

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІВОК  
НА ОСНОВІ ПРИСТРОЇВ  
З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2013

УДК 621.373  
ББК 32.854.2  
О-72

Рецензенти:

**А. П. Бондарєв**, доктор технічних наук, професор

**В. Г. Петрук**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 25 квітня 2013 р.)

**Осадчук, В. С.**

О-72      Радіовимірювальні перетворювачі для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін. — Вінниця : ВНТУ, 2013. — 136 с.

ISBN 978-966-641-550-6

В монографії проаналізовано сучасний стан пристроїв для визначення товщини плівок, подано основи побудови радіовимірювальних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур. Розглянуто електричні схеми і експериментальні дослідження основних параметрів радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок. Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних перетворювачів, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

**УДК 621.373**  
**ББК 32.854.2**

**ISBN 978-966-641-550-6**

© В. Осадчук, О. Осадчук, Р. Криночкін, 2013

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІВОК.....	8
1.1 Основні методи визначення товщини.....	9
1.2 Обґрунтування вибору первинного перетворювача товщини, переваги і недоліки ємнісних вимірювальних перетворювачів .....	16
1.3 Різновиди вторинних перетворювачів сигналів ємнісного первинного чутливого елемента .....	19
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІВОК.....	23
2.1 Розробка математичної моделі первинного ємнісного чутливого елемента .....	25
2.2 Функціонально-схемна організація радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівки.....	35
2.3 Розробка математичних моделей радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок.....	58
3 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІВОК ТА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	75
3.1 Розробка засобу вимірювання на основі радіовимірювального перетворювача для визначення товщини плівок .....	75
3.2 Визначення похибок радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок .....	80
3.3 Визначення чутливості, роздільної здатності та похибок засобу вимірювання на основі радіовимірювального перетворювача для визначення товщини плівок .....	89

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ, ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ У СИСТЕМАХ ОТРИМАННЯ ПЛІВОК І ПОКРИТТІВ .....	96
4.1 Конструкції систем термовакуумного нанесення покриттів .....	97
4.2 Автоматизована вимірювальна система установки для термовакуумного нанесення покриттів, доповнена радіовимірювальним перетворювачем для визначення товщини плівок .....	102
4.3 Застосування розробленого радіовимірювального перетворювача для визначення товщини у системах виробництва полімерної плівки .....	107
ДОДАТОК А Програма розрахунку ємності первинного чутливого елемента площинного типу .....	111
ДОДАТОК Б Графіки змодельованих вихідних коливань пристрою в різних режимах роботи .....	124
ЛІТЕРАТУРА .....	126

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
МК – мікроконтролер  
ЧПВО – частотний перетворювач на основі транзисторної структури з від’ємним опором  
 $C_w$  – ємність первинного ємнісного вимірювального перетворювача  
 $F$  – частота генерації  
 $I_f, I_r, I_{bit}$  – джерела струмів біполярного транзистора  
 $I_{df}, I_{dr}$  – струми внутрішніх переходів база-колектор і база-емітер  
 $L$  – індуктивність котушки  
 $M$  – відносна зміна ємності первинного вимірювального перетворювача  
 $Q$  – добротність  
 $r$  – роздільна здатність  
 $S$  – чутливість  
 $S_c$  – нормована чутливість  
 $\delta_U$  – похибка спричинена нестабільністю напруг живлення  
 $\delta_T$  – похибка спричинена нестабільністю температури  
 $\delta_{НКГ}$  – похибка часової міри частотоміра  
 $\delta_{СТ}$  – похибка первинного перетворювача, спричинена нестабільністю температури  
 $\delta_{КВЧ}$  – похибка квантування частотоміра  
 $\delta_{РЗ}$  – похибка розрядності  
 $\delta_{\Sigma}$  – сумарна похибка

## ВСТУП

У сучасній техніці отримали широкий розвиток галузі точного та інструментального приладобудування, що займаються розробкою різноманітних систем прямого і опосередкованого вимірювання, перетворення, кодування, передачі та захисту метрологічної інформації. Також до цієї сфери науково-технічних знань можна віднести дії щодо відкриття і впровадження нових принципів та покращення існуючих методів вимірювання. Все це дозволяє будувати високоточні засоби і системи вимірювання параметрів технологічних процесів і навколишнього середовища, стану виробничих і вимірювальних систем тощо.

Основними тенденціями розвитку сучасних вимірювальних перетворювачів є подальше підвищення точності і надійності з одночасним зменшенням собівартості, споживання енергії та масогабаритних показників. Все це примушує проводити пошуки і розробку нових методів вимірювання, які б задовольняли ті умови, що з'являються у зв'язку з розвитком технології і потребами практики.

Основний внесок в позиції вітчизняного точного приладобудування зробили відомі вчені О. Д. Азаров [107], І. М. Вікулін [108], З. Ю. Готра [98, 99, 111], В. В. Кухарчук [112], Г. Віглеб [113], В. П. Манойлов, В. С. Осадчук [64, 114–116], В. І. Стафеев [107, 108], В. І. Водотовка [87], О. В. Осадчук [110, 115–117], В. М. Кичак [141], В. О. Поджаренко [142] та ін. Розробками теорії та практичного застосування в Україні займаються такі наукові центри як Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ), Національний технічний університет України «КПІ» (м. Київ), Інститут фізики напівпровідників НАН України (м. Київ), Інститут метрології (м. Харків), Національний технічний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), Харківський національний технічний університет (м. Харків), ВАТ «Український науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування» (м. Київ), Державний науково-дослідний інститут індикаторних приладів (м. Вінниця), Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця).

Декілька відносно нових перспективних напрямків розробки фізичних основ реалізації приладів вимірювання отримали розвиток в наукових школах Вінницького національного технічного університету, а саме: дослідження теоретичних основ реактивних властивостей у напівпровідникових приладах подано у працях проф. В. С. Осадчука [64, 114–116], розвиток теорії від'ємного опору і оцінка її ефективності розглянуто в роботах проф. М. А. Філінюка [118, 119], розробка теорії мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачів на основі тра-

нзисторних структур з від'ємним опором і її використання подано у працях проф. О. В. Осадчука [110, 115–117].

На даний час властивості та характеристики перетворювачів є визначальними для різноманітних автоматичних систем керування, вимірювання та контролю. Тому очевидною стає необхідність подальшого покращення метрологічних та економічних показників перетворювачів, при збереженні їх високої енергетичної ефективності та масогабаритних показників. Важливою властивістю засобів вимірювання, що розробляються, повинна бути можливість безпосередньої легкої інтеграції до адаптивних систем на основі мікроконтролерів, програмованої логіки, промислових та персональних комп'ютерів тощо. Все це повинно поєднуватися з простою технологією виготовлення та застосування.

Існують різноманітні види перетворювачів для визначення товщини матеріалів, що знайшли широке використання як в лабораторіях, так і на виробництві. Проте застосування таких засобів для вимірюванні товщини плівок ускладнюється тим фактом, що більшість з них мають малу роздільну здатність, високий поріг чутливості та великі значення похибок при вимірюванні малих товщин матеріалу. Перетворювачі ж, що створені спеціально для визначення малих та надмалих розмірів плівок (радіаційні, рентгенографічні), хоча і мають високі метрологічні характеристик, проте, по-перше, є складними та мають дуже високу вартість а, по-друге, засновані на небезпечних та психологічно некомфортних для обслуговуючого персоналу іонізаційних ефектах. Виходячи з вище сказаного, перспективною є розробка та дослідження радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини на основі транзисторних структур з від'ємним опором, що дозволить створити прилади, які б поєднували високі метрологічні характеристики з простотою та низькою вартістю. Ці перетворювачі надають можливість реалізувати вимірювання товщини з високою роздільною здатністю, малою похибкою та порогом чутливості, через перетворення її у частоту за допомогою високочутливого коливального контуру з електричною перебудовою. Це дозволяє зменшити собівартість систем вимірювання при одночасному збільшенні їх точності та надійності.

Тому стає очевидною необхідність розробки принципів роботи і теоретичних засад реалізації радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини на основі транзисторних структур з від'ємним опором, а також практичних схем і конструкційних варіантів їх застосування, з наступними експериментальними дослідженнями метрологічних параметрів, розробкою засобу вимірювання та можливостей впровадження у виробничий процес.

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІВОК

На сучасному етапі розвитку технологія отримання плівок та покриттів отримала широке застосування у різноманітних галузях науки і техніки, наприклад:

- виробництво рулонних, листових, трубчатих полімерних матеріалів;
- виробництво металічних аркушів, тонких плоских провідників (мікродротів) тощо;
- отримання захисних, антифрикційних, антикорозійних, декоративних покриттів;
- технологія тонких та товстих плівок для створення базових активних і пасивних елементів та частин РЕА;
- технологія тонких і товстих плівок, як складова частина процесів в інтегральній технології (в т. ч. проведення металізації, виготовлення інтегральних напівпровідникових та діелектричних шарів);
- MEMS технології;
- технологія створення механічних та електромеханічних елементів високоякісного вимірювального, записуючого та відтворюючого обладнання тощо [10, 138–140].

Для вимірювання параметрів нанесених плівок та покриттів використовуються різноманітні технологічні засоби, покращення характеристик яких є логічно необхідним і надзвичайно важливим науковим та метрологічним завданням.

Широкий розвиток нанотехнології та зменшення розмірів елементів електронної техніки, обумовив необхідність створення або модернізації систем вимірювання. Проте, незважаючи на досить значний прогрес у цій сфері, досягнення високої точності вимірювання, частіше за все супроводжується значним збільшенням вартості засобу вимірювання та зменшенням надійності, що робить економічно і технічно не доцільним його використання.

У цьому розділі аналізуються існуючі системи вимірювання товщини та формулюються пропозиції щодо можливих шляхів покращення їх метрологічних параметрів.

В першому підрозділі наведений огляд методів та практичних конструкцій товщиномірів, в другому обґрунтовується вибір ємнісного методу вимірювання, в третьому висвітлені деякі аспекти побудови вторинних перетворювачів для ємнісних сенсорів.



## 1.1 Основні методи визначення товщини

Принцип роботи вимірювальних перетворювачів товщини може бути заснований на різноманітних фізичних явищах, таких як зміна електричного опору, ємності, оптичної, радіаційної або магнітної провідності первинного давача тощо (табл. 1.1).

Наведемо класифікацію методів вимірювання товщини за фізичним та конструктивним принципом (рис. 1.1). Класифікація також буде корисною для визначення ступеня можливості використання того чи іншого принципу у цифровій вимірювальній апаратурі, крім того, класифікація вміщує розширений розподіл видів ємнісних сенсорів за різноманітними ознаками.

Основним видом механічного вимірювача малих товщин є мікрометр. При більших товщинах використовуються також і інші механічні методи й прилади, причому часто вихідною величиною є деяка фізична величина, функціонально пов'язана з товщиною. Ця функція визначається не тільки товщиною, але й властивостями матеріалу, з якого виготовлена деталь. Наприклад, за допомогою зважування на чутливих терезах [7] можна визначити товщину рівномірного покриття з відомою густиною [5]. Для вимірювання товщини плівкоподібних матеріалів, широко застосовуються такий різновид мікрометра, як пасомер [48].

Переваги: простота; низька вартість; вимірювання будь-яких матеріалів. Недоліки: мала повторюваність; зворотний вплив на об'єкт вимірювання; погіршення точності в процесі експлуатації; висока мінімальна границя вимірювання; ускладнене калібрування менше 50 мкм; складність інтеграції до інформаційно-вимірювальних систем (ІВС).

Магнітні перетворювачі товщини використовуються у випадку різного виду магнітної проникності покриття і підкладки, наприклад, для вимірювання немагнітних покриттів на феромагнітному матеріалі. Існує дві основні групи таких сенсорів: магнітного потоку (індукційні) та магнітного опору. Перша група є генераторними перетворювачами та має у якості вихідної величини ЕРС. Друга група відноситься до параметричних перетворювачів магнітного опору і підрозділяється на дві підгрупи в залежності від типу вихідного сигналу: індуктивні (індуктивність) та трансформаторні (взаємоіндуктивність) давачі.

Параметричні пасивні сенсори *магнітного опору* реалізують одну із двох функцій перетворення опору  $Z_m$ : індуктивні сенсори  $L=w^2/Z_m$ , де  $L$  – індуктивність котушки, що має  $w$  витків; трансформаторні сенсори  $M=w_1w_2/Z_m$ , де  $M$  – взаємоіндуктивність двох обмоток перетворювача з кількістю витків  $w_1$  та  $w_2$  відповідно [11].

Конструктивно дані сенсори складаються з однієї або двох котушок, розташованих на розімкнутих П- або Ш-подібних феромагнітних сердечниках. Полюси сердечника притискаються до покриття, товщина якого вимірюється. Зміна товщини приводить до зміни магнітного опору системи, що і відслідковується схемою обробки. Типовими значеннями для таких сенсорів є діапазон вимірювання товщини до 1000 мкм, з похибкою близько  $\pm 5\%$ , роздільна здатність 10 мкм.

Таблиця 1.1 – Основні фізичні принципи визначення товщини

Фізичний принцип перетворювача	Різновид перетворювача	Конструкція перетворювача
Механічний	–	мікрометр пассометр
Магнітний	з магнітним опором	індуктивні трансформаторні
	магнітного потоку (індукційні)	з рухомою котушкою з рухомим магнітом розімкнуті
Вихрових струмів	–	–
Електричний	діелектрична міцність	–
	опір	двозондовий чотиризондовий
	ємність	зі змінним зазором зі змінною діел. проникністю $\epsilon$
Радіаційний	іонізаційний	з ослабленням відбивання
	рентгенівський	з поглинанням емісії
	оптичний	з інтерференцією селективного поглинання ослаблення
Акустичний	ультразвукові	–
	звукові	–

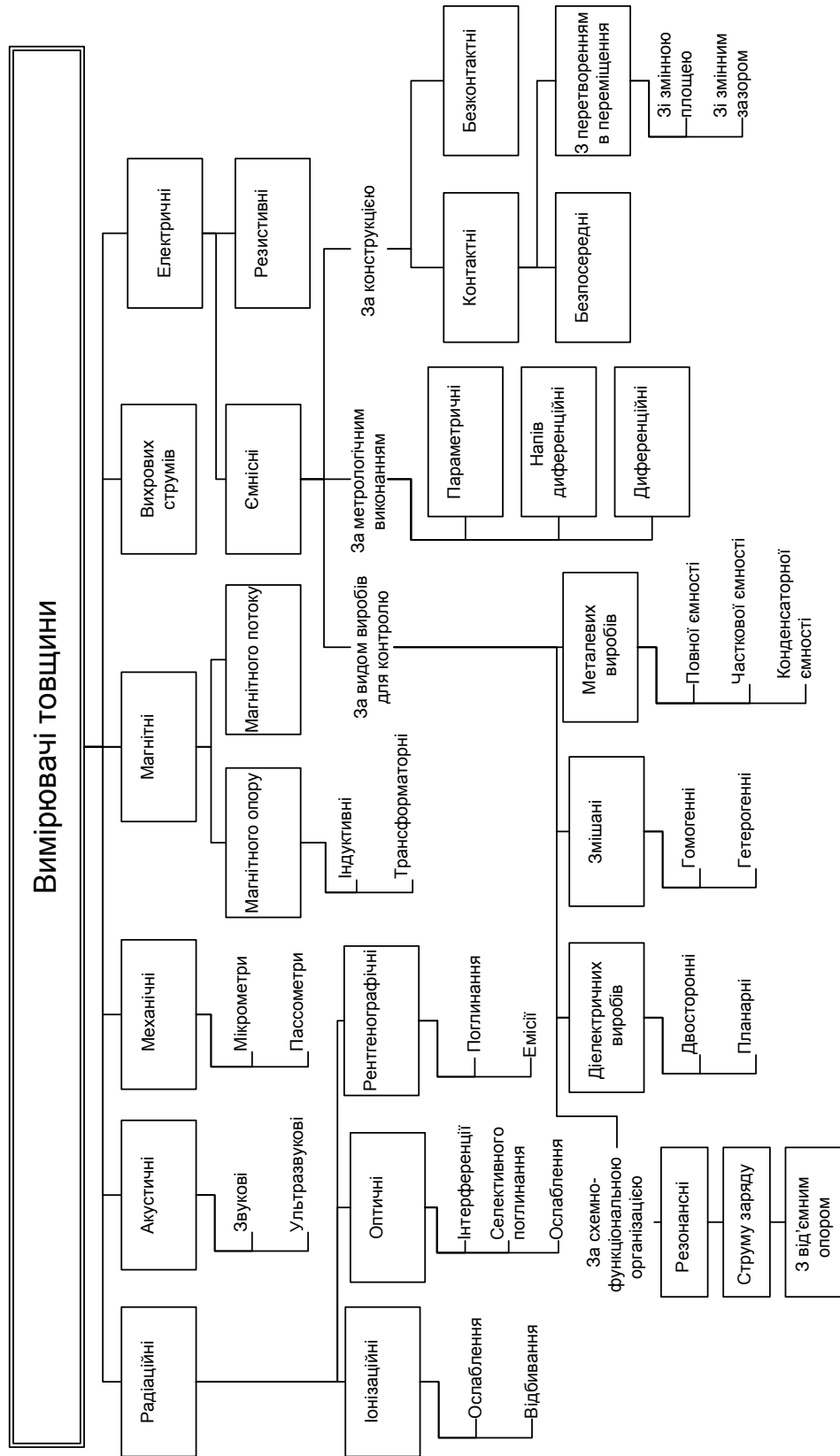


Рисунок 1.1 – Розширена класифікація методів визначення товщини покриття

Важливо слідкувати також, щоб полюси сердечників накладалися на аркуш без зазорів. Для зменшення похибки застосовують диференціальні схеми включення, при цьому використовується зразковий аркуш з відомою номінальною товщиною  $\delta_0$ . Полюси робочого перетворювача притискають до вимірюваного аркуша, полюси порівняльного – до зразкового. Фактично при такому включенні вимірюється різниця товщини аркушів [5, 10].

Генераторні (активні) сенсори *магнітного потоку* мають в основі своєї роботи закон електромагнітної індукції (в зв'язку з чим їх нерідко називають індукційними)  $e = -w \cdot d\Phi/dt$ .

Тобто вихідна ЕДС перетворювача, пропорційна зміні магнітного потоку  $d\Phi/dt$ , що зчіплюється з витками  $w$  котушки, яка рухається в постійному магнітному полі [11].

Через те, що сенсори магнітного потоку реагують лише на його зміну, вони можуть обмежено використовуватись у системах визначення товщини в якості детекторів нестабільностей або пікових параметрів товщини плівок.

Переваги: можливість одностороннього вимірювання, відносно низька вартість реалізації, можливість електронної обробки вихідного сигналу, низький вплив на об'єкт вимірювання.

Недоліки: лише не магнітні матеріали на магнітних підкладках або товщина магнітних матеріалів, висока мінімальна границя вимірювання, невисока чутливість при малих товщинах, чутливість до механічних впливів.

Товщину магнітних покриттів на провідній немагнітній основі або окремих аркушів провідного матеріалу (наприклад сталі), можливо вимірювати методом вихрових струмів. Фактично цей метод дуже схожий на магнітний індуктивний перетворювач. Проте, фізичний принцип дії, покладений в основу роботи та вид сигналу на виході сенсора, різні, що дозволяє виокремити такі давачі в окрему групу.

Сенсор працює таким чином: при введенні у зазор магнітопроводу, аркуша із провідного матеріалу, в останньому наводяться вихрові струми, це призводить до зростання втрат активної потужності у котушці, що еквівалентно зростанню її активного опору. Таким чином, вихідною величиною цього перетворювача є еквівалентний активний опір [5].

Сенсори такого типу знайшли широке застосування у вимірюваннях товщини лакофарбових та інших покриттів на провідних основах (в т. ч., наприклад, в автомобільній промисловості).

Переваги: безконтактність, низький вплив на об'єкт вимірювання, можливість інтеграції до ІВС.

Недоліки: висока температурна похибка, висока чутливість до струму живлення, лише провідні матеріали, погано придатний для малих товщин.

Для визначення товщини плівок і покриттів електричними методами, використовують такі властивості: діелектричну міцність (напругу пробою), ємність, опір плівки.

*Метод напруги пробою* заснований на визначенні граничної величини напруги, що витримує діелектрична плівка. Проте внаслідок низької надійності метод не знайшов широкого втілення та не рекомендований до застосовування.

*Резистивний метод.* Вимірювання опору матеріалу – проста операція, що може бути використана для визначення товщини провідних плівок та покриттів (в т. ч. на непровідних підкладках) і для напівпровідникових епітаксійних шарів [10]. Залежність опору тонкої провідної плівки  $R$  від товщини  $d$  можна представити у вигляді

$$R = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot d},$$

де  $l$  – довжина;  $w$  – ширина;  $\rho$  – питомий опір плівки. При умові константності питомого опору товщину плівки  $d$  можна безупинно визначати за її опором [9].

Однак, незважаючи на легкість вимірювання, такий метод має свої недоліки. Головним із них є те, що для одержання величини товщини плівки необхідно знати величину питомого опору  $\rho$ , однак, під час проведення вимірювань вона може змінюватися. Другим недоліком є те, що в певних умовах (наприклад сильна неоднорідність, включення, існування наскрізних проколів тощо) опір плівки не підкоряється вказаній функції перетворення. Тому вимірювання, проведені резистивним методом, рідко бувають точними.

Переваги: простота, дуже низька собівартість, широкий діапазон вимірювання.

Недоліки: низька точність, залежність від питомого опору, тільки для провідних і напівпровідних матеріалів, контактність.

*Ємнісний метод.* Може бути застосований для визначення товщин як діелектричних плівок так і провідних виробів [47]. При застосуванні площинного конденсатора, вимірювана ємність, для непровідних матеріалів, буде обернено пропорційна товщині плівки та прямо пропорційна діелектричній постійній і площі електрода.

Є два варіанти реалізації методу вимірювання ємності діелектричних плівок: коли електроди перебувають зверху і знизу від поверхонь плівки та коли вони розташовані планарно. Перший метод є більш чу-

тливим, проте другий дозволяє вимірювання навіть в таких технологічних процесах, в яких доступ до виробу можливий лише з однієї сторони. Планарний метод показує найкращі результати для вимірювання відносно товстих плівок. Помилка при цьому складає 2...4 %.

Основною сферою застосування ємнісних мікрометрів є вимірювання розмірів у діапазоні 1...300 мкм.

Чутливість вимірювального конденсатора для діелектричних плівок залежить від відносної діелектричної проникності вимірюваного матеріалу. Чим більша різниця між нею та проникністю повітря, тим більша величина зміни ємності при збільшенні товщини зразка, що вимірюється. Оскільки проникність більшості неполярних та слабо полярних діелектриків лежить в діапазоні від 2 до 12, то відносна зміна початкової ємності сягає не менше 200 % на повний діапазон товщини. Цього повністю достатньо для подальшої обробки вимірювального сигналу сучасними високочутливим електронними засобами.

З іншого боку, залежність показів від діелектричної проникності вимірюваного матеріалу є недоліком методу, тому необхідний додатковий періодичний контроль проникності та автокалібрування сенсора. Втім легкість інтеграції сенсора до автоматичної системи вимірювання значно спрощує цей процес [9].

Переваги: висока чутливість, низький мінімальний поріг, простота, дуже низька собівартість, легкість інтеграції в ІВС, безконтактність, можливість використання в процесі нанесення плівки, зневажливо малий вплив на об'єкт вимірювання, мала маса і розміри.

Недоліки: залежність від діелектричної проникності, необхідність екранування.

Радіаційні методи засновані на вимірюванні характеристик електромагнітного випромінювання – відбитого, пропущеного або емітованого плівкою.

*Іонізаційні.* Джерело випромінювання й іонізаційний перетворювач можуть бути розташовані як по різні сторони вимірюваного покриття (принцип ослаблення променя), так і по один бік від нього (принцип відбитого променя).

Ослаблення променя визначається густиною речовини й не залежить від роду речовини і її стану. Цей метод застосовується в основному для вимірювання листів важких металів й листів великої товщини.

В той же час інтенсивність відбитого променя залежить від матеріалу плівки, що повинен відрізнятись від матеріалу підкладки, тому для нього необхідні еталони товщини матеріалу плівки. Зате цей метод має значно більшу чутливість і застосовується для вимірювання тонких листів легких матеріалів [5, 12].

*Рентгенографічні.* Бувають двох видів: метод поглинання, заснований на вимірюванні ослаблення в півці пучка рентгенівських променів; метод емісії, що ґрунтується на збудженні матеріалу плівки джерелом високої енергії [10].

Є серйозні обмеження методу поглинання, тому що на вимірювання інтенсивності впливають характеристики плівки. Але він, на відміну від методу емісії, може бути застосований навіть тоді, коли підкладка містить значну кількість елементів, що присутні у плівці.

При використанні методу емісії, матеріал покриття збуджується джерелом високої енергії. Після цього вимірюється емітована матеріалом інтенсивність селективної довжини хвилі характеристичного випромінювання, що прямо пропорційна товщині для тонких плівок і росте експоненціально для більш товстих плівок. Цей метод вимагає виконання тільки однієї умови: щоб матеріал підкладки не містив жодного елемента, наявного в плівці, і тому застосовується більш широко, ніж метод поглинання [10].

*Оптичні.* Для вимірювання товщини можна використати низку оптичних явищ: інтерференція, поглинання, пропускання, відбиття світла. Вибір конкретного явища для вимірювання визначається типом підкладки або матеріалу. Однак при виробництві мікроелектронних схем оптичні методи вимірювання товщини не знайшли надто широкого поширення, через складність умов в яких проходять технологічні процеси, крім того звичайно основний інтерес представляють електричні, а не оптичні властивості. Зазначимо також, що в оптичних методах може бути використаний широкий діапазон довжин хвиль: від інфрачервоних до ультрафіолетових.

Переваги: низка похибка, здатність до вимірювання малих товщин.

Недоліки: використання шкідливих променів (іонізаційний), дуже висока вартість устаткування, обмежений набір матеріалів, залежність від оптичної прозорості (оптичний), складність реалізації та обслуговування (рентгенівський).

Зведемо деякі метрологічні параметри та вартість основних видів промислових вимірювачів товщини у сукупну таблицю з сортуванням за порогом стабільного вимірювання, тобто за значенням вимірюваної величини при якій відносна похибка товщиноміра не більша за вказану у відповідній графі, (табл. 1.2).

Таким чином, ті з існуючих методів вимірювання, що мають достатню порогову чутливість та роздільну здатність у діапазоні декількох сотень мікрометрів є складними і дорогими вимірювальними засобами, прості ж вимірювальні прилади, мають, в цьому діапазоні, низькі метрологічні характеристики.

Крім того, недоліком багатьох з таких засобів є неможливість проведення безконтактних вимірювань безпосередньо в процесі виробництва плівок.

Таблиця 1.2 – Деякі характеристики методів промислової товщинометрії

Метод	Поріг	$\Delta$ , мкм	$\delta$ , %	Роздільна здатність	Безконтактно	Вартість, грн
УЗ	200 мкм	30...70	2...3	100 мкм	ні	від 5 000
Механічний	50 мкм	5...10	10	5...10 мкм	ні	200...700
Індуктивний	100 мкм	5	3...5	10 мкм	ні	від 4 000
Вихрових струмів	50 мкм	3	5	25 мкм	так	від 4 000
Ємнісний	20 мкм	2...4	2	1 мкм	так	від 500
Оптичний	0.1 мкм	2	–	0.01 мкм	так	від 10000
Рентгенографічний	0.1 мкм	0.05	2...5	0.01 мкм	так	десятки тис.
Іонізаційний	300 Å	0.01	–	100 Å	так	сотні тис.

## 1.2 Обґрунтування вибору первинного перетворювача товщини, переваги і недоліки ємнісних вимірювальних перетворювачів

Для того, щоб обґрунтувати вибір первинного перетворювача, сформулюємо більш стисло вимоги до розроблюваного товщиноміра. Ці вимоги можна згрупувати у три окремих напрямки:

- метрологічний:
  - висока чутливість,
  - завадостійкість,
  - малий мінімальний поріг вимірювання (мікрони);
- економічний:
  - дешевизна,
  - простота,
  - практичність;
- технологічність:
  - здатність до безперервних вимірювань під час техпроцесу,
  - безконтактність,
  - легка інтеграція у цифрові адаптивні системи контролю.



Виходячи з проведеного у попередньому пункті огляду методів вимірювання та використовуючи таблицю 1.2 зведених властивостей товщиномірів, можна зробити висновок, що для вимірювання у заданому діапазоні (десятки–сотні мікрон) поставленим вимогам найкраще відповідає ємнісний первинний перетворювач товщини. Справді, ємнісний метод має такі позитивні якості: малий мінімальний поріг чутливості, безконтактність, можливість одностороннього вимірювання, стабільність, стійкість до впливу сторонніх факторів (при використанні екранування), легкість виготовлення з високою точністю, легка інтеграція до АСК, простота, низька собівартість.

Основним елементом ємнісного первинного перетворювача є конденсатор, електричні параметри якого змінюються під дією вхідних вимірюваних величин. Конструктивно конденсатор складається із двох електродів, розділених діелектриком. При зміні взаємного положення електродів, їх розмірів або при зміні діелектричної проникності середовища, змінюється ємність конденсатора, що і реєструється вторинним пристроєм.

Найбільш широко використовуваним видом ємнісного первинного перетворювача є площинний конденсатор, ємність якого наближено визначається виразом (докладніше про це див. в наступному розділі):

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d},$$

де  $\varepsilon$  – сукупна відносна діелектрична проникність матеріалу між обкладинками конденсатора;  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму (електрична стала  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $S$  – площа обкладинок;  $d$  – відстань між ними. Як вже було сказано, зміна будь-якого із цих параметрів змінює ємність конденсатора, таким чином всі вони є коефіцієнтами впливу, що має бути враховано при розробці та випробуванні ємнісних сенсорів. Наприклад, зміна температури впливає на площу (через термічне розширення) і на відстань між електродами, а значить розробник повинен використати відповідні методи термостабілізації, компенсації або статкування.

Звичайним способом використання площинного вимірювального конденсатора для визначення товщини під час проведення технологічного процесу є протягування діелектричного або провідного вимірюваного матеріалу між його обкладинками (рис. 1.2.)

Прагнення до підвищення чутливості спричиняє побудову перетворювачів з малим  $d$  і високою прикладеною напругою, але треба враховувати, що при цьому можливий електричний пробій між електродами.

Покращення метрологічних властивостей ємнісного перетворювача можливе при його побудові за диференціальною схемою. Ємнісні перетворювачі є порівняно стійкими до зміни температури, основний вплив при цьому, справляє термічне розширення структурних елементів [5].

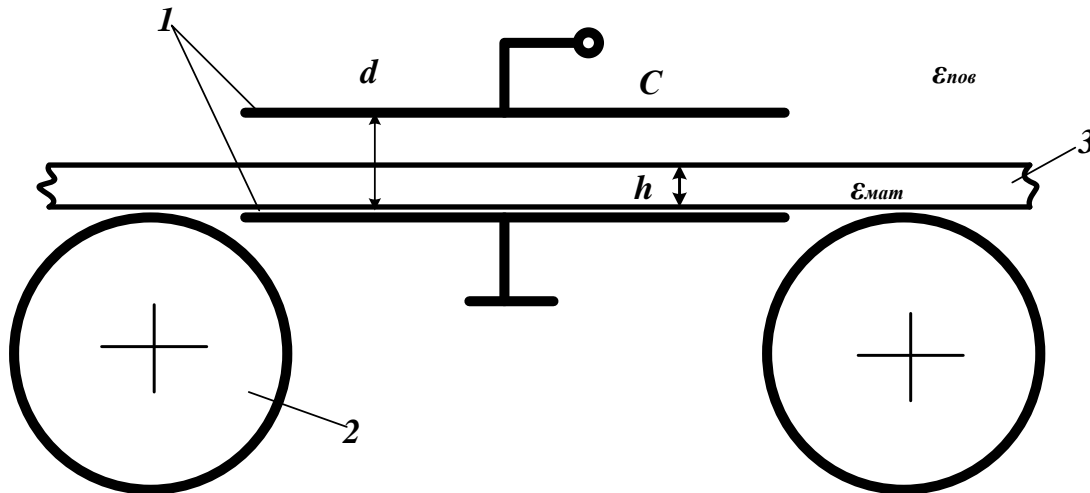


Рисунок 1.2 – Вимірювання товщини діелектричної стрічки:  
1 – вимірювальний конденсатор; 2 – опорні ролики; 3 – стрічка

Основними недоліками ємнісних перетворювачів є залежність від діелектричної проникності матеріалу, невисока ємність (1...100 пФ) і високий опір. Для зменшення останнього перетворювачі живляться напругою високої частоти. Ще одним недоліком є й те, що результат вимірювання залежить від зміни параметрів провідників, що з'єднують первинний сенсор зі схемою обробки. Тому варто мініатюризувати схеми вторинних перетворювачів та розміщувати їх у безпосередній близькості до давача (в одному корпусі) та екранувати їх від впливу навколишніх предметів.

Перевагами ємнісного датчика є простота та низька собівартість, мала маса й розміри, висока термостабільність, висока вібростійкість, практична незалежність від тиску та вологості. Ємнісні перетворювачі можна виконувати із заданою функцією перетворення [5]. Значною перевагою є можливість легкої інтеграції з сучасними високоефективними частотними вимірювальними перетворювачами.

Ємнісні перетворювачі широко застосовуються в науково-дослідній та виробничій практиці, де є висококваліфікований персонал для розробки, експлуатації й ремонту давачів і вторинних перетворювачів. Цінною властивістю давачів є простота їхньої конструкції й технології.

Також особливої вагомості набувають переваги ємнісних первинних перетворювачів в контексті цієї роботи, оскільки застосування

приладів з від'ємним опором в якості вторинних перетворювачів дозволяє усунути значну частину вказаних недоліків при збереженні основних перерахованих переваг методу.

### 1.3 Різновиди вторинних перетворювачів сигналів ємнісного первинного чутливого елемента

Як вторинний прилад обробки для ємнісних первинних сенсорів можна використати різноманітні вимірювальні ланцюги; при цьому зміна ємності перетворюється в зміну напруги, струму або в частоту гармонічного чи імпульсного сигналу.

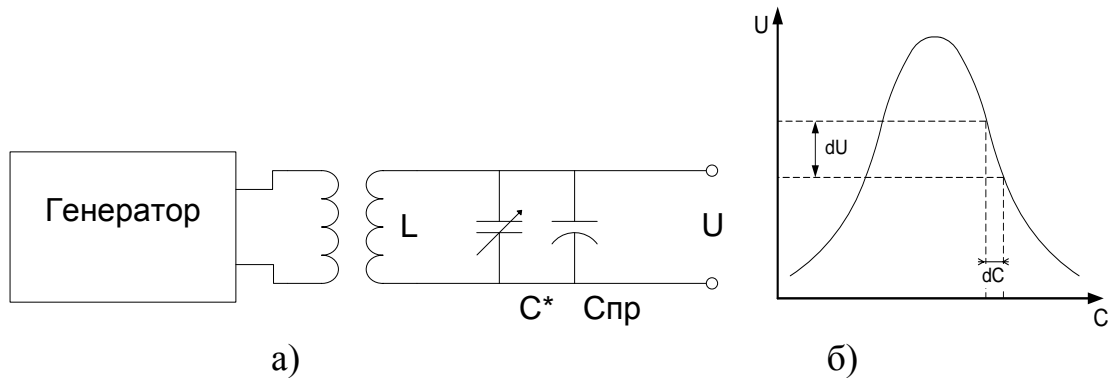


Рисунок 1.3 – Резонансна схема включення ємнісного перетворювача

Досить простою, але високоефективною схемою включення для недиференціального перетворювача слугує резонансний ланцюг (рис. 1.3,а). Задавальний генератор живить резонансний LC-контур (через трансформатор), резонансні параметри контуру залежать від ємності та індуктивності, включених до нього. Ємність складається з суми ємностей перетворювача  $C_{np}$  і налагоджувального конденсатора  $C^*$ . При зміні ємності напруга на контурі змінюється за резонансною кривою, як показано на рис. 1.3,б. Для досягнення максимальної чутливості вимірювального ланцюга використовується зміна ємності налагоджувального конденсатора. Чутливість резонансного ланцюга досить висока й збільшується зі збільшенням добротності контуру [5].

Диференціальний ємнісний перетворювач включається звичайно у мостовий ланцюг (рис. 1.4).  $C_1$  і  $C_2$  робочі ємності диференціального перетворювача;  $C_{e1}, C_{e2}, C_{e3}, C_{e4}$  – ємності екранів сполучних проводів. Еквівалентні ємності екранів можуть трохи змінюватися при роботі приладу. Для того, щоб їх зміна мало впливали на вихідну напругу моста, опори резисторів  $R$  повинні бути малими. Ємність  $C_{e5}$  не входить у рівняння рівноваги моста, і її зміна значно менше впливає на його вихідну напругу.

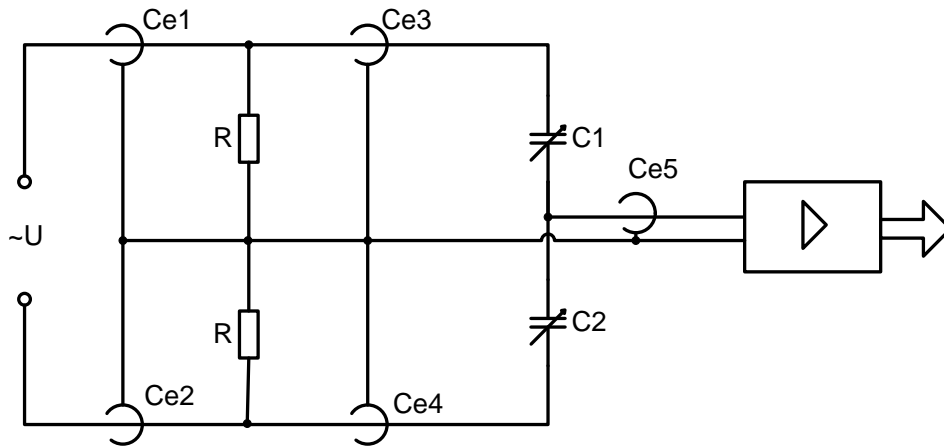


Рисунок 1.4 – Диференціальний ємнісний перетворювач у мостовій схемі включення

Іншою схемою включення диференціальних ємнісних перетворювачів є ємнісно-діодний ланцюг (рис. 1.5,а). При позитивній полярності напруги  $U$  конденсатор  $C_1$  заряджається через  $C_3$  й  $VD_1$ , а при негативній – розряджається через  $C_4$  й  $VD_2$ . Конденсатори  $C_3$  і  $C_4$  мають рівні ємності, а діоди  $VD_1$  і  $VD_2$  – рівні прямі опори.

Напруга на конденсаторі  $C_1$  (у точці  $c$ ) визначається значенням  $C_1$ , аналогічним чином напруга на конденсаторі  $C_2$  (у точці  $d$ ) залежить від ємності  $C_2$ . При  $C_1 = C_2$  і рівних прямих опорах діодів напруги на конденсаторах однакові й напруга між точками  $c$  і  $d$  відсутня. Якщо ж  $C_1 \neq C_2$ , то між точками  $c$  і  $d$  з'явиться змінна напруга, пропорційна різниці  $C_1 - C_2$ . Вихідна напруга знімається з діодів  $VD_3$  й  $VD_4$ , її зміна в часі показана на рис. 1.5,б. Середнє випрямлене значення напруги  $U_в$  визначається різницею  $C_1 - C_2$ . Для того щоб спростити екранування, вся ємнісно-діодна схема поміщується в екранований корпус давача.

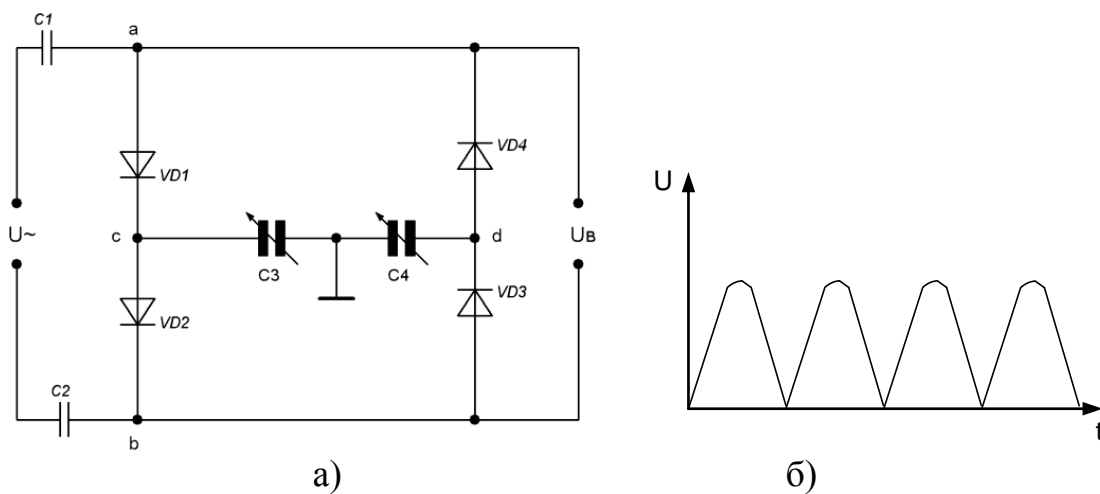


Рисунок 1.5 – Диференціальний ємнісний перетворювач у діодній схемі включення

## ЛІТЕРАТУРА

1. Полунов Ю. П. Цифровые измерительно управляющие устройства тензометрических весов и дозаторов / Ю. П. Полунов, В. Д. Гальченко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
2. Бляхман Р. И. Введение в электротензометрию / Р. И. Бляхман. – Куйбышев : КПТИ, 1981. – 92 с.
3. Клокова Н. П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
4. Литвак В. И. Тензореле: расчет, конструирование, применение / В. И. Литвак. – М. : Машиностроение, 1989. – 160 с.
5. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н. Н. Евтихийев, Я. А. Купершмидт и др. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
6. Электрические измерения : Учебник для вузов / Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин и др. – Ленинград : Энергия, 1980. – 392 с.
7. Измерение массы, объема и плотности / С. И. Гаузнер, С. С. Кивилис, А. П. Осокина, А. Н. Павловский. – М. : Издательство стандартов, 1972. – 623 с.
8. Бриндли К. Измерительные преобразователи : Справочное пособие / К. Бриндли. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
9. Майселл Л. Технология тонких пленок: справочник. пер. с англ. Т. 1. / Л. Майселл, Р. Глэнг. – М. : Советское радио, 1977. – 664 с.
10. Майселл Л. Технология тонких пленок: справочник. пер. с англ. Т. 2. / Л. Майселл, Р. Глэнг. – М. : Советское радио, 1977. – 778 с.
11. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
12. Шрамков Е. Г. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс) : учеб. пособие для втузов / Е. Г. Шрамков. – М. : Высшая школа, 1972. – 520 с.
13. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. – 163 с.
14. Гриневич Ф. Б. Измерительные компенсационно–мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф. Б. Гриневич, А. И. Новик. – К. : Наукова думка, 1987. – 112 с.
15. Кузнецов Ю. В. Основы анализа линейных радиоэлектронных цепей (Временной анализ) / Ю. В. Кузнецов, Ю. В. Тронин. – М. : Издательство МАИ, 1992. – 60 с. – ISBN 5–7035–0250–0.

16. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей : учебн. пособие для вузов / В. С. Андреев. – М. : Радио и связь, 1982. – 280 с.
17. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / В. Д. Разевиг. – М. : Горячая Линия-Телеком, 2003. – 368 с. – ISBN 5-93517-127-9.
18. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 / В. Д. Разевиг. – М. : Солон-Пресс, 1999. – 98 с. – ISBN 5-85954-082-5.
19. Болотовский Ю. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. : Ч. 1 / Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 90–95.
20. Болотовский Ю. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. : Ч. 2 / Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. – 2004. – № 2. – С. 96–103.
21. Болотовский Ю. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. : Ч. 3 / Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. – 2005. – № 3. – С. 90–98.
22. Болотовский Ю. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. : Ч. 4 / Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. – 2005. – № 4. – С. 73–77.
23. Болотовский Ю. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. : Ч. 5 / Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. – 2006. – № 1. – С. 88–92.
24. Болотовский Ю. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. : Ч. 6 / Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. – 2006. – № 2. – С. 85–90.
25. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 1 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 2. – С. 36–37.
26. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 2 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 3. – С. 45–47.
27. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 3 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 4. – С. 33–34.
28. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 4 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 5. – С. 38–40.
29. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 5 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 6. – С. 35–39.
30. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 6 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 7. – С. 46–53.
31. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 7 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 8. – С. 36–37.
32. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 8 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 9. – С. 34–35.

33. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 9 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 10. – С. 35–40.
34. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 10 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 11. – С. 44–46.
35. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 11 / О. Петраков // Схемотехника. – 2001. – № 12. – С. 50–52.
36. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 12 / О. Петраков // Схемотехника. – 2002. – № 1. – С. 44–49.
37. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 13 / О. Петраков // Схемотехника. – 2002. – № 2. – С. 33–39.
38. Петраков О. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов : Ч. 14 / О. Петраков // Схемотехника. – 2002. – № 3. – С. 41.
39. Недолужко И. Модели мощных биполярных транзисторов и определение их параметров / И. Недолужко, А. Лебедев // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 12–17.
40. Златин И. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7 : Ч. 1 / И. Златин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 6. – С. 124–128.
41. Златин И. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7 : Ч. 2. / И. Златин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 7. – С. 149–154.
42. Златин И. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7 : Ч. 3. / И. Златин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8. – С. 154–160.
43. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин / Агеев О. А., Мамиконова В. М., Петров В. В. и др. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
44. Сдвижков О. А. Математика на компьютере: Maple 8 / О. А. Сдвижков. – М. : Солон-Пресс, 2003. – 176 с.
45. Дьяконов В. П. Maple 8 в математике, физике и образовании / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-Пресс, 2003. – 656 с.
46. Богородицкий Н. П. Теория диэлектриков / Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобиненский, А. А. Воробьев, Б. В. Тареев. – М. : Энергия, 1965. – 352 с.
47. Струнский М. Г. Бесконтактные емкостные микрометры / М. Г. Струнский, М. М. Горбов. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 136 с.

48. Смышляев А. Р. Коррекция толщины полимерных пленок в процессе их изготовления / А. Р. Смышляев, Б. В. Бердышев, Ф. Губерман // Полимерные материалы. – 2007. – № 11. – С. 6–11.
49. Сивухин В. Д. Общий курс физики : Т. 3. Электричество / В. Д. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с. – ISBN 5–9221–0227–3
50. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с. – ISBN 5–9221–0123–4 (Т. VIII).
51. Баранс Дж. Электронное конструирование : Методы борьбы с помехами / Дж. Баранс. – М. : Мир, 1990. – 238 с.
52. Валишев М. Г. ФИЗИКА : Часть 2. Электростатика. Постоянный ток / М. Г. Валишев, А. А. Повзнер. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 60 с. – ISBN 5–321–00490–0.
53. Юдин П. Н. Применение метода Монте-Карло для моделирования диэлектрического отклика сегнетоэлектриков / П. Н. Юдин, М. А. Никольский, С. П. Зубко // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73, вып. 8. – С. 56–61.
54. Сильвестров В. В. Конформное отображение / В. В. Сильвестров // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 12. – С. 97–102.
55. Вендик О. Г. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора содержащего тонкий сегнетоэлектрический слой / О. Г. Вендик, С. П. Зубко // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 4. – С. 1–7
56. Деленив А. Н. К вопросу о погрешности метода частичных емкостей / А. Н. Деленив // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 4. – С. 8–13
57. Лаврик В. И. Справочник по конформным отображениям / В. И. Лаврик, В. Н. Савенков – К. : Наукова думка, 1970. – 251 с.
58. Вендик О. Г. Моделирование характеристик многослойного планарного конденсатора / О. Г. Вендик, М. А. Никольский // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 1. – С. 117–121.
59. Иосель Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иосель, Э. С. Кочанов. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1981. – 288 с.
60. Смышляев А. Р. Коррекция толщины полимерных пленок в процессе их изготовления : Ч. 2. / А. Р. Смышляев, Б. В. Бердышев, Ф. Губерман // Полимерные материалы. – 2007. – № 12. – С. 10–16.
61. Смышляев А. Р. Коррекция толщины полимерных пленок в процессе их изготовления : Ч. 3. / А. Р. Смышляев, Б. В. Бердышев, Ф. Губерман // Полимерные материалы. – 2008. – № 1. – С. 26–30.



62. Афанасьев Д. В. Влияние заряженных частиц на процесс образования фуллеренов / Д. В. Афанасьев, В. А. Дюжев, В. И. Каратаев // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, вып. 5. – С. 35–40.

63. Осадчук В. С. Частотний перетворювач концентрації газу на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. О. Прокопова // Вісник ВПІ. – 2005. – № 2. – С. 86–90.

64. Осадчук В. С. Напівпровідникові частотні перетворювачі газу / В. С. Осадчук, М. О. Прокопова // Вісник ВПІ. – 2003. – № 6. – С. 106–110.

65. Осадчук В. С. Математична модель мікроелектронного частотного газового перетворювача / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. О. Прокопова // Вісник ВПІ. – 2003. – № 4. – С. 94–98.

66. Структурные и магнитные характеристики однослойных и многослойных пленок Fe–Si, полученных термическим испарением в сверхвысоком вакууме / С. Н. Варнаков, А. С. Паршин, С. Г. Овчинников и др. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, вып. 22. – С. 1–8.

67. Новіков А. О. Програмно-апаратний комплекс керування процесом термічного випаровування / А. О. Новіков, Р. В. Криночкін // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2007. – № 1–2. – С. 49–51.

68. Осадчук О. В. Проблеми вимірювання товщини нанесеного покриття та методи підвищення його точності / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2009. – № 1. – С. 102–105.

69. Пат. №10471, МПК<sup>7</sup> С 23 С 14/00. Пристрій для випарювання матеріалів / А. О. Новіков, Р. В. Криночкін ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № u20050419 ; заявлено 04.05.2005 ; опубліковано 15.11.2005; Бюл. №11.

70. Пат. №37466, МПК<sup>7</sup> С 23 С 14/48–14/54. Пристрій для випарювання матеріалів / А. О. Новіков, Р. В. Криночкін ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № u200808806 ; заявлено 04.07.2008 ; опубліковано 25.11.2008; Бюл. № 22.

71. Пат. №45045, МПК<sup>7</sup> С 23 С 14/00. Пристрій для випару матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет – № u200904765 ; заявлено 15.05.2009 ; опубліковано 26.10.2009; Бюл. № 20.

72. Криночкін Р. В. Генерація когерентних коливань при конденсації пересиченої пари металу / Р. В. Криночкін // Тези студентських

доповідей рекомендованих до опублікування оргкомітетом XXXIII НТК професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету, 22–24 березня 2004 р. – Вінниця, 2004. – С. 100.

73. Криночкін Р. В. Пристрій для випару матеріалів / Р. В. Криночкін // Тези доповідей рекомендованих до опублікування оргкомітетом XXXIV НТК професорсько-викладацького складу та студентів університету, 21–23 березня 2005 р. – Вінниця, 2005. – С. 98.

74. Криночкін Р. В. Аналіз тенденцій розвитку систем термічного випаровування у вакуумі / Р. В. Криночкін // Тези студентських доповідей рекомендованих до опублікування оргкомітетом XXXV НТК професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету, 20–22 березня 2006 р. – Вінниця, 2006. – С. 64.

75. Криночкін Р. В. Використання сенсорів лінійних переміщень для контролю вакуумного нанесення покриттів / А. О. Новіков, Р. В. Криночкін // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП–2006), 16–19 листопада 2006 р. : тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 35–36.

76. Криночкін Р. В. Радіочастотна вагова вимірювальна система для контролю параметрів покриттів / Р. В. Криночкін // Комп'ютерний моніторинг та інформаційні технології : всеукраїнська наук.-техн. конф., 12–15 травня 2009 р. : тези доп. – Донецьк, 2009. – С. 290–291.

77. Криночкін Р. В. Використання частотних генераторів на від'ємному опорі для визначення ваги / Р. В. Криночкін, О. В. Осадчук // 2-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю, 23–26 вересня 2009 р. : тези доп. – Вінниця, 2009. – С. 313–316.

78. Криночкін Р. В. Вплив зовнішньої вимірювальної ємності на частотний перетворювач з від'ємним опором / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП–2009). Ч. 2 : міжнародна наук.-техн. конф., 8–10 жовтня 2009 р. – Вінниця, 2009. – С. 78.

79. Криночкін Р. В. Визначення оптимальної схеми підключення вимірювальної ємності до частотного перетворювача товщини / Р. В. Криночкін, О. В. Осадчук // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 1. – С. 1–7.

80. Криночкін Р. В. Пристрій вимірювального контролю товщини металевих і полімерних плівок / Р. В. Криночкін, О. В. Осадчук // Вісник ВПІ. – 2010. – № 4. – С. 90–93.

81. Криночкін Р. В. Моделювання частотних перетворювачів товщини на основі від'ємного опору в часовому домені / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2. – С. 83–88.

82. Криночкін Р. В. Автоматизована інформаційна система частотного вимірювання товщини / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: міжнародна наук.-техн. конф., 19–21 травня 2010 р. : тези доп. – Вінниця, 2010. – С. 39–40.
83. Криночкін Р. В. Особливості моделювання ємнісних частотних перетворювачів товщини у середовищі Maple / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Контроль і управління в складних системах (КУСС–2010) : міжнародна конф., 19–21 жовтня 2010 р. : тези доп. – Вінниця, 2010. – С. 61.
87. Водотовка В. І. Автоматична система контролю розсіяного надвисокочастотного електромагнітного поля: інваріантний сенсор випромінювання від мікрохвильового технологічного обладнання / В. І. Водотовка, А. С. Моставлюк // Вісник ВПІ. – 2007. – № 1. – С. 20–23.
88. Шиллер З. Электронно-лучевая технология : пер. с нем. / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
89. Никитин В. А. Частотомер: Методические указания к лабораторному практикуму / В. А. Никитин, Е. Г. Бондаренко – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2003. – 35 с.
90. Кузнецов В. А. Измерения в электронике / В. А. Кузнецов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 511 с.
91. Казаков В. Г. Тонкие магнитные пленки / В. Г. Казаков // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 1. – С. 107–114.
92. Князев Б. А. Начала обработки экспериментальных данных / Б. А. Князев, В. С. Черкасский. – Новосибирск : НовГУ, 1996. – 44 с.
93. Яворский В. А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных / В. А. Яворский. – М. : МФТИ, 2006. – 44 с.
94. Лапшинов Б. А. Нанесение тонких пленок методом вакуумного термического испарения / Б. А. Лапшинов. – М. : Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2006. – 30 с. – ISBN 5–94506–133–6.
95. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 208 с.
96. 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.
97. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 207 с.
98. Готра З. Ю. Датчики. Справочник. / З. Ю. Готра, О. И. Чайковский. – Львов : Каменяр, 1995. – 485 с.

99. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : Т. 1. / З. Ю. Готра – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
100. Минайчев В. Е. Вакуумное оборудование для нанесения пленок / В. Е. Минайчев. – М. : Машиностроение, 1978. – 60 с.
101. Минайчев В. Е. Нанесение пленок в вакууме / В. Е. Минайчев. – М. : Высшая школа, 1989. – 111 с.
102. Технология переработки полимерных материалов / под.ред. В. Е. Галыгина. – Тамбов : Изд-тво ТГТУ, 2001. – 132 с.
103. Костржицкий А. И. Многокомпонентные вакуумные покрытия / А. И. Костржицкий. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
104. Воробьев В. А. Технология полимеров / В. А. Воробьев, Р. А. Андрианов. – М. : Высшая школа, 1980. – 303 с.
105. Костржицкий А. И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А. И. Костржицкий, В. Ф. Карпов. – М. : Машиностроение, 1991. – 1991 с. – ISBN 5–217–00–833–4.
106. Берлин Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Двинин. – М. : Техносфера, 2007. – 207 с. – ISBN 978–5–94836–134–5.
107. Азаров О. Д. Аналого–цифрові інтерфейси ЕОМ / О. Д. Азаров, В. П. Марценюк, Н. О. Біліченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 180 с. – ISBN 966–641–176–8.
108. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1975. – 104 с.
109. Ламбурн Р. Лакокрасочные материалы и покрытия / Р. Ламбурн. – СПб. : Химия, 1991. – 512 с. – ISBN 5–7246–0446–4.
110. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2000. – 303 с.
111. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : Т. 2. / З. Ю. Готра. – Львов : Ліга-Прес, 2003. – 592 с.
112. Кухарчук В. В. Елементи контролю динамічних параметрів електронних машин / В. В. Кухарчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. – 127 с.
113. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
114. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / В. С. Осадчук. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.
115. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2001. – 195 с.
116. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003. – 208 с.

117. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением / А. В. Осадчук. – Винница : Континент, 1998. – 129 с. – ISBN 966-516-024-9
118. Филинюк Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника» / Н. А. Филинюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 3. – С. 38–43.
119. Филинюк Н. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної індуктивності / Н. А. Филинюк, О. О. Лазарев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 2. – С. 44–46.
120. Говаркиер В. Р. Полимеры / В. Р. Говаркиер, Н. В. Висванатхан, Дж. Шриджа. – М. : Наука, 1990. – 396 с.
121. Болотовский Ю. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга / Ю. И. Болотовский, Г. И. Таназлы. – М. : Солон-Пресс, 2005. – 200 с. – ISBN 5–98003–178–2.
122. Красько А. С. Схемотехника аналоговых электронных устройств / А. С. Красько. – Томск : Томский ГУ систем управления и радиоэлектроники, 2005. – 178 с.
123. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1982. – 512 с.
124. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС: Руководство по анализу и расчету / Дж. Гринфилд. – М. : Мир, 1992. – 560 с.
125. Гриценко К. П. Пленки политетрафторэтилена, нанесенные испарением в вакууме / К. П. Гриценко // Рос. хим. ж. – 2008. – Т. II, № 3. – С. 112–123.
126. Ефимов И. П. Источники питания РЭА / И. П. Ефимов. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – 136 с. – ISBN 5–89146–268–0.
127. Технологии и оборудование электронно–лучевой сварки – 2008 – СПб. : «ВиТ-Принт», 2008. – 210 с.
128. Яценков В. С. Микроконтроллеры Microchip с аппаратной поддержкой USB / В. С. Яценков. – М. : Горячая линия-Телеком, 2008. – 400 с. – ISBN 978–5–9912–0030–1
129. Агуров П. В. Практика программирования USB / П. В. Агуров – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 624 с.
130. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 576 с. – ISBN 5–94157–202–6.
131. Филинюк Н. А. Микроэлектронные устройства и основы их проектирования / Н. А. Филинюк, И. М. Николаев. – М. : Энергия, 1979. – 336 с.

132. ПЛЕНКА ПОЛИЭТИЛЕНОВАЯ. Технические условия : ГОСТ 10354–82. – [Действует с 01–07–1983]. – М. : Комитет стандартов мер и измерительных приборов, 1982. – 23 с.
133. ПЛАСТМАССЫ. Методы определения толщины пленок и листов : ГОСТ 17035–86. – [Действует с 01–01–1988]. – М. : Комитет стандартов мер и измерительных приборов, 1986. – 8 с.
134. Бочаров Л. Н. Эквивалентные схемы и параметры полупроводниковых приборов / Л. Н. Бочаров. – М. : Энергия, 1973. – 95 с.
135. Кондратов А. В. Термическое испарение в вакууме при производстве изделий РЭА / А. В. Кондратов, А. А. Потапенко. – М. : Радио и связь, 1986. – 77 с.
136. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 977 с.
137. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
138. Толщина тонкопленочного покрытия при финишном плазменном упрочнении / П. А. Тополянский, С. А. Ермаков и др. // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования и технологической оснастки : материалы 7-й Международной практической конференции, 12–15 апреля 2005 г. – С. 299–309.
139. Бахчисарайцян Н. Г. Практикум по прикладной электрохимии: Учебн. пособие для вузов / Н. Г. Бахчисарайцян, Ю. В. Борисоглебский, Г. К. Буркат и др. – Ленинград : Химия, 1990. – 304 с.
140. Золотухин И. В. Углеродные нанотрубки / И. В. Золотухин // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 3. – С. 111–115.
141. Кичак В. М. Методи компенсації динамічних похибок вимірювальних каналів / В. М. Кичак, В. Д. Рудик, С. Ф. Гончар. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 128 с. – ISBN 978–966–641–331–7
142. Поджаренко В. О. Метрологічний нагляд та контроль / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 162 с.

*Наукове видання*

**Осадчук Володимир Степанович,  
Осадчук Олександр Володимирович,  
Криночкін Роман Володимирович**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІВОК  
НА ОСНОВІ ПРИСТРОЇВ  
З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська  
Оригінал-макет підготовлено О. Осадчуком

Підписано до друку 10.12.2013 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,85  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) Зам № 11-04

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.