

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки  
(повна назва кафедри)

Капець Світлана Василівна  
Kapets Svitlana

УДК 004.9

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(шифр та назва спеціальності)

Кваліфікаційна робота  
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістр  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

## **Схемотехнічне моделювання і проектування елементів мікросистем-на-кристалі з малою споживаною потужністю**

## **Circuit modeling and design of elements of micro systems-on-chip with low power consumption**

Науковий керівник:  
д.т.н., проф. Когут І. Т.

Рецензент:.,  
к. ф.-м. н.,  
проф. Прокопів В.В..

Івано-Франківськ  
2020 р.



## АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи “Схемотехнічне моделювання і проектування елементів мікросистем-на-кристалі з малою споживаною потужністю”: 60 с, 23 рис., 5 схем, 27 джерел.

Актуальність роботи полягає в тому, що різні галузі електроніки розвиваються і потребують використання новіших технологій, однією з яких є використання елементів з малою споживаною потужністю, які являють собою об’єднання технологій та конструкцій.

Об’єктом дослідження є елементи мікросистем-на-кристалі з малою споживаною потужністю.

Метою роботи є вивчення та проектування елементів мікросистем-на-кристалі, їх дослідження та аналіз.

Метод дослідження – статистичний аналіз, імітаційне моделювання з використанням комп’ютерних програм.

Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації.

Ключові слова: схемотехнічне моделювання, мікросистема-на-кристалі.

					123 УДК 004.9		
<i>Змін</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Анотація		
<i>Розробила</i>		<i>Капець С. В.</i>					
<i>Перевіриє</i>		<i>Козут І. Т.</i>					
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Затверд.</i>							
					<i>Арк.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушіє</i>
						3	2

## ABSTRACT

Explanatory note to the Master's Research Work "Schematic modeling and design of elements of microsystems-on-chip with low power consumption", 60 pages, 23 figures, 5 schemes, 27 references.

The relevance of the work is that various branches of electronics are evolving and require the use of newer technologies, one of which is the use of low-power elements, which are a combination of technology and design.

The element of the study are microsystems-on-chip with low power consumption.

The purpose of the work is to acquaint and design the elements of microsystems-on-chip, their research and analysis.

Research method - statistical analysis, simulation using computer programs.

The work consists of an introduction, 4 sections, conclusions, a list of used sources of information.

Key words: circuit modeling, microsystem-on-chip.

The object of research is the integral signal converters.

					123	Арк.
					УДК	4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	004.9	

Міністерство освіти і науки України  
 Державний вищий навчальний заклад  
 «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
 Фізико-технічний факультет  
 Кафедра «Комп'ютерної інженерії та електроніки»

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на тему:

«Схемотехнічне моделювання і проектування  
 елементів мікросистем-на-кристалі з малою  
 споживаною потужністю»

						123 УДК 004.9		
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробила	Капець С. В.				Арк.	Аркуш	Аркушів	
Перевіриє	Козут І. Т.				5	60		
Пояснювальна записка								
Н. Контр.								
Затверд.								

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ СЕНСОРНІ МІКРОСХЕМИ-НА-КРИСТАЛІ .....	9
1.1. Загальне поняття про мікросистему-на-кристалі .....	9
1.2. Структура мікросистеми-на-кристалі .....	9
1.3. Структура мікросистеми-на-кристалі .....	11
1.4. Створення мікросистеми-на-кристалі .....	14
РОЗДІЛ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ .....	16
2.1. Поняття та структура моделі .....	16
2.2. Класифікація моделей .....	17
2.3. Задачі моделювання .....	19
2.4. Методи моделювання .....	20
2.5. Процес моделювання. Системний підхід до побудови моделей .....	22
2.6. Схемотехнічне моделювання електронних схем .....	25
РОЗДІЛ 3. МІКРОСИСТЕМНИЙ ДИЗАЙН .....	28
3.1. Порівняння мікросистем та МЕМС. Загальне поняття .....	30
3.2. Виготовлення МЕМС .....	31
3.3. Матеріал для виготовлення МЕМС .....	33
РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛІ .....	36
4.1. Проектування мікросистем .....	36
4.2. Проблеми проектування мікросистем .....	41
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛІ З МАЛОЮ СПОЖИВАНОЮ ПОТУЖНІСТЮ .....	44
5.1. Моделювання за допомогою регулятора напруги .....	44
5.2. Моделювання за допомогою тактового генератора .....	49
5.3. Моделювання базових елементів операційних підсилювачів з малою споживаною потужністю .....	52
ВИСНОВКИ .....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	58

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			6

## ВСТУП

Світова мікроелектроніка безперервно розвивається та постійно з'являються нові й нові вироби, які є більш швидкодіючими та надійними, а також мають менші розміри та є менш енергозатратними.

Особливу увагу приділяють монолітним мікросистемам з технологіями на кристалі. Перші такі пристрої, які вміщували в собі мікромеханічні елементи та схеми перетворення інформації, називались мікроелектромеханічними системами (МЕМС) і вони були створені в США за технологіями мікроелектроніки. Поняття «мікросистема-на-кристалі» (МСК) в основному використовується в Європі і воно має більш загальне значення в порівнянні з МЕМС.

З появою мікросистем-на-кристалі відбувся великий крок в шляху до мінімізації виробів та їхнього універсального застосування. Це дало шанс створювати цілі системи, які мають розмір  $1\text{ см}^2$ , та відкрили нові можливості розвитку мікроелектроніки. Перше відкриття в схемотехніці трапилося завдяки транзистору, але коли компанія Intel, в 1978 році, випустила свій процесор 8086 відбувся прорив. Але перша мікросистема-на-кристалі була створена ще за два роки до виходу цього процесора. Це був електронний годинник Microma LCD Watch., який містив в середині себе мікросистему-на-кристалі Intel 5810 CMOS Chip. Можливо, самі цього не знаючи та не усвідомлюючи Intel створили свій перший прототип мікросистеми-на-кристалі, які впродовж років кардинально змінили вигляд електронних пристроїв та саме уявлення про побудову інтегральних схем. Основним цифровим вузлом таких систем зазвичай є процесор, який виконує програмне опрацювання цифрових даних та сигналів. Для виконання спеціалізованих функцій МСК має різноманітні цифрові вузли та аналогові схеми, які орієнтовані на конкретну галузь застосування. В наш час мікросистеми-на-

									Арк.
						123	УДК 004.9		7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

кристали займають одну із найбільших частин ринку мікроелектроніки.

Елементна база для мікросистем-на-кристалі створюється за рахунок пошуків нових матеріалів та шляхів до їх створення. Структура «кремній-на-ізоляторі» (КНІ) є перспективною за рахунок діелектричної ізоляції поверхневого приладного шару від підкладки. Також перспективними є створення спеціалізованих мікросистем на базових матричних кристалах (БМК). Важливим та актуальним є розширення можливостей для того, щоб створити нові елементи для мікросистем-на-кристалі. Для такої елементної бази потрібні результати досліджень взаємопов'язаних параметрів та конструкції прикладних КНІ-структур.

									Арк.
						123	УДК 004.9		8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



## РОЗДІЛ 1.СУЧАСНІ СЕНСОРНІ МІКРОСХЕМИ-НА-КРИСТАЛІ

### 1.1. Загальне поняття про мікросистему-на-кристалі

Мікросистема-на-кристалі являє собою прилад на єдиному кристалі якого інтегровані процесор, певний обсяг пам'яті, ряд периферійних пристроїв та інтерфейсів. Ефективність таких приладів залежить від взаємодії елементів та їх взаємодії із іншими приладами. Загалом це може бути пов'язане з тим, що є певні відмінності у швидкодії компонентів приладу та особливостях організації її інтерфейсів. Проаналізувавши опис різних виробів та їх характеристику в технічній літературі, для мікросистем-на-кристалі можна сформулювати таке визначення. Мікросистема-на-кристалі - це інтегральна схема на кристалі якої інтегруються різні функціональні блоки, що являють собою пристрій для автономного застосування.

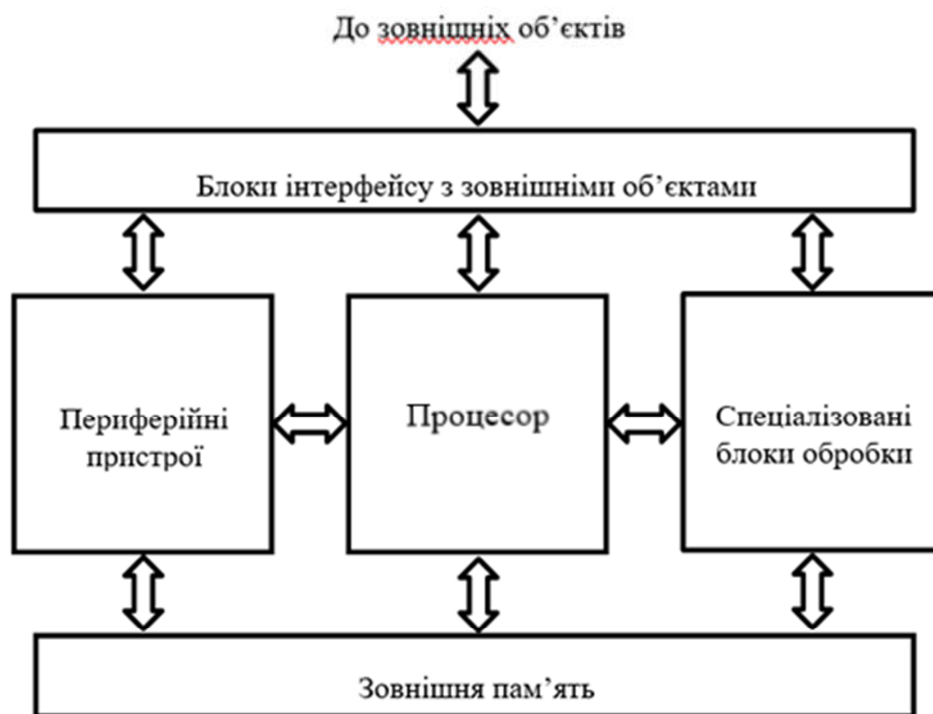
### 1.2. Структура мікросистеми-на-кристалі

Типова мікросистема-на-кристалі вміщує в собі різноманітні набори контролерів та інтерфейсів, куди входять:

- системна шина;
- контроллер шин;
- контроллер Ethernet;
- контролери керування;
- інтерфейси підтримки;
- послідовні інтерфейси;

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			9

- бездротові інтерфейси;
- інтерфейси підтримки карт пам'яті;
- контроллер матричної клавіатури;
- модулі бездротової передачі даних;
- модулі прийому сигналів супутникових навігаційних систем;
- аудіо- і відео-інтерфейси.



**Рисунок 1.1.** Типова мікросистема-на-кристалі.

Така система включає в себе цифрові та аналогові блоки. Процесор - це цифровий блок, який є основним та виконує обробку цифрових даних. Аналогові схеми, блоки цифрової обробки, перетворювачі потоків - це спеціалізовані блоки, які можуть забезпечувати апаратне виконання функцій. До складу мікросистем-на-кристалі можуть входити різноманітні типи модулів пам'яті (SRAM, DRAM, ROM, EEPROM, Flash), або ж підклю-

чатися до системи як зовнішні блоки. Також до складу мікросистем-на-кристалі можуть бути інтегровані таймери, аналогово-цифрові пристрої, цифро-аналогові пристрої, а також широко-імпульсні модулятори, в якості периферійних пристроїв. З'єднання з зовнішніми пристроями відбувається за допомогою портів (паралельних та послідовних), комунікаційних та шинних контролерів, а також інтерфейсних блоків (аналогових підсилювачів, перетворювачів). Звичайно, до складу кожної мікросистеми не входить однакова кількість блоків, а їх чисельність варіюється в залежності від того, яке функціональне призначення в неї. В сучасних мікросистемах наявні спеціалізовані блоки обробки даних, які відрізняють і їх від мікроконтролерів.

### 1.3. Структура мікросистеми-на-кристалі

В концепції побудови мікросистем передбачені схеми обробки інформації та зовнішнього інтерфейсу, а також архітектура сенсорних елементів, для програмованих логічних та процесорних інтегральних схем. Дані архітектури є оптимальними для макро- та мікро-виконань сенсорних елементів, перетворення інформації та схем спряження на основі КМОН. Проте схемотехніці КМОН притаманний обмежений температурний інтервал, який є нестійким до зовнішніх впливів.

В наш час основна увага розробників спрямована на виготовлення нових типів елементів, в основі яких є існуючі та нові мікро- та нанотехнології. Проте виникають також і проблеми з реалізацією функцій на одному кристалі, однією з найбільш поширених є монолітна інтеграція чутливих елементів та схеми з перетворення первинної інформації. Це відбувається через перехід до ще менших розмірів чутливих елементів (нано- та субмікрометрових), скільки в них є малоємнісні навантажувальної

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			11

здатності, які не дозволяють безпосередньо під'єднуватись до виводів інтегральних схем, елементів друкованих плат чи провідників. Щоб створити елементну базу мікросистеми здебільшого використовуються Бі-КМОН технології. Але найбільш перспективними є КНІ-структури, завдяки їх інженерному матеріалу вони мають переваги, які дозволяють розробляти тривимірні конструкції приладів, а завдяки характеристикам - розширюється інтервал температур. Щоб створити елементну базу потрібно проаналізувати методи формування структур (їх переваги та недоліки), сфери застосування таких структур. Комерційними технологіями є: BESOI, ELTRAN, ICEMOS, SIMOX, SmartCut, Unibond. Такі технології формування в першу чергу пов'язані з зміною поверхні та руйнуванням кристалічної структури в кремнієвій пластині великою дозою легування іонами кисню, а також удосконаленим сформованим кремнієвим шаром на окислі (SIMOX). Перенесення тонкого шару кремнію з однієї пластини на іншу відбувається шляхом розумного відколювання після водневого легування (ELTRAN, SmartCut). З'єднання окислених пластин, їх зшліфовування та полірування (BESOI, ICEMOS). Такі методи вважаються універсальними, з точки зору виробника пластин, проте у промисловості нашої країни вони недостатньо освоєні, так як для них необхідне спеціальне технологічне обладнання, вони спрямовані для однотипних інтегральних схем або сенсорів. Такі пластини є дорогими, через складну технологію, і це чинник, який стримує їх широке використання. Гнучкість використання пластин є обмеженим та технологічно не уніфікований. Саме тому, створення таких елементів мікросистем буде більш доцільним з використанням пластини з структурою КНІ, які мають можливість виготовлятися в єдиному технологічному циклі та інтегруються на одному кристалі елемента приладу.

									Арк.
									12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123	УДК 004.9			

Перспективною технологією, а також відносно дешевою, для тривимірних та багат шарових елементів є МЛР, в якій є достатньо можливостей для того, щоб одержати якісні КНІ-структури з керованою локалізацією дефектів, шляхом підбору топології та їх вихідної структури перед проведенням МЛР, фільтрацією дефектів. Перевагою таких структур є те, що температура підігріву підкладки - порівняно низька (400-500°C). Завдяки цьому відкриваються можливості інтеграції таких структур в технології, які створюють тривимірні елементи приладів. КНІ-структури з МЛР для створення нескладних мікро систем будуть найбільш доцільними. А найбільш оптимальними є інтегральні схеми, мікросистеми, які мають однорідну архітектуру.

БМК з регулярним розміщенням елементів були вибрані основою для побудови мікросистеми. Вони використовувалися у вигляді регулярно повторюваних смужок, для яких найбільш оптимальним варіантом є прив'язати напрям сканування лазерного променя та локалізувати дефекти, одночасно використовуючи елементи вихідних структур, як елементи приладів. Також для таких архітектур можна використовувати створення локальних тривимірних структур, але іншими методами.

Сучасні БМК є цифровими або цифро-аналоговими (рідше) на основі КМОН, щоб створювати замовні інтегральні схеми. Таке проектування є доступним та нескладним. Але щоб створити таку монолітно-інтегровану мікросистему, потрібні спеціалізовані архітектури, які мають матриці чутливих та цифро-аналогових елементів з збільшеними експлуатаційними можливостями.

Аналіз елементної бази та її складових на основі Бі-КМОН-технології, вказує на те, що такі елементи не завжди здатні для екстремальних умов експлуатації; а створення нових приладів має обмежені можливості. Тому для розроблення нових перспективних прикладних елементів, або для

									Арк.
					123	УДК 004.9			13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

того щоб модифікувати існуючі, які розширяють можливості створення мікросистеми та сфери їх застосування, враховуючи екстремальні умови, специфіку проектування та виробництво їх в стислий термін.

#### 1.4. Створення мікросистеми-на-кристалі

Створення мікросистеми-на-кристалі складається з наступних процесів:

1. Розробка ІР-блоків;
2. Конструювання системи на системному функціональному рівні (VC): інтегрування всіх блоків на одному кристалі.

Найчастіше в проектах системи-на-кристалі використовуються такі ІР-блоки:

- стандартні інтерфейси;
- мікропроцесори;
- пам'ять;
- цифро-аналогові блоки;
- аналогові і ВЧ-компоненти;
- відео і аудіо декодери.

Мікросистеми-на-кристалі відрізняються від класичних систем на друкованій платі та мають над ними такі переваги:

1. Мініатюризація – це елемент, який створений на базі мікросистеми-на-кристалі складається з 1-2 НВІС та обмеженого набору компонентів, які не можуть, з технологічних причин, інтегруватися всередину інтегральної схеми.

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14

2. Зниження споживаної потужності - можна знизити напругу живлення, а також зменшити споживану потужність, за рахунок того, що елементи такого типу виготовлені за технологією «глибокого субмікрона».

3. Підвищена надійність - завдяки об'єднанню кількох компонентів на одній пластині істотно зменшується число спаяних з'єднань.

Мікросистема-на-кристалі представляє собою цифрову над велику інтегральну схему (НВІС), яка Може містити ряд аналогових блоків. Саме тому для їх проектування можна використовувати ті ж методи та засоби, як і для НВІС. Такі засоби реалізуються у вигляді системи автоматизованого проектування (САПР). Система використовує бібліотеки функціональних елементів бази, в яку входять логічні вентиля, тригери, макроелементи, які можуть використовувати складніші функції (арифметико логічний пристрої, лічильники, помножувачі, регістри, суматори).

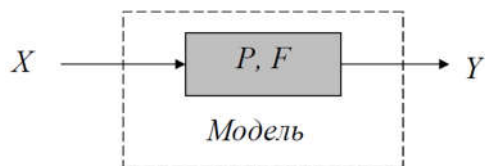
					123	УДК 004.9	Арк.
							15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

## РОЗДІЛ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

Проектування електронних схем відбувається завдяки розв'язуванню задач з синтезу та аналізу. Для того щоб зрозуміти поняття схемотехнічного моделювання вам потрібно ознайомитися з поняттям моделі, способами її побудови та класифікації. Зрозуміти задачу моделювання.

### 2.1. Поняття та структура моделі

Модель - це абстрактне уявлення об'єкта. Їх можна описати за допомогою набору вхідних змінних, тривалістю обслуговування та інтенсивністю вхідного потоку. До набору вхідних змінних входять інтенсивність вихідного потоку, а в місцях накопичення вимог - середня довжина черги. Чисельність пристроїв, наявність черг та наявність обмежень, може розглядатися як параметри моделей загального обслуговування.



**Рисунок 2.1. Структура моделі.** Структура моделі:  $X$  - вхідні змінні системи,  $Y$  - вихідні змінні системи,  $P$  - множина параметрів,  $F$  - функція, модель, залежність змінних  $Y$  від  $X$ .

Модель можна побудувати двома способами. Перший - встановити закони функціонування систем (їх потім можна відтворити за допомогою моделі). Таким чином на моделі можна дослідити поведінку системи. Процеси, які протікають в системі, мають фізичну інтерпретацію, і в такому

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123	УДК 004.9			16



випадку показують параметри моделі. Саме тому їх можна назвати фізичними моделями. Другий, в якому параметри не пов'язані з фізикою реальних процесів, які протікають в системі, таким чином зв'язок залишається невідомим. Такий тип моделі називається нефізичною моделлю.

## 2.2. Класифікація моделей

Технічні пристрої та їх математичні моделі можуть класифікуватись за рядом ознак.

### 1. За характером відображених процесів:

- статичні - в них вихідна змінна не буде змінюватися з часом;
- динамічні - змінна буде змінюватись з часом. Такі моделі можна поділити на неперервні (змінювання змінної є неперервним) та дискретні (змінювання змінної відбувається в певні моменти часу, а в інші є незмінні). Дискретні детерміновані системи в певні моменти часу є передбачуваними, а стохастичні - в них змінювання відоме з деякою імовірністю.

### 2. За способом наведення:

- аналітичні - описують вольт-амперні характеристики (ВАХ) у вигляді рівнянь або диференціальних рівнянь, які описують перехідні процеси та характеризують інерційність елемента;
- графічні - подають компоненти в вигляді еквівалентних схем або у вигляді графіків ВАХ;
- табличні - подають схеми або елементи у вигляді цифрових таблиць, які були отримані в ході експериментальних досліджень об'єкта та відповід-

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			17

них йому графіків експериментальних ВАХ. Такі моделі використовуються в тому випадку, коли складно побудувати аналітичну модель.

Ці моделі можна використовувати у вигляді підпрограм, але в такому поданні вони будуть представлені у вигляді цифрової моделі. Аналітичні та графічні - можна задати у вигляді алгоритму, Який обчислив зовнішні параметри моделі, така модель буде називатися алгоритмічною моделлю. Модель стане цифровою відповідно до наведеного алгоритму, але після оформлення підпрограми.

3. Класифікують електронні схеми також і по типу рівнянь, які вживаються в їх математичних моделях.

В залежності від характеристик вхідних компонентів електронний ланцюг може володіти різноманітними властивостями. Реальна залежність між струмом та напругою завжди нелінійна, складна та має статистичний характер. В залежності від режиму роботи пристроїв за струмом, напругою та зовнішніх факторів може бути різним ступінь нелінійності вхідних характеристик компонентів. В стаціонарних умовах статистичний характер параметрів компонентів мало виражений.

Коли формується, залежно від цілей аналізу та необхідної точності, математична модель електронного ланцюга, допустимо замінити нелінійну залежність, між струмом та напругою на полюсах, на лінійну. результатом такої заміни складна нелінійна модель заміниться менш точною, але більш простою лінійною моделлю.

4. За діапазоном робочих сигналів:

- малосигнальні - лінійні моделі;
- великосигнальні - враховуються характеристики активних та пасивних елементів схеми.

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			18

5. За діапазоном робочих частот:

- низькочастотні;
- високочастотні;
- надвисокочастотні.

Низькочастотні використовуються для розрахунків схем з постійним струмом (в статичному режимі), але не враховують інерційність компонентів. Високочастотні враховують інерційність компонентів, окрім особливостей статичного режиму. Такі моделі доповнюються диференціальними рівняннями, які враховують інерційність компонентів, або ж еквівалентними схемами, що визначають фізичні процеси в компонентах. Особливістю цих двох моделей є те, що вони створені на зосереджених елементах, тому закони Кірхгофа є для них справедливими.

Надвисокочастотні моделі відрізняються від попередніх з врахуванням тимчасових та просторових координат, для їх аналізу використовують рівняння Максвелла. Закони Кірхгофа справедливі тільки в діапазоні до 10-ти ГГц.

### 2.3. Задачі моделювання

Виділимо такі основні задачі моделювання:

1. Задача моделювання знаходить значення вихідних змінних  $Y$ , коли відомі значення вхідних змінних  $X$ , відома модель  $F$  та параметри  $P$ .
2. Задача управління віднаходить значення таких вхідних змінних  $X$ , які можуть забезпечувати значення вихідних змінних  $Y$  при відомій моделі  $F$  та фіксованому значенні параметрів  $P$ .
3. Задача ідентифікації віднаходить одну модель  $F$  з усіх запропонованих,

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			19

визначає її параметри  $P$ , які забезпечують вихідні значення  $Y$  при вхідних  $X$ .

4. Задача оптимізації має відому модель  $F$ , множину вхідних значень  $X$  та критерій оптимізації  $K$ . За ними можна знайти значення параметрів  $P$ , значення вхідних  $X$  та вихідних  $Y$  змінних, які задовільняють заданий критерій оптимізації  $K$ .
5. Задача прогнозування - при відомих значеннях вхідних  $X$  та вихідних  $Y$  значень, на заданому часі  $T$  та до певного моменту часу  $t$  необхідно визначити модель  $F$  та параметри  $P$ .

<b>Моделювання:</b>	відомі $X, P, F \Rightarrow$ знайти $Y$
<b>Управління:</b>	відомі $Y, P, F \Rightarrow$ знайти $X$
<b>Ідентифікації:</b>	відомі $X, Y$ , множина $F \Rightarrow$ знайти $f \in F, P$
<b>Оптимізації:</b>	відомі $F$ , критерій $K \Rightarrow$ знайти $P, X, Y$
<b>Прогнозування:</b>	відомі $X_t, Y_t, T \Rightarrow$ знайти $F, P, Y_{t+T}$

**Рисунок 2.2. Задачі моделювання.**

## 2.4. Методи моделювання.

Існує велика кількість методів моделювання, але виділимо такі, як основні: аналітичне моделювання, імітаційне моделювання та математичне моделювання.

Аналітичне моделювання представляє вигляд відомих аналітичних функцій. Аналітичною буде та функція, яка розкладається у ряд Тейлора. Такі функції й диференційовані багато разів, до них можна застосовувати методи математичного аналізу. До цього методу можна застосовувати класичний математичний аналіз, за допомогою якого можна отримати залежність  $Y = f(X)$ . Цьому методу надають перевагу тоді, коли є можливість

побудувати аналітичну модель. Для того щоб знайти таку залежність  $Y=f(X)$ , потібно буде застосувати спеціальне програмне забезпечення, або ж відмовитись від знаходження абстрактної залежності та обійтись наближеним розв'язком, який знаходиться чисельним методом. Є системи, в яких опис не піддається аналітичним функціям, проте завдяки алгоритму імітації може бути описаний процес їх функціонування. Імітація - це відтворення складної системи в часі, за допомогою комп'ютерної програми. Отримати інформацію про властивість такої системи можна в результаті багаторазових прогонів імітаційної моделі. Саме цей метод називається імітаційним моделюванням.

Можуть бути складні системи, в яких опис функціонування може бути описаний аналітичними функціями, але знаходження такої залежності  $Y=f(X)$  є неможливим. Такі задачі можуть мати досить простий аналітичний опис, але їх розв'язок можна знайти тільки після виконання деякої кількості кроків. Розв'язок такого алгоритму не може бути записаним в аналітичній формі. Такий метод називається математичним моделюванням.



**Рисунок 2.3. Методи моделювання.**

## 2.5. Процес моделювання. Системний підхід до побудови моделей.

Процес моделювання можна поділити на кілька етапів. На першому етапі необхідно визначити задачу моделювання та її мету. В другому етапі описуємо систему. Концептуальна модель системи описує набір змінних, структуру системи, формування цілі та задачі. Виходячи з такої моделі, вибираючи інструментальні засоби, необхідно вибрати теоретичну базу, завдяки якій буде побудована модель системи. Коли обрана теоретична база моделювання, можна описати систему, яка розглядається, обраними елементами опису та визначити усі необхідні параметри для неї. Формальне представлення такої системи має вигляд схеми, де вказано зв'язки між елементами системи та зовнішнім середовищем, вказано параметри елементів системи. Формальна модель містить інформацію, яким саме чином, в результаті моделювання, будуть знайдені вихідні змінні.

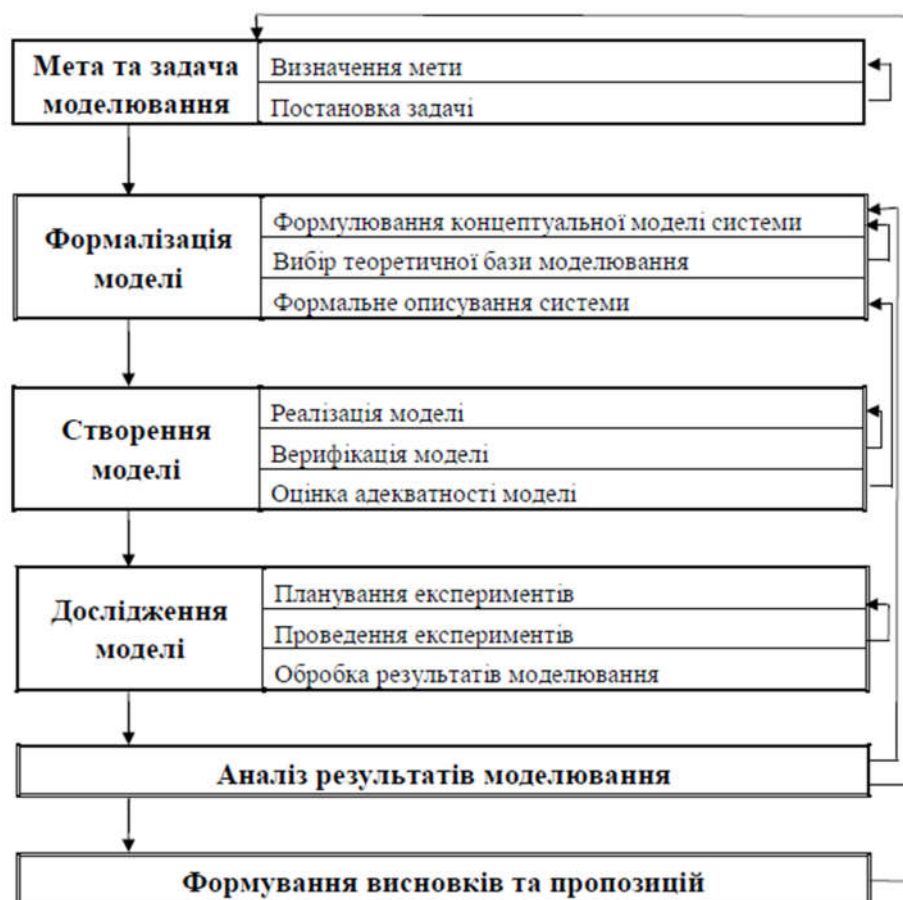
На третьому етапі створюється модель. Спочатку за допомогою вибраного програмного забезпечення виконується реалізація моделі. Потім відбувається верифікація (перевірка на відповідність алгоритму моделювання задуму моделювання). Створення моделі завершується перевіркою, яка порівнює значення вихідних змінних об'єкта та моделі з однаковими значеннями вхідних змінних. Зрозуміло, що така перевірка здійснюється тільки тоді, коли відомі певні значення вхідних та вихідних змінних, об'єкта який досліджується.

Четвертий етап - етап дослідження моделі. На цьому етапі результати моделювання будуть корисними, якщо було проведено змістовне дослідження, відповідно до мети моделювання. Експерименти повинні бути - сплановані, проведені, статистично оброблені.

Аналіз результату моделювання складається з оцінки: точності результатів, стійкості результатів та чутливості результатів.

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			22

Завершальним етапом є формування висновків та пропозицій, де необхідно підвести підсумки та висловити свою думку на рахунок подальших досліджень об'єктів моделювання. Процес моделювання можна представляти етапами тільки у звіті про результат моделювання, адже в ході моделювання потрібно не один раз повертатись до попередніх етапів, уточнювати постановку задач, формальні описи моделей, алгоритми реалізацій або ж порядок проведення експериментів, наближаючись до мети поступовим кроками.



**Рисунок 2.4. Процес моделювання.**

Системний аналіз має завдання формувати опис системи, який відповідатиме меті дослідження системи. Опис системи складається з:

1. набору вхідних змінних, де вказані їхні основні характеристики;

2. набору вихідних змінних, які забезпечують досягнення цілей дослідження;
3. границь системи, де вказано, що саме для системи є її зовнішнім середовищем.
4. елементів системи, де вказані їх основні властивості;
5. зв'язків між елементами системи.

За допомогою системного підходу можна вивчити функціонування системи в загальному, не беручи до уваги окремі її частини. Для всіх систем характерні параметри, які стають на заваді на шляху поліпшення функціонування системи:

- взаємозалежність - всі частини залежать одна від одної, як наслідок погане функціонування однієї частини буде негативно впливати на функціонування інших частин;
- змінюваність - реальна система не є постійною впродовж певного періоду часу, тому побудована модель матиме обмежений термін використання;
- організація - підкоряється цільовому призначенню системи;
- наявне навколишнє середовище - випадковий характер впливу зовнішнього середовища;
- протиприродна поведінка - наслідки з'являються пізніше, ніж причина;
- погіршення характеристики функціонування - можуть зношуватись частини системи, як результат погіршується робота, що може призвести до непередбачуваних наслідків.

Кожна система, з точки зору вибору кордонів системи та її елементів, об'єктивна та суб'єктивна. Одному процесу можна співставити у відповідність різні системи, Та тільки завдяки досвіду, інтуїції, здатності творчо мислити, можна здійснити правильний вибір між багатьма варіанта-

					123	УДК 004.9	Арк.
							24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



ми та виконати дослідження найкращим способом. Системні моделі побудовані з застосуванням системного підходу, завдяки чому і отримали свою назву.

Концептуальна модель описує систему разом з вказаною ціллю та задачею. Концептуальна, тобто сприйнятна. Умовно, в створенні концептуальної моделі, можна виділити такі етапи:

- орієнтація - мета дослідження системи;
- стратифікація - рівень деталізації системи;
- деталізація - визначення елементів системи;
- локалізація - вплив зовнішнього середовища;
- структуризація - зв'язок елементів системи з зовнішнім середовищем.

## 2.6. Схемотехнічне моделювання електронних схем

Проектування електронних схем зводиться до розв'язування задач з синтезу та аналізу. Під синтезом тут розуміють інтуїтивне або формалізоване, створення варіанту схеми, який не обов'язково буде кінцевим результатом. Задача може виконуватися багато разів в процесі проектування синтезу, чергуючи в свою чергу з вирішенням завдань з аналізу. Задача аналізу - це вивчення властивостей схем по заданій структурі (в результаті синтезу), характеру вхідних елементів та параметрів.

Методи аналізу та розрахунку електронних схем безперервно розвиваються та вдосконалюються. Цьому є ряд причин, по-перше: предмет аналізу стрімко ускладнюється за рахунок:

- перероджень елементної бази;
- виникнень нових норм побудови пристроїв для обробки та перетворення електричних сигналів та енергії, а також для підсилення;

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			25

- розширення набору приладів та схем, які мають нелінійні характеристики;
- впровадженнь нововведених дискретно-імпульсних режимів в роботі перетворення інформації, електричних схем та електричної енергії.

По-друге, відбувається якісний перехід в засобах технічного аналізу та розрахунку електронних схем, які можуть проводити чисельні розрахунки та вирішувати складні логічні задачі.

По-третє, зростають вимоги точності, масштабності, аналізу та розрахунку електронних схем, так як сучасна технологія виготовлення немістить їх експериментального доведення, а необхідні вимоги технічних та метеорологічних параметрів в цих електронних пристроях постійно зростають.

По-четверте, ускладнюються різновиди сигналів кому які мають вплив на схеми за рахунок їх масового поширення в складі розривних функцій.

Для моделювання електричних схем можна використовувати різні мови опису. Загальноприйнятими та найбільш поширеними є мови: нова та VHDL. Мова Spice була розроблена в кінці 70-х років в американському університеті Берклі, який знаходиться в штаті Каліфорнія. Багато програмних пакетів працюють на основі цієї мови, зокрема OrCad, MicroCap, MultiSim.

Програми на основі мови Spice містять набір типових компонентів математичних моделей. Їх параметри записуються в бібліотечній файли або ж складаються у файли окремих моделей.

Програмні пакети, під час електричного моделювання, дають можливість створити власні моделі на електричному рівні, також є можливість створити макромоделі. З використанням макромоделей буде зменшуватись складність відображення схеми та пришвидшуватимуться обрахунки. На основі цієї мови використовуються програмні пакети для то-

					123	УДК 004.9	Арк.
							26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

го, щоб моделювати аналогові, цифрові та змішані цифро-аналогові схеми.

Мова VHDL алгоритмічно описує апаратуру високого рівня. Вона описує порядок роботи пристроїв завдяки послідовності операторів присвоювання та затвердження рішень. Ця мова використовується для моделювання та проектування цифрових пристроїв. Розроблена мова на початку 80-х років за вимогою Міністерства оборони США. Згодом вона була прийнята як стандарт IEEE.

					123	УДК 004.9	Арк.
							27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

### РОЗДІЛ 3. МІКРОСИСТЕМНИЙ ДИЗАЙН

Об'єднання всіх аспектів мікросистемного проектування здатне вирішити складний спектр проблем, пов'язаних зі зведенням цілих систем до мікро- та нанодоменів.

Мікросистеми мають давню історію, починаючи з найдавніших часів мікроелектроніки. Хоча інтегральні схеми розроблялися на початку 1960-х років, ряд лабораторій працювали над використанням тієї самої технологічної бази для формування інтегрованих датчиків. Ідея полягала в тому, щоб зменшити вартість і, можливо, поєднати датчики та схеми на одному чіпі. До кінця 60-х років для видимих зображень були розроблені інтегровані масиви, а кремнієве живлення використовувалося для створення тонких діафрагм, які могли перетворювати тиск в електричний сигнал. До 1970 року для формування діафрагми використовували селективне анізотропне травлення, утримуючи товстий кремній-ободок для поглинання напружень, викликаних пакетом. Незабаром з'явилося живлення для зупинки на домішці та електрохімічній базі, і „об'ємна мікрообробка” стала на своє місце. Зчеплення пластин (особливо електростатичний зв'язок кремній-скло) додало додаткових можливостей і застосовувалось до багатьох конструкцій, включаючи намагання інтегрувати цілу систему газової хроматографії на одній пластині.

Попит на покращену економію пального в автомобілях і зменшення викидів в кінці 70-х років перетворили інтегровані датчики тиску на велике виробництво.

На початку 1980-х років датчики тиску з вбудованою електронікою зчитування також були у виробництві, а об'ємна мікрообробка застосовувалася до витратомірів, акселерометрів, струменевих друкувальних голів та інших пристроїв. У цей момент поле «інтегрованих датчиків» поча-

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

ло самоорганізовуватися, створюючи незалежні засідання для доповнення спеціальних сесій на мікроелектронних конференціях.

Поверхнева мікрообробка вийшла на сцену в середині 80-х років і швидко призвела до застосування в акселерометрах, датчиках тиску та інших електромеханічних конструкціях. Мікроактуатори стали центром значної роботи, а ідея розміщення цілих систем із замкнутим циклом на мікросхемі стала справжньою метою. Поле потребувало скорочення, і поступово було прийнято "MEMS" (MicroElectroMechanical Systems), незважаючи на те, що багато пристроїв насправді не були механічними. Термін "мікросистеми" також стає все більш поширеним, коли йдеться про інтеграцію датчиків, виконавчих механізмів та електроніки для обробки сигналів на загальній (але не обов'язково монолітній) підкладці.

Починаючи з кінця 80-х, MEMS все більше отримували визнання у всьому світі.

У США програма нових технологій Національного наукового фонду обрала її як координатора, і в 1992 році це зробило також Агентство перспективних дослідницьких оборонних робіт (DARPA); раптом фінансування різко зросло, а також кількість гравців. Подібні інвестиції здійснювались у Європі та Азії, завдяки чому після більш ніж 25 років родовище нарешті досягло вирішальної більшості. У 1990-х роках з'явилися струменеві друкуючі головки на базі MEMS, датчики тиску,

Витратоміри, акселерометри, гіроскопи, інфрачервоні тепловізори, що не охолоджуються, та оптичні проекційні дисплеї - все це входить у виробництво. Збільшився акцент на повноцінних мікросистемах.

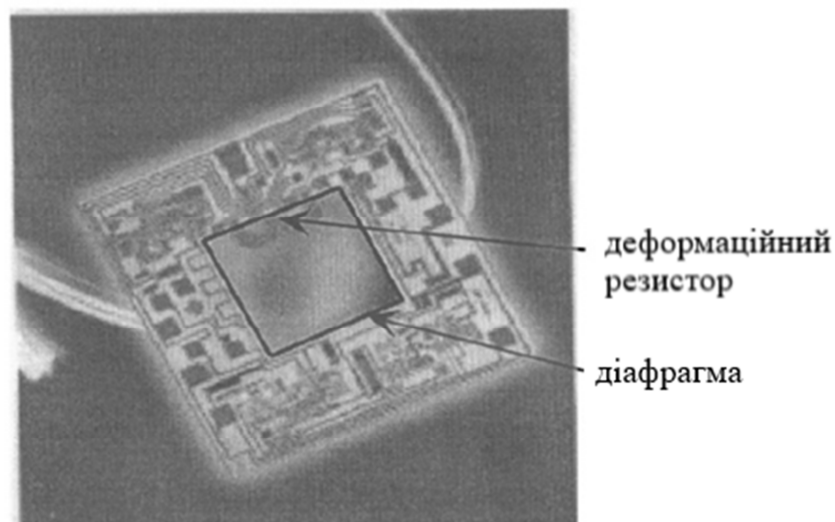
Зараз розробляються більш досконалі пристрої, включаючи ДНК-аналізатори, інтегровані системи газової хроматографії та мініатюрні спектрометри.

					123	УДК 004.9	Арк.
							29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

### 3.1. Порівняння мікросистем та МЕМС. Загальне поняття

У Європі їх називають «мікросистемами». У Сполучених Штатах та інших країнах дедалі частіше їх називають «Мікроелектромеханічні системи» або ж «MEMS». Незважаючи на те, що європейська назва є більш загальною, все-охоплюючою та багато в чому описовішою, аббревіатура MEMS є привабливою, унікальною та набуває популярності у всьому світі.

Мікросистеми буквально - це "дуже маленькі системи" або "системи, виготовлені з дуже дрібних компонентів". Вони роблять щось цікаве та / або корисне. Назва не передбачає жодного конкретного способу їх побудови та жодної вимоги щодо того, щоб вони містили якийсь конкретний тип функціональності. Мікроелектромеханічні системи (МЕМС), з іншого боку, займають позицію: мікро встановлює розмірну шкалу, електро пропонує або електрику, або електроніку (або обидва), а механічна пропонує якісь рухомі частини. Але концепція MEMS розрослася до багатьох інших типів дрібних речей, включаючи теплові, магнітні, рідинні та оптичні прилади та системи, з рухомими частинами або без них. Обидва терміни охоплюють сферу інтересів.



**Рисунок 3.1.** Інтелектуальна система з інтегрованим датчиком тиску.

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			30

На практиці мікросистеми MEMS мають кілька спільних рис. По-перше, MEMS включає як електронні, так і неелектронні елементи і виконує функції, які можуть включати отримання сигналу (зондування), обробку сигналу, спрацьовування, відображення та управління. Вони також можуть служити транспортними засобами для проведення хімічних та біохімічних реакцій та аналізів.

По-друге, MEMS є "системами" у справжньому розумінні, що означає, що важливі системні питання, такі як упаковка, розподіл системи на компоненти, калібрування, відношення сигнал/шум, стабільність та надійність, повинні зіткнутися.

По-третє, найуспішнішими MEMS були ті, які передбачають зміни парадигми з "макро" способу ведення справи, не просто зменшуючи масштаб розміру. Прикладами є струменева друкуюча головка, яка забезпечує якісний кольоровий друк за дуже низьких витрат, і тонкоплівкові головки з магнітними дисками, які продовжують забезпечувати вражаючі вдосконалення у галузі масової пам'яті. І. Мікрофлюїдні пристрої починають забезпечувати дивовижні поліпшення швидкості біохімічного аналізу. Нарешті, деякі MEMS включають великі масиви мікровиготовлених елементів. Приклади включають неохолоджувані інфрачервоні прилади зображення, а також відбивні та рефракційні проекційні дисплеї.

### 3.2. Виготовлення MEMS

Більшість пристроїв та систем MEMS включають певні форми мікровиробництва на основі літографії, запозичені у мікроелектронної промисловості та вдосконалені за допомогою спеціалізованих методів, які зазвичай називаються "мікрообробкою". Виготовлення партій, характерне для мікроелектронної промисловості, дає можливість значно зменшити витрати при виробництві великих обсягів.

					123	УДК 004.9	Арк.
							31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Літографічні методи, як правило, вимагають використання плоских підкладок. Кремній часто використовується навіть тоді, коли в пристрої відсутні електронні компоненти, оскільки інструменти, необхідні для мікровиробництва, розроблені з урахуванням характеристик кремнієвих пластин. Літографія пропонує в площині субмікронну точність на розмірних шкалах від мікрона до міліметра. Методи нанесення та травлення тонкої плівки у поєднанні з техніками склеювання пластин дозволяють зробити візерунок третього виміру, роблячи можливим створення рухомих деталей. Поєднання літографії та тонкоплівкових методів, як правило, призводить до утворення структур, що характеризуються екструзією двовимірних елементів у третій вимір. Нові методи виготовлення забезпечують додаткову свободу ліплення більш загальних тривимірних конструкцій, але вони ще не увійшли у виробництво великих обсягів.

Оскільки виготовлення MEMS зазвичай включає деякі етапи, спільні зі звичайною мікроелектронікою, існує майже рефлексивний потяг до створення повністю інтегрованих мікросистем, тобто інтегральних схем, які включають механічні або інші неелектронні елементи на кремнійному чіпі разом з електронною частиною системи. Деякі виробники агресивно йдуть цим шляхом.



**Рисунок 3.2.** Кварцовий гіроскоп.

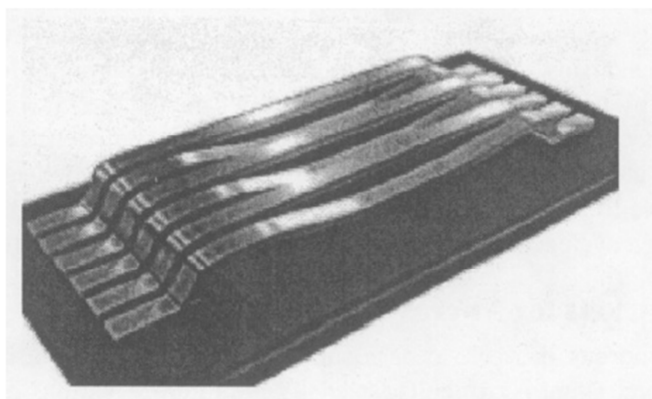
					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			32



Однак альтернативною стратегією є розподіл мікросистеми на підсистеми, які виготовляються окремо, а потім збираються в компактну систему під час операції пакування. Дискусія щодо "правильного" підходу триває без жодної чіткої відповіді. Однак окремі фахівці з питань MEMS (включаючи цього автора) мають тверді думки. Зрозуміло, що архітектура системи та її розділення на компоненти мають величезний вплив на деталі побудови системи. Крім того, інкапсуляція та упаковка компонента в систему може суттєво вплинути на конструкцію.

### 3.3. Матеріал для виготовлення MEMS

Вибір матеріалів у мікросистемі визначається обмеженнями мікровиробництва. Інтегральні схеми утворені різними провідниками та ізоляторами, які можуть бути нанесені та з малюнком із високою точністю. Більшість із них - неорганічні матеріали (кремній, діоксид кремнію, нітрид кремнію, алюміній та вольфрам), хоча використовуються також певні полімери. Мікровиробництво, яке виходить за рамки звичайної мікроелектроніки, відкриває набагато ширший спектр матеріалів та відповідний набір додаткових методів, таких як гальванічне покриття металів, формування та тиснення пластмас.



**Рисунок 3. 4.** Схематичний вигляд пікселя дифракційного оптичного дисплея з електростатичним приводом

Спектр матеріалів для мікросистем зараз став дуже широким. Це пропонує безліч варіантів вибору. Однією з ролей процесу проектування є оцінка відносних переваг різних способів побудови пропонованого пристрою.

Оскільки ефективність пристроїв MEMS залежить від основних властивостей матеріалів, з яких вони виготовлені, збільшення різноманітності вибору матеріалів несе в собі вимогу щодо вимірювання та документування їх властивостей. Багато з цих матеріалів використовуються у тонкоплівковій формі, і добре відомо, що тонкоплівкові властивості можуть відрізнятися від об'ємних властивостей.

Отже, деякі властивості, які є критично важливими для роботи пристрою, наприклад, модуль пружності або залишкове напруження підвішеної балки, повинні контролюватися у процесі виробництва, щоб забезпечити повторюваність від пристрою до пристрою. Це вимагає нових методів вимірювання властивостей матеріалу, що стає все більш важливим у галузі мікросистем.

Конструкція мікросистеми вимагає декількох різних рівнів опису та деталізації. На одному рівні дизайнер повинен задокументувати потребу та технічні характеристики запропонованої мікросистеми, оцінити різні методи, за допомогою яких вона може бути виготовлена, і, якщо пристрій має стати комерційним продуктом, додатково оцінити очікувані виробничі витрати. На іншому рівні для кожного запропонованого підходу слід мати справу з деталями розподілу системи на компоненти, вибором матеріалів та відповідною послідовністю виготовлення кожного компонента, методами упаковки та складання, а також засобами, що забезпечують належне калібрування та рівномірність пристрою під час виготовлення. Очевидно, це може бути моторошною роботою.

					123	УДК 004.9	Арк.
							34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Кількісні моделі відіграють ключову роль у процесі проектування, дозволяючи прогнозувати продуктивність до побудови пристрою, підтримуючи усунення несправностей конструкцій пристрою під час розробки та дозволяючи критичну оцінку механізмів відмов після того, як пристрій введено у виробництво. Моделі можуть розроблятися вручну в аналітичній формі, або вони можуть мати форму чисельного моделювання, проведеного на високошвидкісних робочих станціях. Досвід показує, що існує природний перехід від приблизних аналітичних моделей на початку циклу проектування до більш детальних та всебічних чисельних моделювань пізніше в циклі проектування, продовжуючи розробку та виготовлення пристрою.

									Арк.
									35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123	УДК 004.9			

## РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛІ

### 4.1. Проектування мікросистем

Проектування є альтернативним кроком довгого процесу вирішення до оптимального. Для проектування характерні такі параметри:

- знаходження рішень, які будуть максимально задовольняти всі вимоги;
- деякі вимоги можуть бути конфліктними;
- знаходяться альтернативні рішення;
- метою виробництва є спрощення.

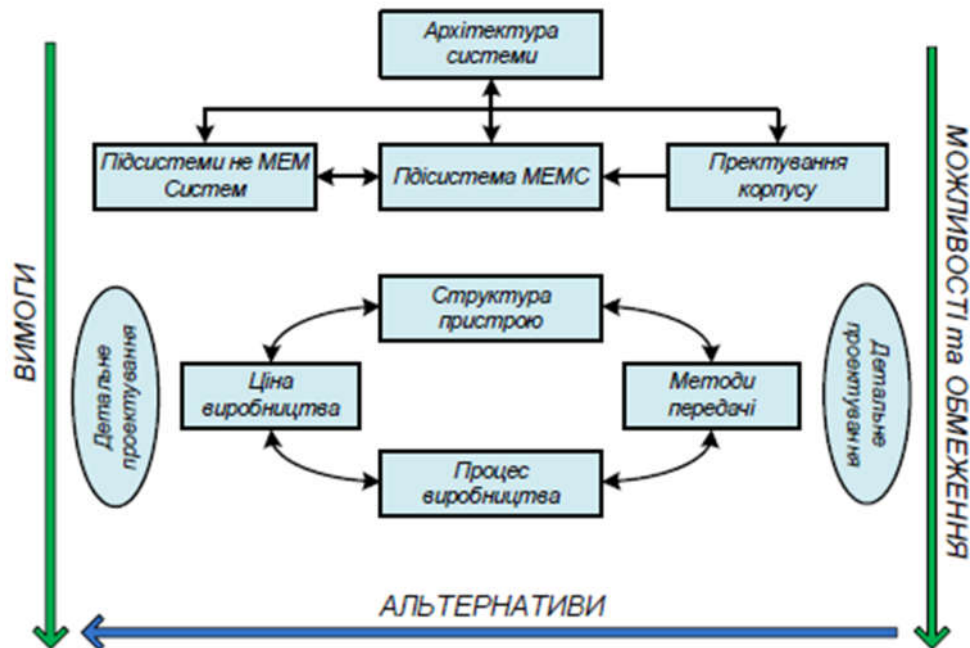


Рисунок 4.1. Схема проектування мікросистеми

Опис мікросистеми відбувається на початковому етапі проектування, він включає в себе механічні та електричні параметри системи.



**Рисунок 4.2.** Схема проектування вбудованих систем та їх виготовлення

Проектування конструкції механічної складової відбуваються за результатом електричної схеми першого наближення, де в подальшому будуть змодельовані всі вихідні характеристики. Завдяки такому аналізу можна уточнюється електрична схема заміщення. Та вона інтегрується в загальну схему виробу.

Ітерація відбувається до того часу, поки всі параметри (вихідні електричні та механічні) незадовільнятимуть технічне завдання.

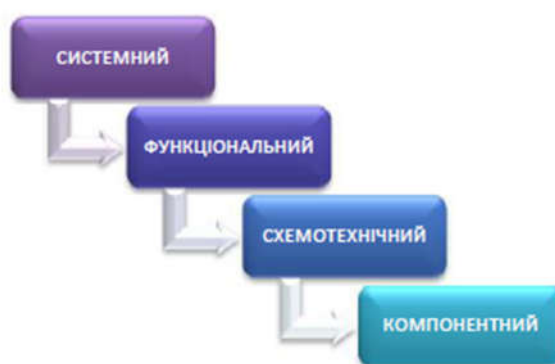
Проектування МЕМС не буде ефективним, якщо не використовувати новітні інформаційні технології, програмні засоби, алгоритми, методології, моделі та методи.

Для того щоб розв'язати задачі з проектування МЕМС, зазвичай використовують блочно-ієрархічний підхід - він передбачає застосування

принципу ієрархічності, щоб структурувати уявлення про об'єкт деталізацією описів та принципом декомпозиції, за допомогою розбиття кожного рівня на різні складові, які мають можливість поблокового проектування. Така структурна схема показана на рисунку 6.2.

Загалом системою називають об'єднання закономірно пов'язаних між собою явищ та об'єктів. Розрізняють такі системи, якісно оцінюючи їх складність: великі, вбудовані, підсистеми, комплекси, пристрої. Чітких границь класифікації не існує. В одних випадках комплекс може бути представлений пристроєм, в інших системою, це все залежно від функціонального призначення. Це свідчить про те, що поняття системи відносно та його можна використовувати в різних випадках проектування, особливо коли для прийняття рішень враховується взаємодія різних факторів та обмежень.

Для процесу розробки мікро систем в загальному випадку використовується класичне багаторівневе ієрархічне проектування, можливі варіанти - згори донизу, знизу догори, паралельне поєднання, наскрізне тому подібне. Враховуючи різні особливості розробки підсистеми збирання, збереження, опрацювання та видачі керуючих сигналів, в процесі автоматизованого проектування виділяються чотири рівні мікросистем, які називаються: системний, функціональний, схемотехнічний, компонентний.



**Рисунок 4.3.** Рівні проектування мікросистем

Системний - розробляється ТЗ для того щоб спроектувати вбудовану систему, аналізуючи додаткові функції, які дана система буде виконувати.

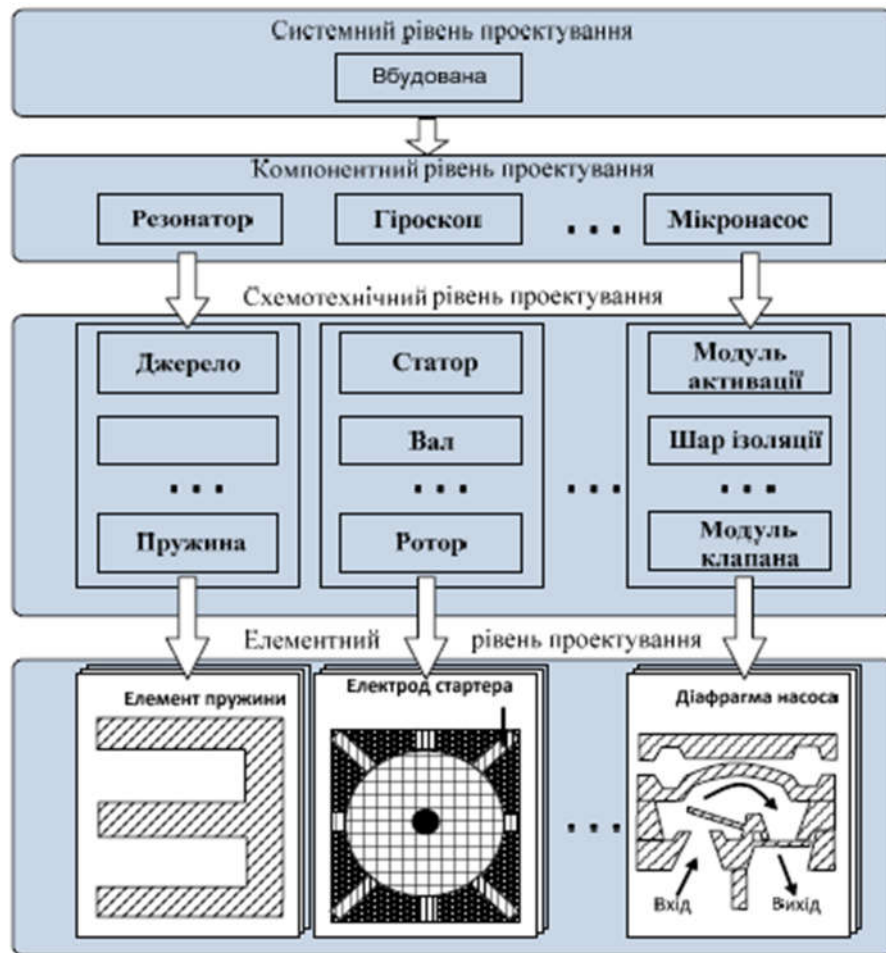
Функціональний рівень відсутній в сучасному етапі проектування електромагнітних, електромеханічних, електротеплових та п'єзоелектричних елементах мікросистемної техніки. Оскільки фізичні процеси, які проходять в таких пристроях мікронних розмірів - досить складні, вони мають жорсткі вимоги щодо точності їх виготовлення.

Функціональний рівень відсутній в сучасному етапі проектування електромагнітних, електромеханічних, електротеплових та п'єзоелектричних елементах мікросистемної техніки. Оскільки фізичні процеси, які проходять в таких пристроях мікронних розмірів - досить складні, вони мають жорсткі вимоги щодо точності їх виготовлення. Мають необхідність оцінювати можливості функціонування пристрою, його реалізацію в процесі проектування нових елементів, потребують розв'язку задач та багато функціональності елементів. Проектування "згори донизу" має такий підхід: пристрій поділяються на функціонально довершені модулі - модулі обробки, блоки живлення, мікро давачі, виконавчі пристрої.

Завдання розробки мікроактиваторів та мікродавачів поділяються на завдання проектування компонентів - вони є завданнями компонентного рівня. Коли виникає потреба мікросистему можна і надалі піддати декомпозиції на елементи. В такому випадку стикаємось з елементним рівнем на якому розробляються анкери, балки, пружини.

Блочно-ієрархічний підхід матиме перевагу над іншими, якщо використовувати його з простішими об'єктами проектування, адже з ними зручніше працювати. На елементарному рівні простіше побудувати математичну модель, проводити моделювання, тестувати результати розробки та виконувати верифікацію.

					123	УДК 004.9	Арк.
							39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



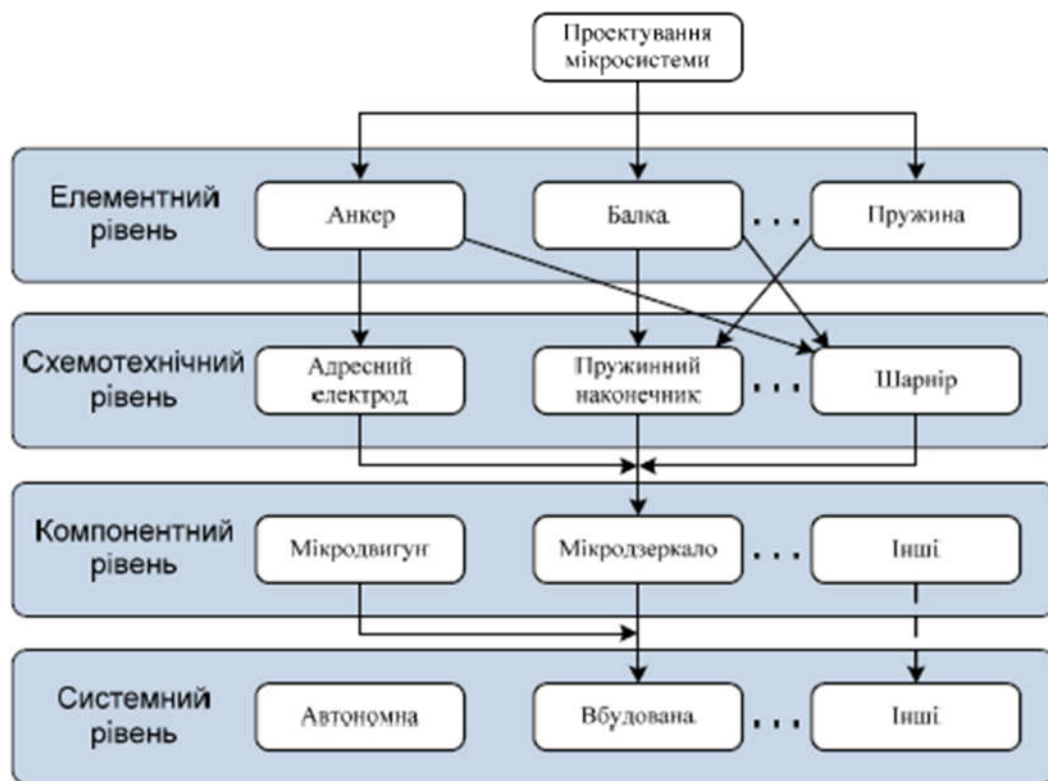
**Рисунок 4.4.** Проектування «згори донизу»

Проектування "знизу вгору" зручне використовувати в тому випадку, коли потрібно побудувати інтегральний пристрій, значна частина якого спроектована частково або повністю. Він використовується все частіше, оскільки з кожним роком розширюється бібліотека мікро електромеханічних систем та елементів. Це стає можливим спочатку для окремих елементів, вже тоді підсистем та компонентів, а в кінцевому результаті - для цілих мікросистеми.

Розробка елементів систем паралельно дає можливість прискорити процес проектування на деяких етапах. Паралельно можна розробити мікроактуатори, мікродавачі, системи обробки, керування та передачі даних.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата





**Рисунок 4.5.** Проектування "знизу вгору"

#### 4.2. Проблеми проектування мікросистем

можна довго перераховувати де конкретно застосовуються прилади МЕМС, адже вони створюються конструкторами для чіткого уявлення про можливі технологічні процеси в ході розв'язку поставленої задачі. Основною проблемою є розробка новостворених технологій, з різних матеріалів. Потрібно використовувати технологію, яка буде мати достатню роздільну здатність для створення набагато менше деталей та елементів, але з високими механічними характеристиками. Іншою проблемою є обмежений вибір матеріалів, які використовуються для виготовлення МЕМС. Основні задачі, які стоять перед такими технологіями - залучення вже випробуваних матеріалів та створення нових для мікросистемних технологій. Якщо залучати нові матеріали, які мають унікальні властивості та характеристики - це може спростити конструкцію мікросистем або розширити їх функціональ-

ність. Важливими є питання чи проектувати окремі елементи конструкції, чи всю систему загалом. Для оцінки поведінки конструкції в різних умовах та під впливом різних навантажень, необхідно створювати такі моделі, які будуть враховувати багато чинників, які впливатимуть на роботу. Для створення такої моделі потрібно залучати великі інформаційні ресурси: експериментальні дані, додаткові дані для характеристики матеріалів конструкції, різні фізико-математичні теорії та якісне програмне забезпечення, щоб забезпечити роботу таких моделей. Якщо виготовляти якісні моделі, вони будуть ефективними та пришвидшуватимуть вихід нової продукції, зменшуватимуть витрати на розробку та модифікацію проміжних зразків. Для формування таких зразків не обійтися без спеціальних комп'ютерних програм для конструювання. Сучасні програми дають змогу досить швидко створювати моделі за використанням електронних бібліотек конструктивних елементів та матеріалів. В роботі з віртуальною моделлю можливо здійснити різні випробування та аналіз поведінки приладу в різних умовах роботи: нормальної роботи, в режимі перевантажень нестандартних умовах. Завдяки такій перевірці можна виявити помилки, які були зроблені при конструюванні чи виборі матеріалу конструкції, можна оптимізувати параметри різних елементів на етапі проміжного проектування. Такі програми дають змогу пришвидшити розробку робочого варіанту приладу, підбирають необхідні процеси та матеріали, зменшують обсяг випробувань.

Сучасний прилад МЕМС містить значну кількість рухомих елементів, які які показують складність конструкції та довершеність технології. Водночас, це є випробування в конструкторському рішенні, щодо зручності та продуманості. В основному всі елементи створюють об'єднаними в одну складну конструкцію, в якій елементи рухомого з'єднання замінюються на гнучкі пружні елементи. Така заміна може бути не функціональною, в такому випадку можна зробити таку конструкцію, де рухомі елементи будуть відді-

					123	УДК 004.9	Арк.
							42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

лятися від інших на етапі останньої технологічної операції таким чином щоб цей елемент перебував на своєму місці, або зробити таку конструкцію, де рухомий елемент в необхідну позицію встановлюватиме спеціальний пристрій (маніпулятор з високою точністю позиціонування). Перевагу в такому випадку будуть надавати проектування спеціального технологічного рішення, де не буде втручань про розташування елементів конструкції та її виготовлення.

Прилади МЕМС мають велику кількість переваг, ніж традиційні прилади мехатроніки, тому вони є дуже привабливими для замовників. Основну роль відіграють: мала маса конструкції, низьке енергоспоживання та малі розміри.

						123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				43

## РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛІ З МАЛОЮ СПОЖИВАНОЮ ПОТУЖНІСТЮ

Радіочастотна ідентифікація (RFID) - це технологія, яка зазвичай використовується сьогодні для відстеження об'єктів і ідентифікувати людей за допомогою радіохвиль. Деякі мітки RFID можна прочитати з декількох метрів далеко і за межі зору читача.

Більшість міток RFID містять принаймні дві частини. Однією з них є антена для прийому та передачі сигналу. Друга - інтегральна схема для зберігання та обробки інформації, модулювання і демодуляція радіочастотного (РЧ) сигналу та інших спеціалізованих функцій.

Існують три типи міток RFID: активні мітки RFID, які містять акумулятор і може передавати сигнали автономно, пасивні мітки RFID, які не мають акумулятора і вимагають зовнішнього джерела, щоб проковувати передачу сигналу, і пасивний (ВАР), який допомагає батареї, які вимагають зовнішнє джерело, щоб прокинутися, але мають значні більш високі можливості прямої лінії зв'язку, забезпечуючи великий діапазон читання.

У цій частині ми спробуємо зімітувати вихід інтегрованого індуктора і ми побачимо, що ідеальний індуктор не існує, це означає, що, у всіх схемах ми маємо справу з паразитарними параметрами як опори і ємності.

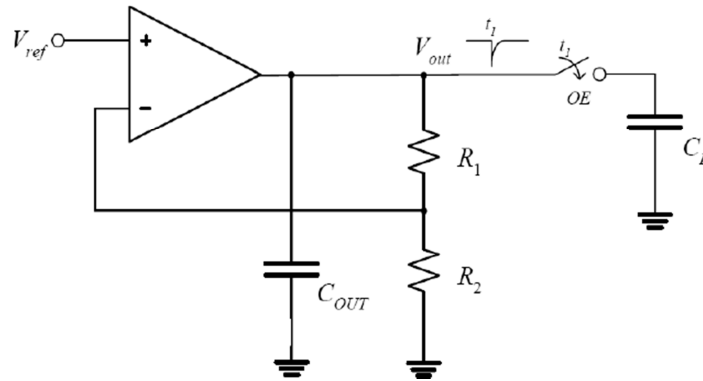
### 5.1. Моделювання за допомогою регулятора напруги

Випрямляч перетворює змінну напругу з антени в напругу постійного струму. Потім потрібно регулювати цю напругу для отримання стабільного виходу  $V_{cc}$  для подачі живлення на різні ланцюги. Цей регулятор напруги дає

									Арк.
									44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		123	УДК 004.9		

стабільний V<sub>сс</sub> на виході, який залишається завжди таким же, коли змінюється вихідна напруга випрямляча. Ця схема побудована для покриття варіацій випрямляча в заданому діапазоні.

Для цього скористаємося такою схемою:



**Схема 5.1.** Типова схема регулятора напруги

Основним елементом цієї конструкції є операційний підсилювач. V<sub>ref</sub> - посилання на напругу на мікросхемі, створене зазвичай завдяки ланцюгу, заснованому на зазорі, - застосовується до V<sub>+</sub> і порівнюється з заданим відсотком V<sub>out</sub>, який залежить від значень R<sub>1</sub> і R<sub>2</sub>.

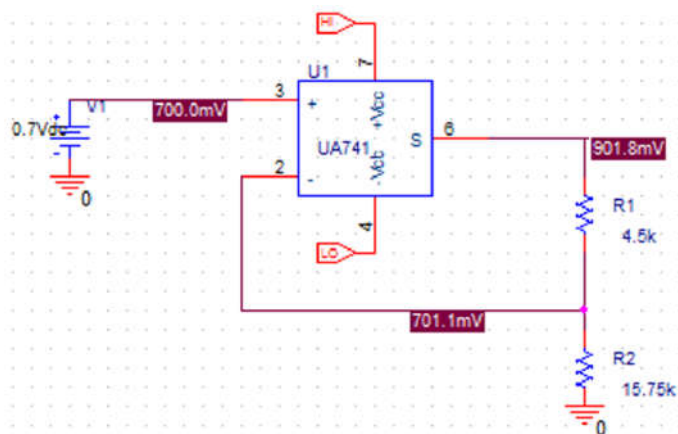
Основні розрахунки дають:

$$V_{out} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

Тому якщо V<sub>out</sub> > V<sub>ref</sub>, то V<sub>out</sub> зменшується, а якщо V<sub>out</sub> < V<sub>ref</sub>, V<sub>out</sub> збільшується.

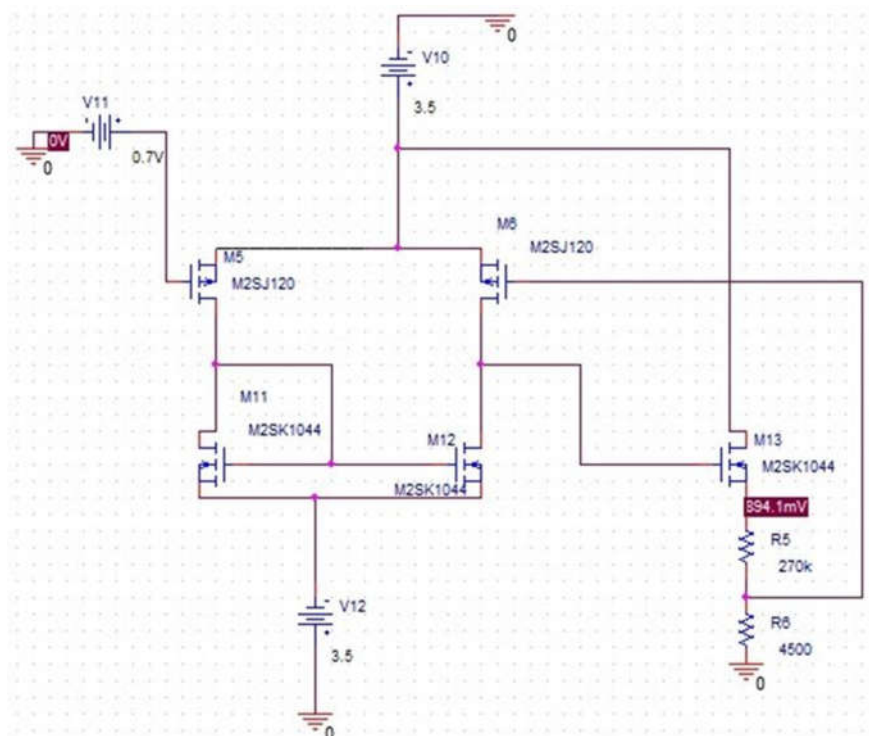
Наприкінці, навіть якщо напруга живлення операційного підсилювача (еквівалентне виходу випрямляча) дещо змінюється, вихідний сигнал регулятора напруги залишатиметься незмінним. Звичайно V<sub>out</sub> повинен залишатися нижчим, ніж V<sub>dd</sub>.

Моделювання на PSpice показує, що наш дизайн працює добре



**Схема 5.2.** Схема регулятора напруги з використанням Pspice.

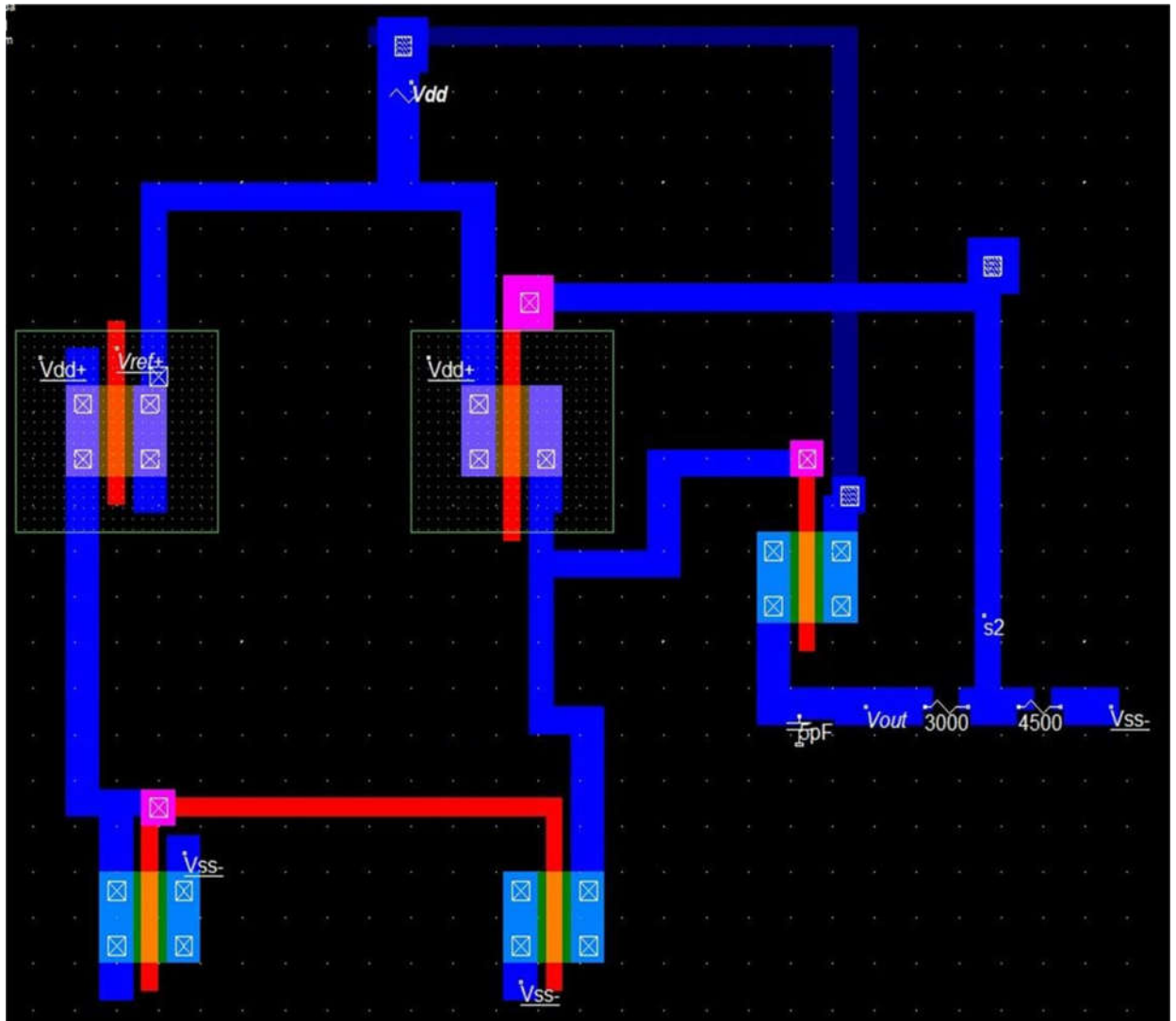
Тепер нам необхідно розробити операційний підсилювач з використанням МОН-транзисторів. Дуже проста конструкція - це диференціальний підсилювач з вихідним каскадом Nmos. Щоб отримати високий коефіцієнт посилення, замість резистора буде використано активне навантаження. Отримана схема така:



**Схема 5.3.** Схема регулятора напруги з використанням транзисторів NMOS з використанням Pspice.

Знову ж таки, Pspice підтверджує, що дизайн повинен працювати. Тому ми реалізували його на Microwind.

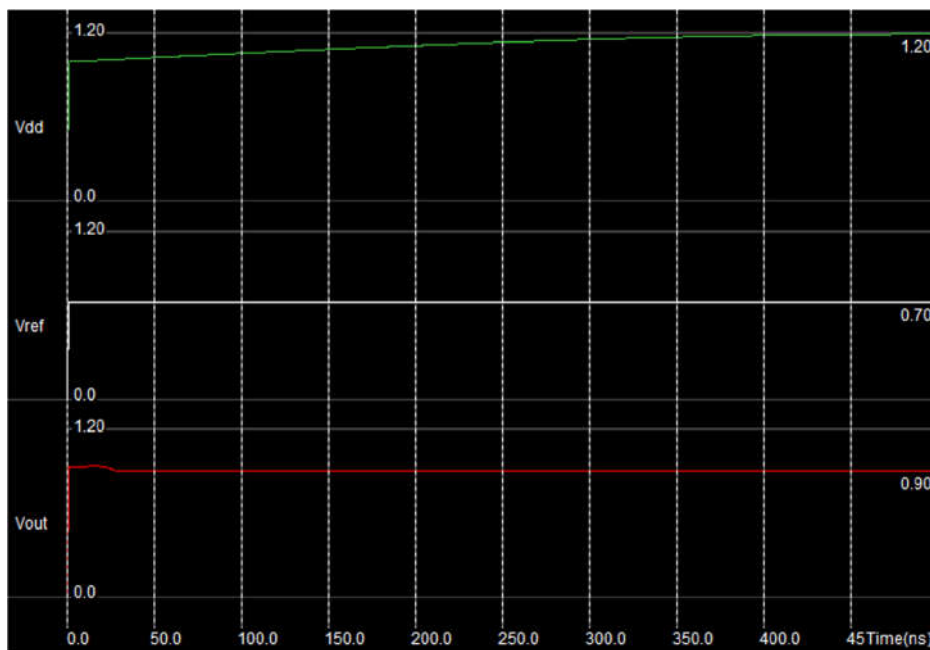
Тепер можна моделювати регулятор напруги за допомогою Microwind:



**Рисунок 5.1.** - Топологія регулятора напруги розроблена в системі Microwind.

Додаткові тести показали, що якщо Vdd вище, ніж 1V, тоді значення Vout завжди було 0.9V, що означає, що для цього потрібно лише мінімальна вхідна потужність -10.5dBm.

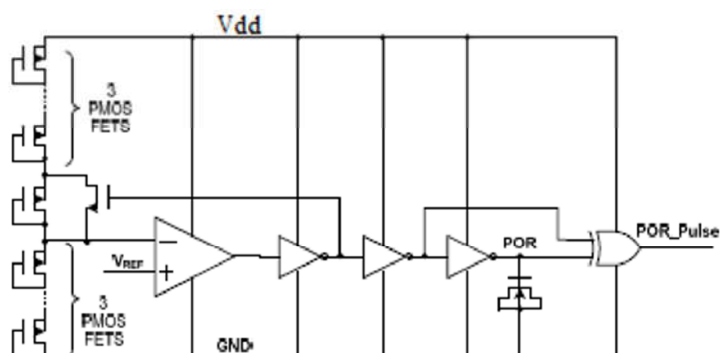
Тому наш регулятор напруги працює дуже добре, як показано на рис. 5.2.



**Рисунок 5.2.** Моделювання за допомогою Microwind.

Мінімальна напруга живлення, яке дає правильне значення  $V_{out}$ , дорівнює 1V. Якщо значення  $V_{dd}$  нижче, ніж 1V, мітка RFID не може працювати або принаймні не повинна працювати. Тобто, процесор базової смуги більше не повинен передавати дані.

Схема включення живлення виявляє, коли мітка досить близька (увімкнена) або занадто далеко від зчитувача (вимкнена) відповідно до напруги  $V_{dd}$  і передає відповідне повідомлення процесору. Це гарантує хорошу поведінку мітки.



**Схема 5.4** Включення живлення схеми скидання



## 5.2. Моделювання за допомогою тактового генератора

Тактовий генератор або генератор керований напругою, є осцилятором, призначеним для управління за частотою коливань за допомогою входу напруги. Частота коливань змінюється за допомогою прикладеної постійної напруги регулятора.

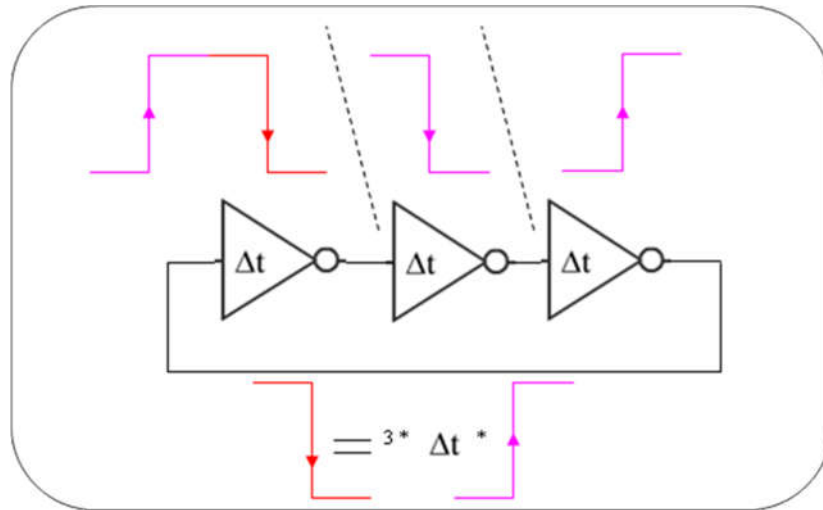


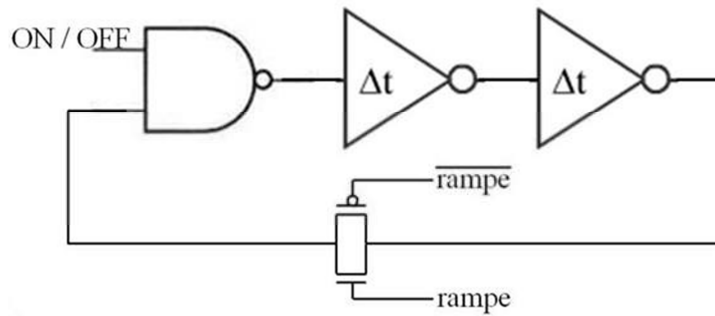
Рисунок 5.3. Принцип генератора керованого напругою

Ми використовуємо інверторні логічні схеми для перемикання сигналу і можемо зробити постійну вихідну частоту. Таким чином, вихідна частота є функцією затримки в кожному з логічних затворів.

Звичайно, треба використовувати непарну кількість логічних схем, щоб зробити генерацію.

Ця схема є основою генератора і працює для RFID-міток, оскільки потрібна частота є постійною. Однак, якщо програма є лінійною командою; нам потрібна змінна частота, контрольована входом напруги.

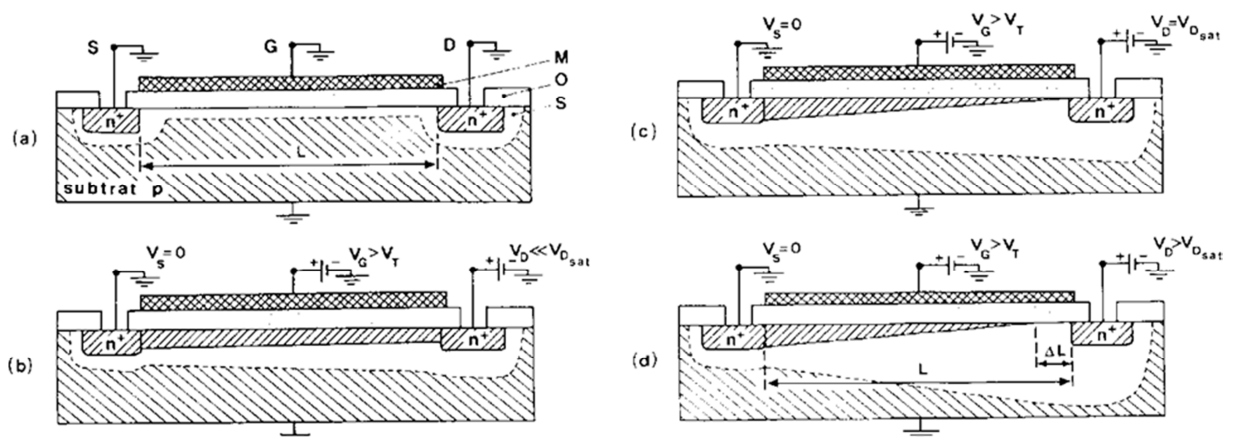
Для контролю частоти ми будемо вдосконалювати схему:



**Схема 5.5.** Контроль частоти в тактовому генераторі (регульований тактовий генератор на основі кільцевого)

Ми знову знаходимо наші логічні схеми, які затримують сигнал. Інвертор був замінений на NAND для активації або не осцилятора. А особливістю є двонаправлені ключі.

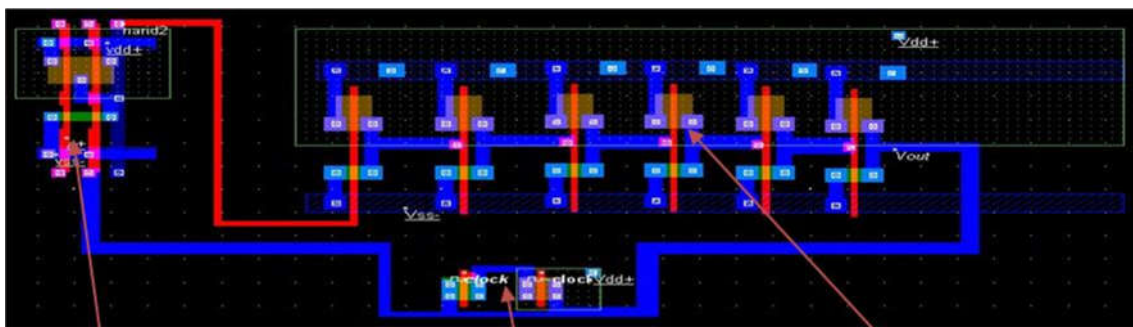
Це PMOS і NMOS паралельно, щоб зробити ключ. До схеми ми підключаємо сигнал частоти, який потрібно контролювати. Тому, коли сигнал низький, переривач вимкнений, а на виході ми маємо низький рівень. Коли сигнал високий, перемикач вмикається, і ми можемо контролювати його період. До стоку транзисторів підключаємо стабільний вихід Vdd регулятора напруги. Тому більше напруги великі і більше канал транзисторів буде великим. Тоді сигнал піде швидше, і тоді ми зможемо контролювати період.



**Рисунок 5.4.** Принципи створення каналу транзистора MOSFET

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Це схема з використанням Microwind:



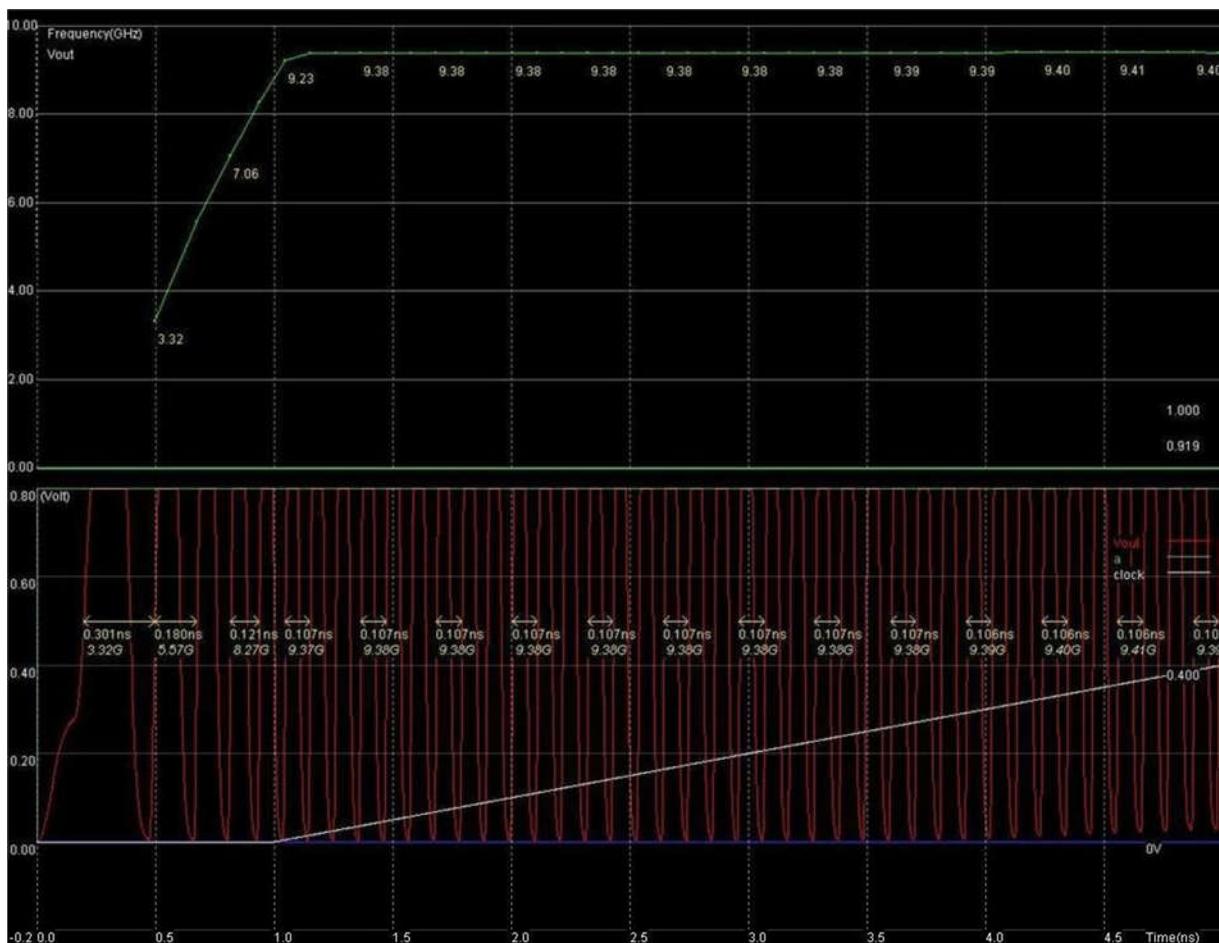
Логічний вентиль

NMOS і PMOS

Шість логічних інверторів

**Рисунок 5.5.** Розроблена топологія і її моделювання в системі Microwind.

Тоді отримаємо моделювання:



**Рисунок 5.6.** Моделювання за допомогою Microwind.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Моделювання показує відповідь на частоту отриманих досліджень і ми можемо бачити, що осцилятор має пропускну здатність, і після насичення осцилятора, не варто збільшувати напругу Vdd регулятора.

А потім це масштабування того ж лінійного відгуку. Ми бачимо збільшення частоти сигналу.

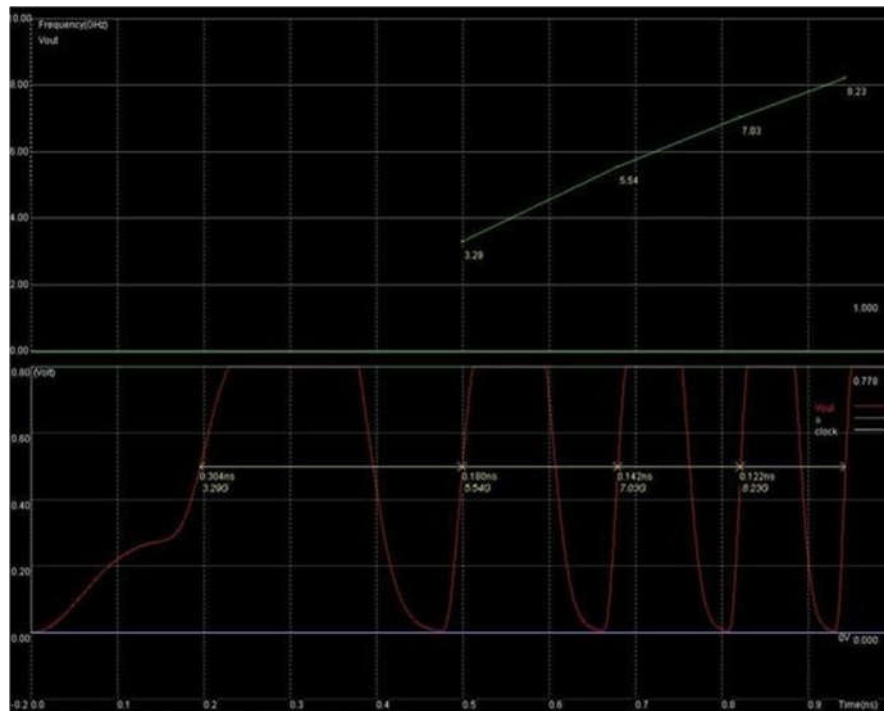


Рисунок 5.7. Моделювання за допомогою Microwind.

### 5.3. Моделювання базових елементів операційних підсилювачів з малою споживаною потужністю

Під час розроблення елементів ІС, а особливо мікросистем-на-кристалі, в тому числі й аналітичних, що являють собою, наприклад системи для дослідження некремнієвих елементів в інтегральному виконанні та монолітно-інтегрованих безпосередньо в кристал спеціалізованої мікросхеми, часто виникає необхідність перетворень логічних сигналів з низькими рівня-

ми, що використовуються у внутрішній частині мікросистеми в логічні сигнали з високими рівнями в периферійних формувачах сигналів зовнішніх пристроїв з подальшим їх опрацюванням та аналізом.

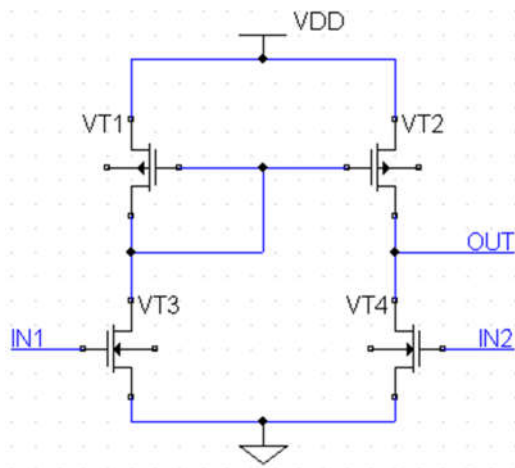
З цією метою було розглянуто особливості схмотехнічного і топологічного проектування перетворювачів рівнів сигналу з низького на високий для КМОН. Розроблено топологію перетворювачів рівнів на основі бібліотечних комірок та спеціалізовану топологію, а також показано результати комп'ютерного схмотехнічного моделювання електричної схеми перетворювача рівнів та моделювання безпосередньо із топології з врахуванням особливостей їх топологічної реалізації та інтегральної структури.

Для проектування різних систем можна брати за основу мікроконтролер АТМega328р, а реалізовувати схеми первинного опрацювання сигналів від сенсорів – на основі елементів аналітичної мікросистеми-на-кристалі (АМнК). Таку платформу можна використати також для роботи з іншими фізичними та біомедичними об'єктами обробки сигналів. Наприклад, для проектування джерела широтно-імпульсного модульованого (ШІМ) сигналу. Сигнал, отриманий від оптичних сенсорів - випромінюючого світлодіода та чутливого фотоелемента є імпульсним, тому важливим є також зменшення тривалості фронтів імпульсів, перед подачею їх на аналоговий вхід схеми зчитування мікроконтролера.

Для первинної аналогової обробки сигналів одним із базових елементів є інтегральний операційний підсилювач (ОП), який використовується для виділення та підсилення корисних сигналів, які можуть бути співрозмірними із шумовими сигналами. Такий елемент являє собою схему порівняння двох сигналів та підсилення різниці їх напруг. При

					123	УДК 004.9	Арк.
							53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

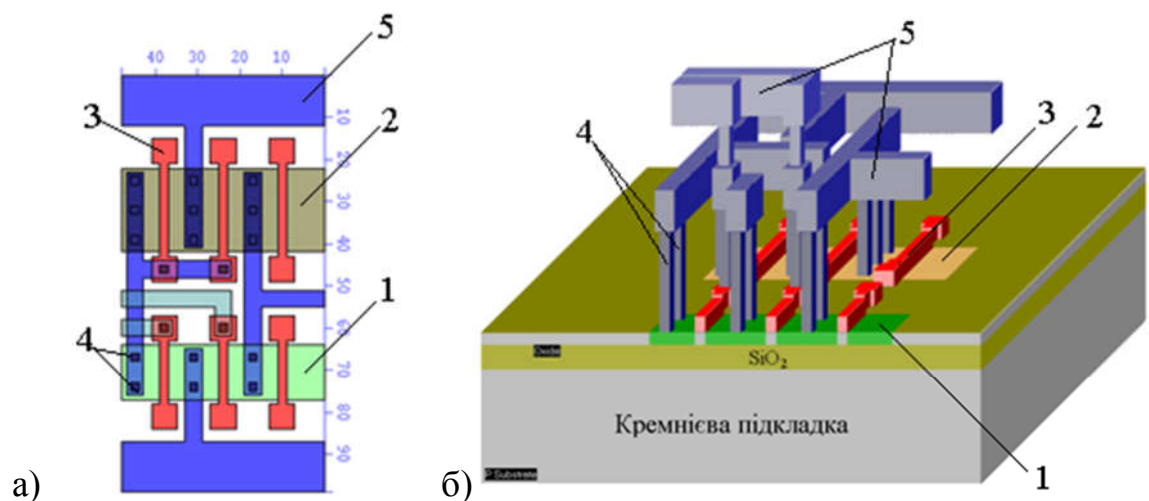
цьому коефіцієнт послаблення синфазних сигналів є досить великим. Схема електрична принципова базового елемента ОП в інтегральному виконанні зображена на рисунку 5.8.



**Рисунок 5.8** Електрична схема інтегрального операційного підсилювача

У цій схемі р-канальні транзистори VT1 і VT2 утворюють дзеркало струму для реалізації активного навантаження ОП, а n-канальні транзистори VT3 та VT4 утворюють диференційну пару, і спроектовані за узгодженими конструктивно-технологічними параметрами. При подачі синфазного сигналу на входи IN1 та IN2, в одному з транзисторів відбувається збільшення струму, а в іншому – зменшення на однакову величину, що приводить до відсутності сигналу на виході.

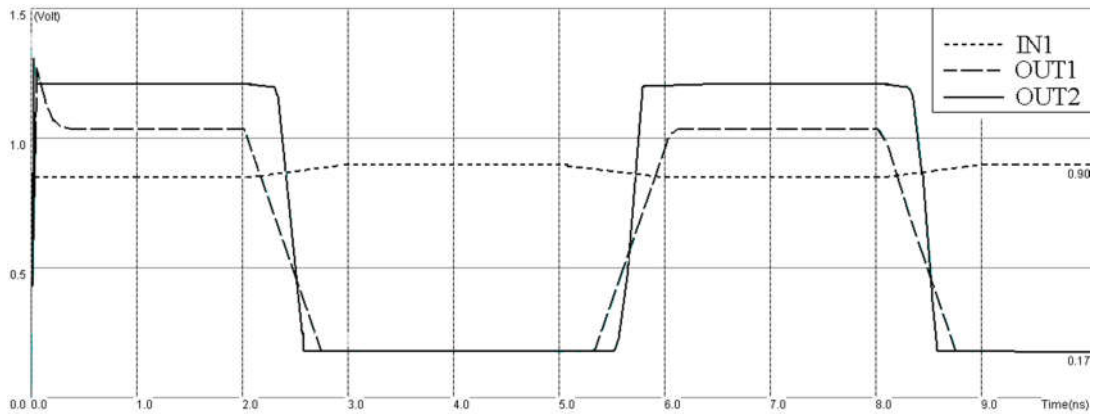
Спроектована топологія базового елемента диференційного підсилювача на основі фрагмента базової матричної комірки згідно схеми рисунку 5.8, зображено на рисунку 5.9. Було розроблено і досліджено два варіанти топологій: з використанням стандартної КМОН-технології на основі об'ємного кремнію; на основі КНІ КМОН-технології.



**Рисунок 5.9.** Топологія а) та об'ємне зображення б) інтегрального ОП на основі фрагмента базової матричної комірки зі структурою «кремній-на-ізоляторі»: 1 – стік-витоківі області n-канальних транзисторів; 2 – стік-витоківі області р-канальних транзисторів; 3 – полікремнієві затвори; 4 – контактні вікна; 5 – шари металізації

Порівняльні результати схематопологічного моделювання базового елемента ОП безпосередньо із топологій, спроектованих на основі структур за стандартною об'ємною КМОН-технологією та на основі КМОН КНІ-структур, наведено на рисунку 5.10. Моделювання проводили при напрузі живлення 1,5 В, вхідний сигнал IN1 являв собою змінний сигнал частотою 0,167 МГц, часом наростання та спадання 1 нс, тривалістю імпульсу 2 нс та амплітудою 0,04 В а IN2 – постійний сигнал з амплітудою 0,7 В.

Для оптимізації площі та покращення електричних і фізичних характеристик операційних підсилювачів для матричних застосувань в АМнК було проведено оцінку можливостей їх створення на основі тривимірних транзисторних КНІ-структур по аналогії їх побудови, як для тривимірних логічних елементів.



**Рисунок 5.10.** Результати схемо-топологічного моделювання ОП: 1 – вхідний сигнал IN1; OUT1 – вихідний сигнал ОП, спроектованого за об’ємною КМОН технологією; OUT2 – вихідний сигнал ОП зі структурою КНІ

Результати схемотопологічного моделювання базового елемента ОП показують, що вихідні сигнали для схеми зі структурами КНІ порівняно з об’ємними КМОН мають суттєво кращу – в середньому на 30% крутизну фронтів та більший коефіцієнт підсилення, завдяки чому вихідний сигнал має рівень амплітуди на 20% вищий. Такі параметри дозволять значно зменшити споживану потужність під час перехідних процесів (менша тривалість фронтів імпульсів), і як наслідок, підвищити ступінь інтеграції елементів в АМНК. Окрім цього, реалізація ОП на основі КНІ-структур дозволить розширити температурний діапазон їх використання.



## ВИСНОВКИ

- 1) Технологія «система-на-кристалі» та її використання дозволяє збереження попередніх напрацювань, створюючи нові системи, знижує вартість розробки, збільшує функціональність.
- 2) Мікросхеми-на-кристалі, які поєднують в собі функції обчислення, вимірювання та комунікації можуть стати основою для побудови розподілених самоналагоджувальних систем в майбутньому.
- 3) Мікросистеми-на-кристалі - конкурентоспроможні та з часом будуть використовуватися частіше, аніж системи на платі замінюючи їх. Реалізація мікроконтролерів та мікропроцесорів у таких мікросистемах-на-кристалі буде виконуватись за використанням різних варіантів складно-функціональних блоків.
- 4) Розробка і виробництво власних мікропроцесорів і мікросистем-на-кристалі є одним з найактуальніших завдань для вирішення різних завдань. Найбільший економічний ефект буде від того виробу (мікропроцесор, мікросистема-на-кристалі), який буде підходити для вирішення максимально широкого кола завдань.
- 5) В роботі розроблені окремі електричні блоки для мікросистемних використань, їх топології, проведено моделювання безпосередньо із топології в системі Microwind.
- 6) Результати роботи можуть знайти використання у проведенні досліджень зі створення мікросистем-на-кристалі на кафедрі комп'ютерної інженерії та електроніки у навчальних цілях.

					123	УДК 004.9	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Колганов С., Лазаревич Е. Технологія «згортки». Повітряно-космічна оборона, 2006, № 2.
- 2) Немудров В., Мартін Г. Системи на кристалі – М: Техносфера, 2004
- 3) Плебанович В. І., Безязичний А. В., Власов В. В., Лукоянов С. А. Створення інтегральних магніточутливих датчиків на основі анізотропного магніторезистивного ефекту. Матеріали науково-виробничої конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології», Одеса, травень, 22-26, 2006 р,
- 4) Максимов Н.В., Партыка Т.Л., Попов И.И. Архитектура ЭВМ и вычислительных систем. ИНФРА-М, 2005. – 512 с.
- 5) В. Гуоров, В. Чуканов. Видеокурс: Логические и арифметические основы и принципы работы ЭВМ -Открытый Интернет Университет Информационных технологий, <http://www.intuit.ru/>
- 6) Э. Таненбаум. Архитектура компьютера. 5-е издание, Питер, 2007. – 830 с.
- 7) Палагин А.В. Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины [http://www.icyb.kiev.ua/m/180/ua/palagin\\_a.w..html?id=180](http://www.icyb.kiev.ua/m/180/ua/palagin_a.w..html?id=180)
- 8) Шагурин И, "Электронные компоненты" №1, 2009г. <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2189/doc/40316/>
- 9) Стешенко В., Руткевич А., Бумагин А., Гулин Ю., Воронков Д., Гречищев Д., Евстигнеева Е., Синельникова М.. «Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер», журнал

					123	УДК 004.9	Арк.
							58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

«Компоненты и технологии» № 10, 2008. [http://kit-e.ru/articles/plis/2008\\_10\\_67.php](http://kit-e.ru/articles/plis/2008_10_67.php)

- 10) Шагурин И., Шалтырев В., Волов А. «Большие» FPGA как элементная база для реализации систем на кристалле. Электронные компоненты, 2006, №5, с.83—88.
- 11) Пахолков Р., Мозолевский В. "Современная система-на-кристалле - основа успешного продукта". <http://www.promwad.com/library/system-on-chip-basis-successful-product-ru.html>
- 12) Бухтеев А. «Методы и средства проектирования систем на кристалле». <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200304/1.html>
- 13) Бухтеев А., Немудров В. «Системы на кристалле. Новые тенденции», 2001-2011 РИЦ Техносфера. <http://www.electronics.ru/issue/2004/3/13>
- 14) Шагурин Игорь, Родионов Андрей «IP-блок для реализации функций управления в составе СБИС класса «система на кристалле». <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/optic/350/doc/551/>
- 15) Бухтеев Александр «Проектирование встроенных систем», журнал «Электронные компоненты» №1, 2007г.
- 16) Rajsuman R. «System-on-a-Chip: Design and Test», [www.reslib.com](http://reslib.com)  
[http://reslib.com/book/System\\_on\\_a\\_Chip\\_Design\\_and\\_Test](http://reslib.com/book/System_on_a_Chip_Design_and_Test)
- 17) Палагин А.В., Опанасенко В.Н «ЭВМ с реконфигурируемой (программируемой) архитектурой. Развитие идей Глушкова В.М.» [http://www.iprinet.kiev.ua/gf/nau\\_rek.htm](http://www.iprinet.kiev.ua/gf/nau_rek.htm)
- 18) Проектування мікросистем. Програмні засоби забезпечення САПР. Навчальний посібник. <https://books.google.com.ua>

									Арк.
									59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		123	УДК 004.9		

- 19) Моделювання елементів мікросистемної техніки в програмі ANSYS.  
<http://www.novsu.ru/file/1057459>
- 20) Словник нано-термінів.  
<http://thesaurus.rusnano.com>.
- 21) Комп'ютерне моделювання компонентів МЕМС.  
<http://www.mes-conference.ru/data/year2008/74.pdf>
- 22) Вікіпедія. П'єзоелектричний ефект.  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/ Пьезоэлектрический\\_эффект](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезоэлектрический_эффект)
- 23) Інженерний аналіз методом кінцевих елементів.  
<http://www.edushk.ru/matematika/5572/index.html>
- 24) Система автоматизованого побудови просторових сіток для рішень завдань методом граничних елементів на основі технології COM.  
<http://www.cs.vsu.ru/sbem-contact/papers6.php>.
- 25) Проектування сенсорних і актюарних елементів мікросистемності техніки. <http://window.edu.ru>
- 26) Проектування МЕМС. <http://www.micromachine.narod.ru/>.
- 27) Збір даних з датчиків на прикладі МЕМС. <http://b.artemiev.su>

					123	УДК 004.9	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			60

