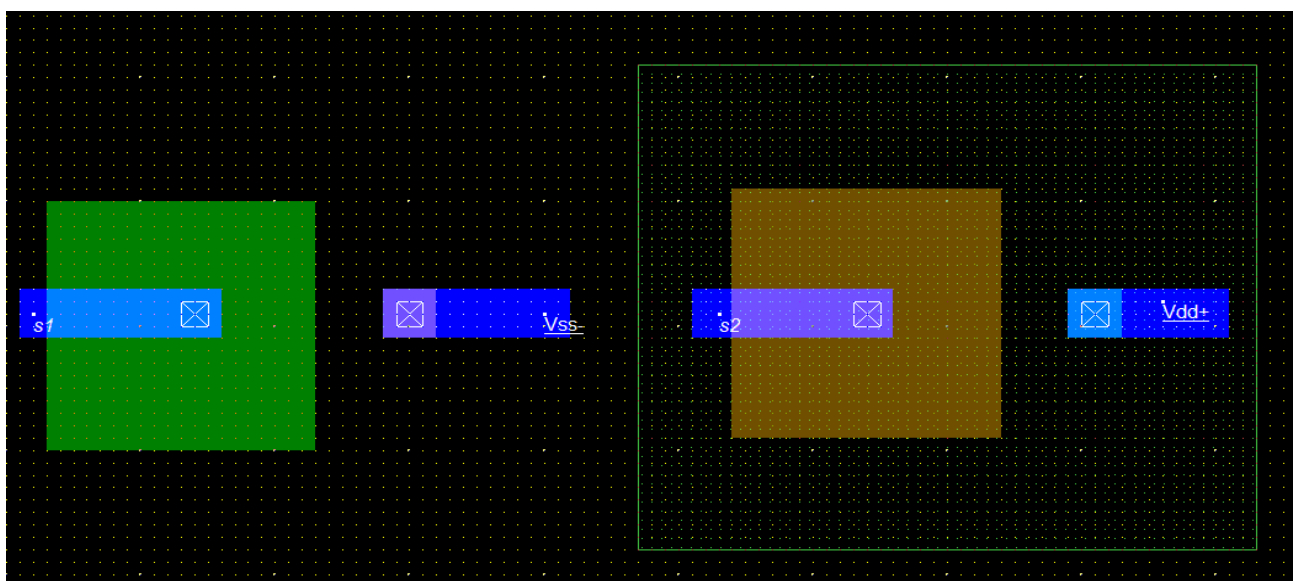


Рис 3.1. Топології діодних конденсаторів



Рис 3.2. Поперечні перерізи діодів N + / P- та P + / N +КМОН конденсатор nMOS і pMOS типу

Транзистор MOS часто є найпростішим вибором конденсатора. В КМОН технології 120 нм оксид затвора має еквівалентну товщину 2 нм (20 ангстрем,), оксиду завдяки цьому є можливість порахувати ємності оксиду затвора , яка оцінюється за рівнянням 3.1:

$$C_{\text{окс1}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{T_{\text{окс}}} = \frac{8.85 \cdot 3.9 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{-12}} = 17.3 \text{ fF} / \text{M} / \text{нм}^2 \quad (3.1)$$

Існує також товстіший оксид його називають подвійним оксидом котрий використовують в КПОН девайсах з високою напругою ,його товщина становить 5 нм ємність такого оксиду вираховується за формулою 3.2:

$$C_{\text{окс2}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{T_{\text{окс2}}} = \frac{8.85 \cdot 3.9 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{-12}} = 6.9 \text{ fF/м/нм}^2 \quad (3.2)$$

де:

ε_0 - діелектрична проникність вакууму вимірюються в фарадах на метр

ε_r - відносна діелектрична проникність

$T_{\text{окс}}$ - товщина оксиду

$T_{\text{окс2}}$ - товщина подвійного оксиду

В інверсному та акумулюючому регіонах роботи ємність оксиду близька до ємності затвору, ємність затвору становиться менше ніж ємність оксиду і стає нелінійною функцією V_{gs} в області виснаження. Пояснення такої поведінки таке що при ситуації коли джерело, стік та основна частина nMOH транзистора заземлена, напруга на затворі росте, а інверсний шар формується при $V_{gs} \approx V_{th}$. Також ми знаємо що при $0 < V_{gs} < V_{th}$ пристрій працює передпороговому регіоні. Транзистор можна розглянути як двополосний пристрій і отже його ємність можливо досліджувати з різними напругами затвору, при дуже негативній напрузі між затвором та джерелом, негативний потенціал притягує дірки в під-ложці до границі оксиду в цьому разі транзистор nKMOH працює в режимі насичення. Двох термінальний пристрій можна розглядати як конденсатор, що має ємність на одиницю площі C_{ox} , оскільки дві "пластини" конденсатора розділені T_{ox} . Коли V_{gs} зростає, щільність отворів на межі розділу падає, тобто позитивна напруга виснажує отвори на поверхні кремнію. Таким чином, область виснаження починає заповнювати простір шириною X_d і пристрій переходить у режим виснаження, ширина виснаження діє як діелектрик у ряді з оксидом [9]. Отже, ємність кремнію C_{dep} зменшується 3.4, а загальна ємність зменшується, що призводить до наступного виразу для ємності при виснаженні 3.3:

$$C_g = \frac{C_{ox}C_{dep}}{C_{ox}+C_{dep}} \quad (3.3)$$

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{кремнію}}}{X_d} \quad (3.4)$$

де:

X_d - ширина виснаження на поверхні

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}$ [F / см] діелектричної проникності вільного простору,

$\epsilon_{\text{кремнію}} = 11,7$ - відносна діелектрична проникність кремнію.

Ширина виснаження апроксимується за рівнянням 3.5

$$X_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{\text{кремнію}} \Phi_s}{q \cdot N_{DEP}}} \quad (3.5)$$

де:

Φ_s - поверхневий потенціал,

$q = 1,60 \cdot 10^{-19}$; [C] - заряд електрона,

N_{DEP} (близко 10^{17} см^{-3} на практиці) - це концентрація допінгу в каналі для нульового зміщення тіла.

Рівняння 3.6 можна представити як функцію напруги затвора наступним чином:

$$X_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{кремнію}}}{C_{ox}} \left(\sqrt{1 + \frac{2(V_g - V_{FB}) C_{ox}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{кремнію}} q * NDEP}} - 1 \right) \quad (3.6)$$

де:

V_g - напруга на затворі,

V_{FB} - напруга на плоскій смугі, що визначається як напруга, при якій поверхневий потенціал в кремнії дорівнює нулю.

Напруга плоскої смуги визначається в Microwind як 3.7:

$$V_{FB} = V_{th} - \Phi_s - 0.5\sqrt{\Phi_s} \quad (3.7)$$

Рівняння (3.6) показує, що коли $V_g = V_{FB}$, ширина виснаження $X_d = 0$, узгоджується з визначенням напруги плоскої смуги.

Площа потенціалу Φ_s визначається за формулою 3.8:

$$\Phi_s = 0.4 + v_t * \ln\left(\frac{NDEP}{n_i}\right) \quad (3.8)$$

де:

v_t – теплова напруга ,

n_i – власна концентрація носіїв у кремнії ($n_i = 1.02 * 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

В цьому режимі робот ємність складається з послідовної комбінації C_{ox} та C_{dep} якщо напруга джерела є достатньо додатна , на поверхні кремнію з'являється інверсний шар , цей інверсний шар з'являється за рахунок генерації не основних носіїв (електрон у нашому прикладі Р-підкладки). Концентрація не основних носіїв може змінюватись тільки по мірі то як носії можуть генеруватись в області виснаження поблизу поверхні [10].

Це обмеження призводить до того що , ємність МОН в інверсії залежить від частоти сигналу АС який використовується для вимірювання ємності. Якщо частота перемінного (АС) достатньо низка(менше 10 Гц). Так що інверсні носії заряду (неосновні носії) можуть відслідкувати за напругою зміщення перемінного току та напругу розмаху постійного току , тоді результуюча крива відома як C-V відома як низькочастотний (НЧ) C-V графік. Однак, якщо частота сигналу зміщення АС занадто висока (як правило, вище 10^5 Гц), так що носії інверсійного заряду не слідкують за напругою постійного струму, виміряна крива C-V називається графіком C-V високої частоти (ВЧ) . Нарешті так як V_{gs} перевищує V_{th} , оксид кремнію витримує сильну інверсію слою, відносна ємність повертається до C_{ox} . В режимі насичення та виснаження ємність МОН C_g не залежить від частоти, для усіх частот що мають практичний інтерес . це зв'язано з тим що, в цій області неосновні носії дуже малі та не вносять вклад до загальної ємності, котра регулюється більшістю носіїв [11]. Останні мають час транспортування близько піко секунди. Також слід відмітити що, частотна ємність в інверсії вірна лише для МОН конденсатора, а не для МОН транзисторів. В корпусі МОН транзистора дифузія джерела та стоку може майже миттєво поставляти неосновні заряди в інверсійний шар. Загальна ємність затвора тонкого оксиду представлена в рівнянні 3.9:

$$C_G = W * L * C_g \quad (3.9)$$

Топологія pМОН конденсатора представлена на рис 3.3 та топологія nМОН конденсатора представлена на (рис 3.7):

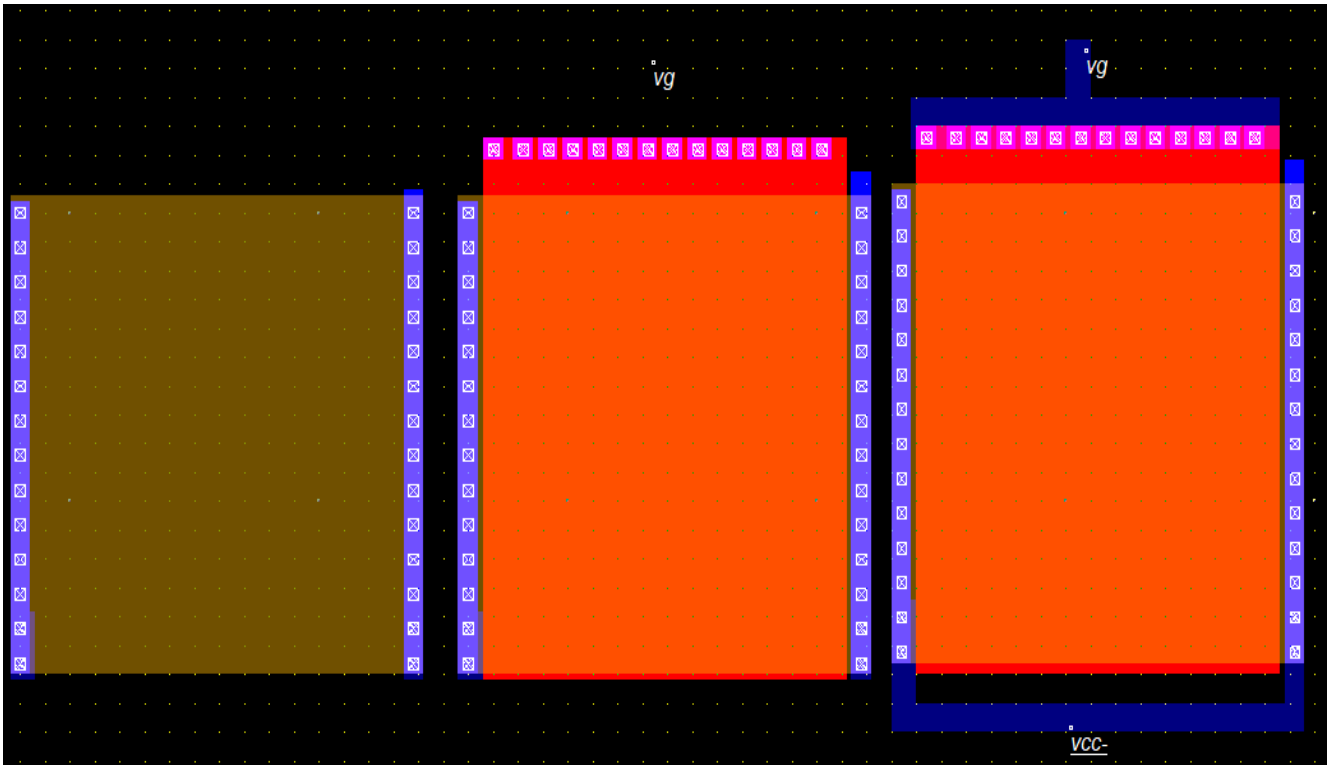


Рис 3.3. Топологія рМОН конденсатора

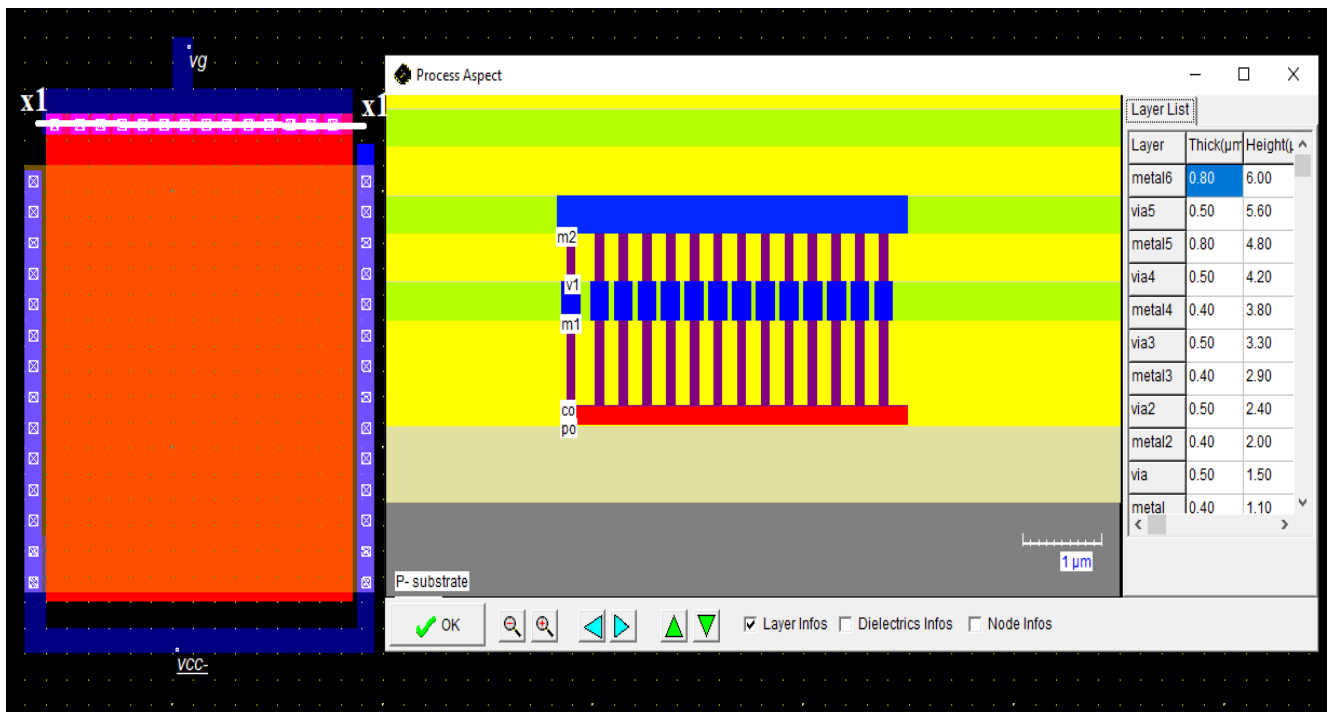


Рис 3.4. Поперечний переріз рМОН конденсатора вздовж осі X1-X1

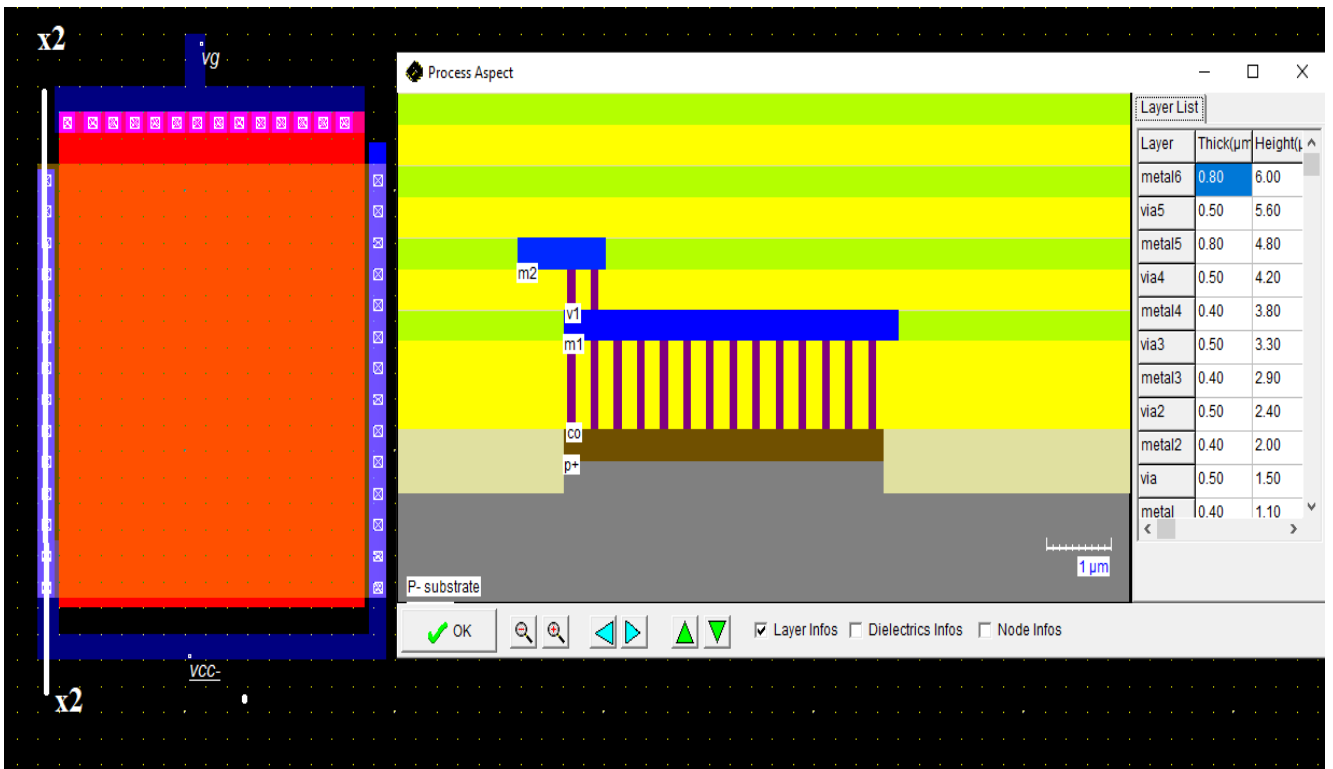


Рис 3.5. Поперечний переріз рМОН конденсатора вздовж осі X2-X2

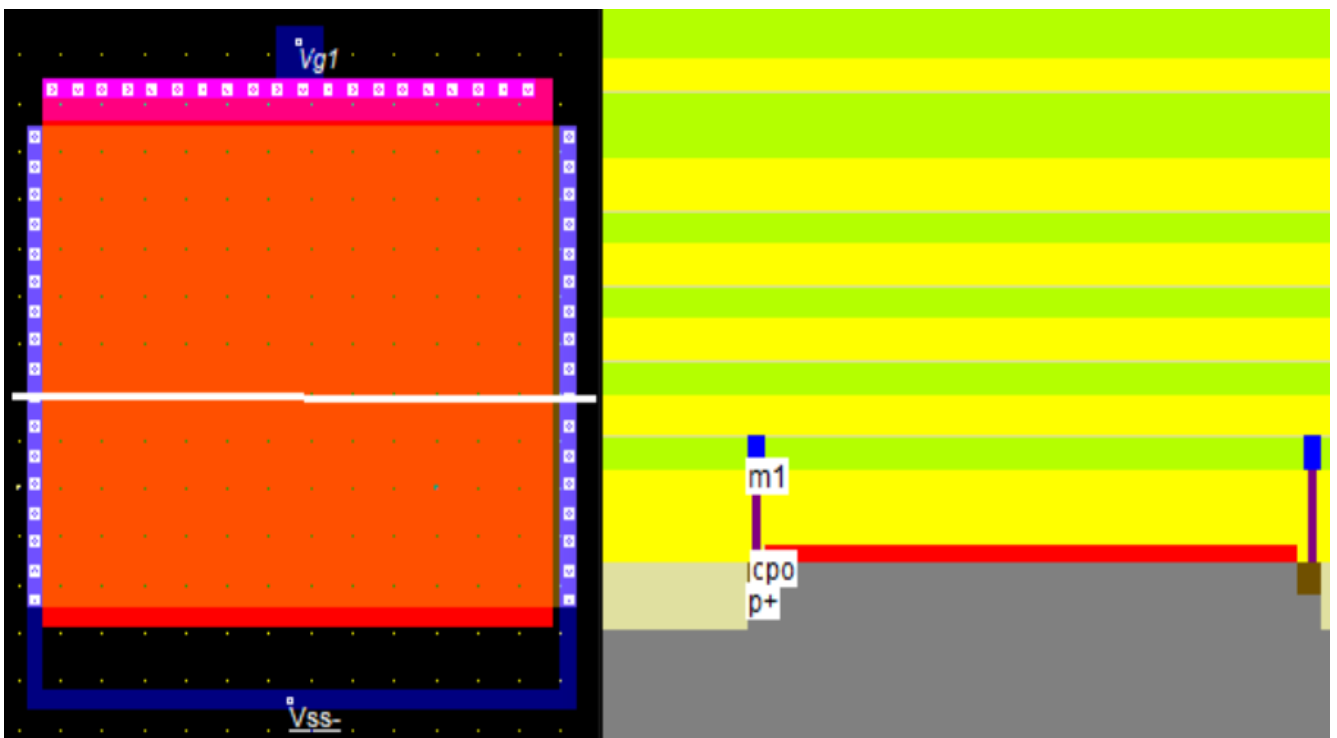


Рис 3.6. Поперечний переріз рМОН конденсатора вздовж осі X3-X3

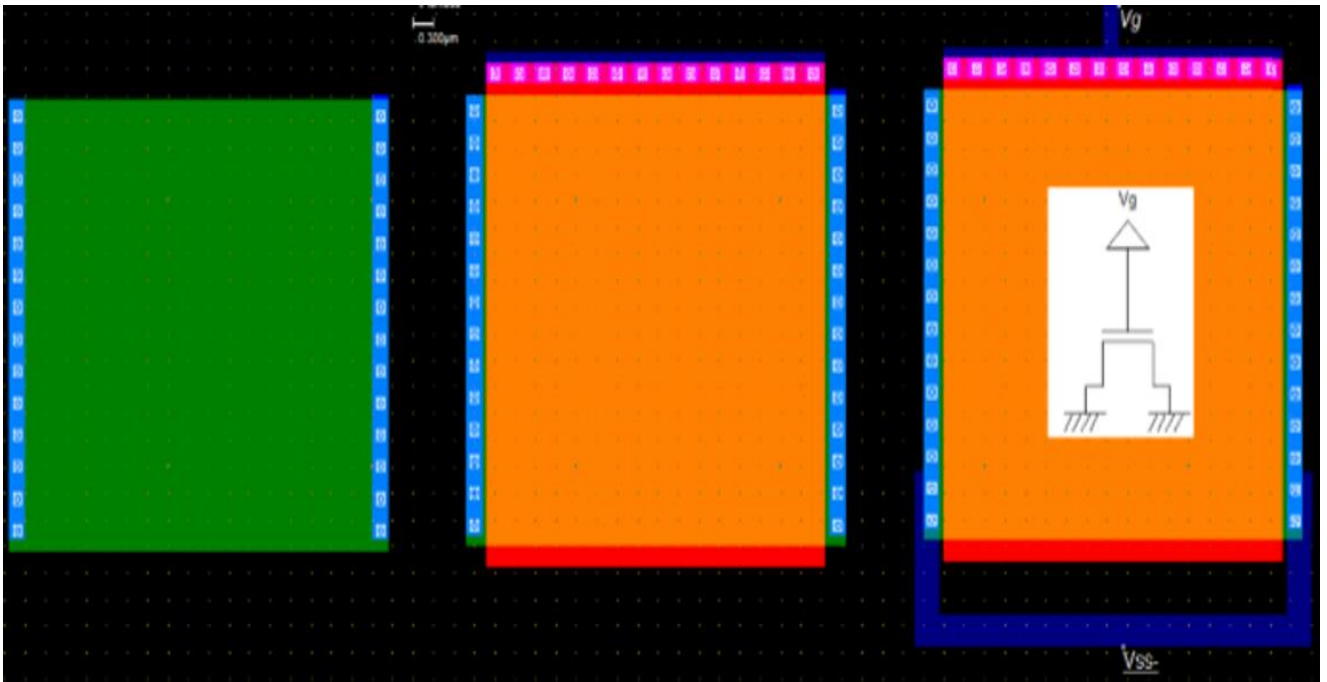


Рис 3.7. Топологія nMOS конденсатора

В аналоговій конструкції затворний конденсатор часто обводиться захисним кільцем. Зазвичай дуже важко інтегрувати конденсатори більше, ніж кілька сотень піко Фарад. Якщо потрібні конденсатори нано-фарад, ці компоненти занадто великі, щоб бути інтегрованими в мікросхему, і вони повинні бути розміщені поза чіпом. Використання надтонких затворів збільшує ємність, проте ризик пошкодження оксидом внаслідок перенапруження значно збільшується [14]. Діелектрична міцність оксиду SiO₂ є критичною. Якщо поле занадто сильне то діелектрик руйнується. Діелектрична міцність $E_{\text{крит}}$ складає від 4 до 10 мВ/см залежно від технології виготовлення. Критична напруга V_{crit} вище якої оксид руйнується апроксимується рівнянням 3.10:

$$V_{\text{crit}} = 0.1 * t_{\text{ox}} * E_{\text{крит}} \quad (3.10)$$

3.3. Конденсатор типу кремній1/кремній2 (poly1/poly2)

Більшість глибоких субмікронних КМОП обробляють другим полікремнієвий пласт (poly2) для побудови плавучих пристроїв. Товщина оксиду ($t_{ox\ pp}$) в 20 нм розміщена між полі- і полі2 матеріалами, ємність що індукує пластинчастий конденсатор приблизно 1,7 fF / мкм². Ємність обчислюється за наступним рівнянням 3.11:

$$C_{poly1poly2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{t_{ox\ pp}} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3.9}{20 \cdot 10^{-8}} = 1.73 \text{ fF/мкм}^2 \quad (3.11)$$

Конденсатор poly1/poly2 складається з аркуша полікремнію1 та аркуша полікремнію2, розділених специфічним діелектричним оксидом, який становить 20 нм у випадку стандартного КМОП 0,12 мкм процесу. Контакти розташовані по обидва боки конденсатора, між полі та металом зліва, між полі2 та металом праворуч. Оксид затвора тут не використовується через низьку напругу пробою [13]. Подвійний оксид (5 нм) також буде страждати від перенапруги, яка може спричинити багато аналогових конструкцій, таких як підсилювачі потужності на радіочастоті. Крім того, товстий оксид зазнає менших змін у процесі, що забезпечує кращий контроль кінцевої ємності. Топологія конденсатора poly / poly показано на (рис. 3.8) переріз конденсатора poly / poly2 показано на (рис. 3.9):

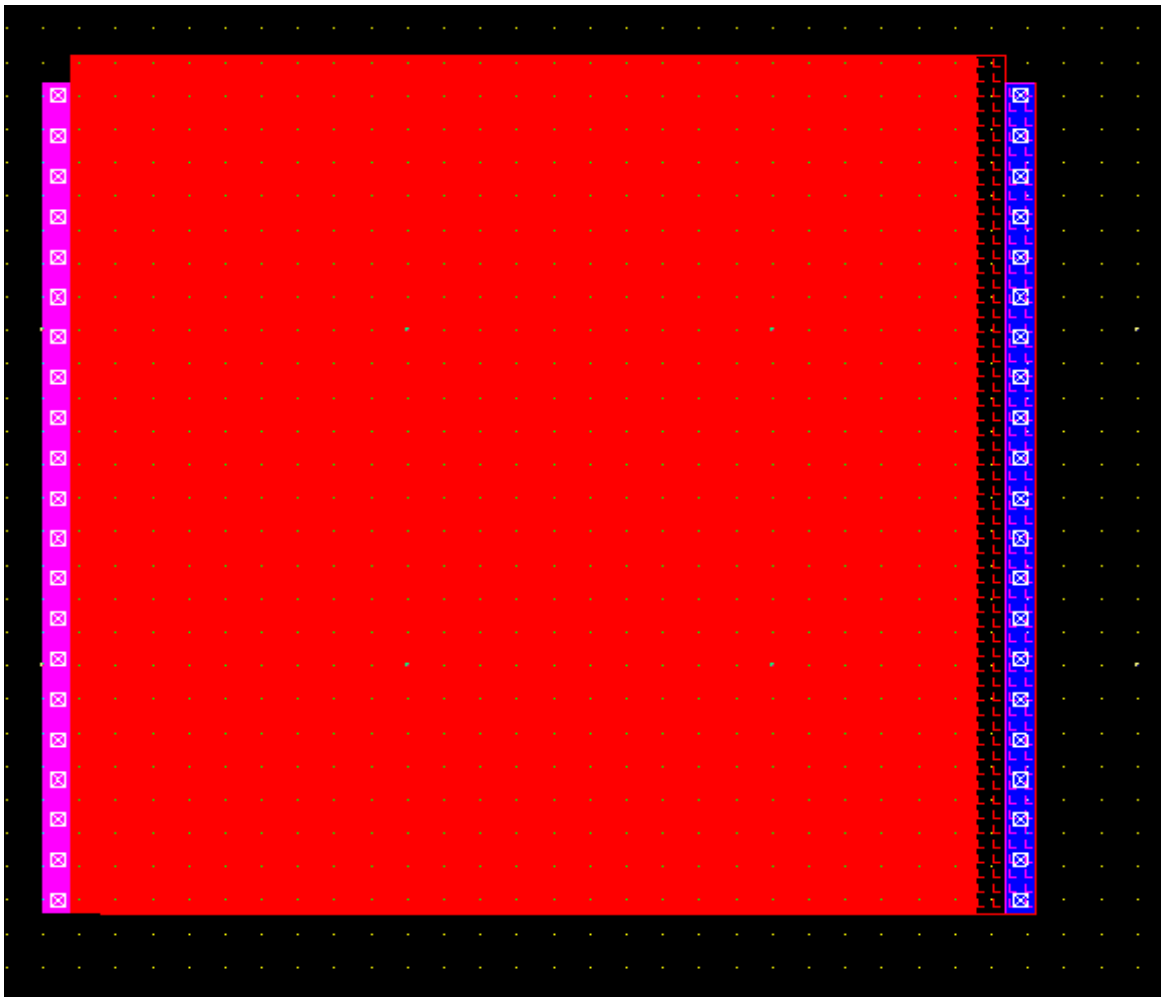


Рис. 3.8. Топологія конденсатора poly / poly

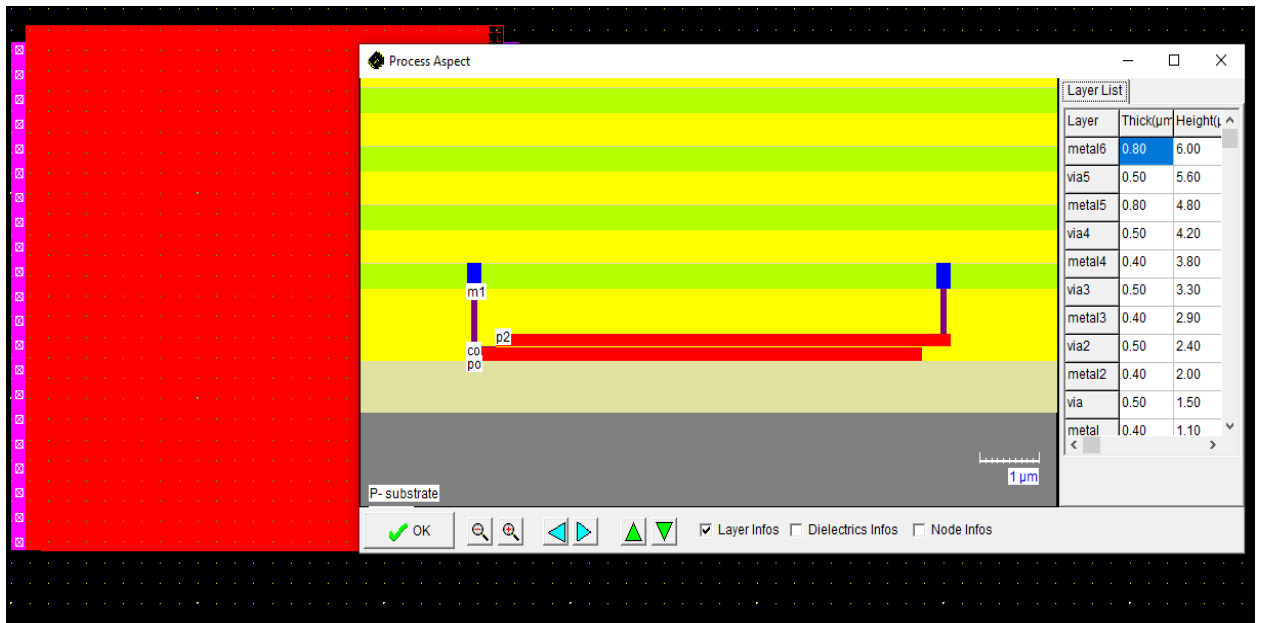


Рис. 3.9. Переріз конденсатора poly / poly2

3.4. Інтер/металевий конденсатор

Складається з великої (до 6) кількості металевих шарів та створює ефект бокової та вертикальної ємності, значення котрих зростає .

Хоч проміжний оксид Інтер/металевого конденсатора має товщину у 10-50 разів більше, ніж зверх тонкого оксиду, вільний кремній що знаходиться у верхніх шарах оксиду може використовуватися для створення малої ємності ,котру можливо використовувати для компенсації та локальної розв'язки .В залежності від бажаної ємності конденсатора MICROWIND обчислює розмір квадратної конструкції, виготовленої з металевих платин [15]. На (рис 3.10) зображено топологію Інтер / металевого конденсатора з шести шарів металу , цей конденсатор ми використовували в топології широкопasmового підсилювача , на (рис. 3.11) показаний переріз Інтер/металевого конденсатора.

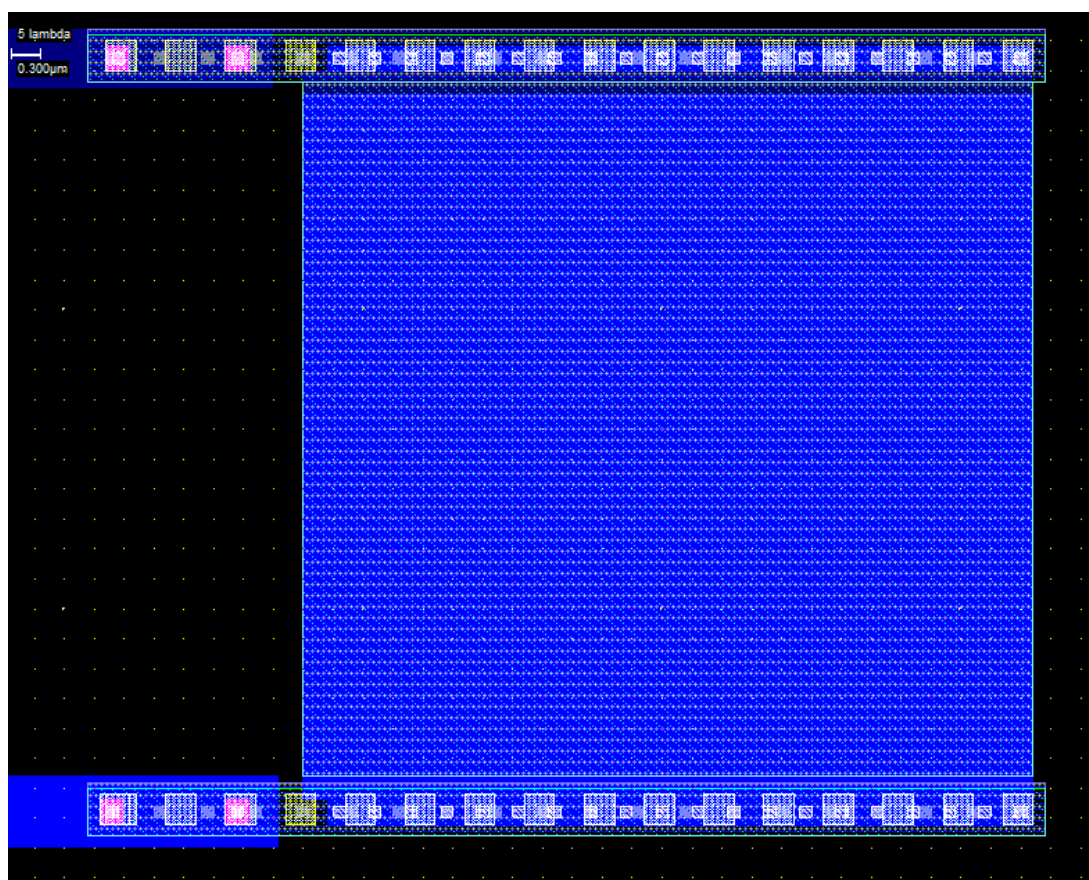


Рис. 3.10. Топологія Інтер / металевого конденсатора

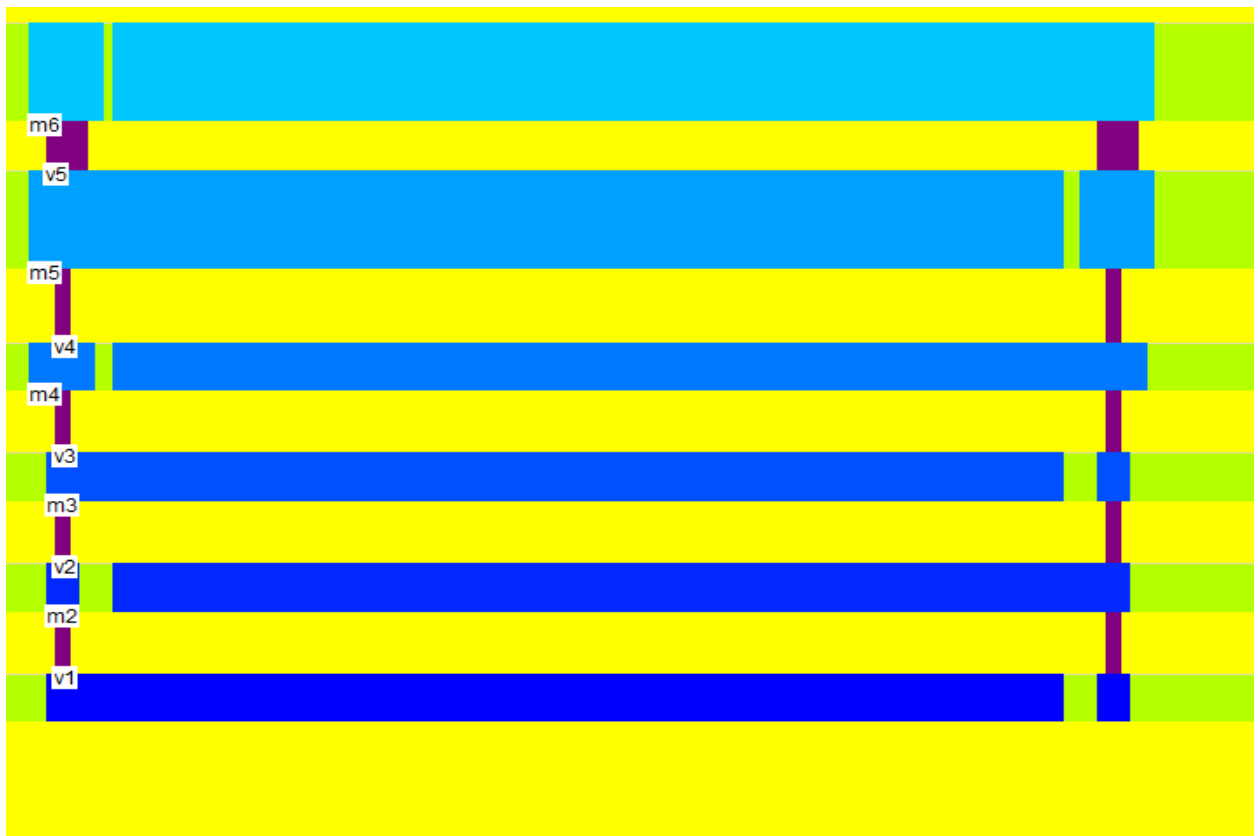


Рис. 3.11. Переріз Інтер/металевого конденсатора

3.5. Топології nМОН і рМОН транзисторів в КМОН технології

В нинішній час широке розповсюдження отримали схеми на базі транзисторів зі структурою метал-оксид-напівпровідник тобто МОН . В кремнієвих схемах роль діелектрика виконує оксид кремнію та структура транзисторів. МОН транзистори з каналом n-типу (nМОН) та p-типу (pМОН) провідності взаємно доповнюють один одного та називаються комплементарними (КМОН), умовне позначення транзисторів приведені на (рис. 3.12, рис. 3.13):

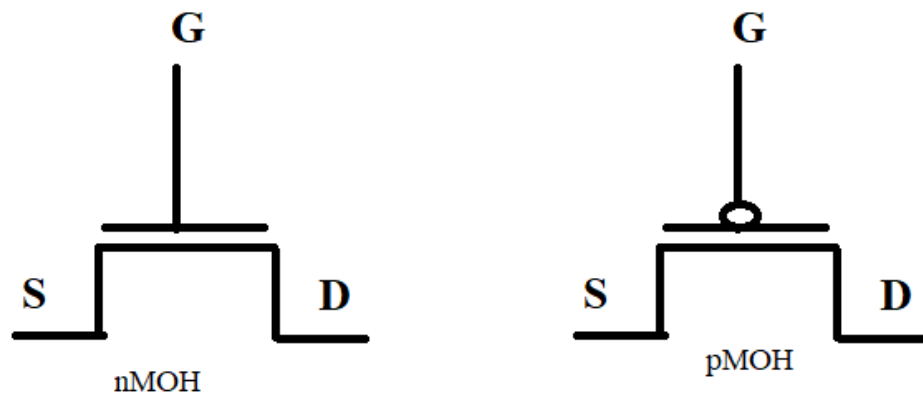


Рис. 3.12. Умовне позначення транзисторів

МОП транзистор можна розглядати як нелінійний резистор котрий керується електричним полем , котре створюється за допомогою спеціального електрода тобто затвора. Робота транзистора може бути пояснена таким чином:

1. при відсутності вхідного керуючого сигналу на , тобто напруга затворі V_G nМОП (pМОП) менша (більша) порогової напруги V_t транзистор закритий , і струм між джерелом та стоком практично відсутній;
2. при подачі вхідної керуючої напруги тобто при додатній ефективній напрузі $V_0 = V_G - V_t > 0$ на затворі в nМОП (від'ємній для pМОП) транзисторі затвор замкнутий тобто проводить струм , а величина току в вихідному ланцюзі між джерелом та стоком залежить від напруги на електродах [16].

Особливості, які слід враховувати при проектуванні топології КМОП-транзистора:

- паразитні опору витоків і стоків повинні бути настільки низькими, наскільки це можливо;
- слід мінімізувати паразитні ємності;
- парні елементи повинні бути максимально узгоджені.

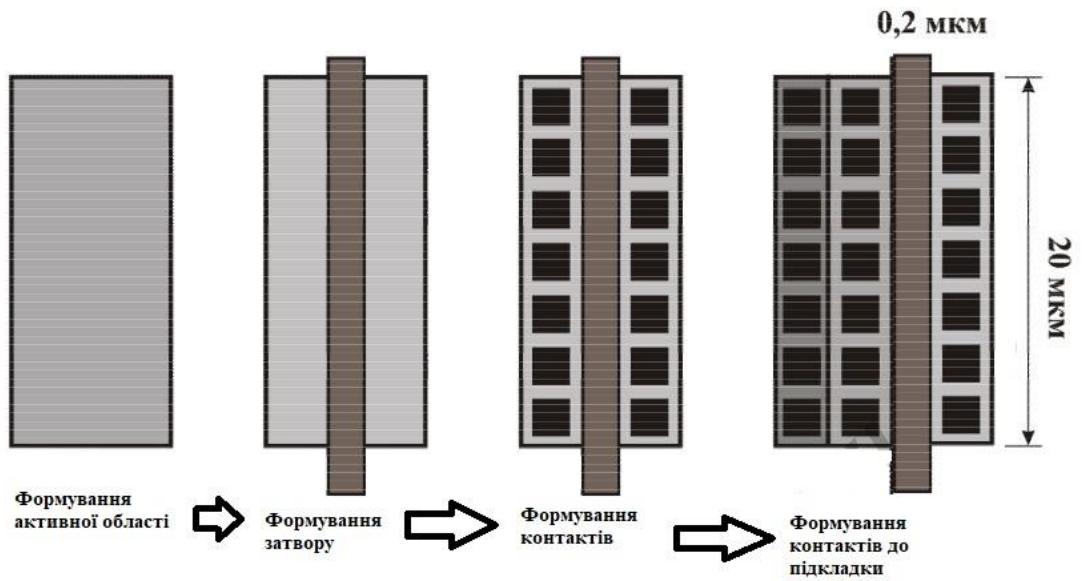


Рис 3.13. Етапи формування топології МОП-транзистора

Транзистори з великою шириною каналу мають високе значення відношення ширини каналу до його довжини. Розробка компактної топології таких транзисторів є неможливою. Топологія транзистора може бути змінена шляхом розбиття його на паралельно з'єднані сегменти (від англ. Fingers - «пальці») [12]. Наприклад, транзистор з шириною каналу 20 мкм і довжиною 0,2 мкм відповідає паралельному з'єднанню чотирьох транзисторів з шириною каналу 5 мкм і довжиною 0,2 мкм ((рис. 3.14):

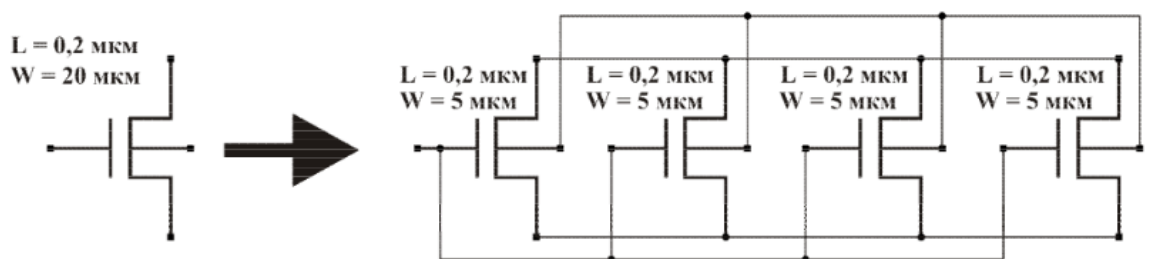


Рис 3.14. Поділ МОП-транзистора на сегменти

Величина порогової напруги, визначається електрофізичними параметрами пристрою, котрі залежать від технології в котрій виготовлений пристрій для технології 0,12 мкм порогова напруга становить 0.4 V. При такій

пороговій напрузі nМОН (рМОН) транзистор надійно закритий при $V_G = 0$ ($V_G = V_{dd}$) та гарно відкритий при напрузі $V_G = V_{dd}/2$.

Вхідний ланцюг відкритого транзистору МОН- транзистору при малих струмах являє собою резистор , величина котрого провідності котрого g_{do} пропорційна ефективній напрузі , тобто транзистор працює в лінійному режимі, провідність визначається за відношенням 3.12:

$$g_{do} = \left(\frac{W}{L}\right) * C_{ox} * \mu * V_0 \quad (3.12)$$

де:

W-ширина затвору

L-довжина затвору

C_{ox} – питома ємність затвору

μ – рухливість носіїв

При підвищенні напруги на стоці струм починає обмежуватися , тобто настає режим насичення, в цьому режимі МОН транзистор можна розглядати як генератор струму I_D величина котрого має квадратичну залежність з ефективною напругою, як за відношенням 3.13 [16]:

$$I_D = \frac{1}{2} * \left(\frac{W}{L}\right) * C_{ox} * \mu * V_0 = \frac{g_m}{2} * V_0^2 \quad (3.13)$$

де:

g_m - крутизна МОН транзистора.

В новітніх МОН транзисторах малою довжиною затвору ($L < 1$ мкм) така залежність має місце бути лише при невеликих величинах V_0 , генератор струму має кінцевим опором котре являє собою вихідний опір МОН транзистору r_d . Воно обернено пропорційне струму та квадрату ефективної напруги V_0 .

З формул 3.12. та 3.13 виходить що обох режимах : лінійному та режимі насичення - транзисторний струм має пропорцію з $(W/L)*\mu$. Це надає змогу мати nМОН і рМОН транзистори з однаковими Вольт амперними характеристиками (ВАХ) , так як рухливість електронів та дірок можливо компенсувати вибором геометричних розмірів затворів . На (рис. 3.15 та рис.3.16) приведені топології nМОН і рМОН транзисторів котрі ми використовували диференційному підсилювачі потужності:

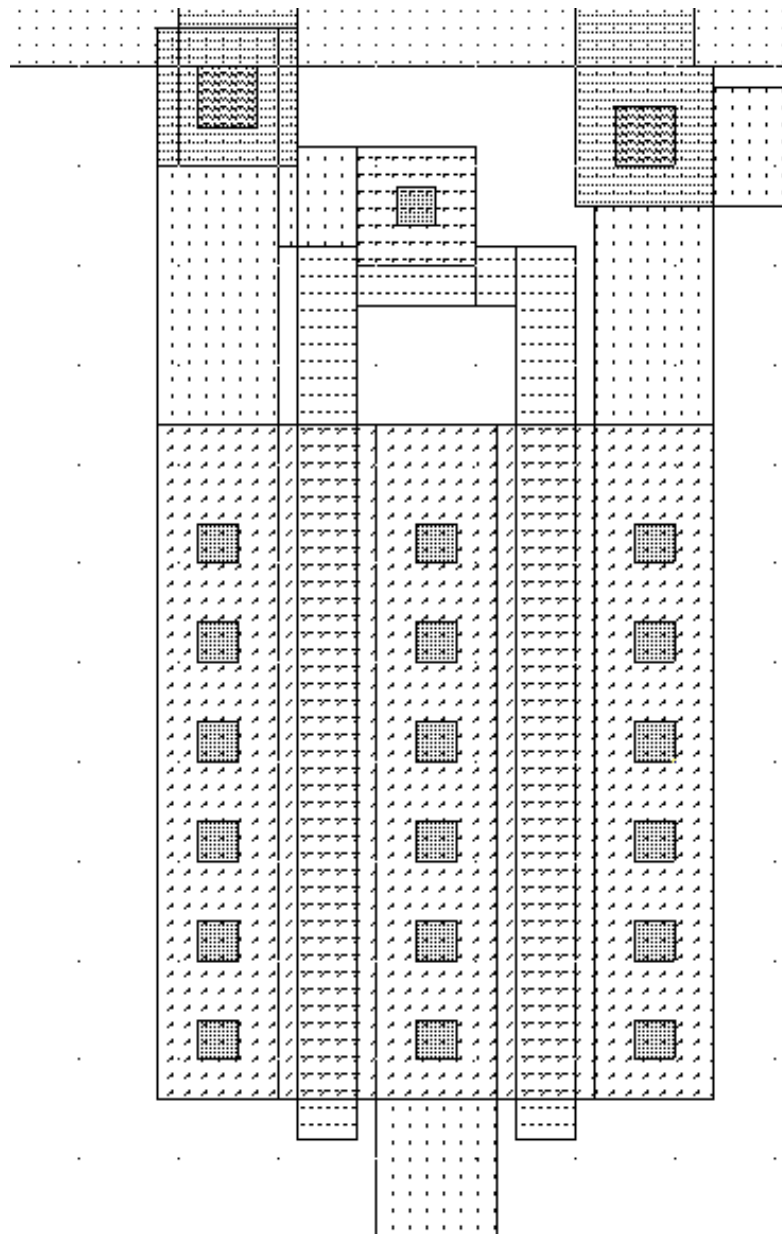


Рис 3.15. (а) Топологія nМОН транзистора

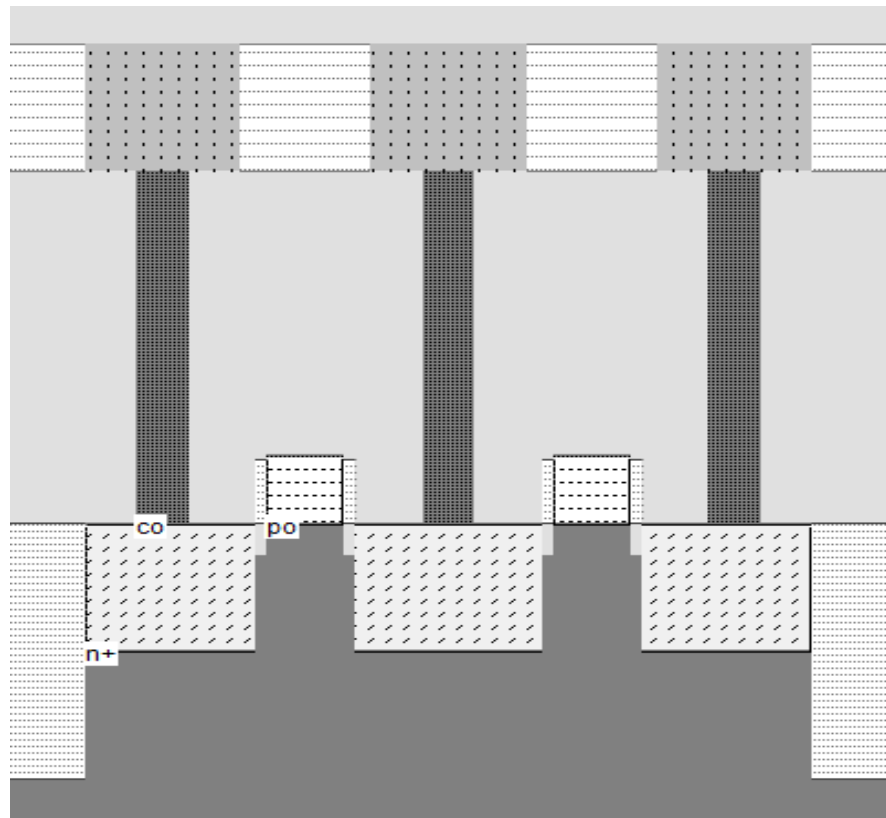


Рис 3.16. Переріз nMOH транзистора

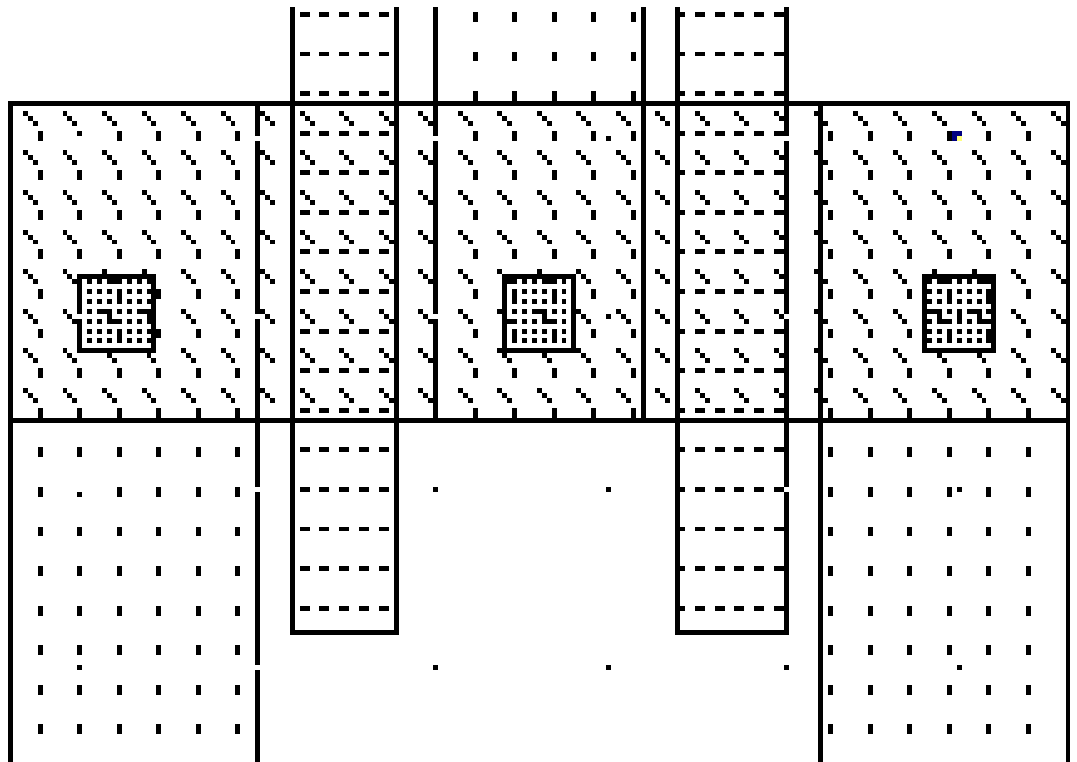


Рис 3.15. (b) Топологія pMOH транзистора

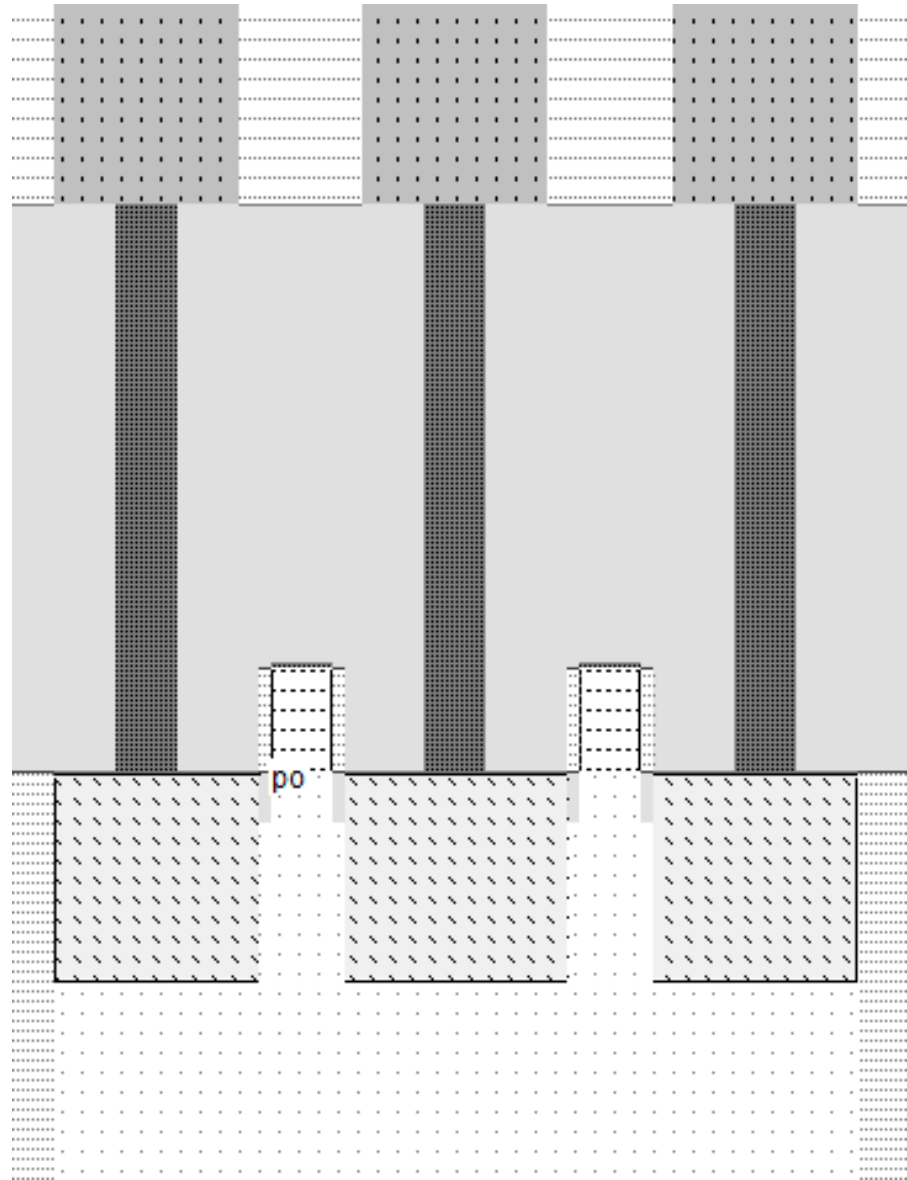


Рис 3.16. Переріз рМОН транзистора

На (рис. 3.16) приведена топологія рМОН транзистора, їх називають багато-затворною, в такій топології транзистор має декілька затворів котрі з'єднані разом, це дозволяє оптимально реалізувати пристрої з широкими каналами. Різновидами багато-затворних транзисторів є звернутий та гребінчастий [17].

МОН транзистор топологія приведена на (рис. 3.15) відноситься до звернутого типу. Звернутий тип має два затвору що дає можливість при заданій ширині каналу, зменшити активну область в два рази. Це суттєво зменшує площу джерела/стоку що зменшує паразитну ємності затвору котрі

обумовлені площею. Також при це зменшує площу усього пристрою , а також знижує опір затвору. Але ємності джерела та стоку обумовлені їх периметром збільшуються.

Гребінчастий МОН транзистор використовують при дуже широких каналах. Вони мають не тільки кращі ємнісні та резистивні характеристики, але і більш кращу форму, ніж МОН транзистори з одним затвором, це дозволяє розміщувати їх на напівпровідниковій підкладці більш компактніше. Топологія гребінчастого транзистора показана на (рис 3.17):

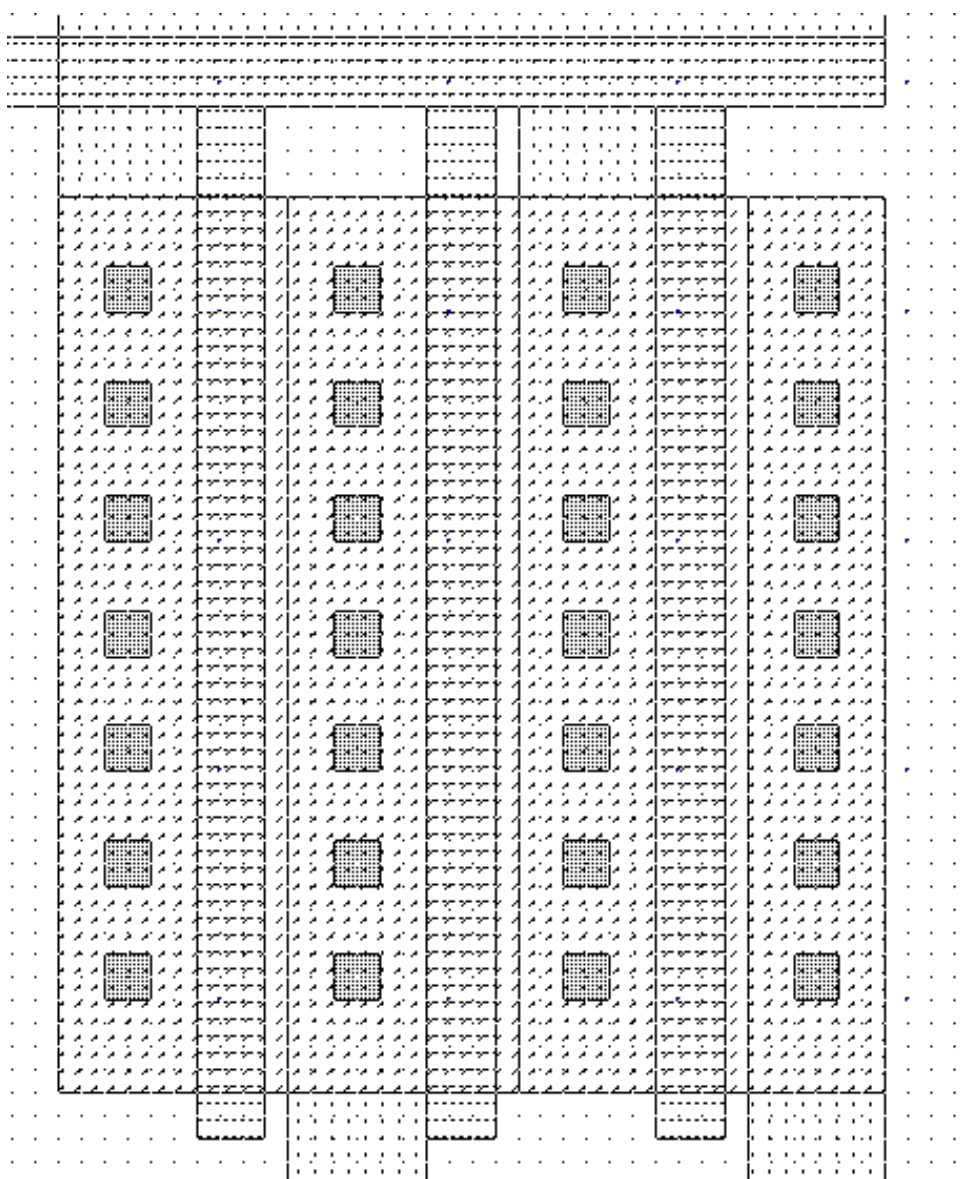


Рис 3.17. Гребінчастий МОН транзистор

РОЗДІЛ 4: АНАЛІЗ СХЕМИ ШИРОКОСМУГОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА

4.1. Вступ

В цьому розділі буде розглянуто принцип роботи таких частин широкосмугового підсилювача як дільник напруги на МОН транзисторах, також буде розглянуто схему та принцип роботи диференціального підсилювача й у кінці цього розділу буде пояснений принцип роботи схеми широкосмугового підсилювача

4.2. Дільник напруги на КМОН транзисторах

Дільник напруги на МОН транзисторах використовує діодне підключення транзисторів . Основна ідея такого підключення це створити постійний контакт між стоком та затвором , в більшості випадків джерело n-канального МОН підключається до V_{ss} , а джерело p-канального МОН V_{dd} . Ця конструкція дозволяє отримати високий опір на малій площі кремнію тобто при діодному підключенні транзистори виконують функцію резисторів але займають менше площі .

Дільник напруги часто використовується для задання опорної напруги (V_{ref}) наш випадок не був виключенням , конструкція дільника напруги приведенного на (рис. 4.1) складається з pМОН транзистора з діодним включенням , джерело котрого підключене до V_{dd} та nМОН транзистора з діодним включенням , джерело котрого підключене до V_{ss} , при напрузі $V_{GS} > V_{th}$ транзистори відкриваються та мають великий опір , при напрузі V_{DS} більший за 0.6 V їх опір стає сталим [18]. Вихідна напруга такого дільника залежить від відношення опорів на pМОН і nМОН транзисторах та обчислюється за формулою 4.1 .

$$V_{ref} = \frac{R_n}{R_p + R_n} * V_{dd} \quad (4.1)$$

де:

R_n - опір транзистору nМОН ,

R_p - опір транзистору рМОН.

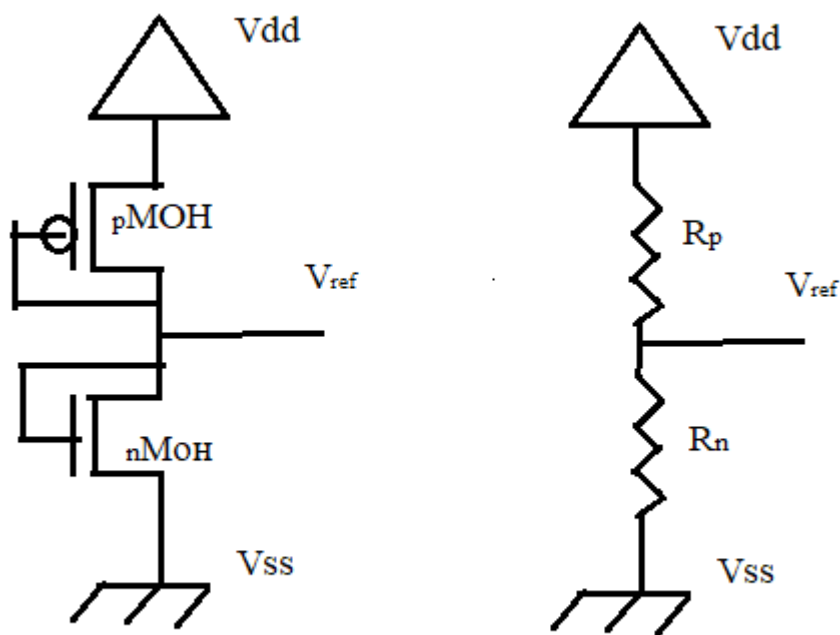


Рис.4.1. Схема дільника напруги рМОН і nМОН транзисторах та еквівалентна схема .

Значення опору на транзисторах має бути достатньо високим щоб підтримувати низький струм короткого замикання та уникати втрат потужності , головною ідеєю є використання МОН транзисторів замість кремнієвого чи дифузійного резистору , щоб економити площу кристалу . Через низьку рухливість носіїв в рМОН транзисторі його опір буде вищим ніж опір nМОН транзистора з однаковими розмірами затвору. Через це при проектуванні топології дільника напруги потрібне точне налаштування

розмірів затвору МОН транзисторів. Вирахувати значення вихідної напруги (V_{ref}) доволі складно так як каналам транзисторів властива висока нелінійність рівняння для вихідної напруги 3.15 [18]:

$$V_{ref} = \frac{V_{dd} - V_{tp} + \sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p} * V_{tn}}}{\sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p} + 1}} = \frac{1.2 - 0.45 + \sqrt{\frac{480}{4250} * 0.4}}{\sqrt{\frac{480}{4250} + 1}} = 0.718 \text{ V} \quad (4.2)$$

$$\beta_n = \mu_n \frac{W_n}{L_n} = 600 * \frac{0.240}{0.300} = 480$$

$$\beta_p = \mu_p \frac{W_p}{L_p} = 250 * \frac{2.040}{0.120} = 4250$$

де:

μ_p = мобільність комірок(отворів)(250 см²/V*S)

μ_n = мобільність електронів (600 см²/V*S).

4.3. Схема КМОН диференціального підсилювача

Диференційний підсилювач є одним з найбільш універсальних та розповсюджених типів підсилювачів. Він має два симетричних входи та його функціональне призначення це підсилення різниці сигналів. Сума вхідних сигналів тобто синфазна складова не повинна мати впливу на вихідний сигнал диференційного підсилювача. Вона має бути ослаблена на практиці.

До диференційного підсилювача ставлять нестандартні умови наряду зі звичайними. До нестандартних характеристик відносять:

- коефіцієнт підсилення за диференціальною складовою;
- коефіцієнт підсилення синфазної складової;

- коефіцієнт зменшення синфазної складової, тобто відношення коефіцієнта підсилення диференційної складової до коефіцієнту синфазної складової;
- діапазон синфазного сигналу на вході - це границі синфазного сигналу в яких підсилювач забезпечує таке підсилення яке було задано;
- зміщення нулю це відношення вихідної напруги до коефіцієнту підсилення диференційної складової, при однаковому сигналі поданому на обидва входи.

Отже основною частиною диференційного підсилювача є диференційна пара котра представляє собою пару узгоджених МОН транзисторів під'єднаних джерелами до генератору току зміщення чи джерела живлення Vdd [19].

У диференційної пари на базі n-МОН транзисторів карман знаходиться під нульовим потенціалом, при цьому додатній потенціал джерела збільшує порогову напругу V_{thn} . У диференційної пари виконаної на рМОН (рис. 4.2) транзисторах є можливість під'єднати карман до джерела та порогова напруга в такому разі буде дорівнювати V_{tp} :

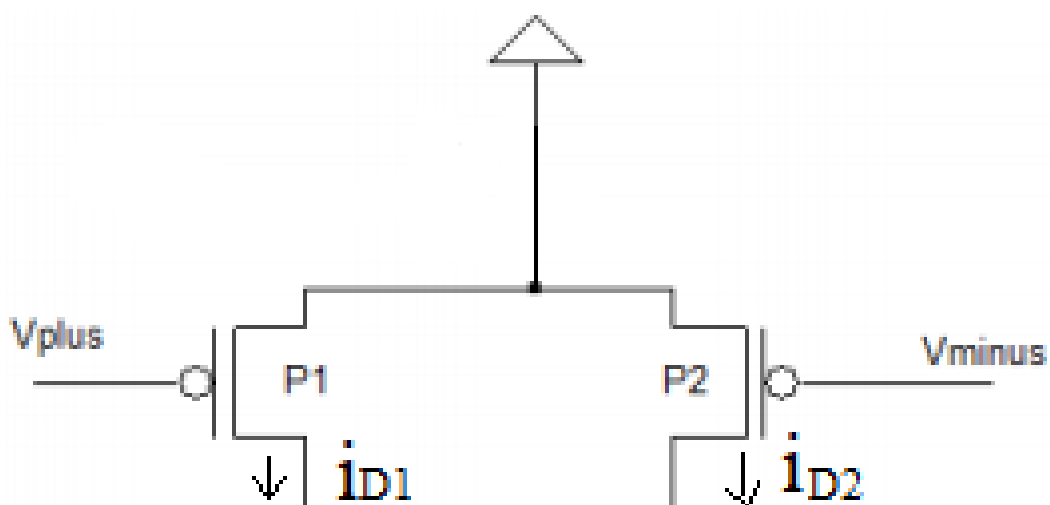


Рис 4.2 . Диференційна пара виконана на рМОН транзисторах

Струм зміщення I_{ss} ділиться на струми i_{D2} та i_{D1} транзисторів $P_2 P_1$.

$$I_{ss} = i_{D2} + i_{D1} \quad (4.3)$$

Різниця вхідних напруг V_{DI} зв'язана з різницею напруг затвор-джерело

$$V_{DI} = V_{I1} - V_{I2} = V_{gs1} - V_{gs2} \quad (4.4)$$

При однакових потенціалах на затворах зміщення транзисторів i_{D2} та i_{D1} рівні

$$i_{D2} = i_{D1} = \frac{I_{ss}}{2} \quad (4.5)$$

В силу ВАХ МОН транзистору

$$I_D = \frac{\beta}{2} * (V_{gs} - V_{thp})^2 \quad (4.6)$$

Різниця вхідних напруг зв'язана зі струмами відношенням

$$V_{DI} = \sqrt{\frac{2}{\beta}} * (\sqrt{i_{d1}} - \sqrt{i_{d2}}) \quad (4.7)$$

Звідси з урахуванням формули 4.7 маємо формули котрі визначають залежність вихідного струму диференційної пари від різниці напруги на входах

$$I_{D1} = \frac{I_{ss}}{2} \left| 1 + \sqrt{\left(\frac{\beta V_{DI}^2}{I_{ss}} - \frac{\beta^2 V_{DI}^4}{4I_{ss}^2} \right)} \right| \quad (4.8)$$

$$I_{D2} = \frac{I_{ss}}{2} \left| 1 - \sqrt{\left(\frac{\beta V_{DI}^2}{I_{ss}} - \frac{\beta^2 V_{DI}^4}{4I_{ss}^2} \right)} \right| \quad (4.9)$$

З отриманих формул (4.8) та (4.9) виходить що є наявність протяжної лінійної області передавальної ВАХ диференційної пари, формули справедливі лише у діапазоні $V_{DI\max} - V_{DI\min}$.

$$V_{DI\max} = V_{I1} - V_{I2} = \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\beta}} \quad (4.10)$$

$$V_{DI\min} = -\sqrt{\frac{2I_{SS}}{\beta}}$$

Крутизна диференційної пари G_m визначається середній нахил передавальної ВАХ в діапазоні $V_{DI\max} - V_{DI\min}$.

$$G_m = \frac{di_{DI}}{dv_{DI}} = \frac{I_{SS}}{2\sqrt{2I_{SS}/\beta}} = \frac{\sqrt{2\beta}I_{SS}}{4} = \frac{g_m}{4} \quad (4.11)$$

де:

g_m - крутизна МОН транзистора.

Навантаження диференційної пари: в якості навантаження диференційної пари можна використовувати різні комбінації МОН транзисторів: активне навантаження – МОН з діодним підключенням, токовим дзеркалом. Використання токового дзеркала в ролі навантаження дозволяє віддавати до вихідного ланцюгу повний вихідний струм та передбачає один несиметричний вихід.

РОЗДІЛ 5: КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ШИРОКОСМУГОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА

5.1. Вступ

Підсилювачі потужності є одними з найбільш енергоємних будівельних блоків в радіочастотному трансивері. Великі рівні струму та висока швидкість наростання напруги є основними причинами труднощів зв'язаних з проектуванням і особливо пакуванням цих компонентів (екранування). Паразитні опори в декілька Ом можуть та індуктивності в декілька піко Генрі можуть призвести до значних втрат ефективності та рівня підсилення, особливо цей ефект помітний при роботі підсилювача на високих частотах. Через ці причини більшість проблем компоновки та екранування, котрі зазвичай не такі важливі при проектуванні топологій інших аналогових и радіочастотних схем, становляться критично важливими .

Цей розділ буде присвячено проектуванню топології широкосмугового підсилювача по струму та моделюванню його характеристик, також і цьому розділі буде розглянуто етапи проектування його складових частин а саме - дільника напруги на МОН транзисторах, диференційного підсилювача, та конденсатору котрий утворює RC фільтр, також буде розглянуто проблеми використання фіктивних елементів .

5.2. Проектування топології КМОН дільника напруги

Дільник напруги на КМОН транзисторах несе на собі функцію джерела постійної напруги для підтримки затвору Р-канального транзистору на генераторі струму завжди відкритим. Принцип роботи дільника напруги на МОН транзисторах нічим не відрізняється від дільника напруги на звичайних транзисторах, перевагою дільника напруги на транзисторах над дільником

напруги на резисторах є його малі розміри (площа на кристалі) відносно дільника з використання кремнієвих чи дифузійних резисторів, використання транзисторів з діодним підключенням дозволяє отримати великий опір на маленькій площі. В нашому випадку використовувались P та N- канальні МОН транзистори для цих цілей.

Напруга на дільнику становить 0.72 Вольта і забезпечує роботу P-канального транзистору з завжди відкритим затвором. Так як дільник напруги не має ніякого впливу на роботу підсилювача крім задання режиму роботи генератору струма, то для економії площі на кристалі при його проектування використовувалося лише екранування як зображено на (рис.5.1).

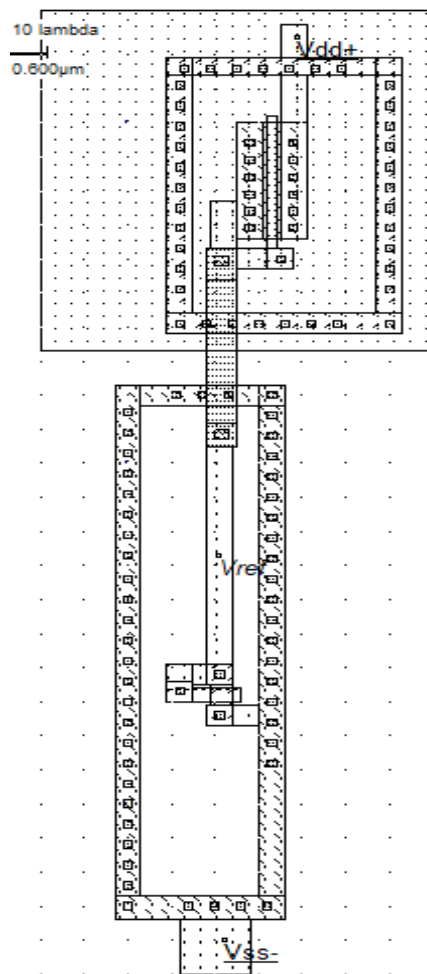


Рис.5.1. Топології КМОН дільника напруги

5.3. Проектування топології диференціального підсилювача

Так як диференційний підсилювач виконує роль керування вихідним каскадом підсилювача, тобто керує його активним навантаженням і на один з його входів приходить сигнал оборотного зв'язку його характеристики на рахунок зміщення, нелінійних викривлень та ефектів другого порядку мають дуже сильний вплив на роботу підсилювача в цілому. Щоб зменшити ці негативні характеристики було прийнято ряд мір при проектуванні топології диференційного каскаду підсилювача. Щоб зменшити нелінійні викривлення та ефекти другого порядку було використано канали більшої довжини, як показано на (рис.5.2). При виготовленні пристроїв на кристалі, в число котрих входить і цей підсилювач, крайні частини його елементів можуть мати дефекти, щоб цього уникнути використовують фіктивні елементи як показано на (рис.5.3). Також використання цих елементів зменшує вплив електромагнітного поля на транзистор, якщо елемент під'єднати до екранування, але в такому разі фіктивний елемент потрібно розміщувати не поряд, а на дифузії транзистору, що негативно впливає на його ємність, особливо при великих частотах.

Так як в диференційному підсилювачі транзистори в диференційної парі та активному навантаженні мають мати бути однакові та мати однакові характеристики на всьому частотному діапазоні роботи підсилювача, то ми прийняли такі міри при проектуванні його топології як:

- екранування;
- фіктивні елементи;
- велику довжину каналу транзистору, як показано на (рис.5.4).

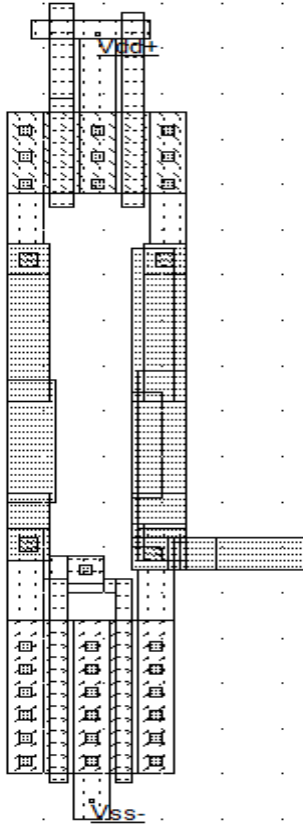


Рис.5.2. Топологія диференційного підсилювача зі збільшеною довжиною каналу транзистору

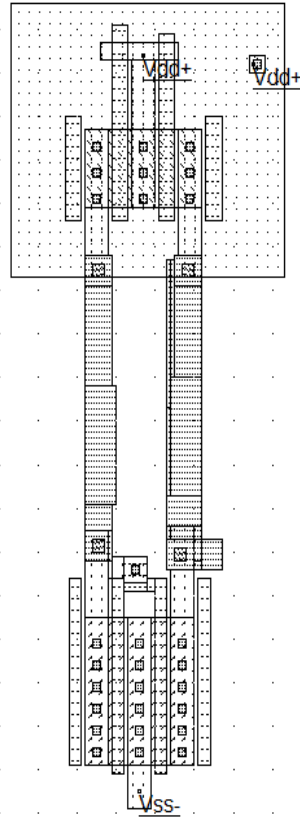


Рис.5.3. Топологія диференційного підсилювача з використанням фіктивних елементів

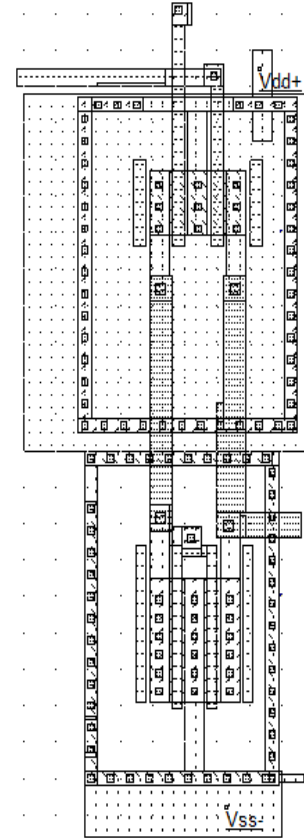


Рис.5.4. Фінальна топологія диференційного підсилювача

5.4. Проектування топології конденсатора

Цей тип конденсатора відноситься до плоских конденсаторів. Конструкція конденсатора представлена тонкими металевими пластинами, з'єднаними особливим чином, як показано на (рис.5.5). Ми можемо поліпшити питому ємність конденсатору, подивившись формулу для визначення ємності тонких конденсаторів.

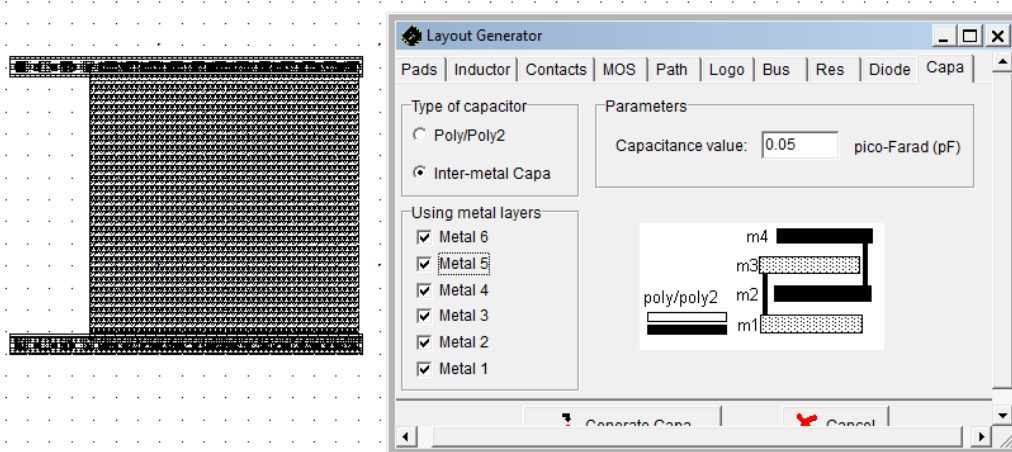


Рис.5.5.Топологія інтер-металевого конденсатору

$$C = \frac{A}{d} \quad (5.1.)$$

де:

A - площа металевих пластин,

d - відстань між ними.

Тобто нам потрібно збільшити площу металевих пластин або зменшити відстань між ними, щоб отримати велику ємність на конденсаторі. Зменшити товщину оксиду незважаючи на те що товщина оксиду в між металевому

конденсаторі більша у 20 разів, ніж у МОН конденсатора в КМОН технології неможливо для цього типу конденсаторів, але його ємність можна збільшити не збільшуючи його розміри використовуючи більше шарів металу. В нашій топології ми так і зробили переріз топології металевого конденсатора показаний на (рис.5.6).

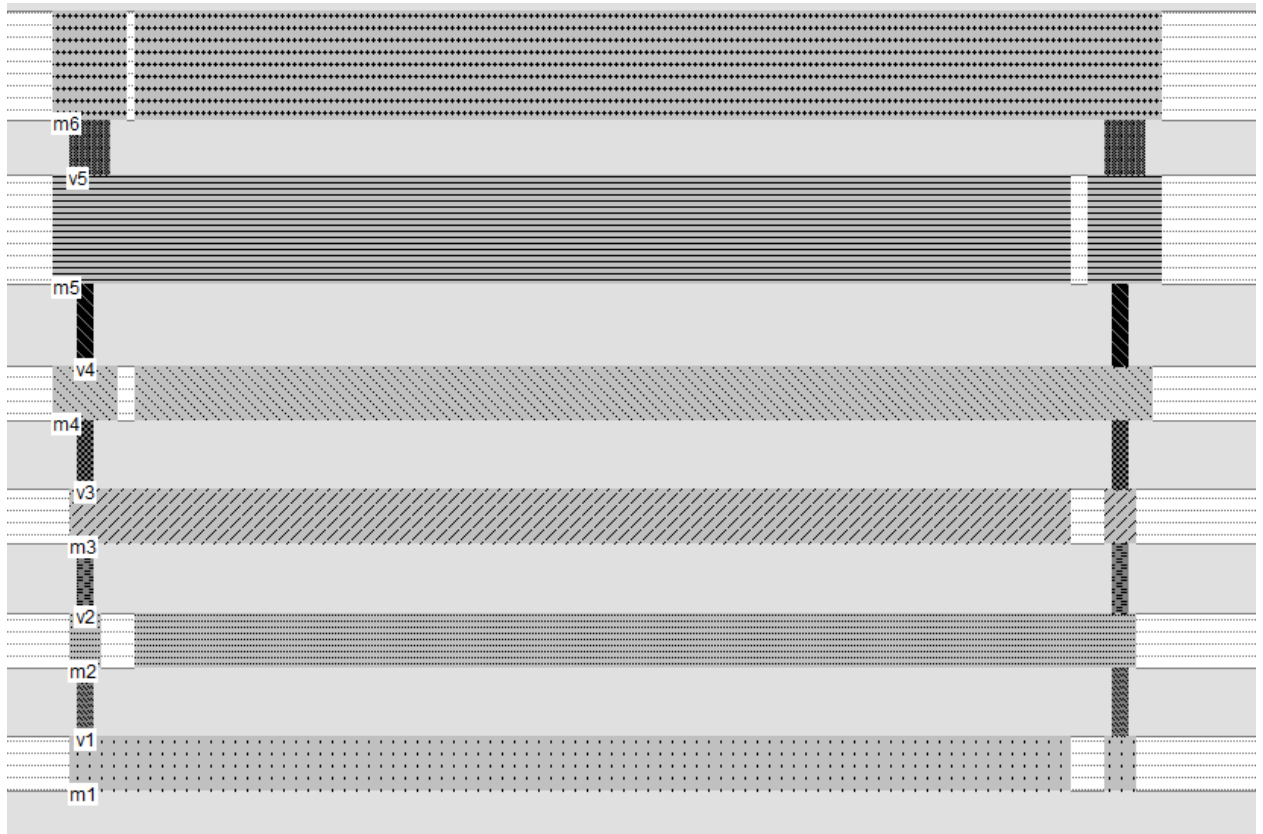


Рис.5.6. Переріз топології металевого конденсатора

5.5. Топологія широкопasmового підсилювача

На (рис.5.7) зображено топологію широкопasmового підсилювача потужності з низьким рівнем шуму. Його основні елементи це компаратор напруги представлений у вигляді диференційної пари та вихідний каскад утворений генератором струму. Як ми можемо бачити, диференційний підсилювач керує активним навантаженням.

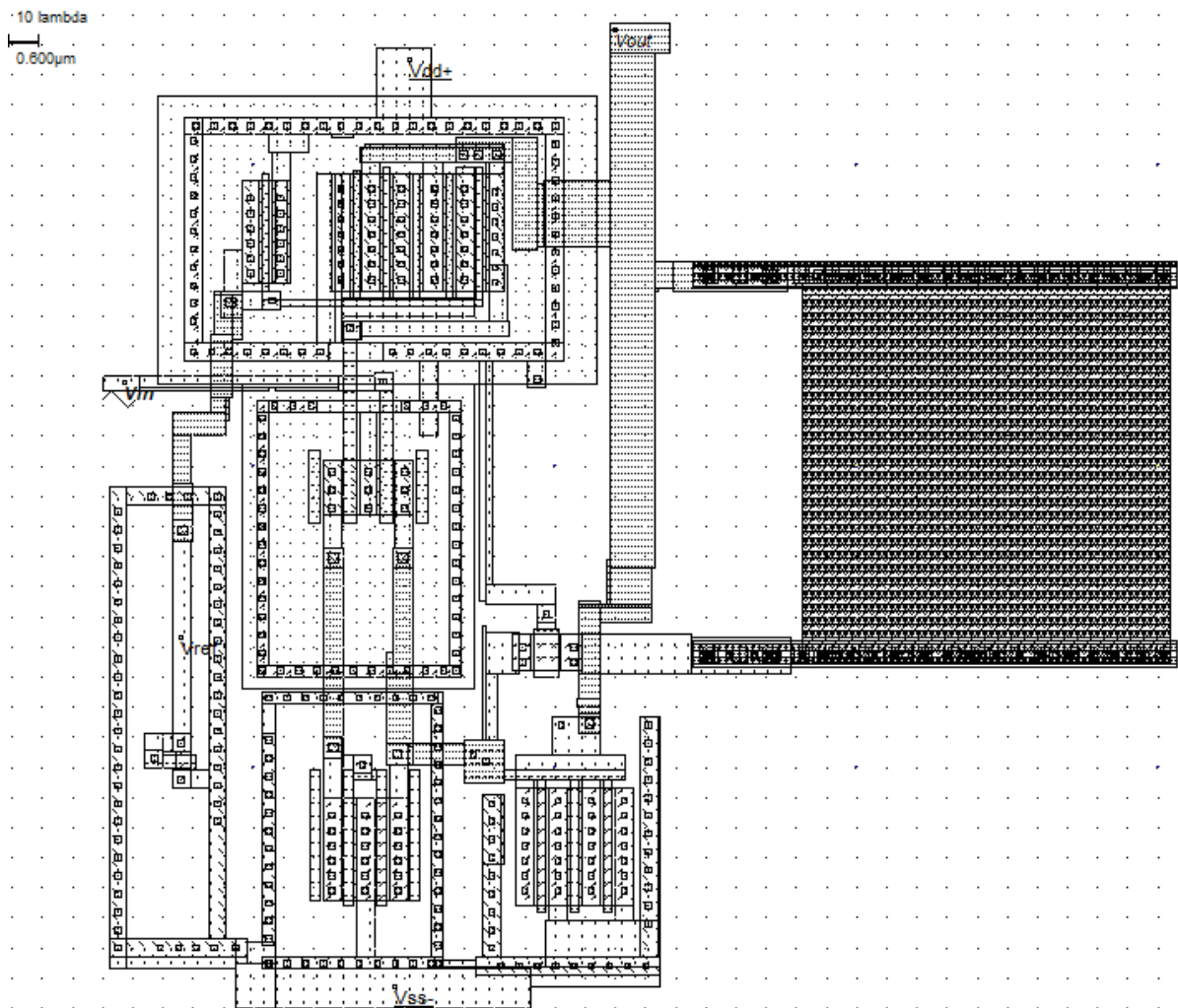


Рис.5.7.Топологія широкосмугового підсилювача

5.6. Моделювання топології широкосмугового підсилювача

Також диференційний підсилювач відповідає за зворотній зв'язок, бо його другим входом керує напруга з транзистора, котрий виконує роль генератору струму, так як на обох входах подається синфазний сигнал диференційний підсилювач послаблює синфазний сигнал, і вже ця синусоїдальна напруга керує активним навантаженням генератором струму звідси і виходить посилення за струмом, а не напругою. Металічний конденсатор та транзистор між конденсатором та виходом диференціального підсилювача утворюють RC фільтр, транзистор спеціально дуло спроектовано з великою довжиною та малою шириною для збільшення його опору.

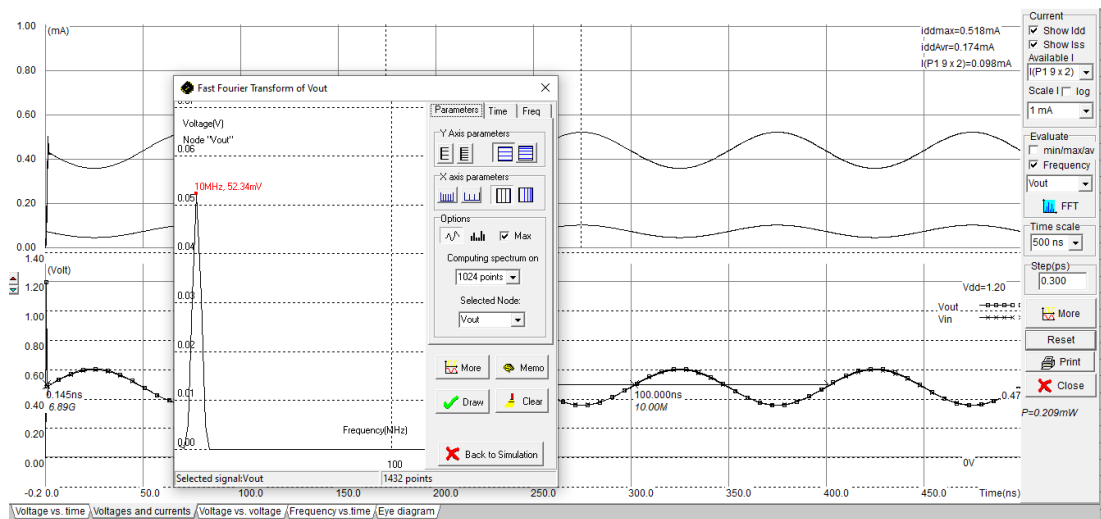


Рис.5.8. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 10 МГц на якій змодельований

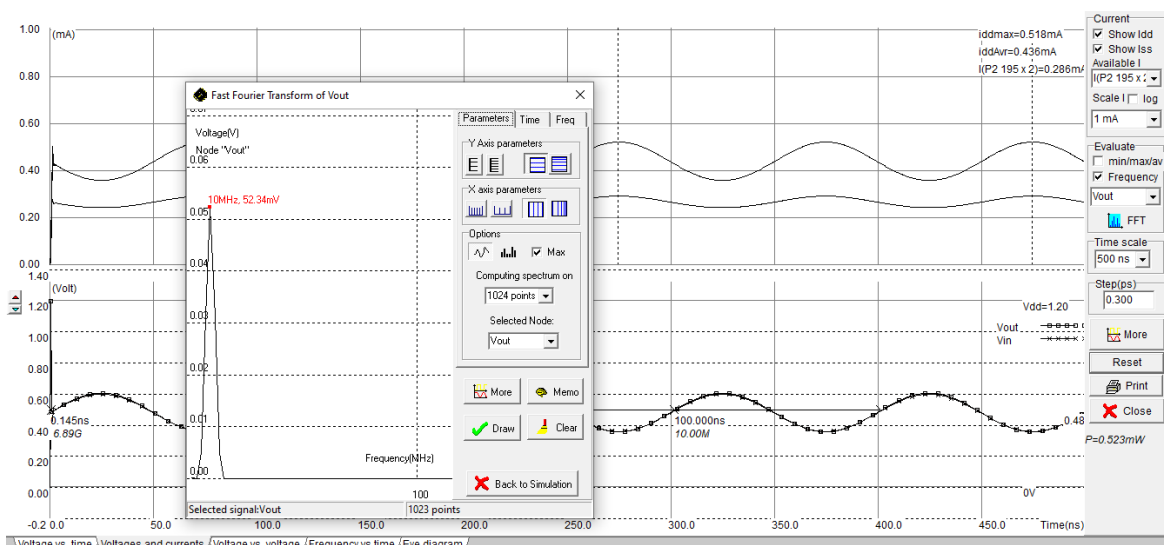


Рис.5.9. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 10 МГц на якій змодельований вихідний струм ,напруга та ФТТ

Так як в нас підсилювач має коефіцієнт підсилення за напругою $K_V=1$, то підсилення потужності залежить від підсилення струму (рис.5.8-15):

$$K_I = \frac{I_{out}}{I_{input}} = \frac{0.286}{0.098} = 2.918 \quad (5.2.)$$

$$P_{eff} = I_{out} * V_{out} = 0.48 * 0.000286 = 0.13728 \text{ mW}$$

Коефіцієнт корисної дії η дорівнює:

$$\eta = \frac{P_{eff}}{P_{use}} = \frac{0.13728}{0.531} = 0.258531 \text{ чи } 25.8 \% \quad (5.3.)$$

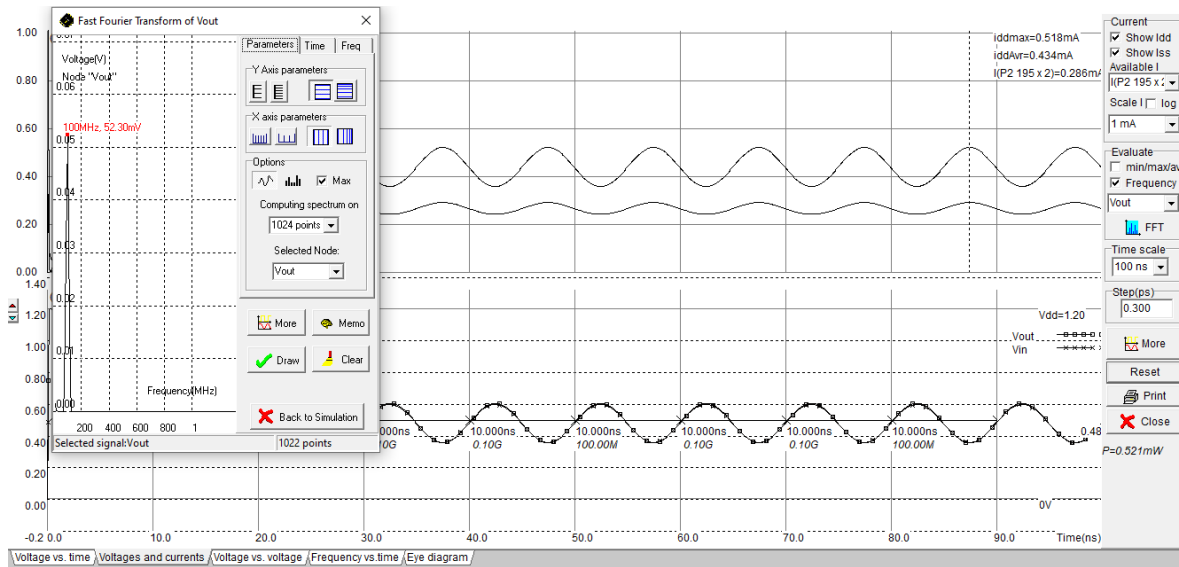


Рис.5.10. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 100 MHz

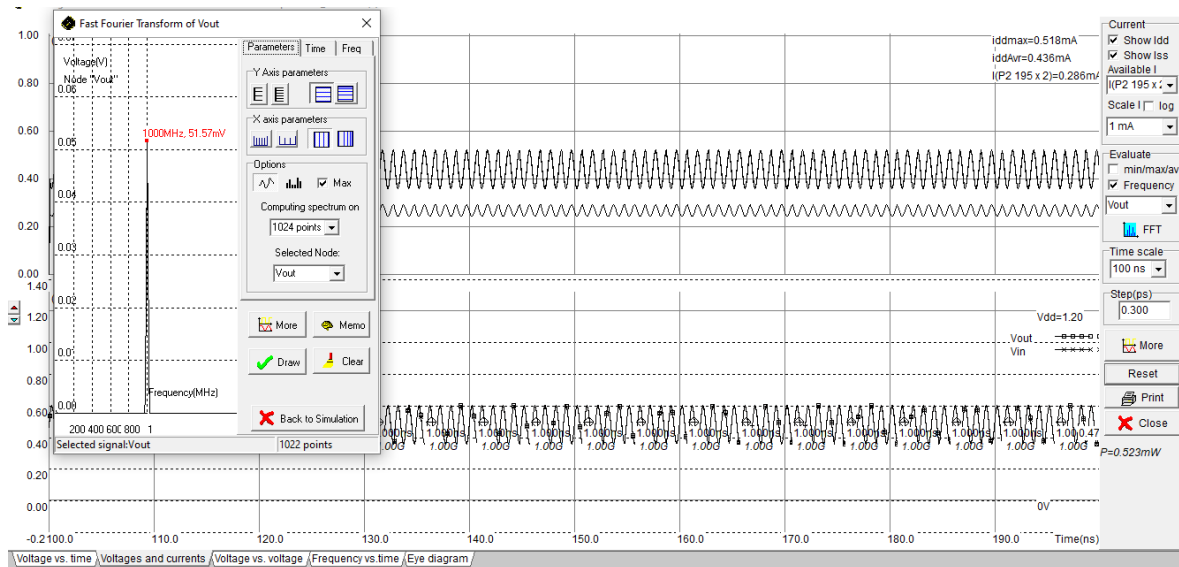


Рис.5.11. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 1000 MHz

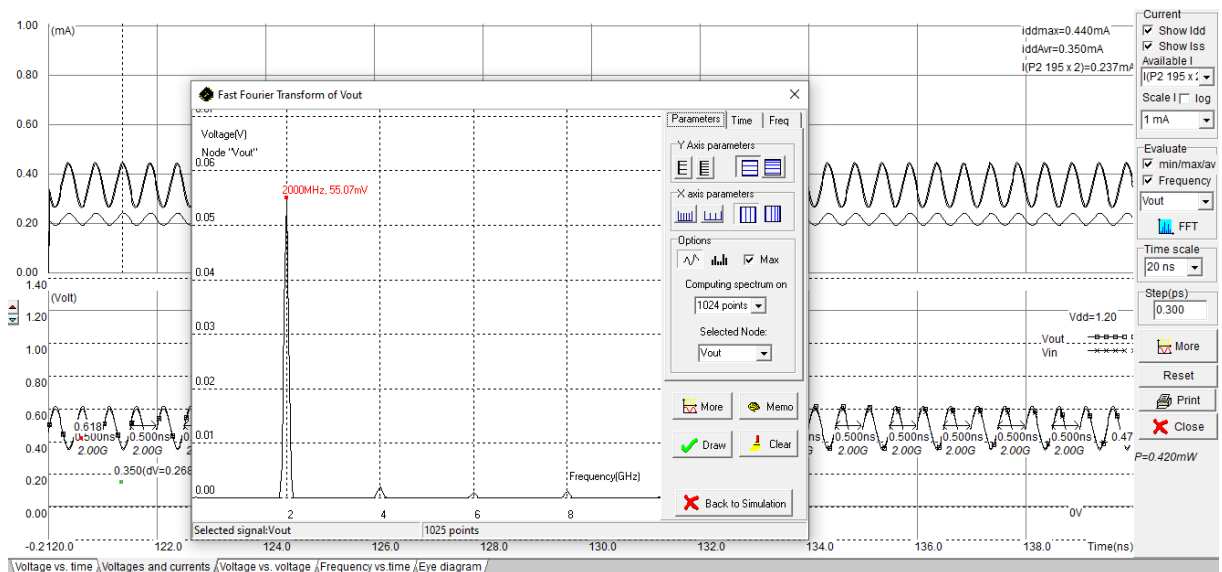


Рис.5.12. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 2 GHz

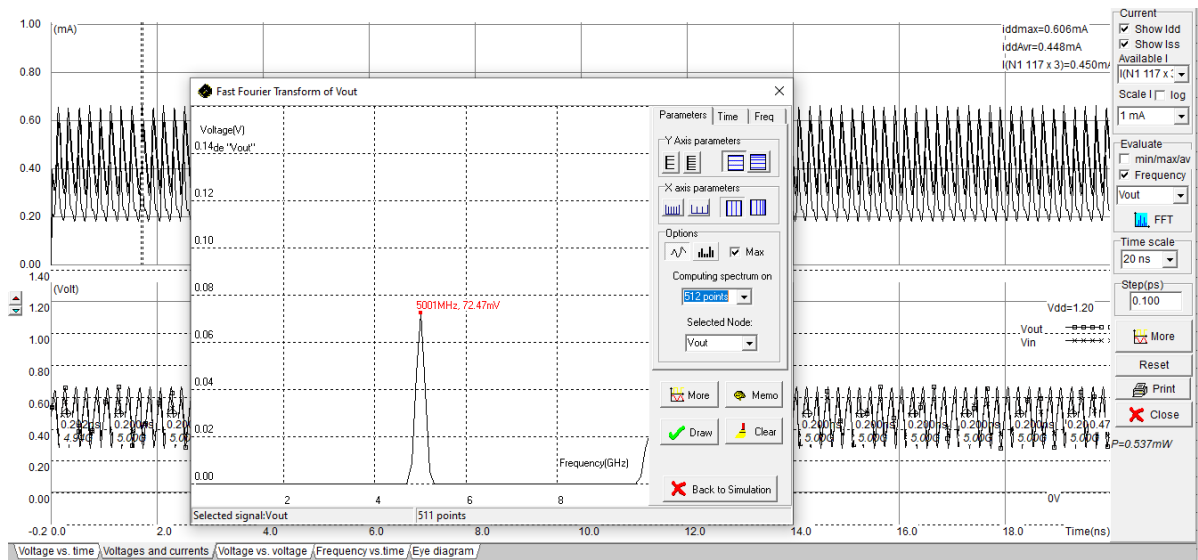


Рис.5.13. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 5 GHz

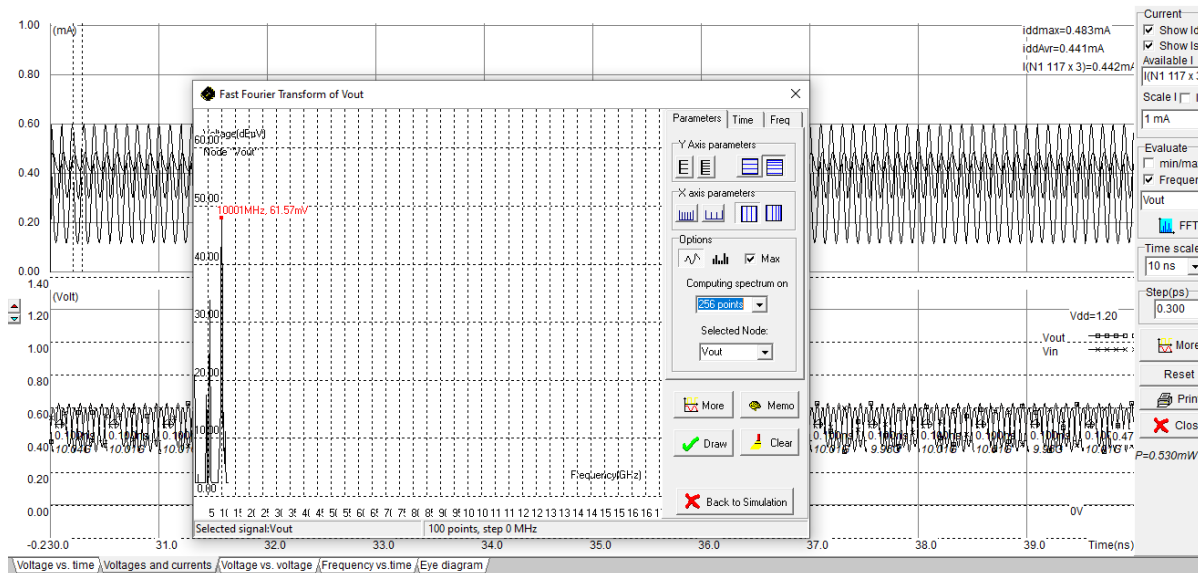


Рис.5.14. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 10 GHz

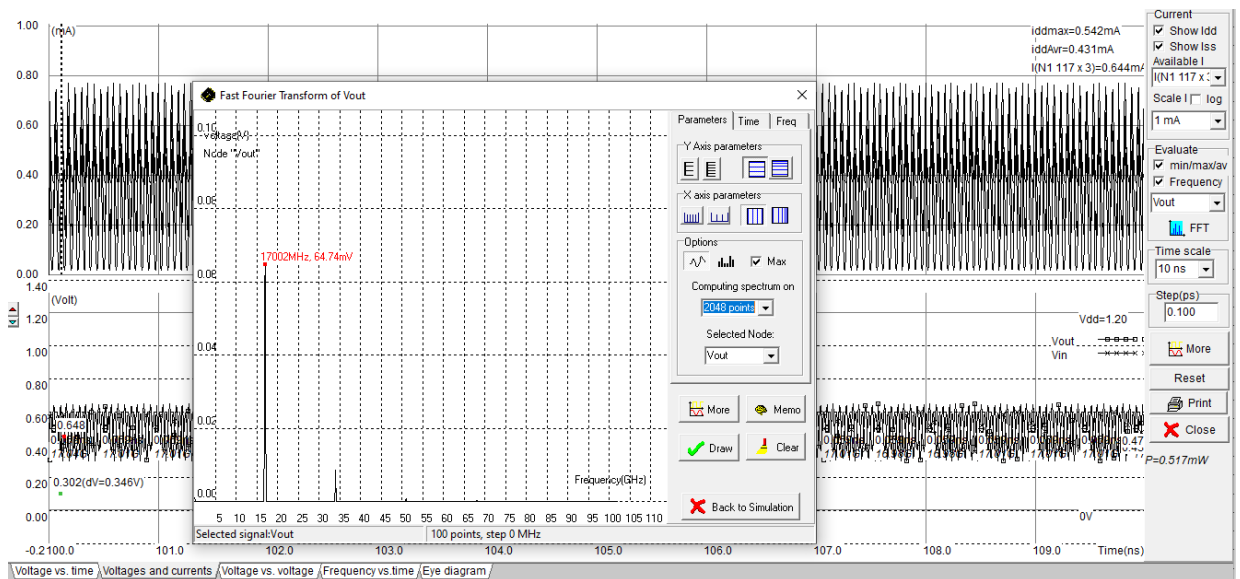


Рис.5.15. Характеристика підсилювача потужності на частоті в 17 GHz

5.7. Підсумки розділу

Ми провели аналіз топологій транзисторів та конденсаторів через те, що від довжини каналу МОН транзистору залежить як буде працювати транзистор на великій частоті. Було встановлено, що при використанні транзисторів з каналом мінімальної довжини в диференційному підсилювачі при частоті вхідного сигналу в 3 МHz ми можемо спостерігати:

- зсув фази вихідного сигналу,
- нелінійні спотворення та ефекти другого порядку.

Збільшуючи довжину каналів у транзисторах ми прийшли до висновку, що при використанні у МОН транзисторах каналу більшої довжини зсув фази вихідного сигналу, нелінійні спотворення та ефекти другого порядку проявляють себе на значно більших частотах.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це комплекс правових, соціально- економічних, організаційно- технічних, санітарно- гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Охорона праці являється системою законодавчих актів, соціально- економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на створення безпечних умов, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Складовими охорони праці є законодавство про працю, виробнича санітарія і безпека застосування різних технічних засобів на виробничих процесах включаючи пожежну безпеку.

Трудове законодавство регламентується законодавчими актами, основними з яких є Конституція України, Кодекс законів про працю, Закон України „Про охорону праці“.

Конституційне право громадян нашої держави на охорону їх життя і здоров'я у процесі їх трудової діяльності відображено у Законі України, прийнятому Верховною Радою України 14 жовтня 1992 р. Дія закону поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності і виду їх діяльності, на всіх працюючих незалежно від їх посади і рівня кваліфікації.

Охорона праці спирається на комплекс державних законодавчих актів. У державному стандарті України ДСТУ 2293-99 "Система стандартів безпеки праці. Охорона праці. Терміни та визначення" встановлені терміни і визначення основних понять з охорони праці. Наведемо деякі з них:

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно- технічних, гігієнічних або лікувально-профілактичних заходів і засобів спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці;

Шкідливий (виробничий) фактор – виробничий фактор вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я та зниження працездатності працівника;

Небезпечний (виробничий) фактор – виробничий фактор вплив якого в певних умовах може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

Нещасний випадок на виробництві – раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, внаслідок яких заподіяна шкода здоров'ю або наступила смерть;

Виробнича травма – порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок впливу виробничих факторів;

Виробниче середовище – сукупність фізичних, хімічних, біологічних, соціальних факторів, що діють на людину в процесі трудової діяльності;

Міжгалузеві і галузеві акти з охорони праці – закони, міжгалузеві і галузеві стандарти, норми, правила, положення, інструкції та інші документи з охорони праці, яким надається сила правових норм обов'язкових для виконання;

Нагляд за охороною праці – одна з форм діяльності державних органів по дотриманню вимог законів та інших нормативних актів з охорони праці встановлених державною владою.

Виходячи з теми даної дипломної роботи суб'єктом охорони праці є інженер з електронної техніки, тож в наступних підрозділах цього розділу буде проаналізовано умови праці інженера, можливі шкідливі та небезпечні чинники, що впливають чи можуть вплинути на нього, їх небезпечну дію та заходи для зниження їх впливу.

6.1. Перелік небезпечних та шкідливих факторів у робочій зоні

В процесі праці, на інженера згідно ГОСТу 12.0.003-74 впливають наступні небезпечні та шкідливі фактори [20]:

- несприятливий мікроклімат;

Згідно ГОСТу 12.1.005–88 про «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» в виробничих приміщеннях при виконанні робіт пов'язаних з нервово-емоційною напругою, повинні дотримуватися оптимальні величини температури повітря 22-24 ° С, при його відносній вологості 60-40% і швидкості руху (не більше 0,1 м / с) [24].

- запиленість робочої зони;

Основним параметром складу повітряного середовища є запиленість. Пил у робочому приміщенні являє собою аерозоль дезінтеграції, утворену в результаті механічного здрибнювання часток гранту, що заносять у приміщення на взутті й одязі. Запиленість повітря в приміщенні не перевищує 0.1 мг/м² при розмірах часток не більше 3 мам, що відповідає нормі. Зменшувати рівень запиленості потрібно вологим прибиранням приміщення.

- виробничі випромінювання;

При роботі з ПЕОМ інфрачервоним, ультрафіолетовим й іншим видами випромінювань, опромінюється до 50% поверхні тіла користувача ПЕОМ, згідно ГОСТу 12.1.005-88 інтенсивність теплового випромінювання повинна становити не більше 70 Вт/ м². [24]

- підвищений рівень шуму, що створюється технічним оснащенням;

Основні характеристики і допустимі рівні шуму на робочих місцях визначаються згідно ДСН 3.3.6.037-99 "ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки.". Допустимі рівні звукового тиску звуку для аналітичних та вимірювальних робіт – 60 ДБА [21] [22].

- Недостатня освітленість робочої зони;

Перенапряг зорового аналізатора (наприклад, при роботі з екраном дісплея).

- Електричний струм, шлях якого у випадку замикання, може пройти через тіло людини;
- Тривалий статичний напруг м'язів спини, шиї, рук та ніг може привести до статичних перевантажень інженера-електроніка.

6.2. Технічні та організаційні заходи щодо зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Перераховані вище небезпечні та шкідливі фактори в тій чи іншій мірі впливають на самопочуття людини, що призводить до зниження працездатності і продуктивності праці. Заходи, що до зменшення впливу шкідливих факторів:

- дотримання норм і правил згідно ГОСТу 12.1.005-88 про «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони»;
- вологе прибиранням приміщення;
- забезпечення від інфрачервоних випромінювань: огорожувальними, герметизуючими, теплоізолюючими пристроями, знаками безпеки, дистанційним управлінням;
- раціоналізація режимів праці та відпочинку (додаткові перерви);
- зменшення шуму на шляху поширення (за рахунок місцевої та загальної звукоізоляції, шумовляючих екранів, поглинаючих фільтрів).

6.2.1. Забезпечення освітлення робочої зони

Вимоги до освітлення наведені у ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Збереження зору людини, стан його центральної нервової системи значною мірою залежить від освітлення [23].

Розрахунок освітленості робочого місця зводиться до вибору системи освітлення, визначенню необхідного числа світильників, їхнього типу й розміщення. У приміщенні використовується система загального штучного освітлення з використанням люмінесцентних джерел світла у світильниках загального освітлення. Як світильники загального освітлення використовуються люмінесцентні лампи типу ЛПО71-4x18-571/Мілано із індексом передачі кольору не менш 70 ($R_{\geq 70}$), як світильники - установки типу УСП-35-4x18 з можливістю плавного регулювання яскравістю.

Нормативними документами встановлено вимоги освітлення робочого місця інженера, так як рекомендована освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документу 300 - 500 лк. Місцеве освітлення не повинно створювати відблисків на поверхні екрану і збільшувати освітленість екрана понад 300 лк.

Джерелами штучного світла є люмінесцентні лампи. Їх перевагами є: економічність, великий термін служби, рівномірне освітлення в полі зору, спектр випромінювання близький до спектру природного кольору.

У приміщенні, де знаходиться робоче місце інженера використовується змішане освітлення, тобто сполучення природного і штучного освітлення. У якості природного бічне освітлення через вікна. Штучне освітлення використовується при недостатньому природному освітленні. Тип світильника: підвісний растровий світильник для громадських приміщень ЛПО71-4x18-571/Мілано з умовним номером групи 1.

Для проектування системи штучного освітлення скористаємося методом світлового потоку, оскільки будемо розраховувати рівномірне загальне освітлення приміщення при освітленості тільки в горизонтальній площині.
Висота приміщення:

$$H = 3\text{ м};$$

Висота робочої поверхні столу:

$$h_p = 0.8\text{ м};$$

Висота звісу світильника від стелі:

$$h_3 = 0.1\text{ м};$$

Визначаємо висоту звісу світильника над робочою поверхнею:

$$b = H - h_p - h_3 \quad (6.1)$$

$$b = 3 - 0,8 - 0,1 = 2,1\text{ м}$$

Ширина приміщення:

$$A = 4\text{ м};$$

Довжина приміщення:

$$B = 8\text{ м};$$

Визначаємо освітлювану площу приміщення:

$$S = A \cdot B \quad (6.2)$$

$$S = 4 \cdot 8 = 32\text{ м}^2$$

Визначаємо індекс приміщення:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} \quad (6.3)$$

$$i = \frac{32}{2.1 \cdot (4 + 8)} = 1.26$$

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.

Характеристики вибраного світильника:

- довжина $D_{cv} = 625\text{мм}$
- ширина $Ш_{cv} = 625\text{мм}$
- висота $B_{cv} = 100\text{мм}$
- чотири лампи типу ЛЕЦ(754) потужністю по 18 Вт кожна.

Таким чином, світловий потік:

$$\Phi = 4000 \text{ лм};$$

З урахуванням індексу приміщення, коефіцієнтів відбиття стелі, стін, підлоги і типу обраного світильника визначаємо коефіцієнт світлового потоку:

$$\eta = 40;$$

Коефіцієнт затінення:

$$K_z = 1,4;$$

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:

$$N_c = \frac{100 \cdot E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n_i \cdot \Phi \cdot \eta \cdot K_\gamma} \quad (6.4)$$

$$N_c = \frac{100 \cdot 300 \cdot 32 \cdot 1,4 \cdot 1,3}{4 \cdot 4000 \cdot 40 \cdot 0,9} = 3,97$$

З розрахунків видно, що для даного приміщення з ПЕОМ потрібно N=4 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:

$$E_\phi = \frac{N_c \cdot n_i \cdot \Phi \cdot \eta \cdot K_\gamma}{100 \cdot S \cdot K_3 \cdot Z} \quad (6.5)$$

$$E_\phi = \frac{4 \cdot 2 \cdot 3000 \cdot 40 \cdot 0,9}{100 \cdot 32 \cdot 1,4 \cdot 1,3} \approx 340_{лк}$$

отримана фактична освітленість приміщення забезпечує рекомендовану освітленість приміщення.

6.3 Інструкція з техніки безпеки, пожежної та вибухової безпеки

6.3.1. Вимоги щодо забезпечення пожежної безпеки

Приміщення, в якому розміщене робоче місце інженера відноситься до категорії категорії В, що характеризується наявністю твердих горючих і слабо горючих речовин і матеріалів, а також легкозаймистих матеріалів.

Пожежна безпека забезпечується:

- системою запобігання пожежі;
- системою протипожежного захисту;
- організаційно-технічними заходами.

Можливими причинами пожежі можуть бути різноманітні несправності в електромережі, перевантаження електромережі при включенні в ланцюг (у холодний час року) великих електрообігрівальних потужностей.

Передбачено наступні міри, спрямовані на мінімізацію ризику виникнення пожежі:

- проводиться періодичний огляд електричної техніки на предмет несправностей в електричних ланцюгах;
- у кожному комп'ютері передбачені плавкі запобіжники для захисту від короткого замикання;
- вхідний електричний щит має автоматичний вимикач (знижує ризик виникнення перевантажень і коротких замикань);
- конструкцією електричної приладів передбачена наявність плавких запобіжників;
- опір ізоляції контролюється 2 рази на рік;
- світильники, проводка, встановлене устаткування періодично (2 рази на місяць) очищаються від пилу відповідно до вимог;
- 1 раз у 3 місяці проводиться очищення від пилу усіх вузлів і агрегатів встановленого устаткування;
- розподільна мережа напругою (380/220) виконана проводами у вінілопластикових трубах, прокладених приховано в стінах і підлоги (ГОСТ 12.1.004-85);
- не застосовуються проводи і кабелі з ізоляцією з вулканізованої гуми й інших сірко утримуючих матеріалів (ГОСТ 12.1.004-85).

Технічні рішення системи протипожежного захисту на робочому місці інженера спрямовані на обмеження поширення пожежі, захист людей і матеріальних цінностей від впливу шкідливих і небезпечних наслідків пожежі, на створення умов ліквідації пожежі.

По пожежному захисту передбачено:

- приміщення забезпечене системою виявлення пожежі, що реагує на появу диму (з тепловим датчиком);
- приміщення обладнане засобами первинного пожежогасіння вогнегасниками вуглекислотними ВВК-2 і порошковими ВП-2(М);
- приміщення обладнане протипожежним водопроводом, що живиться від водопроводу;
- приміщення підключене до загальної системи ручного протипожежного повідомлення;
- у приміщенні є евакуаційні виходи (2 на поверсі).

Проводяться наступні організаційні міри по забезпеченню пожежної безпеки:

- негайне відключення несправного устаткування;
- знеструмлення всіх приладів по закінченні роботи;
- відповідний інструктаж персоналу;
- плакат з зображенням плану евакуації персоналу;
- приміщення має у своєму розпорядженні запасний вихід;
- розроблено план дій на випадок евакуації людей із приміщення;
- не допускається застосування електричних обігрівачів і кип'ятильників;
- відстань від робочого місця інженера до евакуаційного виходу не перевищує норми в 70 метрів.

6.3.2. Розробка інструкції з охорони праці

Інструкція з техніки пожежної та вибухової безпеки згідно з вимогами НПАОП 0.00-6.03-93 „Порядок опрацювання і затвердження власником нормативних актів про охорону праці, що діють на підприємстві”, затвердженим Держнаглядом охорони праці (наказ від 21 грудня 1993 р. № 132) [25] та НПАОП 0.00-4.15-98 „Положення про розробку інструкцій з охорони праці”, затвердженим Держнаглядом охорони праці (наказ від 29 січня 1998 р. № 9) [26].

Загальні вимоги:

- 1) До роботи з приладом допускаються інженери, що вивчили проектний відділ, інструкцію з технічної експлуатації, діючу інструкцію, а також склали залік з техніки безпеки та пожежної безпеки;
- 2) Налагоджувально-ремонтні роботи виконує інженер – електронщик. Інструмент повинен бути справним, джерело живлення відключеним;
- 3) Для забезпечення заходів безпеки і виключення можливості ураження електричним струмом оператор повинен:
 - а) не порушувати порядок роботи з приладом, встановлений інструкцією з технічної експлуатації приладу;
 - б) підключати прилад до джерела живлення тільки при надітому корпусі;
 - в) перед підключенням приладу до джерела живлення перевірити візуально стан шнурів та кабелів;
 - г) з'єднувати і роз'єднувати кабельні та інші роз'єми тільки при виключеному живленні [25].

6.3.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

До роботи з приладом допускається оператор, що вивчив об'єкт, інструкцію з технічної експлуатації, діючу інструкцію, а також склав залік з техніки безпеки та пожежної безпеки. Перед початком роботи необхідно:

- 6.3.3.1 Пересвідчитися, що прилад правильно підключений;
- 6.3.3.2 Пересвідчитися, що у робочій зоні немає зайвих предметів;
- 6.3.3.3 Оглянути з'єднувальні ланцюги і кабелі, місця рознімання і пересвідчитися, що вони справні;
- 6.3.3.4 У разі виявлення несправності приладу чи інструмента, яким користуються під час роботи, повідомити керівника роботи.

6.3.3.5 Інженер-електронік не почне виконувати завдання ,якщо у нього є сумніви в забезпеченні безпеки на робочому місці для виконання майбутньої роботи.

6.3.3.6 Перед початком роботи інженеру-електроніку слід звернути увагу на раціональну організацію робочого місця, підготувати необхідний інструмент, пристосування і перевірити їх роботу.

6.3.3.7 Перед включенням електронної апаратури в електричну мережу інженеру-електроніку слід візуально перевірити справність розетки, вилки, а також електричних шнурів і кабелів, які використовуються для харчування машин і під'єднання між собою всіх пристроїв.

6.3.3.8 Інженер-електронік повинен особисто переконатися в тому, що всі заходи, необхідні для забезпечення безпеки працюючих виконані; при виникненні сумнівів в достатності і правильності вжитих заходів і в можливості безпечного виконання роботи інженер-електронік не приступить до роботи.

6.3.3.9 Інженер-електронік перед початком роботи повинен перевірити наявність і справність всіх необхідних електрозахисних засобів.

6.3.3.10 Перед початком виконання робіт з технічного обслуговування і ремонту електронного устаткування інженеру-електроніку слід вжити необхідних заходів, що забезпечують безпеку праці, в тому числі, заходи електробезпеки, до яких відноситься наступне:

а. Виконати необхідні відключення і вжити заходів, що перешкоджають помилковому або самочинному включенню електронного обладнання під час його технічного обслуговування або ремонту.

б. Перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах електронного обладнання.

в. При необхідності обгородити струмовідні частини, що залишилися під напругою і встановити попереджувальні знаки безпеки.

6.3.3.11 При роботі з персональним комп'ютером інженер-електронік повинен пам'ятати про наступне:

а. Взаємне розташування комп'ютерів впливає на рівень генеруються ними електромагнітних випромінювань.

б. Для забезпечення безпеки відстань між комп'ютерами має бути не менше 1,5 м.

в. Персональні комп'ютери рекомендується розташовувати таким чином, щоб ліва панель машини була звернена або до стіни, або до проходу, де немає постійних робочих місць.

г. Не слід розташовувати відеодисплейні термінали екранами один до одного.

6.3.4. Вимоги безпеки під час виконання роботи

Під час виконання роботи необхідно:

6.3.4.1 Використовувати тільки справний термометр і тільки за призначенням;

6.3.4.2 Замінювати запобіжник тільки за номінальним струмом і тільки при вимкненому приладі;

6.3.4.3 Щоб уникнути випадків електротравматизму не допускається залишати неізольовані кінці проводів після демонтажу вузлів електронного устаткування.

6.3.4.4 Інженер-електронік повинен знати про те, що раціональна організація робочого місця сприяє зменшенню стомлюваності, підвищення працездатності, а також зниження ймовірності травматизму.

6.3.4.5 При роботі з відеотермінальних пристроїв інженеру-електроніку слід знати такі основні вимоги до організації робочого місця:

6.3.4.6 За допомогою поворотного пристрою монітор повинен бути відрегульований відповідно до робочої пози інженера-електроніка;

6.3.4.7 Площина робочого столу повинна бути регульованою по висоті в межах 680-800 мм з урахуванням індивідуальних особливостей інженера-електроніка; при відсутності такої можливості, висота столу повинна бути не менше 725 мм.

6.3.4.8 Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною - не менше 500 мм, глибиною на рівні колін - не менше 450 мм і на рівні витягнутих ніг - не менше 650 мм.

6.3.4.9 Конструкція робочого стільця (крісла) повинна забезпечувати:

- ширину і глибину поверхні сидіння не менше 400 мм;
- поверхню сидіння з заокругленим переднім краєм;
- регулювання висоти поверхні сидіння в межах 400-550 мм і кутах нахилу вперед до 15 ° і назад до 5 °;

6.3.4.10 При появі іскріння, короткого замикання, запаху гарі, диму, прилад негайно відключити та виявити причин можливого виникнення пожежі;

6.3.4.11 Періодично проводити перевірку електричної схеми приладу для виявлення причин, які можуть призвести до виникнення пожежі;

6.3.4.12 Прибрати з робочого місця зайві речі, які відволікають від роботи і можуть привести до ушкоджень інженера;

6.3.4.13 Для підключення електронного обладнання до електричної мережі слід застосовувати фірмовий шнур живлення, який додається з обладнанням;

6.3.4.14 Перевіряти відсутність напруги слід покажчиком напруги заводського виготовлення, справність якого повинна бути перевірена перед його використанням;

6.3.4.15 При роботі з електронним обладнанням слід застосовувати ручний інструмент тільки з ізолюючими ручками; у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень;

6.3.4.16 При технічному обслуговуванні і ремонті електронного устаткування із застосуванням електрозахисних засобів (наприклад, покажчика напруги, ручного інструменту та т.п.) інженер-електронік не повинен наближатися до струмоведучих частин на відстань менше довжини ізолювальної частини цих засобів;

6.3.4.17 При виконанні робіт по експлуатаційно-технічному обслуговуванню, профілактичним перевіркам, поточного ремонту електронного устаткування інженеру-електроніку слід керуватися експлуатаційною документацією (в тому числі, інструкціями з експлуатації) фірм-виробників.

6.3.4.18 З метою зниження зорового і кістково-м'язового стомлення інженеру-електроніку слід дотримуватися встановленого режиму праці і відпочинку.

6.3.4.19 Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров'я інженера-електроніка, протягом робочої зміни повинні бути встановлені регламентовані перерви.

6.3.4.20 Час регламентованих перерв протягом робочої зміни слід встановлювати в залежності від її тривалості, виду і категорії трудової діяльності.

6.3.4.21 При необхідності виконання робіт без зняття напруги і при використанні ізолюючих засобів захисту, інженер-електронік повинен пам'ятати і виконувати наступні правила безпеки:

а.Тримати ізолювальні частини засобів захисту можна тільки за рукоятки до обмежувального кільця.

б.Розташовувати ізолюючі частини засобів захисту слід таким чином, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами проводів або замикання на землю.

в.Слід користуватися тільки сухими і чистими ізолюючими частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

г. При виявленні порушення цілісності лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути припинено.

6.3.5. Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після закінчення роботи необхідно:

6.3.5.1 Вимкнути прилад, коли оператор чи інженерно-технічний склад працівників залишають свої робочі місця;

6.3.5.2 Прибрати своє робоче місце;

6.3.5.3 Дотримуватись санітарних норм і правил особистої гігієни;

6.3.5.4 Повідомити керівника робіт про виявлені недоліки в роботі приладу.

6.3.6. Вимоги безпеки під час аварійних ситуацій

6.3.6.1 У разі виявлення порушень вимог охорони праці, які створюють загрозу здоров'ю або особистої безпеки, інженер-електронік повинен звернутися до керівника робіт і повідомити йому про це; до усунення загрози слід припинити роботу і покинути небезпечну зону.

6.3.6.2 В разі аварії негайно вимкнути всі електроспоживаючі прилади від електромережі не допускати сторонніх осіб в небезпечну зону; повідомити керівника робіт про те, що сталося.

6.3.6.3 У випадку виникнення пожежі негайно викликати пожежну команду. До її приїзду приступити до тушіння пожежі своїми силами, а також спасінню людей та надання їм допомоги;

6.3.6.4 При нещасному випадку, отруєнні, раптовому захворюванні необхідно негайно надати першу допомогу потерпілому, викликати лікаря або допомогти доставити потерпілого до лікаря, а потім повідомити керівника про те, що трапилося.

6.3.6.5 При виникненні пожежі слід знеструмити прилад;

6.3.6.6 В обов'язковому порядку в приміщенні повинні бути засоби пожежегасіння;

6.3.6.7 Якщо сталася травма внаслідок впливу електричного струму, то заходи надання першої допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення його від дії електричного струму;

6.4. Підсумки розділу

В даному розділі дипломної роботи наведено основні питання з техніки безпеки і організації умов праці, проведено аналіз і розрахунок шкідливих виробничих факторів, відповідно до ДСТУ. Дана оцінка і характеристика з охорони праці і пожежної безпеки приміщень і середовища в яких експлуатується пристрій. Відповідно до прийнятих норм необхідно забезпечити відповідний мікроклімат, мінімальний рівень шуму, зручне і з правильною ергономікою робоче місце. У процесі роботи одним з найважливіших факторів, що впливають на продуктивність при тривалому часі роботи є достатня освітленість робочого місця, що досягається за рахунок правильного освітлення, і регламентований графік робіт для - зменшення втомлюваності працівника. Згідно інструкцій котрі було розроблено в цьому

розділі працювати дозволяється тільки на справному устаткуванні. При виникненні пожежі діяти згідно інструкції по пожежній безпеці. Про усі несправності устаткування негайно повідомляти ремонтні служби. При нещасному випадку вміти надати першу допомогу, викликати лікаря, по можливості залишивши місце події без зміни. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях:

- у випадках виявлення дефектів шнурів живлення, наявність диму або запаху гару негайно відключити живлення і повідомити про аварійну ситуацію;
- якщо людина потрапила під напругу, негайно звільнити його від дії струму шляхом відключення устаткування і до прибуття лікаря надати ПМД;
- у разі погіршення самопочуття (появи різі в очах, різкому погіршенні зору) покинути робоче місце, звернутися до лікаря;
- при займанні устаткування, відключити живлення і вжити заходи по гасінню вогнища пожежі за допомогою вуглекислого або порошкового вогнегасника, викликати пожежну команду.

РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Останнім часом напівпровідникова промисловість піддавалася критиці за відмову підтримати запропоновані екологічні та професійні проекти в області охорони здоров'я, які були спрямовані на вирішення екологічної проблеми в цій галузі. Судові позови останніх років зосереджували увагу громадськості на негативному впливі на навколишнє середовище та здоров'я працівників найбільш швидкозростаючого виробничого сектору у світі - напівпровідникової промисловості. Обвинувачі стверджували, що вплив токсичних хімічних речовин на заводах з виробництва широкосмугових підсилювачів призвів до негативних наслідків як для здоров'я людей, так і забруднення навколишньої середовища. Галузеві критики також підкреслюють факт, що напівпровідникова промисловість вкрай несприятливо позначається на стані навколишнього середовища, викликаючи забруднення підземних вод та повітря, утворюючи токсичні відходи як побічний продукт процесу виробництва напівпровідників, в тому числі широкосмугових підсилювачів . На відміну від цього, бюро статистики США (одна з країн з найбільш розвиненою інфраструктурою у цій сфері) показує, що напівпровідникова промисловість має рівень захворюваності робітників приблизно третину від середнього показника серед усіх виробництв, і адвокати активно виправдовують заводи і виробництва, вказуючи на недавнє співробітництво з дослідницькими лабораторіями, яке посприяло покращенню продукції як доказ того, що виробники напівпровідників адекватно захищають і своїх співробітників, і навколишнє середовище. У сучасній екологічній ситуації важливо при оцінці економічної ефективності науково-технічного прогресу враховувати екологічні наслідки впровадження нової техніки, проводити комплексні еколого-економічні експертизи нової техніки. Такій експертизі мають підлягати не тільки створені техніка і технології, а й технічні ідеї, розробки, проекти нових технічних засобів [28].

7.1. Основні засади охорони навколишнього середовища

Закон України "Про охорону навколишнього середовища"[29] визначає правові, економічні, соціальні основи охорони навколишнього середовища. Завданням охорони навколишнього природного середовища є вирішення питань у галузі охорони, використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки, запобігання і ліквідації негативного впливу господарської та іншої діяльності на навколишнє природне середовище, збереження природних ресурсів, генетичного фонду живої природи, ландшафтів та інших природних комплексів, унікальних територій та природних об'єктів, пов'язаних з історико-культурною спадщиною.

Державній охороні і регулюванню використання на території України підлягають: навколишнє природне середовище як сукупність природних і природно-соціальних умов та процесів, природні ресурси, як залучені в господарський обіг, так і невикористовувані в народному господарстві в даний період (земля, надра, води, атмосферне повітря, ліс та інша рослинність, тваринний світ), ландшафти та інші природні комплекси. Особливій державній охороні підлягають території та об'єкти природно-заповідного фонду України й інші території та об'єкти, визначені відповідно до законодавства України.

Державній охороні від негативного впливу несприятливої екологічної обстановки підлягають також здоров'я і життя людей.

Охорона навколишнього середовища складається з:

- правової охорони, що формує наукові екологічні принципи;
- матеріального стимулювання природоохоронної діяльності, прагнучого зробити її екологічно вигідною для підприємств;
- інженерної охорони, розробляючи природоохоронну і ресурсозберігаючу технологію і техніку.

В цьому розділі дипломної роботи буде проводитись аналіз основних джерел впливу та їх наслідків на людину та її оточення при виготовленні

електронних чипів з кремнію на основі котрого у дипломній роботі було розроблено підсилювач потужності та при роботі самого підсилювача потужності . За прогнозами різних екологічних організацій телекомунікації залишатимуться однією з галузей світової індустрії, що найбільш розвиватиметься, ще принаймні протягом 10-15 років. А тому перед екологами поставатимуть все нові завдання, що стосуються організації безпечних і комфортних умов для людей, що працюють на виробництві кремнієвих чипів з котрих складається спроектований підсилювач потужності та зменшення негативного впливу на довкілля факторів присутнім при виготовленні кремнієвих чипів .

Екологічний фактор – будь-який елемент середовища, що здатен чинити прямий чи опосередкований вплив на живі організми.

Для нормального існування організму потрібен певний набір факторів.

Кожний організм існує тільки при певних умовах, тобто йому потрібен той склад повітря, води, температури, тиску, те середовище в якому він може природно розвиватися. Зміна будь-якого фактора може призвести до змін у організмі чи зовсім до знищення.

7.2. Аналіз проблеми впливу широкосмугових підсилювачів на стан довкілля

Ден Херр, директор Асоціації досліджень напівпровідникової промисловості сказав в своєму інтерв'ю, що в світі продовжує спостерігатися найбільший промисловий зріст в історії, що призводить до безперервного відкриття і підготовки нових заводів по виготовленню різних напівпровідників, в тому числі і підсилювачів. Але такий колосальний економічний та технічний прорив дуже дорого коштує навколишньому середовищу [29].

7.3. Аналіз основних джерел впливу та їх наслідків на людину та її оточення при виробництві підсилювачів потужності

Достатньо велика кількість працівників зі стажем на заводах з виробництва підсилювачів постійно судяться з компаніями, в яких вони працюють через недотримання усіх норм охорони здоров'я, через що люди через 7-8 років постійної роботи починають виявляти в себе різні хронічні хвороби, включаючи проявлення раку. Безперервні позови почали з часом привертати пильну увагу екологів.

Гостра економічна конкуренція в електронній промисловості прискорює темпи, які призводять до швидких змін видів і типів інструментів, матеріалів, що використовуються в зміні процесу виробництва напівпровідників. В даний період часу, усі передові розробники комп'ютерної, побутової, телефонної техніки проводять зміну чіпів та підсилювачів кожні 2-3 роки, що безперечно не змінює їх негативний вплив. Щорічно в продаж поступають сотні нових хімічних речовин, але при їх впровадженні в виробничий процес ніхто не зауважує адекватну токсикологічну оцінку спеціалістів. Екологи стверджують, що працівників на таких фабриках просто використовують як «піддослідних кроликів».

Вплив напівпровідникової промисловості належним чином задокументований екологами, які з активним розвитком галузі почали все більше акцентувати увагу на непоправних наслідках. Токсичні матеріали, які використовуються для виготовлення 220 мільярдів кремнієвих чіпів та підсилювачів щорічно, приголомшують своїм складом і зокрема включають високо корозійну соляну кислоту, такі метали як кадмій і миш'як та летучі розчинники: метил-хлороформ, толуол, бензол, ацетон і трихлоретилен. Також до складу входять токсичні гази, такі як арсин. Багато з цих хімічних речовин є відомими і можливими канцерогенами для людини. Кілька вчених, включаючи Фаулера і Ладу, офіційно заявили, що рівень захворюваності на

рак в індустрії комп'ютерних мікросхем значно зростає в майбутньому, тому що ця галузь відносно нова, і рак може проявитися в групах робітників, які зазнають «непомітного» впливу зараз, через 20-25 років. «Протягом наступного десятиліття ми побачимо більше повідомлень про ракові захворювання серед працівників комп'ютерних чіпів», - каже Фаулер.

Згідно зі статтею в журналі «E/The» (кафедри екології Стенфордського університету) за травень-червень 2007 року, виробництво лише однієї восьмидюймової комп'ютерної пластини, що містить сотні чіпів вимагає в середньому 12 кілограмів хімікатів і 300 літрів небезпечних газів. Виробництво ж однієї кремнієвої пластини (яка входить до складу широкосмугового підсилювача) затрачує 4 кілограми небезпечних відходів та 3787 галонів стічних вод, після вдихання випаровувань яких потім потребується серйозне лікування для відновлення.

Крім того, багато виробничих процесів відбуваються в закритих системах, а це означає, що вплив шкідливих речовин часто важко виявити якщо моніторинг не проводиться на щоденній основі. Основні шляхи контактів викликають занепокоєння щодо вдихання і контактів з шкірою людини. Хоча працівники вдягнені в захисний одяг з голови до ніг, дослідники стурбовані повторним використанням повітря в так званих «чистих приміщеннях» (де виготовляються і зберігаються виготовлені чіпи і підсилювачі), що піддає робочих небезпечному впливу токсичних хімікатів. Елементи, які входять до складу підсилювачів і мають прямий негативний вплив:

1. Ацетон

А. Вдихання від помірного до високого рівня викликає роздратування носа, горла, легенів і очей;

Б. Викликає сплутаність свідомості.

В. Концентрація високого рівня ацетону викликає втрату свідомості і може викликати зараження шкіри в роті.

Г. Тривала дія викликає пошкодження нирок, печінки і нервів; посилюється вірогідність вроджених дефектів; і прослідковується знижена здатність до розмноження.

2. Миш'як

А. При низькій концентрації викликає нудоту, блювоту, діарею, зниження вироблення червоних і білих кров'яних тілець, порушення серцевого ритму і пошкодження кровоносних судин

Б. При високих рівнях концентрації викликає пошкодження тканин (нерви, шлунок, кишечник, шкіра) і може бути фатальним

В. Хронічний вплив викликає рак легенів. Відомий канцероген для людини.

3. Арсин

А. Викликає головний біль; нездужання; слабкість; запаморочення; задишку; болі в животі та спині;

Б. Нудота; блювота;

В. Жовтяниця;

Г. Периферична невропатія;

4. Бензол

А. Викликає ушкодження кісткового мозку і зниження продукції червоних кров'яних тілець, що призводить до анемії

Б. Знижується імунна система, виникає підвищена ймовірність зараження будь-якими вірусними хворобами

В. Знижує репродуктивну функцію і може викликати лейкемію

Г. Відомий канцероген для людини

4. Кадмій

А. Викликає ушкодження легенів, ниркову дисфункцію, пошкодження печінки, дефекти кісток

Б. Підвищує ризик гіпертонії, знижує репродуктивну функцію і викликає тератогенність.

В. Передбачається, що це канцероген для людини

5. Соляна кислота

А. Викликає серйозні опіки очей і шкіри і кон'юнктивіт; тривалий або повторний контакт зі шкірою може викликати дерматит

Б. Вдихання викликає сильне подразнення дихальних шляхів з кашлем, опіками, затрудненим диханням

В. Викликає роздратування травного тракту, біль у животі, блювоту.

Г. Також викликає фото-сенсibiliзацію у деяких людей і може статися відмова системи кровообігу.

Д. Пошкоджує нирки і імунну систему

Е. Викликає передчасні пологи; може стати причиною низькою ваги при народженні, зниженням розумових здібностей; дефіцитом здатності до навчання у дітей, зменшеним часом реакції;

Ж. Слабкість в пальцях, зап'ястях і щиколотках;

З. Анемія.

6. Метилхлороформ

А. Викликає головний біль, пригнічення ЦНС.

Б. Погіршується рівновага

В. Спричинює подразнення очей, носа, горла і шкіри; призводить до аритмії.

7. Толуол

А. Тривала дія у низькій і середній концентрації викликає втому, сплутаність свідомості, слабкість, втрату пам'яті, нудоту і втрата слуху

Б. Вдихання високих доз протягом короткого періоду часу може призвести до повного пошкодження мозку і проблеми з мовою, зором і слухом, втратою м'язового контролю і викликати втрату балансу тіла

В. Викликає неврологічні проблеми і затримку росту у дітей

Г. Передбачається, що це канцероген для людини

8. Трихлоретилен

А. Дратує очі і дихальні шляхи

Б. Вдихання викликає запаморочення, сонливість і головний біль.

В. Хронічний вплив викликає порушення мови та слуху, захворювання нирок, захворювання крові, інсульт, анемію, діабет і шкірні висипання

Г. Ймовірний канцероген для людини

7.4. Аналіз основних джерел впливу та їх наслідків на людину та її оточення при роботі підсилювача потужності

Немалий вплив представляють електромагнітні поля, що випромінюються підсилювачем потужності . У процесі життєдіяльності людина постійно знаходиться в зоні дії електромагнітного поля Землі. Таке поле є природним, воно назване фоном, вважається нормальним і не наносить здоров'ю людей ніякої шкоди. Ступінь і характер впливу електромагнітного поля на організм людини залежать: від інтенсивності випромінювання;

частоти коливань; площі поверхні тіла, що опромінюється; індивідуальних особливостей організму; режиму опромінення (безперервний чи переривчастий); тривалості впливу; комбінованої дії інших факторів навколишнього середовища. У діапазонах промислової частоти, радіочастот, інфрачервоного і частково ультрафіолетового світла (до частоти $3 \cdot 10^{16}$ Гц) електромагнітні поля чинять тепловий вплив. У діапазоні частот рентгенівського спектра і вище електромагнітного поля настільки змінюють енергію атомів, що їх називають іонізуючими. При експлуатації ВЧ-, ДВЧ-, УВЧ передавачів на радіо та телецентрах джерелами електромагнітного випромінювання є високочастотні генератори, антенні комутатори, пристрої складання потужностей електромагнітного поля, комунікації (від генератора до антенного пристрою), антени. Ступінь опромінення працюючих залежить від кількості розміщуваних у приміщенні передавачів (в окремих зонах, на радіо та телецентрах їх може бути до 20), їх потужності, ступеня екранування, розміщення окремих блоків всередині приміщення і поза його межами. Для всіх видів зв'язку джерелом електромагнітного випромінювання є радіолокаційні станції, зокрема генератори, фідерні лінії, антени, окремі блоки енергії електромагнітного поля ЗВЧ- та НВЧ діапазонів. Впливу енергії НВЧ діапазону працівники зазнають при регулюванні, настроюванні та випробовуванні радіолокаційних станцій, у цехах заводів і ремонтних майстерень. Основним джерелом випромінювання в цехах заводу є відкриті антенні системи. Під час випробовування СБСЗ на полігонах або їх експлуатації в цивільній авіації умови праці операторів сприятливіші, оскільки більшу частину робочого часу вони перебувають в екранованих кабінах [30].

Тепловий вплив електромагнітного поля пояснюється наступним чином. Як відомо тіло людини складається з клітин, що містять рідину (протоплазма, кров, лімфа та ін.), яка є електролітом. Під дією зовнішнього постійного електричного поля тканини живого організму поляризуються. Дипольні молекули (наприклад води) та іони, що містяться у рідкому середовищі, переміщуються й орієнтуються за напрямком силових ліній зовнішнього поля.

У змінному електромагнітному полі електричні властивості живих клітин залежать від частоти випромінювання, і в міру її збільшення вони набувають властивостей провідників. Крім струмів провідності, змінне електромагнітне поле призводить до змінної поляризації діелектричних складових організму (сухожилля, хрящі тощо). При цьому найбільш небезпечними для організму людини є частоти близькі до 7 Гц, оскільки вони збігаються з частотами енергетичних центрів.

Вплив ЕМП на біологічний об'єкт оцінюється кількістю електромагнітної енергії $W_{\text{погл}}$ (Вт), яка поглинеться цим об'єктом при перебуванні його в полі:

$$W_{\text{погл}} = \sigma \cdot S_{\text{еф}} \quad (7.1.)$$

де:

σ – густина потоку потужності випромінювання електромагнітної енергії, Вт/м², $S_{\text{еф}}$ – ефективна поглинаюча поверхня тіла людини, м².

Унаслідок поглинання людиною енергії електромагнітного поля відбувається нагрівання тканин організму тим більше, чим вищою є напруженість поля і довшим час впливу. Зайва теплота відводиться до деякої межі шляхом збільшення навантаження на механізм терморегуляції. Однак починаючи зі значення інтенсивності випромінювання $I_{\text{пор}} = 10 \text{ мВт/см}^2$ (100 Вт/м²), яка називається тепловим порогом, організм не справляється з відведенням теплоти, і температура тіла підвищується.

При загальному опроміненні підвищення температури тіла більше ніж на 1°C неприпустиме. Може спостерігатися локальне нагрівання тканин. Перегрівання особливо шкідливим є для тканин зі слаборозвиненою судинною системою (очі, мозок, нирки, шлунок, жовчний і сечовий міхури), тому що кровообіг відіграє роль водяного охолодження.

Тепловий ефект є найбільшим в зоні надвисоких частот. Так, дія електромагнітного поля частотою $3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$ Гц викликає катаракту очей (помутніння хрусталика), а опромінення електромагнітного полем великої

інтенсивності призводить до руйнівних змін у тканинах та органах, опіків, омертвіння тканин організму. Катаракто утворення пояснюється не тільки тепловою дією, воно залежить також і від ряду інших не повністю встановлених чинників. Значну роль можуть відігравати концентрація поля у середовищах з окремими діелектричними властивостями та об'ємні резонансні ефекти

Крім теплового ефекту, біологічна дія електромагнітного поля виявляється в зміні орієнтації клітин та молекул відповідно до напрямку силових ліній поля, в ослабленні біохімічної активності білкових молекул; зміні структури клітин крові (її складу), впливі на ендокринну систему та обмін речовин. Тому систематичний або тривалий вплив електромагнітного поля навіть невеликої інтенсивності (нижче теплового порога) призводить до різних нервових і серцево-судинних розладів – головного болю, підвищеної стомлюваності, порушення сну, зміни кров'яного тиску, уповільнення пульсу, болю в ділянці серця й аритмії, випадання волосся, ламкості нігтів і т.д.

Вважається, що особливо чутливі до впливу електромагнітного поля кора головного мозку і проміжний мозок. Їхнє ураження викликає порушення процесів регуляції функцій організму з боку центральної нервової системи. На ранніх стадіях ці порушення стану здоров'я носять оборотний характер. Сумісну дію випромінювань широкого діапазону можна класифікувати як окрему радіохвильову хворобу. Тяжкість її наслідків знаходиться у прямій залежності від напруженості електромагнітного поля, тривалості впливу, фізичних особливостей різних діапазонів частот, умов зовнішнього середовища, а також від функціонального стану організму, його стійкості до впливу різних чинників, можливостей адаптації. Проблема електромагнітного випромінювання, що виходить від підсилювачів потужності, встає досить гостро по декільком причинам:

- підсилювачів потужності має відразу декілька джерел випромінювання (вхідний підсилювач -дільний частоти -вихідний підсилювач);
- дуже тривалий час впливу.

Не слід забувати і про електростатичне поле, яке підсилювач. Сильне електростатичне поле шкідливе для людського організму. Правда, на відстані 50-60 см від устаткування його вплив значно знижується. Застосування спеціальних фільтрів, що прикривають підсилювач, взагалі дозволяє звести його до нуля. Варто звернути увагу ще і на те, що при роботі підсилювача електризується не тільки його корпус, але і повітря в приміщенні. Причому він приймає позитивний заряд. Позитивно наелектризована молекула кисню не сприймається організмом як кисень, що викликає у користувача кисневе голодування.

В даний час всі всі підсилювачі повинні відповідати міжнародним стандартам на радіоактивне випромінювання МРК 1990:10, електромагнітне випромінювання ТСО-92, ТСО-01, ТСО-03.

Підприємства і організації охочі запобігти забрудненню навколишнього середовища і забезпечити її охорону, збалансувати свою діяльність з соціально-економічними принципами підприємства, повинні використовувати стандарти серії ISO 14000 зі створення системи екологічного менеджменту, як методичні вказівки по виконанню таких робіт.

Під шумом в екології розуміють будь-який звук, що сприймається живим організмом, та порушує тишу й перешкоджає нормальній життєдіяльності цього живого організму.

На робочому місці інженера з електронної техніки, джерелом шуму такими технічними засобами є — комп'ютер, принтер, вентиляційне устаткування, а також зовнішній шум.

Діючи на орган слуху, центральну і вегетативну нервові системи, а через них на внутрішні органи, шум є причиною розвитку хвороби, спричиненої шумом. Знижуючи загальну опірність організму, він сприяє розвитку інфекційних захворювань. При роботі за умов шуму спостерігаються підвищена стомлюваність і зниження працездатності, погіршуються увага і мовна комутація, створюються передумови до помилкових дій. Внаслідок цього шум може спричинити зниження рівня безпеки праці. Будучи причиною

головного болю, дратівливості, неврівноваженого емоційного стану, шум створює передумови до погіршення психологічного стану.

Прояви хвороби, викликані шумом, підрозділяються на специфічні, виникають в периферичній частині слухової системи людини, і неспецифічні, характерні для інших органів і систем організму людини.

Під впливом шуму відбувається зниження слухової чутливості. Чим значніший шум, тим вище його інтенсивність і експозиція. Стійка втрата слуху настає через п'ять – вісім років роботи за умов, що характеризуються високими рівнями шуму. Акустична енергія звукових хвиль при рівнях шуму понад 125 дБ і частоті 250-1000 Гц настільки велика, що звук здатний викликати тотальний струс тіла людини (повітряні вібрації). У цьому випадку підвищується роль проходження звуку до внутрішнього вуха, по кісткам, і захист тільки привушних областей виявляється недостатнім. Чим відповідальніші функції виконує яка-небудь зона центральної нервової системи і чим складніше вона організована, тим більше вона страждає від впливу шуму. Шум змінює функціональний стан багатьох систем і органів людини внаслідок їхньої взаємодії через центральну нервову систему. Такий взаємозв'язок призводить до впливу шуму на органи зору людини, вестибулярний апарат і рухові функції, зокрема, до зниження м'язової працездатності.

Розглядаючи тіло людини з погляду механіки, його можна при низьких частотах і рівнях вібрації приблизно апроксимувати лінійною системою із зосередженими параметрами. Однією з основних ланок цієї системи є грудиночеревна порожнина, резонансні частоти якої лежать у діапазоні 3-6 Гц. Ще один резонансний ефект знаходиться у смузі частот 20-30 Гц, він відноситься до ланки голова – шия – плече. У діапазоні частот 60-90 Гц виявляються резонансні явища очного яблука, а при частоті 100-200 Гц ці явища охоплюють нижню щелепу – черепну коробку. Частоти резонансу, власне черепної коробки, лежать у межах 300-400 Гц для основної форми коливань і 600-900 Гц – для вищих форм. У виробничій вібрації найбільш

важливий діапазон низьких частот.

У результаті впливу вібрації може розвинутихся вібраційна хвороба. У людини, що піддається впливу могутньої загальної вертикальної вібрації, можуть ушкоджуватися судини головного мозку й оболонки, а також порушуватися циркуляція крові. Вібрації від ручного віброінструмента можуть спричинити ушкодження дрібних кровоносних судин і нервових закінчень у м'язах та в шкірі кінцівок. Характер впливу вібрації – загальна чи місцева визначає три форми вібраційної хвороби: периферичну, церебральну і центрально-периферичну.

Першим симптомом периферичної форми захворювання є почуття оніміння в кистях рук, передпліччях. Хворий відчуває печіння, ломоту в руках, ногах. При церебральній формі хвороби першими ознаками є головний біль, почуття важкості і шуму в голові. Бувають короточасні запаморочення, а іноді й втрата свідомості. У робітника з'являється дратівливість, порушується сон, виникають спазми судин. У результаті розвивається гіпертонія, загальна слабкість, тремтіння рук.

7.5. Рекомендації щодо зниження цих негативних чинників

За останні 20 років напівпровідникова індустрія встановила кілька дослідницьких партнерських відносин з урядом та науковим сектором. Через це, не дивлячись на ряд негативних показників просліджуються і помітні покращення. Хлорфторуглероди (ХФУ), хімічні речовини, що руйнують атмосферний озон, колись використовувались для очищення комп'ютерних чіпів, але до 2005 року IBM, Intel, Toshiba America, HewlettPackard Company та інші комп'ютерні компанії повідомили, що вони виключили ХФУ зі свого виробничого процесу відповідно до Монреальського протоколу, міжнародної угоди про поступове припинення та остаточну ліквідацію всіх ХФУ. За словами Лінн Голдман, запрошеного наукового співробітника Університету Джона Хопкінса в Школі громадського здоров'я в Балтиморі, штат Меріленд,

яка працювала помічником адміністратора Управління профілактики ЕРА, пестициди та токсичні речовини з 2000 по 2008 рік у цій промисловості були найбільш болючою проблемою, яка була явною загрозою для зовнішнього середовища. "На початку 1990-х і раніше Силіконова долина мала багато проблем з розчинниками та очищенням токсичних відходів, але сьогодні за галуззю спостерігають так само пильно, як за будь-яким сектором економіки, і її екологічні показники значно покращилися " зазначила вона. "Основними проблемами сьогодні є умови праці працівників". Крім того розширюються центри переробки, які почали свою роботу ще з 1995 року. Наприклад, за останнє п'ятиріччя було перероблено більше ніж 70 000 підсилювачів. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища (ЄАНС), кількість електронних відходів, утилізованих в світі щороку, досягло 40 мільйонів тон , 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 однієї третини населення світу в 2018 році [34].

7.6. Утилізація підсилювачів та електронного обладнання загалом

Підсилювач потужності розроблений в технології 120 мкм , його топологія знаходиться на кремнієвому кристалі , підсилювач як готовий до використання продукт треба розглядати не як сам кристал , а як кристал з топологією котрий розміщений на платі з текстоліту котра має деякі допоміжні електронні компоненти та знаходиться у корпусі, також до підсилювача як правило підключають комп'ютер чи інший пристрій котрий використовується для радіозв'язку тому утилізацію підсилювача слід розглядати як утилізацію

електронного обладнання. Складність утилізації електронного обладнання полягає в тому, що подібного роду техніка містить в собі такі неорганічні складові, як різного типу пластик та матеріали, які зроблені на основі полівінілхлориду і фенолформальдегідів. А також майже повний набір металів. Ці компоненти в цілому не представляють небезпеки для здоров'я людини і навколишнього середовища в процесі експлуатації приладу. Але зовсім інша справа, коли постає питання утилізації такого виробу. До складу електронних компонентів комп'ютерів, принтерів і електронної техніки входять такі хімічні елементи, як свинець, ртуть, кадмій, миш'як.

На відміну від органічних відходів, електронне сміття неможливо утилізувати, використовуючи природні процеси регенерації.

При захороненні електронного обладнання на звалищі отруйні хімічні сполуки протягом довгого часу вимиваються з електронних компонентів і друкованих плат в навколишнє середовище або випаровуються в атмосферу.

При спалюванні в атмосферу викидаються важкі метали: свинець, ртуть, і кадмій. Ртуть розповсюджується по харчових ланцюгах і накопичується в живих організмах, найчастіше в рибі. Якщо вироби містять ПВХ, при їх спалюванні в атмосферу викидаються також діоксин і бромовані антипірени.

Причому у сучасної електроніки є своя специфіка – вона в переважній більшості складається з неліквідних матеріалів.

Окрема проблема утилізації комп'ютерної техніки — кінескопи моніторів, оскільки вони містять специфічні отруйні речовини і їх не можна розбирати, їх слід тільки ховати в спеціальних захороненнях. Те ж саме відноситься і до батарей живлення і акумуляторів, що містять такі метали, як свинець, кадмій, цинк і нікель.

Процес утилізації включає демонтаж технічних вузлів, сортування і розділення матеріалів конструкції. А також збір і сортування електронного лому, який оформляється згідно нормативно-технічної документації, що діє, по переробці матеріалів і виробів які містять дорогоцінні метали. Після цього компоненти виробу, що виготовленні або містять такі матеріали, як золото,

срібло, кольорові метали (алюміній, мідь), чорний метал, полімери, використовуються для переробки.

Фахівці корпорації NEC і її японської дочірньої компанії NEC Tohoku спільно розробили нову систему переробки корисних компонентів друкованих плат. Що особливо важливе, дана система переробка є стовідсотково повною. Процес, названий “EcoSeparation System”, складається з двох основних етапів: компоненти, і EcoSeparation, що полягає в подрібненні плат і розділенні отриманої суміші матеріалів.

На першому етапі, EcoRemover, проводиться нагрівання до температури плавлення припою, рідкий припій знімається, і встановлені на платі компоненти відділяються від неї із застосуванням невеликого зовнішнього зусилля. Згідно заявам представників NEC, в ході випробувань був продемонстрований збір 95% припою і відділення майже всіх компонентів без їх пошкодження. Таким чином, на другий етап переходить гола друкарська плата.

В результаті здійснення процесу EcoSeparation вона подрібнюється в порошок, який потім розділяється із застосуванням двох методів: у повітряній центрифугі і на електростатичному високовольтному фільтрі. Вдається виділити більше 98% міді, що містилася в друкарській платі. Майже 100% скловолокна і синтетичних смол, підлягає повторному використанню.

7.7. Зниження вуглецевого сліду продукту

Підрахувати вуглецевий слід індустрії, продукту або послуги - складне завдання. У Міжнародній організації по стандартизації є стандарт ISO 14040: 2006, на основі якого був створений стандарт Оцінки життєвого циклу, що дозволяє приблизно оцінити наслідки виробництва продукту або послуги для навколишнього середовища, в тому числі і їх вуглецевий слід [36].

Розрахуємо вуглецевий слід від пристрою розробленого в дипломній роботі. Для цього спочатку ми порахуємо середню потужність за годину:

$$P_a = \frac{P_{pa} + P_f + P_{pV} + P_{user}}{4} \quad (7.2.)$$

де:

P_{pa} – споживання підсилювачем котрий я спроектував,

P_f – споживання дільником частоти,

P_{pV} – споживання підсилювачем напруги

P_{user} – споживання комп'ютером.

З технічних характеристик беремо дані для обчислення:

1) для мого комп'ютера $P_{user} = 110$ Вт*год;

2) для підсилювача котрий я спроектував

$$P_{pa} = 0.05 \text{ Вт*год. Вт*год};$$

3) дільника частоти

$$P_f = 2 \text{ Вт*год};$$

4) споживання підсилювачем напруги

$$P_{pV} = 11.3 \text{ Вт*год};$$

Середня споживана потужність $P_a = 30.8375$ Вт*год.

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

$$m_{CO_2} = P_a h_{24} d_{30} CDE \quad (7.3.)$$

де:

h_{24} – кількість годин у добі,

d_{30} – кількість днів у місяці,

CDE – викид вуглекислого газу в залежності від палива.

Гідротермальне джерело за кіловат електроенергії викидає 50 грам вуглекислого газу, сонячні панелі – 100 грам, атомна енергія – 30 грам, вітрогенератор – 40 грам [37].

Таблиця 7.1. Види енергії

Тип енергії	CO ₂ , кг
Сонячні панелі	2.2176
Гідротермальне джерело	1.1088
Атомна енергії	0.66528
Вітрогенератор	0.88704

Знизити вуглецевий слід виробництва можна, наприклад, утеплення будинків, розміщенням сонячних панелей на даху, впровадженням енергії з відновлюваних джерел, технологічними поліпшення (більш Економічні лампи і обладнання) [37]. Також, зниження вуглецевого сліду може залежати від матеріалів, що використовуються для виробництва або упаковки. Наприклад, використання і виробництво пластикової тари і упаковки, натомість скляній або металевій, може потенційно знизити виділяється слід CO₂. Так, Franklin Associates розрахували викиди вуглеводнів при виробництві різних видів пляшок в розрахунку на 2957 л. напою. За даними звіту, виробництво пляшок із пластику показало найнижчий результат викидів CO₂ на всіх етапах життєвого циклу. А пластмасові комплектуючі машин і літаків допомагають знизити вагу транспортного засобу, що надалі впливає на економічність споживання палива і призводить до скорочення викидів вуглеводню в атмосферу. До того ж, при виробництві, що вважається більш екологічним, паперового пакета, відбувається на 70% вище виділення парникових газів, ніж при виробництві того ж пакета з пластику [37].

Якщо ж комп'ютер позбавлений зовнішньої відеокарти і має енергоефективний процесор, то споживання такої системи складе менше 200 Ватт на годину, що можна порівняти з енергоспоживанням телевізора великої діагоналі. При цьому треба враховувати, що в режимі простою або нескладних завдань, споживання енергії зменшується завдяки функціям енергозбереження, вбудованим в BIOS материнських плат або утиліт, що функціонує під системою Windows.

7.8. Підсумки розділу

Після того, як в промисловому житті стали використовуватися прилади, що працюють від електроенергії, а в побутовому житті - електротехніка, інтенсивність випромінювання підвищилася. Це призвело до появи хвиль такої довжини, яких раніше в природі не існувало. В результаті будь-який прилад, який працює на електроенергії, є джерелом електромагнітного забруднення. З появою джерел забруднення антропогенного характеру, електромагнітні поля стали чинити негативний вплив і на здоров'я людей, і на природу в цілому. Так з'явилося явище електромагнітного смогу. Він буває як на відкритих просторах, в місті і за його межами, так і в приміщеннях.

Санітарно-гігієнічні чинники небезпеки виникають при підвищеному вмісті в повітрі робочих зон шкідливих речовин, недостатньому чи нераціональному освітленні, підвищеному рівні шуму, вібрації, незадовільних мікрокліматичних умовах, наявності різноманітних випромінювань вище допустимих значень, порушенні правил особистої гігієни та ін.

Організаційні чинники небезпеки характеризують структуру виробничих взаємозв'язків, систему правил, норм, інструкцій, стандартів стосовно виконання робіт, планово-попереджувального ремонту устаткування, організацію нагляду за небезпечними, роботами, використанням устаткування, механізмів та інструменту за призначенням тощо.

Бурхливо розвивається виробництво електроніки створює все більшу кількість відходів. Серед відходів електронного обладнання найбільшою вартістю володіють плати, що містять дорогоцінні метали. Це призвело до розвитку комерційної інфраструктури, заснованої на зборі друкованих плат з подальшою їх сортуванням за змістом дорогоцінних металів і відновленням шляхом переплавки в плавильної печі.

Більшість відходів плат (приблизно 85%) вивозиться на сміттєві звалища. Це призводить до нераціональних втрат обмежених матеріальних ресурсів і, крім того, дає велике навантаження на сміттєві звалища. Утилізація

відходів електроніки дозволить скоротити потреби в сміттєвих звалищах, а також буде сприяти відновленню цінних матеріалів і компонентів для повторного використання. Незважаючи на те, що за останні п'ять років вартість електронних компонентів значно знизилася, все ж існує значний попит на багато відновлені деталі, і варіант зменшення навантаження на сміттєві звалища придбав як ніколи велике значення. Що стосується продукції, одержуваної з відходів, то можна розглядати дві категорії її утилізації: утилізація компонентів і утилізація матеріалів плат.

За допомогою інформації про вуглецевий слід продуктів, споживачі зможуть зрозуміти, як саме запобігти викидам парникових газів. У свою чергу, виробники вже надають клієнтам можливість зменшити вуглецевий слід певних продуктів, використовуючи альтернативну сировину і поновлювані джерела енергії.

ВИСНОВКИ

Цілю даної роботи було дослідити та спроектувати топологію широкопasmового підсилювача потужності з низьким рівнем шуму в КМОН технології 0.12 мкм. Для вибору схеми підсилювача було проведено аналіз класичних схем підсилювачів потужності на МОН транзисторах. Вибір пав на схему широкопasmового підсилювача побудованого по принципу двокаскадного підсилювача з використанням диференційного контуру та зворотного зв'язку. Через те, що така схема має коефіцієнт підсилення за струмом близько трьох та не змінює амплітуду напруги вхідного сигналу, також до позитивних характеристик такої схеми можна віднести дуже широкий діапазон роботи за частотою від 10MHz до 17GHz.

При виконанні роботи ми провели аналіз топологій транзисторів та конденсаторів через те, що від довжини каналу МОН транзистору залежить як буде працювати транзистор на великій частоті. Було встановлено, що при використанні транзисторів з каналом мінімальної довжини в диференційному підсилювачі при частоті вхідного сигналу в 3 MHz ми можемо спостерігати зсув фази вихідного сигналу, нелінійні спотворення та ефекти другого порядку. Збільшуючи довжину каналів у транзисторах ми прийшли до висновку, що при використанні у МОН транзисторах каналу більшої довжини зсув фази вихідного сигналу, нелінійні спотворення та ефекти другого порядку проявляють себе на значно більших частотах.

При проектуванні топології я прийшов до висновку, що оптимальною довжиною каналу транзисторів для диференційної пари буде 0.24 мкм для Р-канальних транзисторів та 0.18 мкм для N-транзисторів активного навантаження. Також у цій роботі було широко використано фіктивні затвори та екранування транзисторів. Подібні міри дозволяють зменшити шуми, особливо це помітно на високій частоті. Також було помічено, що підсилювач працює з меншими шумами, коли усі транзистори мають одне направлення

затворів, особливо це було помітно при повороті транзистору силового каскаду на 90 градусів відносно транзистору дільника напруги.

Також для зменшення шумових характеристик підсилювача було спроектовано RC фільтр. Методом підбору було визначено, що оптимальна ємність конденсатору становить від 50 fF до 100 fF. Найкращі результати були отримані при використанні металевого конденсатору з 6 шарів металу, через те, що в нього були найменші показники паразитного опору та індуктивності. В ролі резистору в RC фільтрі було використано n-МОН транзистор з великою довжиною та шириною каналу для економії площі кристалу.

До негативних складових підсилювача слід віднести його маленький КПД - усього в 25.8 %, та відсутність підсилення за напругою. Але при роботі на такій широкій смузі частот та низькому рівні спотворень на це можна піти.

При проектуванні широкосмугового підсилювача потужності з низьким рівнем шуму в КМОН технології 0.12 мкм було спроектовано 9 транзисторів та один металевий конденсатор. При проектуванні конденсатору було використано 6 шарів металу - це дозволило зменшити площу спроектованої схеми на 7.3 мкм².

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дж. Браннинг (J. Brunning), Р. Рэйит (R. Rayit). Проектирование широкополосного, высокоэффективного высокочастотного усилителя мощности. (URL: <https://microwave-e.ru/wp-content/uploads/3007.pdf>)
- [2] Сурков, О. А. Классы усилителей мощности. Усилители классов А, В, АВ, С. Молодой ученый. 2017. No 17 (151). С. 82-86.
- [3] Баран В.С. Порівняльний аналіз вихідних каскадів підсилювачів класу D. 2020.
- [4] Костров А.И. Проектирование топологии интегральных микросхем в программном комплексе CADENCE. Минск БГУИР. 2011.
- [5] Павлов В.М., Ногин В.М. Схемотехника аналогових електронних пристроїв. М.: Радіо і зв'язок, 1997.
- [6] Драйверы для управления силовыми элементами. URL: <http://nauchebe.net/2013/08/drajvery-dlya-upravleniya-silovymi-elementami/> (дата звернення 11.03.2020).
- [7] 100% времени открытый nMOSFET в верхнем ключе, или про бутстрап с подкачкой. URL: <https://www.drive2.ru/b/1170149/> (дата звернення 16.04.2020).
- [8] Пілінський В.В. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів. Курс лекцій (Видання друге, виправлене). – Київ. Національний Технічний Університет України «КПІ ім. І. Сікорського», 2009. – 426 с.
- [9] Коржов А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие для самостоятельной работы студентов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 70 с.
- [10] Оникиенко Ю.А. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости / Ю.А.Оникиенко, В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко //

Технічна електродинаміка. Тем.вип. Силова електроніка і енергоефективність. 2011, Ч.1 – С.39-42.

[11] Мощные нитрид-галлиевые транзисторы (GaN) от EPC – конец эры кремния. URL: <https://www.compel.ru/lib/71931> (дата звернення 18.03.2020).

[12] D. Han, S. Li, W. Lee, W. Choi and B. Sarlioglu, "Trade-off between switching loss and common mode EMI generation of GaN devices-analysis and solution," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 843-847.

[13] Mohammed Ismail. A Wide Range Differential Difference Amplifier: A Basic Block for Analog Signal Processing in MOS Technology. IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-11: ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING, VOL. 40, NO. 5, MAY 1993.

[14] Aly M. Ismail and Ahmed M. Soliman. Novel CMOS Wide-Linear-Range Transconductance Amplifier. IEEE Transaction on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications, vol. 47, No. 8, August 2000.

[15] Ali Motamed, Changku Hwang. A Low-Voltage Low-Power Wide-Range CMOS Variable Gain Amplifier. IEEE Transaction on Circuits and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing, vol.45, No.7, July 1998.

[16] Aul R. Gray. MOS Operational Amplifier Design— A Tutorial Overview. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. SC-17, No. 6, December 1982.

[17] William C. Wesson. A Fully Integrated, Regulatorless CMOS Power Amplifier for Long-Range Wireless Sensor Communication. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.48, No.5, May 2013.

[18] Arun Ravidrana. Differential CMOS Current-Mode Variable Gain Amplifier with Digital dB-Linear Gain Control. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 38, 161-174, 2004. Kluwer Academic Publishers. Manufactured in the Netherlands.

- [19] Калинина М.М. Проектирование транзисторных широкодиапазонных передатчиков. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ). Санкт-Петербург. 2013.
- [20] ГОСТ 12.0.003-74. "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация".
- [21] ГОСТ 12.1.003–76 “Шум. Загальні вимоги безпеки”.
- [23] ГОСТ 12.1.029–80 “Засоби та методи захисту від шуму”.
- [24] СНП II-4-79 "Природне і штучне освітлення. Норми проектування".
- [25] ГОСТ 12.1.005–88 про «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони».
- [26] НПАОП 0.00-4.15-98 „Положення про розробку інструкцій з охорони праці”.
- [27] НПАОП 0.00-6.03-93 „Порядок опрацювання і затвердження власником нормативних актів про охорону праці, що діють на підприємстві”.
- [28] ISO 14031:1996. Оцінювання екологічної ефективності. Загальні вимоги. Чинний від 15.06.96.
- [29] Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища” – К.: Україна. – 1991. - 59 с. (з усіма редакціями до 2017 року)
- [30] Where the chips fall: environmental health in the semiconductor industry. Environ Health Perspect. 1999 Sep; 107(9): A452–A457.
- [31] ГОСТ 12.1.005–88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Введен 01.01.89.
- [32] ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Введен 01.01.85.
- [33] ГОСТ 12.1.005–88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Введен 01.01.89.

- [34] ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework
- [35]. POSTNOTE 383 June 2011 Carbon Footprint of Electricity Generation
- [36] K. O’Rielly, J. Jeswiet. Strategies to Improve Industrial Energy Efficiency // Procedia CIRP. — 2014-01-01. — T. 15. — C. 325—330. — ISSN 2212-8271
- [37] Harald Pilz, Bernd Brandt, Roland Fehringer. The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe // denkstatt GmbH. — 2010