

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КРИНОЧКІН РОМАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.373

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ПЛІ-
ВОК НА ОСНОВІ ПРИСТРОЇВ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Спеціальність 05.11.08 – радіовимірювальні прилади

Автореферат

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Вінниця - 2011

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Водотовка Володимир Ілліч,
Київський національний університет
технологій та дизайну,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерних систем

доктор технічних наук, доцент
Бондарєв Андрій Петрович,
Національний університет "Львівська політехніка",
доцент кафедри теоретичної радіотехніки та
радіовимірювання

Захист відбудеться " 27 " травня 2011 р. о 12 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд.210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий " 14 " квітня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Ю. Кучерук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На даний час властивості та характеристики перетворювачів є визначальними для різноманітних автоматичних систем керування, вимірювання та контролю. Від надійності і точності роботи даних систем в першу чергу залежить економічність, екологічність та ефективність роботи окремих промислових установок або навіть виробництв в цілому, безпека роботи транспортних та енергетичних систем, розширення можливостей новітніх розробок в різних сферах людського життя. 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 даних засобів для вимірювання 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 характеристики, проте по-перше, є складним та мають 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. Дані 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилась у відповідності з держбюджетною фундаментальною науково-дослідною роботою: «Математичне моделювання генераторів електричних коливань з широкосмуговою перебудовою частоти генерації на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (№ державної реєстрації 0105U002420), в якій здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є покращення чутливості і роздільної здатності перетворювачів для визначення товщини плівок, принцип роботи яких базується на використанні функціональної залежності частоти генерації транзисторної структури з від'ємним опором від зміни товщини вимірюваного матеріалу.

Об'єктом дослідження є процес перетворення значення товщини у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах.

Предметом дослідження є статичні і динамічні характеристики радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язуються такі *задачі*:

- провести аналіз існуючих методів вимірювання товщини, визначити оптимальний вид первинного сенсора та обґрунтувати переваги перетворювачів з частотним виходом по відношенню до існуючих;
- розробити математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини (в часовій області), на основі яких отримати статичні і динамічні характеристики перетворювачів (зміну напруг і струмів в часі, залежність частоти генерації та чутливості від товщини матеріалу);
- розробити схему радіовимірювального перетворювача, напруги джерел живлення, місце підключення первинного вимірювального перетворювача та параметри елементів схеми;
- виконати експериментальну перевірку адекватності розроблених математичних моделей;
- розробити мікропроцесорний засіб вимірювання товщини з покращеною роздільною здатністю на основі радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини;
- здійснити метрологічне визначення похибок вимірювання, функцій чутливості і роздільної здатності та впровадити розроблені перетворювачі у практику.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні:

- рівнянь фізичної електроніки та математичної фізики під час розробки еквівалентних схем перетворювачів;
- методу часткових ємностей та конформних відображень для визначення функцій перетворення планарного та площинного первинних ємнісних перетворювачів;
- методу змінних стану, теорії функції комплексної змінної, диференціального та інтегрального числення, теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа, методу найменших квадратів для визначення функцій перетворення та чутливості радіовимірювальних перетворювачів товщини на основі пристроїв з від'ємним опором.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні таких результатів:

1. Вперше запропоновано метод використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини матеріалу, що реалізують принцип перетворення «товщина - частота», що дозволило підвищити роздільну здатність і чутливість приладів вимірювання.

2. Удосконалено методи схемно-функціональної організації радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок на основі транзисторних структур з від'ємним опором, в яких, на відміну від існуючих, враховано вплив товщини вимірюваного матеріалу на елементи схем перетворювачів, що дало змогу отримати функції перетворення, чутливості та роздільної здатності.

3. Вперше розроблено математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок на основі транзисторних структур з від'ємним опором, які, на відміну від існуючих, виконані в часовій області, що надало можливість визначати зміну величини струмів і напруг в часі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому що:

1. Отримані математичні моделі можуть бути використані для інженерного розрахунку функції перетворення, чутливості та інших характеристик радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини.

2. Розроблено високочутливі частотні перетворювачі товщини на основі транзисторних структур з від'ємним опором з покращеною роздільною здатністю для вимірювання в діапазоні від 0 до 500 мкм, зі зміною частоти генерації на 150 кГц з чутливістю від 170 до 400 кГц/мм, роздільною здатністю від 0,75 до 2,25 мкм, при похибці вимірювання $\pm 1.15\%$, амплітудою вихідного сигналу 1.25 В.

3. Створено програмне забезпечення, що може бути використане при інженерних розрахунках для отримання залежностей зміни значення напруги і струму в будь-якій точці схеми радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини від часу.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві ВАТ «СБК Водпроект» (м. Вінниця), а також у навчальний процес при вивченні дисципліни «Волоконно-оптичні лінії зв'язку».

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належать: розробка апаратної частини системи [1], розробка функціональної та електричної принципової схем радіовимірювального перетворювача для визначення товщини на основі пристроїв з від'ємним опором [2], розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача товщини на основі пристроїв з від'ємним опором [3], аналіз існуючих методів вимірювання товщини [4], дослідження властивостей радіовимірювального перетворювача для визначення товщини з різними схемами включення елементів [5], визначення сучасного технічного стану систем випаровування та технічної схеми пристрою [6], знаходження вольт-амперних характеристик та функції перетворення радіовимірювального перетворювача [8], реалізація математичної моделі в програмних термінах [9], розробка реалізації системи [10], схема застосування сенсора [11], спосіб використання радіовимірювального перетворювача [12], дослідження впливу зовнішньої вимірювальної ємності [13], розробка багатоканальної вимірювальної системи [14].

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень, що викладені в дисертації, були апробовані на наукових конференціях, серед них:

1. II Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування" (СПМРТП-2006). 16-19 листопада 2006 р. (м. Вінниця).

2. V Всеукраїнська науково-технічна конференція "Комп'ютерний моніторинг та інформаційні технології" (КМІТ-2009), 12–15 травня 2009 р. (м. Донецьк).

3. II Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. 23 – 26 вересня 2009 р. (м. Вінниця).

4. IV Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (СПРТП-2009). 8-10 жовтня 2009 р. (м. Вінниця).

5. Міжнародна науково-практична конференція «Дні науки – 2010». 27 березня – 5 квітня 2010 р. (м. Прага, Чехія)

6. Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». 19 – 21 травня 2010 р. (м.Вінниця).

7. XXXIV - XXXV науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. 2005, 2006 рр. (м. Вінниця).

Публікації

Результати дисертації опубліковані у 14 наукових працях, серед яких 5 статей у науково-фахових журналах, 6 статей в науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 3 патенти України на корисну модель.

Обсяг і структура дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу і 4 розділів, списку використаних джерел і 7 додатків. Загальний обсяг дисертації 167 сторінок, з яких основний зміст викладений на 135 сторінках друкованого тексту, містить 65 рисунків, 13 таблиць. Список використаних джерел складається з 143 найменувань. Додатки містять результати розрахунків, фрагменти програмного забезпечення та акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність задач досліджень, сформульовано мету роботи та задачі дослідження. Дана характеристика наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У першому розділі проведено аналіз методів для визначення товщини плівок і засобів вимірювання на їх основі, з порівнянням основних параметрів промислових товщиномірів. Показано, що існуючі засоби мають, в основному, незадовільні метрологічні параметри в області малих товщин, ті ж з них, які забезпечують високу метрологічну якість є складними, коштовними та не зручними у застосуванні.

Для побудови простого, надійного і чутливого засобу вимірювання запропоновано використати перетворювачі з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Використання частотного принципу роботи надало змогу підвищити чутливість, роздільну здатність та спростити обробку вихідного сигналу перетворювача. Виходячи з аналізу літературних джерел, визначено мету та задачі дослідження.

Другий розділ присвячений розробці математичних моделей та дослідженню властивостей радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини на основі пристроїв з від'ємним опором. Удосконалено математичні моделі та методи схемно-функціональної організації перетворювачів, в яких на відміну від існуючих, врахований вплив товщини вимірюваного матеріалу на частоту генерації, що дало змогу отримати функцію перетворення та чутливості пристрою. Також вказані моделі вперше були виконані в часовій області, що надало можливість визначати зміну величини струмів і напруг в часі, а також спостерігати форму коливань.

На першому етапі було визначено залежність вихідних коливань від часу при певному значенні ємності первинного вимірювального перетворювача.

Для цього, спочатку будується еквівалентна схема перетворювача (рис. 1) і складається система рівнянь за методом змінних стану. Напруги і струми в вузлах схеми є залежними від часу, тому система (1) (з врахуванням підстановок) є динамічною математичною моделлю перетворювача, таким чином розв'язання цієї системи, дозволяє знайти значення напруги або струму у будь-якій точці кола в будь-який заданий момент часу при певному значенні вимірювальної ємності.

На другому етапі для кожного значення вимірювальної ємності, за отриманими на першому етапі залежностями, була визначена частота вихідних коливань. Це дозволило отримати функцію перетворення пристрою у вигляді залежності частоти генерації від значення ємності в певному діапазоні (рис. 2).

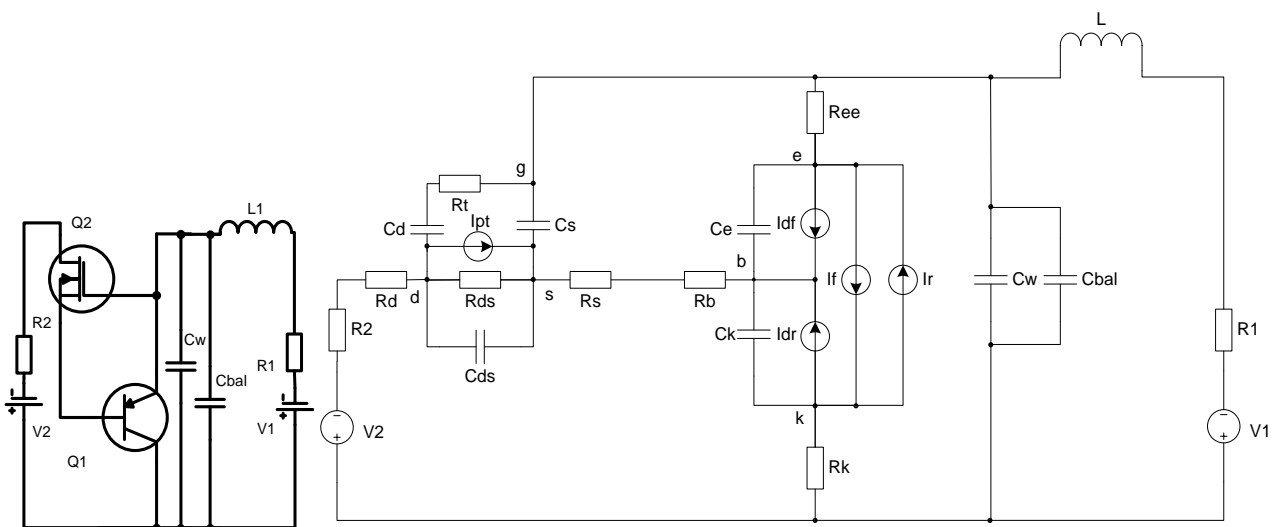


Рис. 1. Електрична принципова та еквівалентна схеми радіовимірювального перетворювача для визначення товщини плівок, включеного по схемі з загальним колектором

$$\left\{ \begin{array}{l}
 L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = V1 - (U_{Ci}(t) + i_L(t) \cdot R_1); \\
 Cd \cdot \frac{dU_{Cd}(t)}{dt} := \frac{U_{Cs}(t) - U_{Cds}(t) - U_{Cd}(t)}{Rt}; \\
 Cs \cdot \frac{dU_{Cs}(t)}{dt} = \frac{B5 \cdot U_{Cs}(t) + B6 \cdot U_{Cds}(t) + B7 \cdot U_{Cd}(t)}{A4 \cdot B3 \cdot Rt} + \\
 \quad + \frac{(B4 \cdot U_{Ci}(t) + B8 \cdot U_{Ce}(t) - B9 \cdot U_{Ck}(t) - B3 \cdot V2) \cdot Rt}{A4 \cdot B3 \cdot Rt}; \\
 Cds \cdot \frac{dU_{Cds}(t)}{dt} = \frac{(A1 \cdot U_{Cs}(t) - A4 \cdot U_{Cd}(t)) \cdot Rds}{A4 \cdot Rt \cdot Rds} + \\
 \quad + \frac{(Rt \cdot (-U_{Ci}(t) + V2 + Ipt \cdot A4)) \cdot Rds - B10 \cdot U_{Cds}(t)}{A4 \cdot Rt \cdot Rds}; \\
 Ck \cdot \frac{dU_{Ck}(t)}{dt} = \left((A6 \cdot (U_{Ci}(t) - U_{Ck}(t))) - A3 \cdot U_{Ce}(t) - U_{Cs}(t) \cdot Ree + (Ibit - Idr) \cdot B3 \right) / \\
 \quad / B3; \\
 Ce \cdot \frac{dU_{Ce}(t)}{dt} = (-A5 \cdot U_{Ce}(t) + A3 \cdot U_{Ci}(t) - A3 \cdot U_{Ck}(t) + U_{Cs}(t) \cdot Rk + (Ibit + Idf) \cdot B3) / \\
 \quad / B3; \\
 Ci \cdot \frac{dU_{Ci}(t)}{dt} = \frac{-B11 \cdot U_{Ci}(t) + B7 \cdot i_L(t) + B4 \cdot U_{Cs}(t) + A6 \cdot A4 \cdot U_{Ck}(t)}{A4 \cdot B3} + \\
 \quad + \frac{A3 \cdot A4 \cdot U_{Ce}(t) + B3 \cdot (V2 - U_{Cds}(t))}{A4 \cdot B3},
 \end{array} \right. \quad (1)$$

де $A1 = Rt + Rd + R2$; $A2 = Rd + R2 + Rs + Rb$; $A3 = Rb + Rs$; $A4 = R2 + Rd$; $A5 = Rk + Rb + Rs$;

$A6 = Ree + Rs + Rb$; $B1 = A1 \cdot Rk + A2 \cdot Rt + A3 \cdot A4$; $B2 = A2 \cdot Rt + A3 \cdot A4$; $B3 = A5 \cdot Ree + Rk \cdot A3$; $B4 = (A2 + Rk) \cdot Ree + Rk \cdot A3$; $B5 = -B1 \cdot Ree - B2 \cdot Rk$; $B6 = A1 \cdot B3$; $B7 = A4 \cdot B3$; $B8 = A4 \cdot Rk$; $B9 = A4 \cdot Ree$; $B10 = A1 \cdot Rds + A4 \cdot Rt$; $B11 = B4 + A3 \cdot A4$.

Для перевірки адекватності розробленої моделі, було створено дослідний зразок приладу, на рис. 2 наведено порівняння результатів моделювання з експериментальними дослідженнями. Максимальна чутливість для перетворювача включеного по схемі з загальним колектором склала до 56 кГц/пФ, діапазон вхідних значень ємності 1 пФ – 1 нФ.

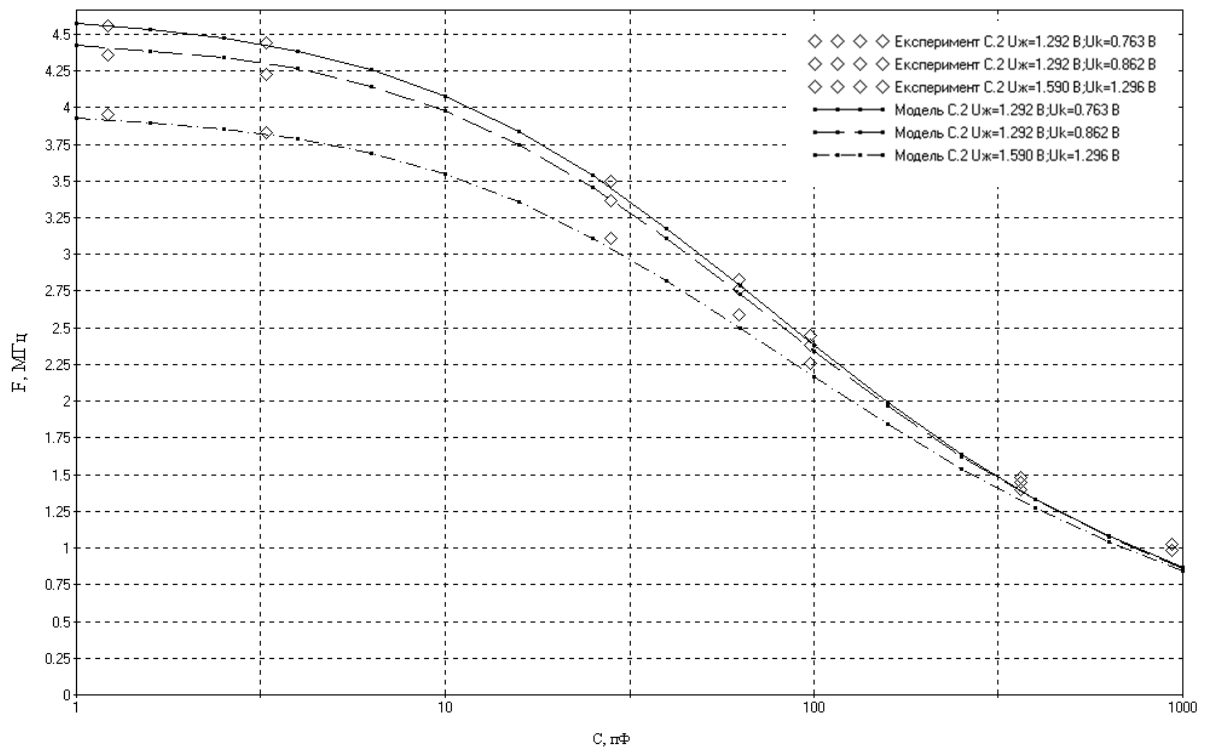


Рис. 2. Порівняння експериментальної та розрахованої за допомогою моделі функції перетворення вторинного перетворювача, включеного по схемі з загальним колектором

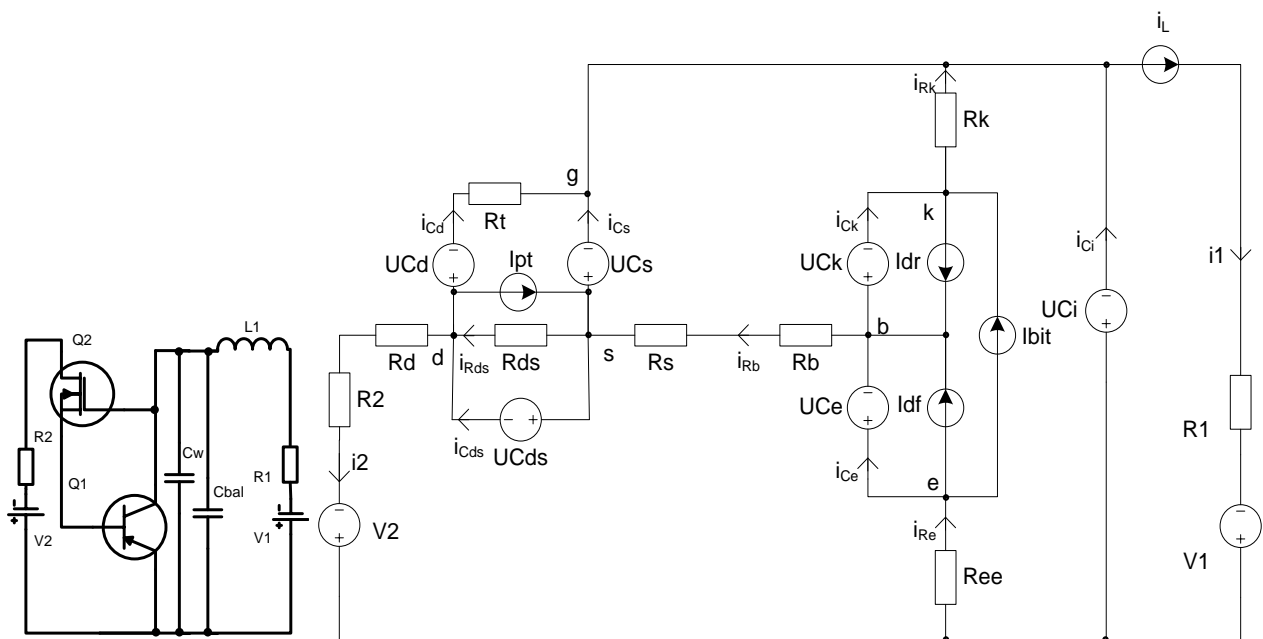


Рис. 3. Електрична принципова та перетворена еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача для визначення товщини, включеного по схемі з загальним емітером

Для розширення діапазону вимірювання був запропонований радіовимірювальний перетворювач, включений по схемі з загальним емітером, перетворена еквівалентна схема якого представлена на рис. 3. Функція перетворення представлена на рис. 4. Максимальна чутливість перетворювача включеного по схемі з загальним емітером склала до 5 кГц/пФ, діапазон вхідних значень ємності 1 пФ – 25 нФ. Таким чином, перший з розроблених перетворювачів є більш чутливим в області низьких значень ємності, а другий – має більш широкий діапазон вимірювання і більшу чутливість у діапазоні високих значень ємності.

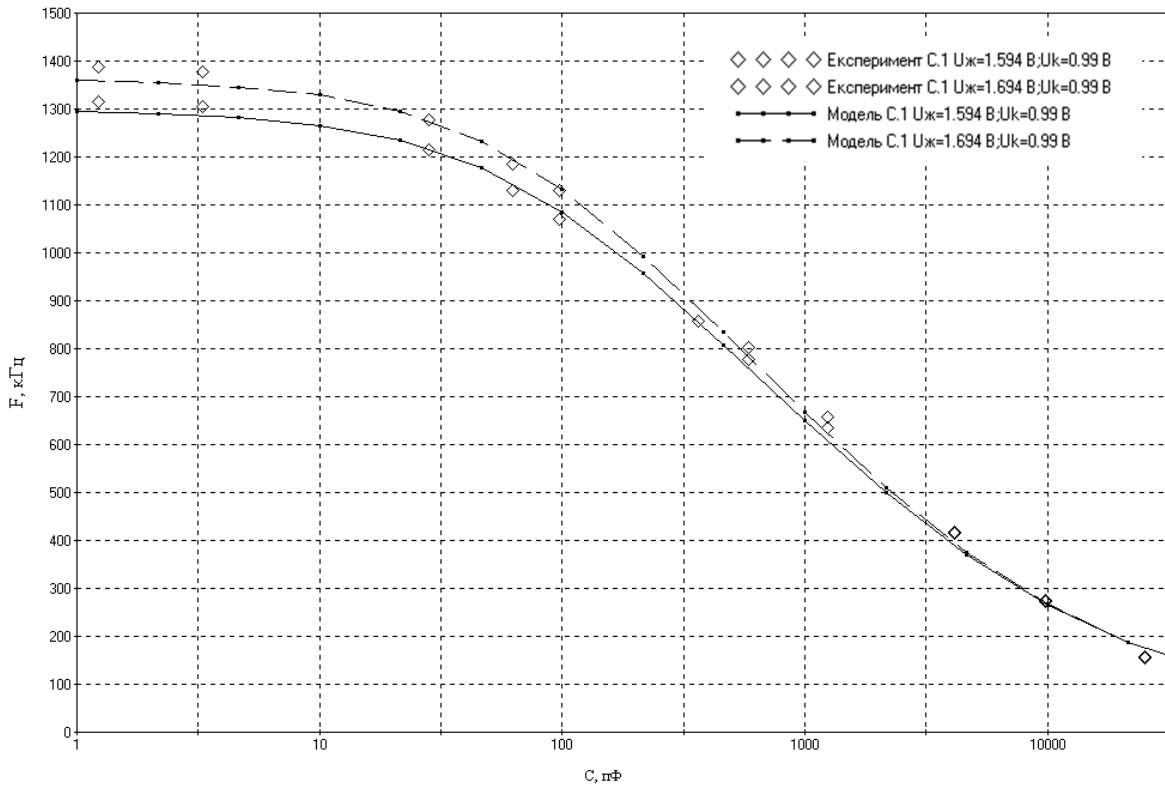


Рис.4. Порівняння експериментальної та розрахованої за допомогою моделі функції перетворення вторинного перетворювача включеного по схемі з загальним емітером

На третьому етапі визначалась в загальному вигляді залежність ємності від товщини матеріалу. Для цього було проведене порівняння різних методик розрахунку функції перетворення первинного ємнісного перетворювача, для площинного прямокутного, площинного круглого та планарного конденсаторів. Перші два типи розраховувалися за емпіричною та уточненою формулою Кірхгофа. Ємність планарного конденсатора обчислювалася за допомогою методу часткових ємностей та методу конформних відображень. Наведемо основні формули, що використовувалися при обчисленні:

- площинний круглий

$$C = \varepsilon_0 \cdot R \cdot \left(\frac{d \cdot \varepsilon_B \cdot \varepsilon_{\text{MAT}}}{\varepsilon_B \cdot h_{\text{MAT}} + \varepsilon_{\text{MAT}} \cdot (d - h_{\text{MAT}})} \right) \cdot \left[\frac{\pi R}{d} + \left(\ln \frac{16\pi R}{d} - 1 \right) \right]; \quad (2)$$

- площинний прямокутний

$$\begin{cases} C = \left(\frac{d \cdot \varepsilon_B \cdot \varepsilon_{\text{MAT}}}{\varepsilon_B \cdot h_{\text{MAT}} + \varepsilon_{\text{MAT}} \cdot (d - h_{\text{MAT}})} \right) \varepsilon_0 \frac{a}{\pi} \ln \left(\frac{4d}{b} + \frac{b}{2d} \right), \text{ при } b \leq \frac{d}{2} & ; \\ C = \left(\frac{d \cdot \varepsilon_B \cdot \varepsilon_{\text{MAT}}}{\varepsilon_B \cdot h_{\text{MAT}} + \varepsilon_{\text{MAT}} \cdot (d - h_{\text{MAT}})} \right) \varepsilon_0 \cdot a \left(\frac{b}{d} + 1.21 - \frac{0.11d}{b} + 0.5 \cdot \left(1 - \frac{d}{2 \cdot b} \right)^6 \right), \text{ при } b > \frac{d}{2} & ; \end{cases} \quad (3)$$

- планарний конденсатор на діелектричній підложці

(4)

де

$$\begin{aligned} C_{\text{ч1}} &= (2 \cdot a \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_B) / \pi \cdot \ln((4 \cdot l) / d), \text{ для } d \leq 0.25l, \\ C_{\text{ч2}} &= (a \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_{\text{MAT}} - \varepsilon_B)) // (d/h + 4/\pi \ln(2)), \text{ для } d > h; \\ C_{\text{ч3}} &= (a \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_{\text{ПОД}} - \varepsilon_B)) / \pi \cdot \ln((16 \cdot h_{\text{ПОД}}) / (\pi \cdot d)), \text{ для } d \leq 0.5h_{\text{ПОД}}; \end{aligned}$$

$$C_{\text{конф}} = a \cdot \left(2 \cdot \varepsilon_B \cdot \frac{K(k)}{K(k')} + (\varepsilon_{\text{ПОД}} - \varepsilon_B) \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \right); \quad (5)$$

$$k = \sqrt{\frac{b1 \cdot b2}{(b1 + d)(b2 + d)}}; k' = \sqrt{1 - k^2};$$

$$k1 = \sqrt{\frac{(t1 - t2) \cdot (t3 - t2)}{(t1 + t2) \cdot (t3 + t2)}}; k1' = \sqrt{1 - k1^2};$$

$$t_i = \frac{e^{\lambda_i} - 1}{e^{\lambda_i} + 1};$$

$$\lambda_1 = \frac{2b2 + d}{2h}; \lambda_2 = \frac{\pi \cdot d}{2h}; \lambda_3 = \frac{2b1 + d}{2h} \pi.$$

Отримані значення були перевірені експериментально (рис. 5). Дані залежності дозволяють здійснити вибір геометричних розмірів первинного ємнісного перетворювача.

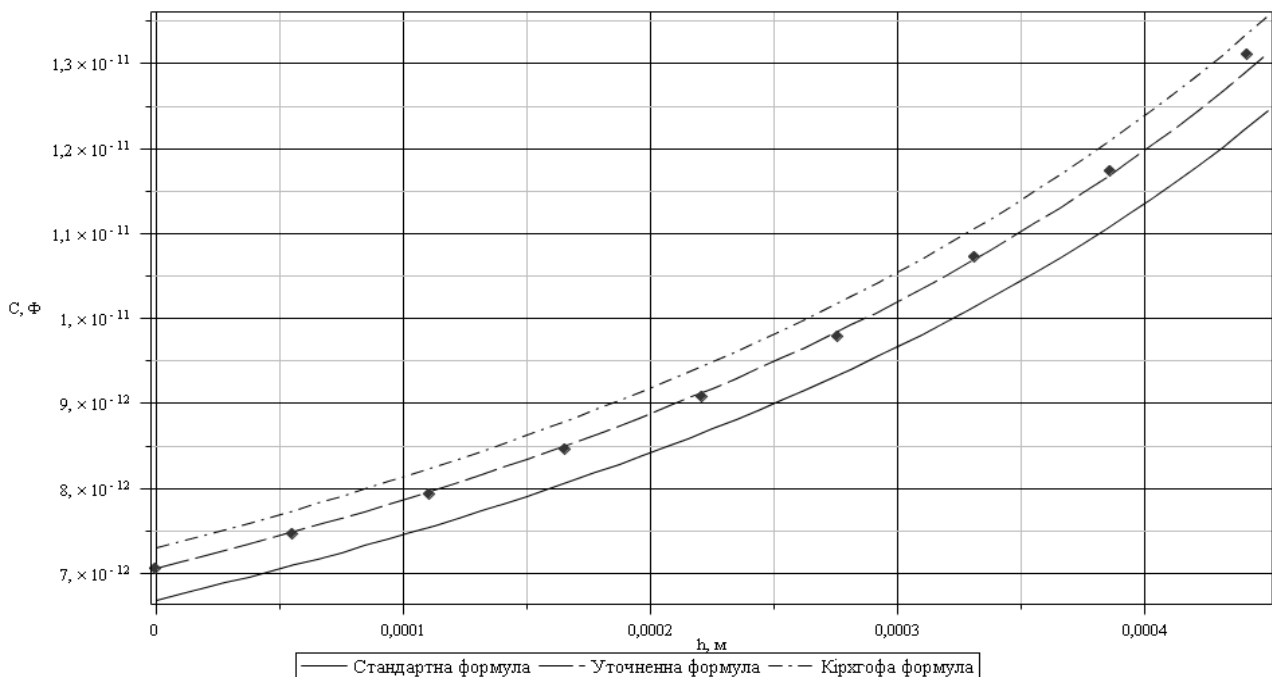


Рис. 5. Залежність ємності первинного вимірювального перетворювача від товщини вимірюваного матеріалу (обкладинки круглої форми)

Третій розділ присвячений створенню засобу вимірювання на основі розроблених перетворювачів та визначенню його метрологічних характеристик. Справа в тому, що розглянутий у другому розділі радіовимірювальний перетворювач для визначення товщини входить, як невід'ємна і основна складова, до засобу вимірювання товщини. Для визначення і перевірки характеристик перетворювача, необхідно розробити схему використання та інтеграції перетворювача до вищезгаданого засобу, що дозволить провести дослідження параметрів отриманого приладу. З іншого боку, розгляд приладу вимірювання не можна вважати завершеними без визначення його метрологічних характеристик.

Засіб вимірювання товщини на основі радіовимірювального перетворювача у випадку його реалізації з використанням мікроконтролера складається з трьох основних якісних частин: апаратне забезпечення; програма для мікроконтролера; програмне забезпечення для персонального комп'ютера. Засіб працює наступним чином: зміна товщини вимірюваного матеріалу, приводить до зміни ємності чутливого елемента, яка в свою чергу впливає на еквівалентну ємність коливального контуру (через власне зміну ємності та через зміщення робочої точки перетворювача), що призводить до зміни частоти коливань, що генеруються на виході схеми. Надалі сигнал послідовно проходить через вхідний вузол та внутрішній буфер

мікроконтролера, після чого потрапляє на вхід лічильника імпульсів. Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує підрахунок частоти. Електрична принципова схема приладу вимірювання товщини, що реалізує вищевикладений принцип роботи, для одноканального режиму наведена на рис. 6. У випадку реалізації двох або більше каналів системи застосовується каскадування перетворювачів за допомогою мультиплексування їх живлення з розділенням по часу.

Також, в розділі визначено систематичну складову основної похибки засобу вимірювання та ступінь впливу основних дестабілізуючих факторів (температури і напруги живлення). При цьому вкажемо, що похибки вимірювального каналу в цілому, складаються з похибок первинного ємнісного перетворювача, частотного перетворювача і вимірювача частоти. Сумарна гранично допустима систематична складова основної похибки склала 1,15%, роздільна здатність склала від 0,75 до 2 мкм. Розроблено комплекс заходів по зменшенню впливу впливових факторів і підвищенню стабільності засобу, зокрема розроблена схема термокомпенсації приладу, що дозволило зменшити гранично допустиму систематичну складову похибки до 0,1%.

У **четвертому розділі** надані рекомендації, щодо застосування радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини у системах отримання плівок і покриттів. Вимірювання товщини є важливою операцією для широкого спектру технологічних систем виробництва, обслуговування та ремонту різноманітних матеріалів і пристроїв. Основними галузями, для яких покращення точності вимірювання товщини виробів та зменшення вартості пристроїв є критичною задачею, та може дати найбільший економічний та технологічний ефект є: виробництво полімерних матеріалів побутового та виробничого призначення (поліетиленові плівки, полімери високої та низької густини, полістирол, фторопласт); паперово-целюлозна промисловість (високоякісний папір, в т.ч. і фотопапір, цупкий картон); лакування та фарбування (вимірювання товщини та однорідності фарбового шару, дофарбовий контроль поверхні); виробництво надчистих та композитних матеріалів (парогазове випаровування, плазмове наплення, хімічне осадження); виготовлення компонентів гібридних та інтегральних мікросхем; вимірювання товщини захисних плівок мікросхем, корпусів, деталей радіоелектронної апаратури.

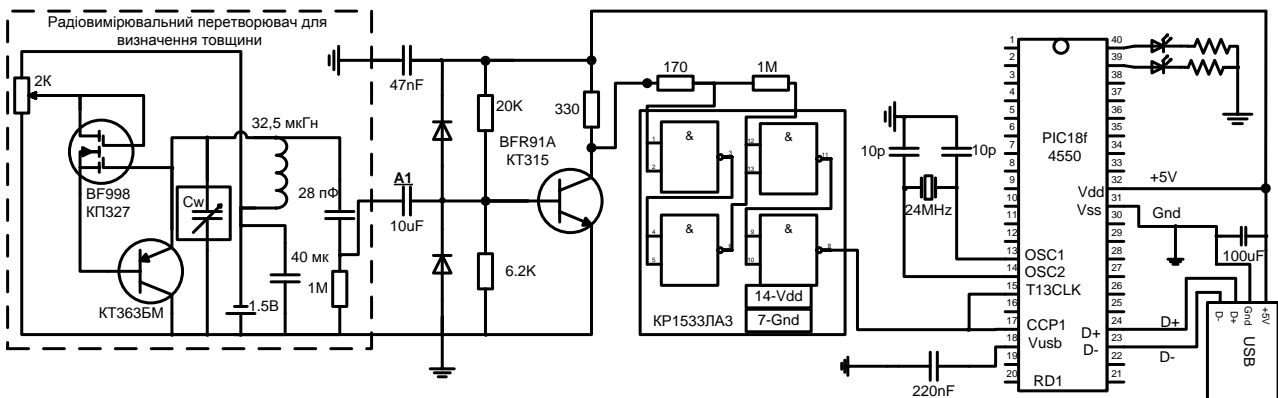


Рис. 6. Електрична принципова схема апаратної частини засобу вимірювання товщини

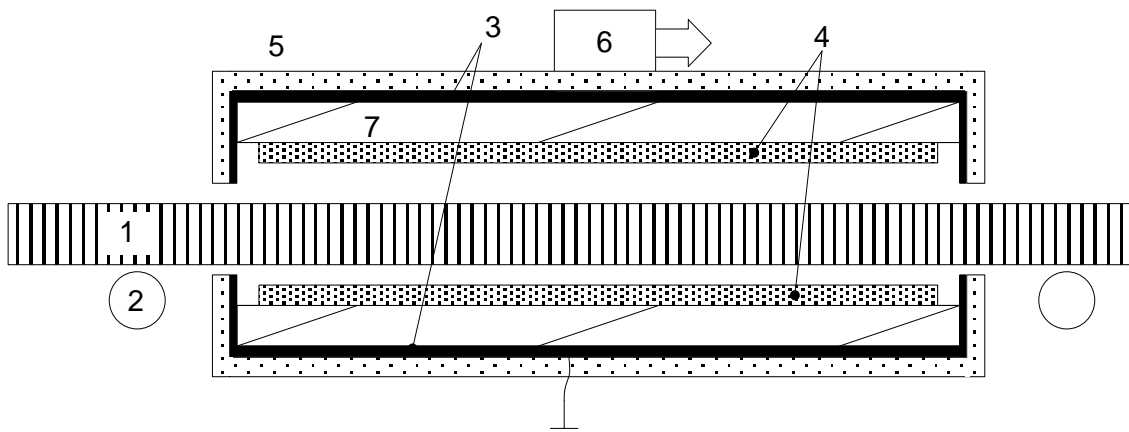


Рис. 7. Конструкція перетворювача для визначення товщини полімерної плівки: 1 – плівка; 2 – ролик; 3 – корпус-екран; 4 – робочі пластини конденсатора; 5 – термостабілізаційна вставка; 6 – перетворювач; 7 – невідна основа.

Зокрема в системі парофазного нанесення покриттів, розроблені перетворювачі надали можливість беззупинно вимірювати товщину отримуваної плівки під час процесу наплення, що дало значні переваги перед методами періодичного або післяопераційного вимірювання.

На виробництвах полімерної плівки, застосовують прилади потокового вимірювання листових виробів. Розроблені перетворювачі дозволили збільшити роздільну здатність вимірювачів при одночасному зменшенні їх вартості. Конструкція для даного випадку наведена на рис. 7.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі у науковому плані розроблені динамічні математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором в часовій області, що дозволило визначати зміну величини струмів і напруг в часі та отримати функції перетворення, чутливості і роздільної здатності розроблених приладів.

В практичному плані створено новий клас високочутливих вимірювачів товщини з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі «Maple» для моделювання та розрахунків динамічних характеристик перетворювачів з врахуванням залежності параметрів елементів схем пристроїв від впливу товщини.

ОТРИМАНО ТАКІ ОСНОВНІ НАУКОВІ І ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ:

1. Вперше запропоновано метод використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, який реалізує принцип перетворення «товщина - частота», на основі якого підвищується роздільна здатність і чутливість приладів вимірювання товщини матеріалу.

2. Розроблено математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок на основі транзисторних структур з від'ємним опором, які, на відміну від існуючих, виконані в часовій області та враховують вплив товщини вимірюваного матеріалу на елементи схем перетворювачів, що дало можливість визначати зміну величини струмів і напруг в часі, отримати функції перетворення, чутливості та роздільної здатності.

3. Розроблено високочутливі частотні перетворювачі товщини на основі транзисторних структур з від'ємним опором для вимірювання в діапазоні від 0 до 500 мкм, роздільною

здатністю від 0,75 до 2,25 мкм, чутливістю від 170 до 400 кГц/мм, при похибці вимірювання $\pm 1.15\%$ і амплітуді вихідного сигналу 1.25 В.

4. Створено мікропроцесорний засіб вимірювання товщини з покращеною роздільною здатністю і комплексом заходів для температурної стабілізації, екранування і компенсації зміни напруг живлення, що дозволило зменшити систематичну складову основної похибки з 1.15% до 0.1%.

5. Створене програмне забезпечення, що реалізує інженерний розрахунок функції перетворення, чутливості, струму або напруги в будь-якій точці схеми перетворювача товщини з від'ємним опором в заданий момент часу.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Криночкін Р. В. Програмно-апаратний комплекс керування процесом термічного випаровування / Новіков А. О., Криночкін Р.В. // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. - 2007. - № 1-2. - С.49-51.

2. Криночкін Р. В. Пристрій вимірювального контролю товщини металевих і полімерних плівок / Криночкін Р. В., Осадчук О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4. – С. 90-93.

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

4. Криночкін Р. В. Проблеми вимірювання товщини нанесеного покриття та методи підвищення його точності / Осадчук О. В., Криночкін Р.В. // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. - 2009. - № 1. - С.102-105.

1. 5. Криночкін Р. В. Визначення оптимальної схеми підключення вимірювальної ємності до частотного перетворювача товщини [Електронний ресурс] / Криночкін Р. В., Осадчук О. В. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету.– 2010.- № 1. - С.1-7. — Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2010_1/2010-1.files/uk/10ovocot_ua.pdf.

6. Пат. №10471, МПК⁷ С 23 С 14/00. Пристрій для випарювання матеріалів / Новіков А. О., Криночкін Р.В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний ун-т - № u20050419; заявлено 04.05.2005; опубліковано 15.11.2005; бюл. №11.

7. Пат. №37466, МПК⁷ С 23 С 14/48 - 14/54. Пристрій для випарування матеріалів / Новіков А. О., Криночкін Р.В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний ун-т - № u200808806; заявлено 04.07.2008; опубліковано 25.11.2008; бюл. №22.

8. Пат. №45045, МПК⁷ С 23 С 14/00. Пристрій для випару матеріалів / Осадчук В. С., Осадчук О.В., Криночкін Р.В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний ун-т - № u200904765; заявлено 15.05.2009; опубліковано 26.10.2009; бюл. №20.

9. Криночкін Р. В. Особливості моделювання ємнісних частотних перетворювачів товщини у середовищі Maple / Осадчук О. В., Криночкін Р.В. // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010): міжнародна конф., 19-21 жовтня 2010 р.: тези доп. - Вінниця, 2010. - С. 61.

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

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

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

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

14. Криночкін Р. В. Автоматизована інформаційна система частотного вимірювання товщини / Осадчук О. В., Криночкін Р.В. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: міжнародна наук.-техн. конф., 19-21 травня 2010 р.: тези доп. - Вінниця, 2010. - С. 39 - 40.

АНОТАЦІЯ

Криночкін Р.В. Радіовимірювальні перетворювачі для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірювальні прилади. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2011.

Дисертаційну роботу присвячено розробці нового класу перетворювачів для визначення товщини плівок, принцип роботи яких базується на використанні функціональної залежності частоти генерації транзисторної структури з від'ємним опором від зміни товщини вимірюваного матеріалу, що надає можливості підвищення чутливості і роздільної здатності метрологічних засобів.

У дисертаційній роботі були розроблені теоретичні підходи до створення математичних моделей радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини на основі пристроїв з від'ємним опором за допомогою методу змінних стану. Вперше розроблені та експериментально перевірені на адекватність динамічні математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором в часовій області, що дозволило визначати зміну величини струмів і напруг в часі та отримати функції перетворення і чутливості розроблених засобів. Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі «Maple» для моделювання та розрахунків динамічних характеристик перетворювачів з врахуванням залежності параметрів елементів схем пристроїв від впливу товщини. Надані рекомендації щодо застосування розроблених перетворювачів у різних системах виробництва плівок і покриттів.

Ключові слова: радіовимірювальний перетворювач для визначення товщини, товщина, мікрометр, плівка.

АННОТАЦИЯ

Криночкин Р.В. Радиоизмерительные преобразователи для определения толщины на основании приборов с отрицательным сопротивлением. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы. Винницкий национальный технический университет, Винница – 2011.

Диссертация посвящена разработке нового класса преобразователей для определения толщины пленок, принцип работы которых основан на использовании функциональной зависимости частоты генерации транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением от изменения толщины измеряемого материала, что дает возможность повышения чувствительности и разрешающей способности метрологических средств.

Широко применяются различные виды преобразователей для определения толщины материалов. Однако их использование осложняется тем, что большинство из них имеют малую разрешающую способность и высокий порог чувствительности при измерении малых толщин. Преобразователи же, созданные специально для определения малых и сверхмалых размеров пленок, хотя и имеют высокие метрологические характеристик, однако являются

сложными и имеют высокую стоимость. Разработка и исследование радиоизмерительных преобразователей для определения толщины, на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, позволила создать приборы, объединяющие высокие метрологические характеристики, с простотой и низкой стоимостью. Данные преобразователи дают возможность реализовать измерения толщины с высоким разрешением и малым порогом чувствительности, через преобразование ее в частоту с помощью высокочувствительного колебательного контура с электрической перестройкой.

В диссертационной работе были разработаны теоретические подходы к созданию математических моделей радиоизмерительных преобразователей для определения толщины на основе устройств с отрицательным сопротивлением с помощью метода переменных состояния. Впервые разработаны и экспериментально проверены на адекватность динамические математические модели радиоизмерительных преобразователей для определения толщины пленок на основе устройств с отрицательным сопротивлением во временной области, что позволило определять изменение величины токов и напряжений во времени и получить функции преобразования и чувствительности разработанных средств.

Для этого, была составлена система уравнений по методу переменных состояния, так как напряжения и токи в узлах схемы являются зависимыми от времени, то система является динамической математической моделью частотного преобразователя толщины, так что решения этой системы, позволит найти значение напряжения или тока в любой точке цепи в любой заданный момент времени при определенном значении измерительной емкости. Далее, для каждого значения измерительной емкости, по полученным на первом этапе зависимостями, определялась частота выходных колебаний. Это позволило получить функцию преобразования устройства в виде зависимости частоты генерации от значения емкости в определенном диапазоне. На последнем этапе определялась зависимость емкости от толщины материала для плоскостного и планарного конденсаторов с помощью метода частичных емкостей и метода конформных отображений. В результате была получена функция преобразования радиоизмерительного преобразователя для определения толщины пленок на основе устройств с отрицательным сопротивлением в виде зависимости частоты генерации от толщины. На ее основе были найдены функция чувствительности и определена разрешающая способность прибора. Создано программируемое средство измерения толщины, на основе разработанных радиоизмерительных преобразователей.

Разработан пакет прикладных программ в вычислительной среде «Maple» для моделирования и расчетов динамических характеристик преобразователей с учетом зависимости параметров элементов схем устройств от влияния толщины. Даны рекомендации по применению разработанных преобразователей в различных системах производства пленок и покрытий.

Ключевые слова: радиоизмерительный преобразователь для определения толщины, толщина, микрометрия, пленки.

ABSTRACT

Krinochkin R.V. Radiomeasuring transducers to determine the thickness based on the devices with negative resistance . – A manuscript.

A thesis for a candidate in a technical sciences degree by speciality 05.11.08 – radiomeasuring equipments. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2011.

Thesis is devoted to developing a new class of converters to determine the film thickness, the principle of which is based on the functional dependence of generation frequency transistor structure with negative resistance of the material thickness changes measured, providing opportunities to increase the sensitivity and resolution metrology tools.

The thesis was a theoretical approach to creating mathematical models of the radiomeasuring converters to determine the thickness based devices with negative resistance by method of the state variables. First developed and experimentally tested the adequacy of mathematical models of dynamic radio measuring transducers for determining the thickness of films based on negative re-

sistance devices in time domain, allowing to determine the change magnitude of currents and voltages in time and get the transfer function and sensitivity of the developed facilities. A computer program in the computing environment «Maple» for modeling and calculation of dynamic characteristics of sensors with regard to dependence of elements of circuit devices from the effects of thickness. Provided recommended converters designed for use in different systems of production of films and coatings.

Keywords: a radiomeasuring transducer to determine the thickness, thickness, micrometry, films.

Підписано до друку 24. 03. 2011 р. Формат 29.7x42¹/₄
Папір офсетний. Друк – ризографія. Умовн. друк. арк. 0.9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. № 2011-080

Надруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: (0432) 59-81-59