

## РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.372.51

М. А. Філинюк, д-р техн. наук;

О. О. Лазарєв, канд. техн. наук;

Л. Б. Ліщинська, канд. техн. наук

### ПРИСТРОЇ УЗГОДЖЕННЯ ВІДЕОІМПУЛЬСНИХ ТА ІМІТАНСНИХ СХЕМ

*Сформульовано вимоги до пристроїв узгодження відео-імпульсних та імітансних схем (відеоімпульсних-імітансних перетворювачів (ВІП)), обґрунтовано та проведено аналіз схемотехнічних реалізацій ВІП, здійснено експериментальну оцінку значень параметрів ВІП. Запропоновано три напрямки схемотехнічної реалізації ВІП: на базі пасивних компонентів, на базі активних компонентів з фіксованою робочою точкою та на базі активних компонентів зі зміною робочої точки. Показано, що запропоновані ВІП забезпечують перетворення рівнів сигналів відеоімпульсної логіки до рівнів імітансної логіки із затримкою 0,2...15 нс при роботі в частотному діапазоні 1...20 ГГц.*

#### Вступ

Сучасна обчислювальна техніка базується на використанні як носія інформації відеоімпульсних сигналів [1]. Логічні елементи, що використовують такі сигнали, мають високу швидкодію та ступінь інтеграції. Під час розв'язання низки специфічних задач, пов'язаних з обробкою радіотехнічних сигналів, виникає необхідність використання аналого-цифрових перетворювачів, що призводить до зменшення швидкості обробки інформації, а в деяких випадках — і до інформаційних втрат. Усунення цих недоліків можливе шляхом використання радіочастотних логічних елементів, наприклад, частотно-імпульсних [2], фазочастотних [3] або параметричних [4]. Недоліком таких елементів є робота в нелінійному режимі, що приводить до появи додаткових важкоконтрольованих гармонік. Це погіршує завадостійкість таких логічних елементів. Кращу завадостійкість параметру забезпечують індуктивний «L» (логічна одиниця) та ємнісний «C» (логічний нуль) імітанси (або навпаки «L» — «1», «C» — «0»).

Таким чином, ВІП має забезпечувати перетворення відеоімпульсного сигналу в імітансні сигнали у відповідності до табл. 1.

Таблиця 1

Таблиця істинності ВІП

Вхідні параметри інформаційного сигналу		Вихідні параметри інформаційного сигналу	
Логічний рівень	Амплітуда відеоімпульсу, В	Характер імітансу	Логічний рівень
0	0...0,5	C або L	0
1	2,4...5	L або C	1

При цьому найважливішими параметрами такого ВІП є його швидкодія та робочий діапазон частот, що визначають його завадостійкість.

#### Обґрунтування та аналіз схемотехнічних реалізацій ВІП

Пропонується три напрямки розв'язання задачі побудови ВІП:

1. На базі пасивних компонентів (рис. 1а);
2. На базі активних компонентів з фіксованою робочою точкою (рис. 1б, в);
3. На базі активних компонентів зі зміною робочої точки (рис. 1г).

Схема ВІП на базі пасивних компонентів (рис. 1а) використовує властивість зміни імітансу послідовного LC-кола, що утворюється варикапом VD1 та індуктивністю L1. C1 — розділова ємність, опором якої на робочій частоті можна знехтувати, хоча вона впливає на швидкодію схеми, що враховано при комп'ютерному моделюванні схеми. Реактивний імітанс на виході схеми дорівнює

$$\operatorname{Im} Z = j\omega L + 1/j\omega C_B,$$

де  $C_B$  — ємність варикапа VD1.

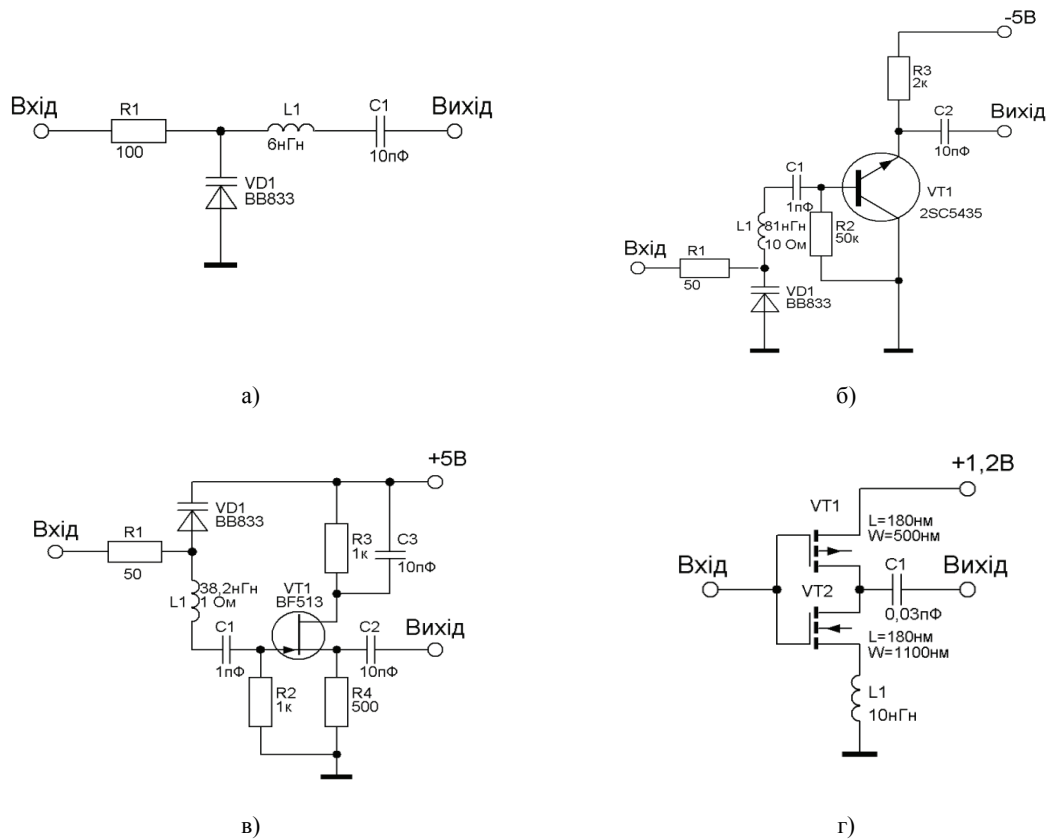


Рис. 1. Електричні принципи схеми ВІП: а — на пасивних компонентах; б—г — на активних компонентах

Таблиця істинності ВІП, зображеного на рис. 1а

Вхід	Вихід
«0» ( $U = 0 \dots 0,5 \text{ В}$ )	«0», «L», ( $X > 0$ )
«1» ( $U = 2,4 \dots 5 \text{ В}$ )	«1», «C», ( $X < 0$ )

Таблиця 2 При подачі на вхід напруги логічного «0» ємність варикапа буде відносно великою, опір на високій частоті малий, імпеданс на виході буде мати індуктивний характер. При подачі на вхід напруги логічної «1» ємність варикапа зменшиться, реактивний опір збільшиться, і, у разі відповідного вибору параметрів схеми, імпеданс на виході буде мати ємнісний характер, що відповідає таблиці істинності (табл. 2). Перевагою такого ВІП є відсутність кіл живлення та практично нульове споживання енергії.

Схема перетворювача рівнів на біполярному транзисторі показана на рис. 1б. Біполярний транзистор VT1 працює як узагальнений перетворювач імпедансу [7], перетворюючи імпеданс послідовного кола (L1—VD1), що підключений між колектором та базою транзистора, у вихідний імпеданс транзистора VT1. При подачі на вхід схеми напруги логічного «0» ємність варикапа буде відносно великою, та імпеданс котушки індуктивності L1 буде перетворюватися на певній частоті у ємність та від'ємний активний опір вихідного кола транзистора. При подачі на вхід напруги логічної «1» ємність варикапа зменшується, імпеданс вихідного кола стає індуктивним з від'ємний активним опором. Оскільки біполярний транзистор VT1 працює в активному режимі, перехідні процеси в транзисторі відсутні, розділова ємність C2 не впливає на швидкодію. Час перемикання імпедансних логічних рівнів буде визначатися лише сталою часу варикапа VD1. Опір R1 може бути невеликим (наприклад, 50 Ом), а отже, швидкодія схеми буде значно вища від попереднього випадку.

Схема перетворювача рівнів на польовому транзисторі показана на рис. 1в. Напруга відеоімпульсного сигналу на вході змінює ємність варикапа VD1. Транзистор VT1 працює як узагальнений перетворювач імпедансу, перетворюючи імпеданс котушки індуктивності L1 в ємнісний імпеданс на виході схеми у разі подачі на вхід напруги логічного нуля, та в індуктивний імпеданс у разі подачі на вхід напруги логічної одиниці. Як і в попередній схемі, робоча точка транзистора VT1 не змінюється, що забезпечує підвищену завадостійкість схеми. Біполярний та польовий транзистори на схемах рис. 1б та 1в працюють в активному малосигнальному режимі ( $P_{\text{ВХ}} < 10^{-4} \text{ Вт}$ ) з незміною робочою точкою та виконують функції перетворювачів імпедансу, перетворюючи вхідний імпеданс у певний вихідний імпеданс. Значення вихідного імпедансу буде залежати від параметрів транзисторів (що визначають коефіцієнт перетворення) та значення вхідного імпедансу. Оскільки режим роботи

транзистора не змінюється, не змінюються його параметри. Зміна вихідного імітансу буде визначатися лише зміною імітансу на вході. Тому, для спрощення аналізу, враховано тільки зміну повного опору послідовного кола варикапа та індуктивного кола.

В схемі ВПІ, що показана на рис. 1г, використана комплементарна пара МОН транзисторів (КМОН), характер реактивної складової якої залежить від положення робочої точки транзисторів VT1 і VT2, що залежить від рівня відеосигналу на вході схеми. При подачі на вхід напруги логічного нуля транзистор VT1 є закритим, а VT2 — відкритим, вихідний імітанс схеми буде мати ємнісний характер, що визначається вихідною ємністю транзистора VT2. При подачі на вхід схеми напруги логічної одиниці транзистор VT1 буде відкритим, а VT2 — закритим, вихідний імітанс схеми буде мати індуктивний характер, що визначається котушкою індуктивності L1.

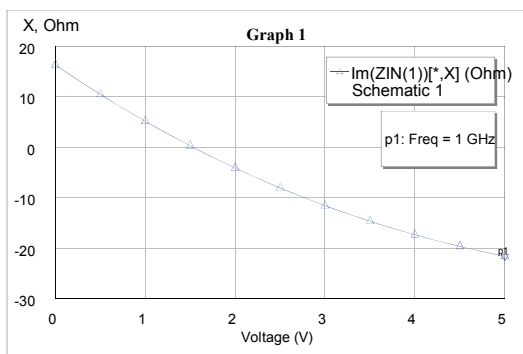
### Експериментальна оцінка параметрів ВПІ

Експериментальна оцінка параметрів здійснена за допомогою чисельного моделювання з використанням програми AWR MicroWave Office 9 для схем 1а, б, в та MicroCap 8 для схеми 1г (див. рис. 1).

На рис. 2а зображена перехідна характеристика схеми ВПІ (див. рис. 1а), з якої видно, що вихідний імітанс схеми на частоті 1 ГГц для вхідної напруги, що відповідає логічному «0», є індуктивним, а для напруги, що відповідає логічній «1», — ємнісним.

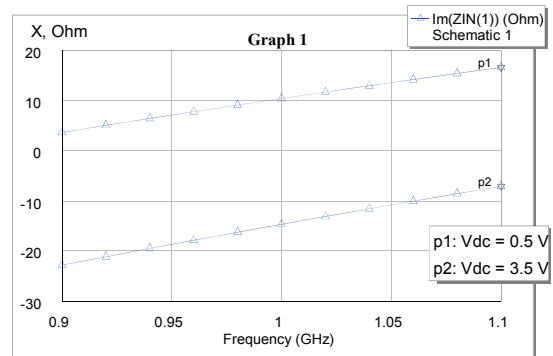
З наведених графіків (рис. 2б) видно, що імітанс на виході схеми не змінює свій характер на частотах від 0,9 до 1,1 ГГц, що дозволяє використовувати малостабільні генератори високої частоти (відхилення частоти  $\pm 10\%$  від 1 ГГц) для роботи імітансних елементів.

Аналіз перехідних процесів схеми за часовими діаграмами напруг та струмів (рис. 2в) показав, що час затримки сигналів логічних рівнів становить близько 5 нс, та визначається сталою RC-кола, що утворюється резистором R1, ємністю варикапа VD1 та розділовою ємністю C1. Для збільшення швидкодії необхідно зменшити опір R1 та ємність C1, що для цієї схеми є неможливим, оскільки малий опір R1 буде шунтувати вихідний імпеданс, а мала ємність C1 буде створювати великий опір вихідному сигналу. Інший шлях збільшення швидкодії полягає у відмові від ключового режиму роботи схеми.



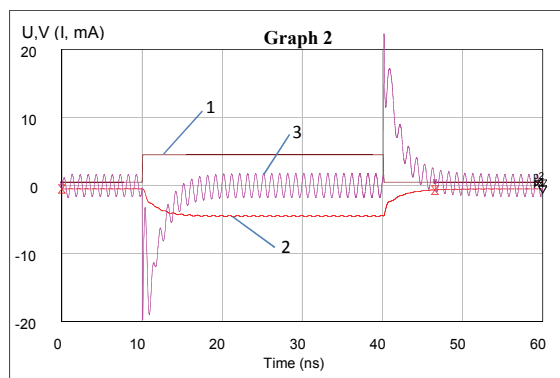
а)

Перехідна характеристика ВПІ



б)

Частотні залежності уявної складової вихідного імпедансу при подачі на вхід напруг, що відповідають логічним рівням «0» (0,5 В) та «1» (3,5 В)

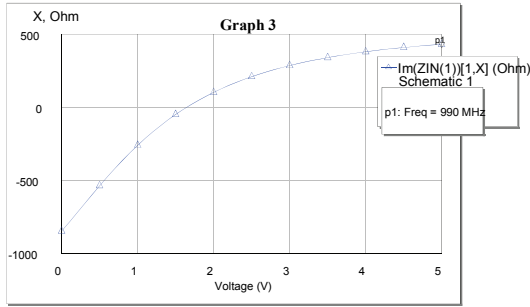


в)

Часові діаграми напруг та струмів в схемі: 1 — напруга на вході, 2 — напруга на варикапі, 3 — струм на виході

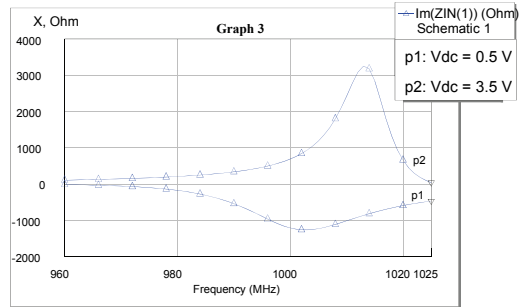
Рис. 2. Результати моделювання ВПІ (див. рис. 1а)

Результати чисельного моделювання ВІП на базі біполярного транзистора показані на рис. 3.



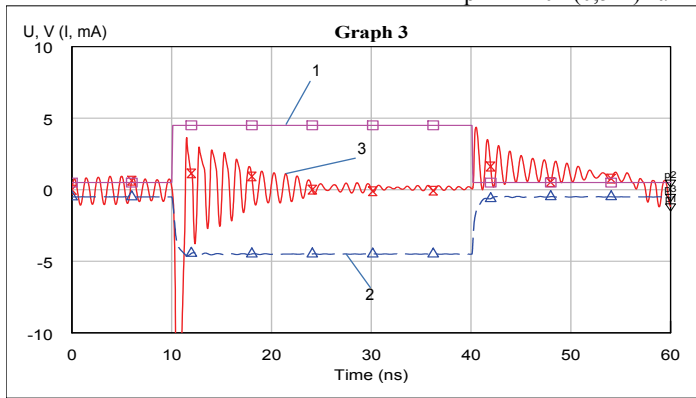
а)

Перехідна характеристика перетворювача рівнів на біполярному транзисторі



б)

Частотні залежності вихідного імпедансу при подачі на вхід напруг логічних рівнів «0» (0,5 В) та «1» (3,5 В)



в)

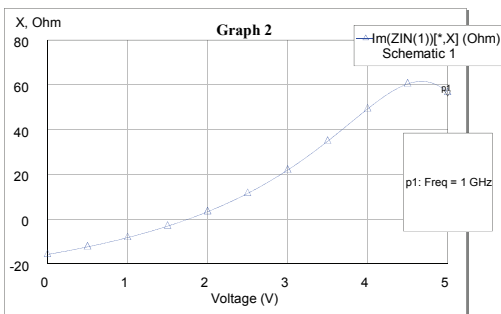
Часові діаграми напруги на вході (1), на варикапі (2) та струм на виході (3)

Рис. 3. Результати моделювання ВІП на біполярному транзисторі

З графіків на рис. 3б видно, що вихідний імпеданс схеми не змінює свій характер в діапазоні частот 960...1025 МГц, що визначає робочу частоту схеми 990 МГц  $\pm$  3 %. Тривалість перехідного процесу встановлення напруги на варикапі в цій схемі на порядок менша, ніж в попередній, а саме напруга на варикапі визначає імпеданс вхідного кола транзистора, а відтак і імпеданс на виході схеми. Таким чином, час затримки сигналів логічних рівнів становить приблизно 0,3 нс. Однак, внаслідок від'ємного активного опору, схема є потенційно нестійкою. В схемі також виникають затухаючі коливання, внаслідок ударного збудження в моменти перемикання логічних станів, що збільшує тривалість перехідного процесу до 15 нс.

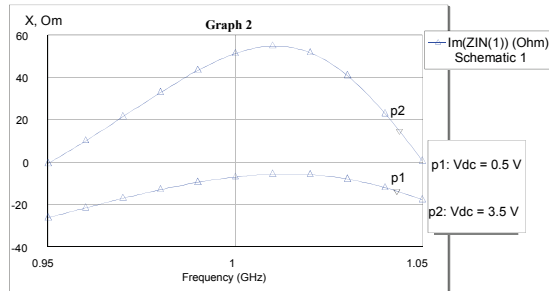
Результати чисельного моделювання ВІП на польовому транзисторі зображені на рис. 4.

З характеристики на рис. 4а випливає, що при подачі на вхід напруги логічного «0» вихідний імпеданс буде мати ємнісний характер, при подачі на вхід напруги логічної «1», вихідний імпеданс — індуктивний. З графіків на рис. 4б видно, що вихідний імпеданс схеми не змінює свій характер в діапазоні частот 950...1050 МГц, що визначає робочу частоту схеми 1000 МГц  $\pm$  5 %.



а)

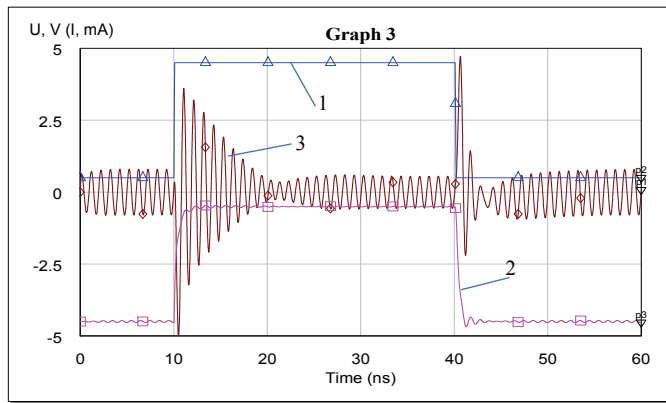
Перехідна характеристика схеми



б)

Частотні залежності вихідного імпедансу при подачі на вхід напруг логічних рівнів «0» (0,5 В) та «1» (3,5 В)

Рис. 4. Результати моделювання схеми ВІП (рис. 1в)



в)

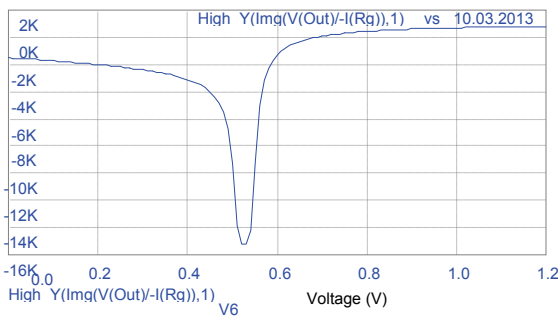
Часові діаграми напруги на вході (1), на варикапі (2) та струм на виході (3)

Рис. 4 (продовження). Результати моделювання схеми ВІП (рис. 1в)

На рис. 4в зображені часові діаграми напруг та струмів в схемі. З наведених графіків видно, що тривалість перехідного процесу встановлення напруги на варикапі в цій схемі аналогічна попередній, та час затримки сигналів логічних рівнів становить приблизно 0,3 нс. Перевагою схеми є відсутність від'ємного активного опору вихідного імпедансу, внаслідок чого схема є абсолютно стійкою, що не висуває додаткових умов до імпеданс навантаження для забезпечення стійкості схеми. В схемі також виникають згасаючі коливання, внаслідок ударного збудження в моменти перемикавання логічних станів, що збільшує тривалість перехідного процесу до 5...10 нс.

Результати чисельного моделювання ВІП на КМОП-структурі показані на рис. 5. Моделі транзисторів для технологічного процесу IBM 130nm 8RF-8LM-DM завантажені з сайту MOSIS (www.mosis.com).

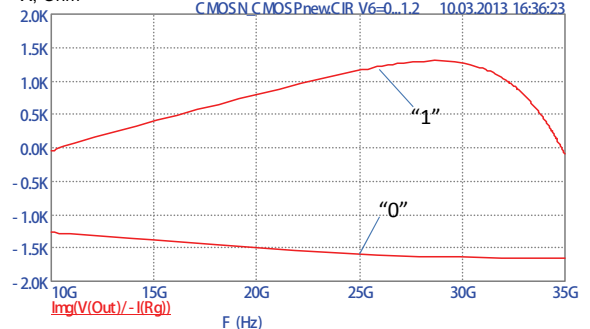
X, Ohm



а)

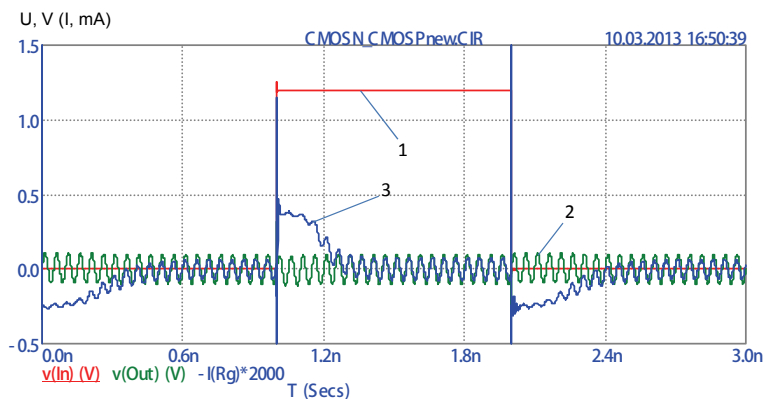
Перехідна характеристика схеми перетворювача рівнів для частоти 20 ГГц

X, Ohm



б)

Частотні залежності вихідного імпедансу схеми для різних логічних рівнів на вході



в)

Часові діаграми напруги на вході (1), напруги (2) та струму (3) на виході

Рис. 5. Результати моделювання схеми ВІП на КМОП-структурі

З наведених графіків (див. рис. 5б) видно, що діапазон частот роботи схеми склав від 10—35 ГГц, що є найбільшим з усіх розглянутих схем. Робоча частота схеми 20 ГГц  $\pm 50\%$ . Результати моделювання показали (див. рис. 5в), що час затримки логічних рівнів складає близько 0,2 нс, що є найкращим результатом серед усіх розглянутих схем.

### Висновки

1. Сформульовані вимоги до відеоімітансного перетворювача (ВП).

ВП має забезпечувати перетворення відеоімпульсного сигналу в імітансні сигнали. Кількісне значення імітансу не має значення, а характер визначає низку найважливіших параметрів імітансних логічних елементів (ЛЛЕ) і, найперше, завадостійкість та ступінь простоти технічної реалізації. Найважливішими параметрами ВП є його швидкодія та робочий діапазон частот.

2. Запропоновані три напрямки схемотехнічної реалізації ВП: на базі пасивних компонентів, на базі активних компонентів з фіксованою робочою точкою та на базі активних компонентів зі змінною робочою точкою. Показані їх переваги та недоліки.

3. Здійснена експериментальна оцінка значень параметрів запропонованих ВП. Показано, що час затримки логічних рівнів ВП на пасивних елементах становить близько 5 нс та робоча частота 1 ГГц  $\pm 10\%$ . Схеми ВП на базі транзисторних узагальнених перетворювачів імітансу мають час затримки 5...15 нс та робочу частоту 1 ГГц  $\pm 3\%$ . Перевагами схем є незмінна робоча точка транзисторів, що покращує завадостійкість, та можливість реалізації від'ємного активного опору, що збільшує їх функціональні можливості. Найменшу затримку (0,2 нс) та найбільший частотний діапазон (20 ГГц  $\pm 50\%$ ) мають ВП на КМОН-структурі, що робить створення нечітких імітансних логічних елементів на базі добре розвинутої КМОН технології перспективним напрямом.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Безуглов Д. А. Цифровые устройства и микропроцессоры : учеб. пос. / Д. А. Безуглов, И. В. Калиенко. — 2-е изд. — Ростов Н/Д : Феникс, 2008. — 469 с.
2. Кичак В. М. Синтез частотно-импульсных элементов цифровой техники : моногр. / В. М. Кичак. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2005. — 266 с.
3. Кнорре К. Г. Фазовые и частотные СВЧ элементы / К. Г. Кнорре, В. М. Туз, Г. И. Шур. — М. : Советское радио, 1975. — 352 с.
4. Проектирование многофункциональных интегральных схем / [А. А. Молчанов, В. П. Волкогонов, Ю. Х. Лоза, Г. И. Яловега]. — К. : Техніка, 1984. — 143 с.
5. Філінюк М. А. Імітансна логіка / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2010. — № 2(18). — С. 25—31.
6. Лищинская Л. Б. Обоснование концепции «нечеткого иммитанса» / Л. Б. Лищинская // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2010. — № 1. — С. 20—25.
7. Шило В. Л. Популярные цифровые микросхемы: справочник / В. Л. Шило. — М. : Радио и связь, 1989. — 352 с.
8. Філінюк М. А. Основи негатроніки. — Т. 1. Теоретичні і фізичні основи негатроніки / М. А. Філінюк. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. — 456 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Стаття надійшла до редакції 23.04.2013

Рекомендована до друку 19.06.2013

**Філінюк Микола Антонович** — завідувач кафедри, **Лазарєв Олександр Олександрович** — доцент, **Ліщинська Людмила Броніславівна** — доцент.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця