

УДК 621.373

О. В. Осадчук, д. т. н., проф.; Р. В. Криночкін

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ ДО ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТОВЩИНИ

У роботі викладено результати дослідження впливу величини та місця підключення вимірювальної ємності до частотного перетворювача товщини на основі від'ємного опору. Наведено методику отримання функції перетворення, діапазону вимірювання та чутливості за допомогою комп'ютерного експерименту. Обґрунтовано вибір оптимального варіанту включення на основі аналізу отриманих результатів.

Ключові слова: вимірювання товщини, частотні генератори, від'ємний опір.

Вступ

У зв'язку з розвитком нанотехнологій питання визначення метрологічних параметрів покриття набуває у сучасній техніці надзвичайної ваги. Тому не викликає сумніву необхідність подальшого розширення можливостей застосовуваних засобів вимірювання товщини. Проте в умовах насиченого ринку замало створити продукт високих метрологічних якостей. Конче необхідними для успішного просування є економічні та утилітарні показники приладу: низька собівартість, простота і надійність.

Головною ідеєю, що покладалася в основу нових вимірювачів товщини було забезпечення різнопланового набору характеристик, які б дозволили покращити загальну якість вимірювання і відкрили шлях до масового використання на виробництві. Ці характеристики можна згрупувати у три окремих напрямки: економічний (дешевизна і простота), метрологічний (чутливість, завадостійкість, малий мінімальний поріг вимірювання), практичний (технологічність та здатність до вимірів під час проведення процесу).

Виходячи з вищезазначеного, на основі проведеного у роботі [1] аналізу, перспективними у відповідності до поставлених критеріїв є частотні перетворювачі, засновані на від'ємному опорі [2] в парі з ємнісним первинним сенсором [3].

Можна виділити наступні переваги такого поєднання [4 – 6]:

С-сенсор	Частотний перетворювач
<ul style="list-style-type: none"> • висока стабільність • лінійність 	<ul style="list-style-type: none"> • висока чутливість і точність • широкий діапазон • завадостійкість вихідного сигналу
<ul style="list-style-type: none"> • простота • низька собівартість • висока технологічність 	<ul style="list-style-type: none"> • простота • низька собівартість • висока технологічність

Вимірювальна система з частотним перетворювачем на від'ємному опорі (рис. 1) працює наступним чином: зміна вимірюваної величини (товщини) призводить до зміни сумарної діелектричної проникності вимірювального зазору або геометричних розмірів первинного сенсора (конденсатора), таким чином перетворюючись в аналоговий сигнал (тобто у зміну ємності), цей сигнал впливає на внутрішні параметри частотного перетворювача з від'ємним опором (ЧПВО), результатом чого є зміна частоти генерації вихідного сигналу.

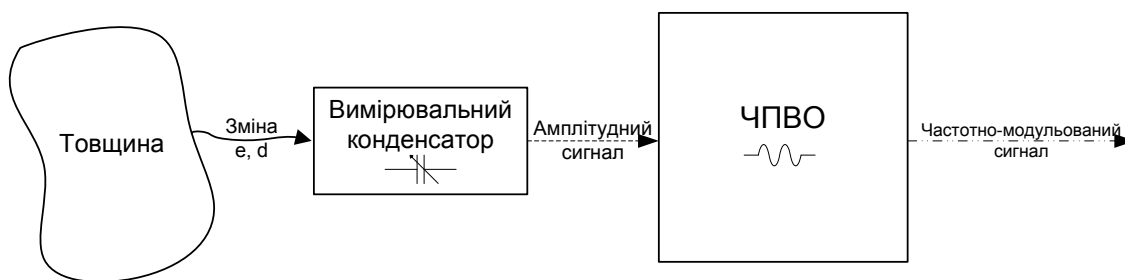


Рис. 1. Принцип роботи частотного перетворювача товщини на від'ємному опорі

Безпосередня схема ЧПВО в якості основної структурної ланки містить транзисторну структуру з від'ємним опором, що виконує функцію еквівалентної ємності в коливальному резонансному LC-контурі. Причому величина цієї ємності керується електрично при зміні вхідного сигналу, таким чином досягається кореляція між вимірювальним аналоговим сигналом і вихідною частотою генерації.

Основною метою даного дослідження виступає визначення оптимального місця підключення первинного сенсора до ЧПВО, на прикладі двох конкретних різновидів перетворювача (рис. 2). Принципова схема досліджуваної транзисторної структури складається з 4 вузлів (не враховуючи підключення конденсатора захисту C_3), тому є можливим 6 варіантів (схем) підключень вимірювальної ємності [7].

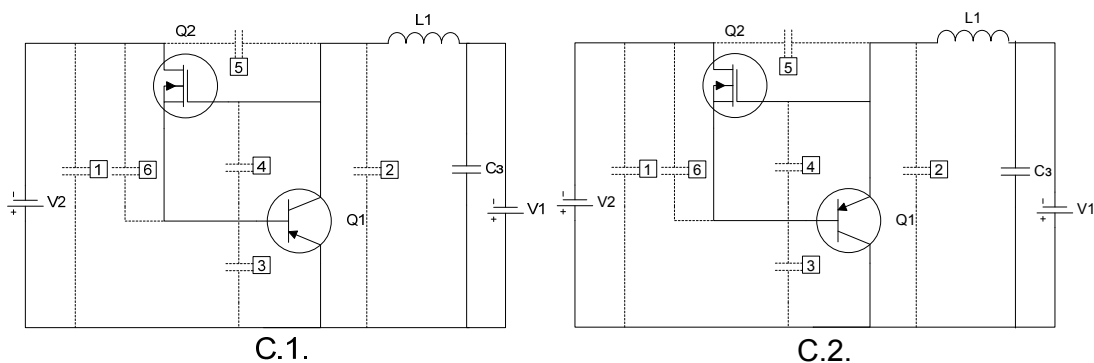
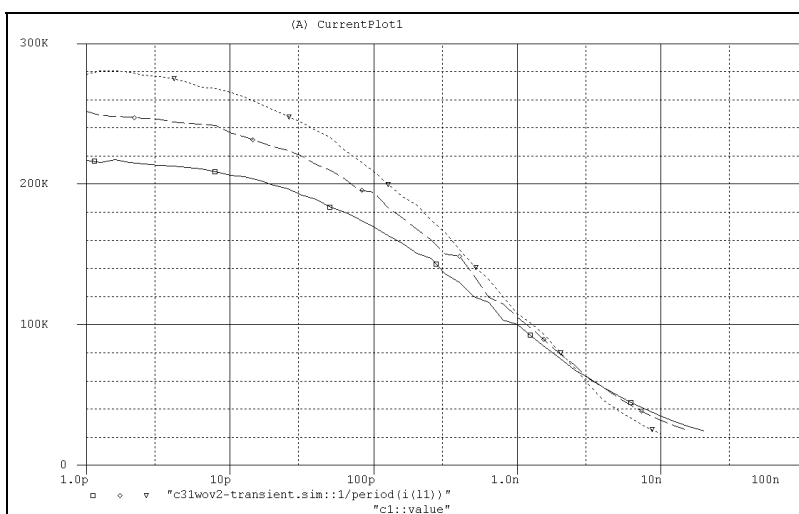


Рис. 2. Варіанти схем-включень ємнісного чутливого елемента

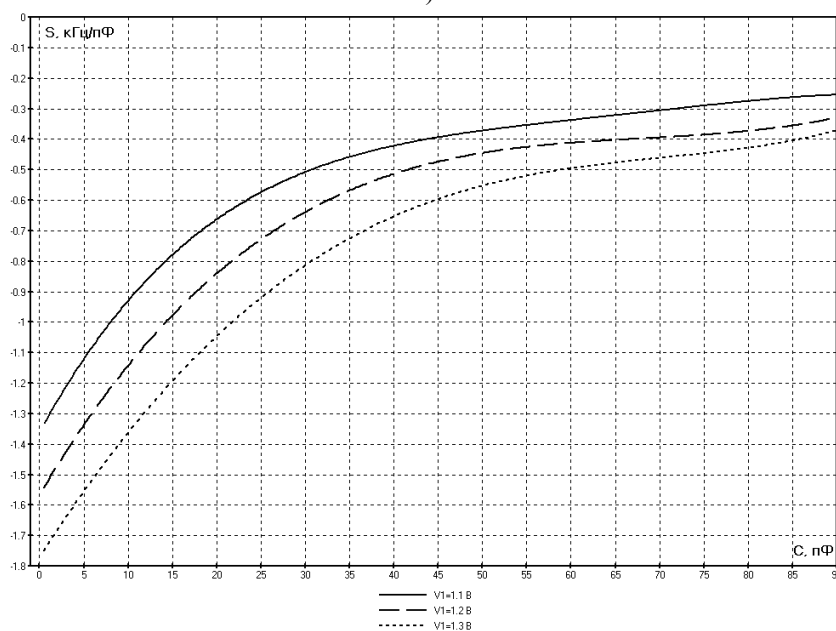
Інструменти дослідження

В якості основного програмного додатка для моделювання схем-гіпотез, що розробляються, було обрано широко використовуваний пакет OrCAD на основі мови опису і моделювання електронних схем PSpice A/D 16.0 [8,9]. Режим параметричного моделювання в даному пакеті дозволяє проводити комп'ютерний експеримент у режимі роботи схеми зі зміною ємності вимірювального конденсатора. При цьому для кожної такої зміни знаходиться відповідна зміна вихідної частоти генерації при різних значеннях напруги живлення джерела. Це дає змогу визначити діапазон вимірювання, побудувати в графічному вигляді (по точках) залежність частоти генерації та чутливості (як похідної функції перетворення) від ємності і в такий спосіб зробити висновки про подальшу можливість використання перетворювача в тому чи іншому вимірювальному діапазоні.

Покажемо для прикладу результати аналізу схеми С.1.4 (четверте включення на схемі 1) (рис. 3). Три гілки сімейства на кожній з представлених залежностей виникають через те, що моделювання проводилося з трьома різними напругами джерела $V1=1.1-1.3$ В (для визначення впливу зміни $V1$ на роботу схеми).



а)



б)

Рис. 3. а) залежність частоти генерації схеми С.1.4 від ємності вимірювального конденсатора; б) графік чутливості перетворення схеми С.1.4 в діапазоні від 1 пФ до 90 пФ

Вплив зміни вимірювальної ємності C_1 , що підключена за схемою 1.4, наступний:

- в діапазоні 1 пФ – 35 нФ існує відповідна зміна генерації, що носить *стабільний характер* і може бути використана для вимірювальних цілей;
- в діапазоні понад 35 нФ (для 1.3 В) генерація *відсутня*.

Аналіз та обробка отриманих результатів

Отримані в описаний спосіб дані заносяться в сукупну таблицю 1. Треба сказати, що частина з представлених схем майже нечутлива до зміни ємності або не має визначеної закономірності такої зміни, тому дані таких схем до таблиці не вносяться. Відмітимо також, що чутливість приводиться без врахування її знаку (додатна чи від'ємна), оскільки знак вказує лише на напрям зміни частоти генерації (зростання чи спадання).

Таблиця 1.

Вплив ємності на роботу ЧПВО

	Номер схеми					
	C.1.2	C.1.4	C.1.5	C.2.2	C.2.4	C.2.5
Максим. діапазон вимірювання	1 пФ 300 мкФ	1 пФ 55 нФ	1 пФ 30 мкФ	1пФ 1мкФ	1пФ 1нФ	1пФ 1мкФ
Максим.чутливість, кГц/пФ	0.6	2	0.4	250	365	197
Діапазон перестроювання, кГц	280 – 2	280 – 20	280 – 20	4500 – 20	5000 – 40	5000 – 20
Максимальна чутливість при відповідних значеннях С, кГц/пФ						
1 пФ	-	2	-	251	365	197
10 пФ	0.5	1.3	0.4	67	76	70
100 пФ	0.205	0.41	0.25	8	8.2	8
1 нФ	58E-03	167E-03	80E-03	451E-03	362E-03	422E-03
10 нФ	11E-03	25E-03	14E-03	18E-03	-	17E-03
100 нФ	1.90E-03	-	2.25E-03	0.629E-03	-	0.604E-03
1 мкФ	260E-06	-	-	18E-06	-	18E-06
10 мкФ	28E-06	-	-	-	-	-
100 мкФ	2.80E-06	-	-	-	-	-

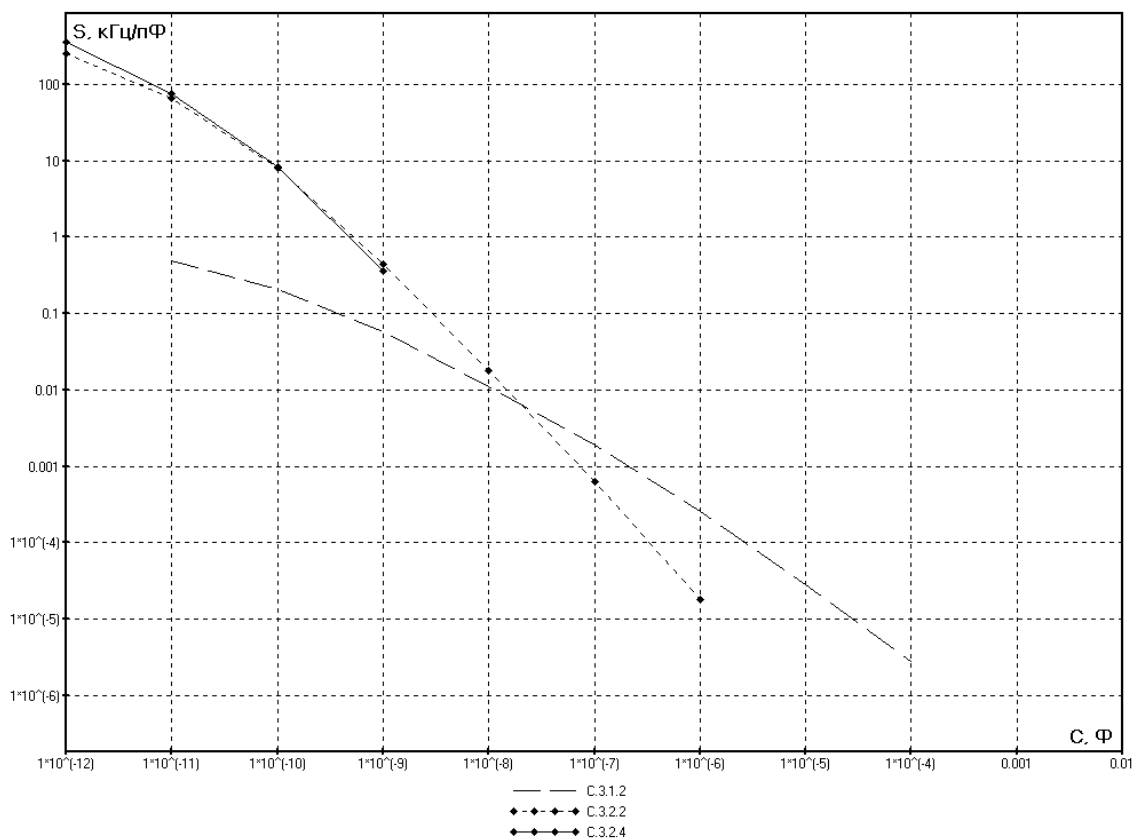


Рис. 4. Діаграма співвідношення «чутливість-діапазон вимірювання»

На основі даної таблиці побудована діаграма співвідношення «чутливість-діапазон

вимірювання» (рис. 4). При цьому, по осі абсцис відкладається певне значення ємності з діапазону вимірювання, по осі ординат – відповідне йому значення чутливості в цьому діапазоні. Дана діаграма дає можливість порівняти схеми різних включень між собою та визначити оптимальний для заданих умов варіант під'єднання зовнішнього сенсора.

Виходячи з наведених залежностей, ми можемо зробити висновок, що найбільшою чутливістю серед схем першої групи наділене включення С.1.4, а максимальним вимірювальним діапазоном – С.1.2.

Що стосується схем з другої групи, то порівняння С.2.2 і С.2.4 показує, що друга має переваги лише в районі одиниць – сотень пікофарад. Перша ж має значно більший діапазон вимірювання та чутливість при всіх інших значеннях. Ще однією перевагою схеми С.2.2 є низька залежність її параметрів від зміни V_1 , а отже і малий вплив випадкових девіацій напруги джерела живлення. Відповідно серед схем другої групи рекомендовано використовувати більш універсальну схему С.2.2, лише в тому випадку, коли необхідно отримати підвищену чутливість в діапазоні до 100 пФ - С.2.4.

Порівнюючи схеми групи 1 та 2, треба відмітити значно більшу чутливість схем другої групи при низьких ємностях (менше 10 нФ), однак у субмікрофарадному діапазоні їх чутливість стає на стільки ж менше, а при подальшому зростанні ємності схеми групи 2 взагалі виходять з автоколивального режиму, і генерація переривається.

Отже, підводячи підсумок, можна рекомендувати до використання в залежності від режиму роботи такі схеми включень:

- для вимірювань від 1 пФ до 10 нФ – схема С.2.2;
- для вимірювань більше 10 нФ до 10 мкФ – схема С.1.2;
- спеціальний високочутливий варіант для 1 – 100 пікофарад – схема С.2.4.

Для покращення наочності визначених графічних залежностей введемо поняття нормованої діапазонної чутливості, що з урахуванням зменшення чутливості при зростанні ємності (df/dC має від'ємний знак), запишеться наступним чином:

$$S_c = \frac{S \cdot C}{F_b},$$

де S – чутливість при ємності C , а F_b – нормувальна частота 1 МГц.

Ця безрозмірна величина чисельно дорівнює чутливості схеми при зміні ємності первинного перетворювача на одиницю відповідного діапазону (МГц/мкФ, МГц/нФ тощо). Таким чином, вона дозволяє більш чітко оцінити чутливість схеми у будь-якому діапазоні вимірювання. Особливо зручно використовувати S_c в описі схем, у яких можлива зміна значень чутливості досягає багатьох порядків, оскільки дозволяє показати зміну чутливості без застосування логарифмічного масштабу по вісі ординат і в такий спосіб більш точно порівнювати різноманітні варіанти включень. Графічні залежності нормованої діапазонної чутливості для досліджуваних схем показані на рисунку 5, наочно підтверджують зроблені висновки про застосовуваність схем включень.

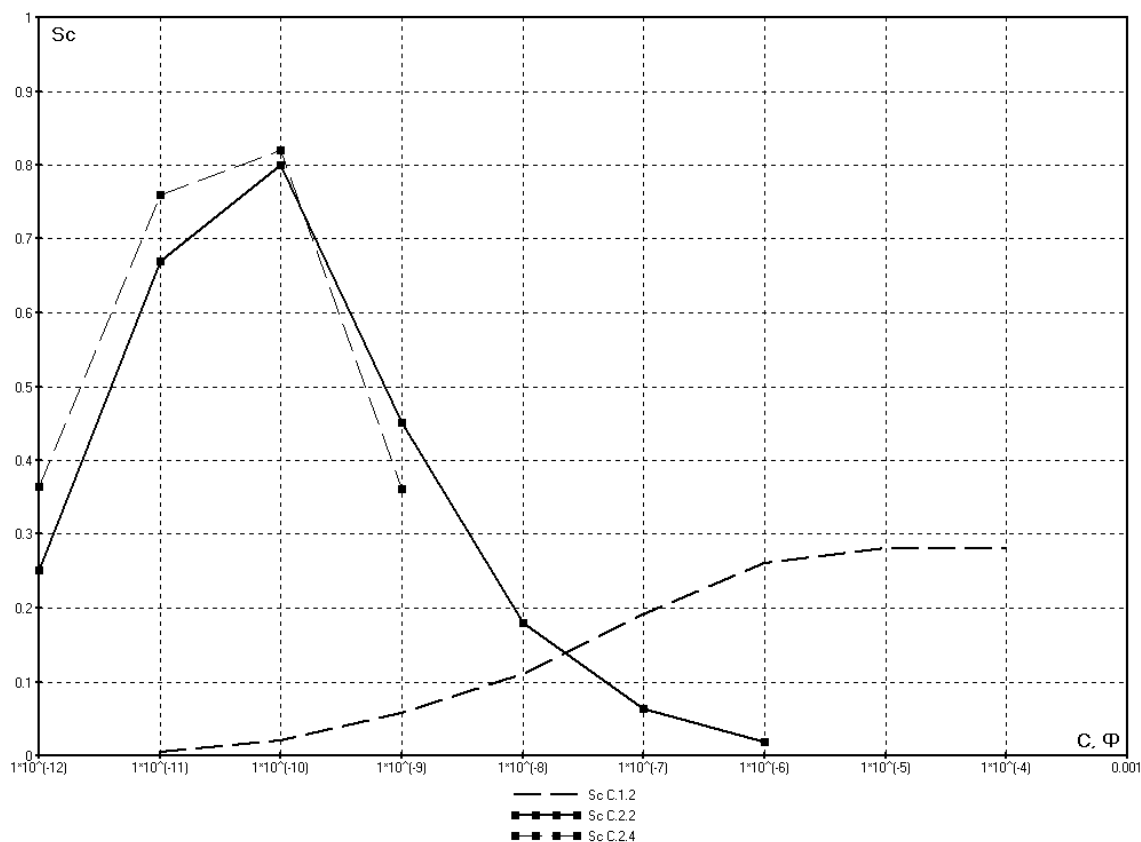


Рис. 5. Нормована діапазонна чутливість

Висновки

1. У даній роботі представлені результати комп'ютерного експерименту з моделювання роботи ємнісного частотного вимірювача товщини на від'ємному опорі при різних варіантах підключення вимірювального конденсатора.
2. Розроблено методику отримання для пристрою функції перетворення, діапазону вимірювання та чутливості відносно зміни вимірювальної ємності.
3. Визначено та обраховано критерії оптимальності для порівняння включень на основі використання діаграм співвідношення «чутливість – діапазон вимірювання» та нормованої діапазонної чутливості. Обґрунтовано вибір оптимального включення вимірювальної ємності до частотного перетворювача на від'ємному опорі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук О. В. Проблеми вимірювання товщини нанесеного покриття та методи підвищення його точності / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Нові Технології. – 2009. – №1. – С. 102 – 105. – ISSN: 1810-3049
2. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця: ВНТУ, 2004 – 208 с.[1]
3. Гриневич Ф. Б. Измерительные компенсационно мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф.Б. Гриневич, А. И. Новик.; АН УССР, Ин-т Электродинамики. – Киев: Наукова думка. – 1987. – 112 с. – Библиогр.: с.105 – 110 (109 назв.).
4. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С Осадчук., О. В.Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с. – ISBN 966-7199-67-3.
5. Струнский М. Г. Бесконтактные емкостные микрометры / М. Г. Струнский, М. М. Горбов – Л.: Энергоатомиздат: Ленинградское отд-ние, 1986. – 136 с.: ил.
6. Иоссель Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г.

Струнский. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1981. – 288 с.

7. Осадчук О. В. Вплив зовнішньої вимірювальної ємності на ЧПВО / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009): матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції, Вінниця, 8-10 жовтня 2009 року. – Вінниця, 2009. – Частина 2. – С.78

8. Болотовский Ю. И. ОтCAD. Моделирование. «Поваренная» книга/ Ю. И. Болотовский, Г. И. Таназлы – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 200 с. – (Серия «Библиотека студента»). – ISBN 5-98003-178-2

9. Хайнеман Р. Моделирование работы электронных схем / Р. Хайнеман. – М.: ДМК-Пресс, 2005. – 327 с. – (Серия «Проектирование»).

Осадчук Александр Володимирович – д. т. н., професор, завідувач каф. радіотехніки.

Криночкін Роман Володимирович – аспірант кафедри радіотехніки.
Вінницький національний технічний університет.