

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Володимир ЄРЕМЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні технології»**

**спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

**на тему: «Прилад для вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів»**

Виконав:

студент III курсу, групи III-п11  
Цимбал Дмитро Олександрович

\_\_\_\_\_

Керівник:

Професор, д.т.н., доцент  
Барилко Сергій Віталійович

\_\_\_\_\_

Рецензент:

Старший викладач  
Зайцев Віктор Миколайович

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2024 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП 152. 0103.001 ПЗ	Пояснювальна записка	69	
3	A4	ДП 152. 0103.001 ТК1	Вимірювач товщини покриття діелектричних матеріалів, схема структурна	1	
4	A3	ДП 152. 0103.001 ТК2	Вимірювач товщини покриття діелектричних матеріалів, схема принципова	1	
5	A4	ДП 152. 0103.001 ТК3	Алгоритм процесу вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів	1	
6	A4	ДП 152. 0103.001 ТК СП	Специфікація	3	

				ДП 152.0103.001	
	ПБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Цимбал Д.О.			Відомість дипломного проєкту	Лист
Керівн.	Барилко С. В.				1
Н/контр.					Листів
Зав.каф.	Єременко В. С.				1
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ІВТ Гр. ПІ-п11	

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Прилад для вимірювання товщини покриття**  
**діелектричних матеріалів»**

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультету**  
**Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**  
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)  
Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»  
Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Володимир ЄРЕМЕНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

### ЗАВДАННЯ

**на дипломний проєкт студенту**  
**Цимбалу Дмитру Олександровичу**

1. Тема проєкту «Прилад для вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів», керівник проєкту Барилко Сергій Віталійович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «28» 05 2024 р. № 2120-с

2. Термін подання студентом проєкту 14.06.2024 р.

3. Вихідні дані до проєкту: ємнісний прилад для вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів в діапазоні 10 ... 100 мкм при товщинах самого матеріалу 1 ... 2 мм, похибка вимірювання 5,5%.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. Принципи та методи вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів та прилади ні їх основі. Розділ 2. Розрахунок параметрів повітряного конденсатора для вимірювання товщини покриття матеріалів ємнісним методом. Розділ 3. Створення структурної та електричної схеми приладу для вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів. Розділ 4. Створення проєкту друкованої плати вимірювального приладу. Загальні висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Вимірювач товщини покриття діелектричних матеріалів, схема структурна (1л). Вимірювач товщини покриття діелектричних

матеріалів, схема принципова (1л). Алгоритм процесу вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів (1л). Презентація (на 1 ел. носії).

6. Дата видачі завдання: 01.03.2024 р.

#### Календарний план

з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Вибір та затвердження теми	15.03.24 р.	
2.	Формулювання та затвердження завдання	26.03.24 р.	
3.	Виконання першого та другого розділів, перевірка їх керівником	26.04.24 р.	
4.	Виконання 3-4 розділів, перевірка їх керівником і консультантом	24.05.24 р.	
5.	Формування графічної частини ДП	31.05.24 р.	
6.	Оформлення та завершення ДП. Надання на розгляд керівнику	03.06.24 р.	
7.	Надання ДП (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки на наявність запозичень (плагіату)	03.06.24 р.	
8.	Остаточна перевірка ДП керівником, надання відгуку	03.06.24 р.	
9.	Попередній захист ДП	04.06.24 р.	
10.	Рецензування	10.06.24 р.	
11.	Надання роботи відповідальному за організацію дипломного проєктування на кафедрі (друкований варіант)	14.06.24 р.	
12.	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	18.06.24 р.	

Студент

Дмитро ЦИМБАЛ

Керівник

Сергій БАРИЛКО

## АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт на тему: "Прилад для вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів" містить 80 сторінок, 34 ілюстрації та 22 бібліографічних посилань. У дипломному проєкті проведений аналіз методів та засобів вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів, а саме: методу сканування довжини оптичної хвилі; методу інтерференції; методу нанесення подряпини; методу рентгенівської флуоресценції. За допомогою запропонованих методів та засобів сьогодні можна вимірювати товщину покриття різних діелектричних матеріалів, але більш доцільно на виробництві для реалізації моніторингу вимірювального параметру використовувати саме ємнісний різницевий метод. Також показано, що різницевий метод вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу передбачає використання змінного конденсатора перетворювача для визначення ємності між його пластинами та опорного каналу, значення напруги з якого повинне відніматися від значення напруги у вимірювальному каналі. Різницю зазначених напруг у кінцевому результаті пов'язують із параметром товщини покриття діелектричного матеріалу.

У роботі представлено структурну та спрощену електричну схеми приладу, які працюють на основі різницевого ємнісного методу вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу.

Розроблено проєкт електричної схеми та друкованих плат приладу в різних програмних середовищах та створено код мікроконтролера для тестової програми роботи вимірювального приладу.

**Ключові слова:** товщина покриття, діелектричний матеріал, ємнісний метод, вимірювальний прилад.

## ABSTRACT

The diploma project on the topic: "The device for measuring the thickness of the coating of dielectric materials" contains 80 pages, 34 illustrations and 22 bibliographic references. The diploma project analyzed the methods and means of measuring the thickness of the coating of dielectric materials, namely: the optical wavelength scanning method; interference method; scratch application method; X-ray fluorescence method. With the help of the proposed methods and tools, today it is possible to measure the thickness of the coating of various dielectric materials, but it is more expedient to use the capacitive difference method in production to monitor the measurement parameter. It is also shown that the differential method of measuring the thickness of the coating of the dielectric material involves the use of a variable capacitor of the converter to determine the capacitance between its plates and the reference channel, the voltage value of which must be subtracted from the voltage value in the measuring channel. The difference in the specified voltages in the final result is associated with the parameter of the thickness of the coating of the dielectric material.

The work presents the structural and simplified electrical diagrams of the device, which work on the basis of the difference capacitive method of measuring the thickness of the coating of the dielectric material.

The project of the electrical circuit and printed circuit boards of the device was developed in various software environments, and the microcontroller code was created for the test program of the measuring device.

**Key words:** coating thickness, dielectric material, capacitive method, measuring device.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>10</b>
<b>Розділ 1. ПРИНЦИПИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПРИЛАДИ НІ ЇХ ОСНОВІ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Вимірювання товщини діелектричних плівок методом сканування довжини оптичної хвилі.....	11
1.2 Вимірювання товщини діелектричних плівок з використанням методу інтерференції.....	18
1.3 Вимірювання товщини діелектричних плівок методом подряпини .....	24
1.4 Вимірювання товщини діелектричних плівок методом рентгенівської флуоресценції.....	28
<b>Висновки до розділу 1 .....</b>	<b>34</b>
<b>Розділ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ МАТЕРІАЛІВ ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ .....</b>	<b>35</b>
2.1 Спосіб вимірювання товщини покриття матеріалів .....	35
2.2 Розрахунок параметрів моделі повітряного конденсатора при вимірюванні товщини матеріалу з покриттям.....	35
2.3 Розрахунок параметрів перетворювача вимірювального каналу .....	38
<b>Висновки до розділу 2 .....</b>	<b>43</b>
<b>Розділ 3. СТВОРЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ .....</b>	<b>44</b>
3.1 Створення структурної та електричної схем вимірювального приладу товщини покриття матеріалу.....	44
3.2 Опис роботи вимірювальної схеми приладу .....	46
<b>Висновки до розділу 3 .....</b>	<b>57</b>

<b>Розділ 4. СТВОРЕННЯ ПРОЄКТУ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ.....</b>	<b>58</b>
4.1 Огляд існуючих програмних середовищ для створення проєктів друкованих плат.....	58
4.2 Порядок створення проєкту друкованої плати вимірювального приладу за допомогою програми PROTEUS та KiCad.....	61
<b>Висновки до розділу 4 .....</b>	<b>71</b>
<b>Загальні висновки .....</b>	<b>72</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>73</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>75</b>

## ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості та електроніки ставить все більш жорсткі вимоги до контролю якості та характеристик матеріалів. Одним з важливих параметрів, що впливають на роботу електронних пристроїв, є товщина покриття діелектричних матеріалів. Якість ізоляції, електрична міцність, теплопровідність, а також інші експлуатаційні характеристики значною мірою залежать від товщини нанесеного покриття. Тому розробка точних і надійних методів вимірювання товщини покриття є актуальною задачею.

Наразі існує багато методів вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Одним з поширених методів є ємнісний метод, який ґрунтується на вимірюванні зміни ємності конденсатора, що утворюється об'єктом з нанесеним покриттям та опорною пластиною. Цей метод відрізняється простотою реалізації, високою точністю та неруйнівним характером контролю.

Дослідження у цьому напрямку дозволять розробити новий прилад для вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів, який буде відрізнятися високими метрологічними характеристиками, простотою у використанні та доступною ціною. Розроблений прилад може бути використаний для контролю якості та характеристик діелектричних покриттів в різних галузях промисловості, таких як електроніка, машинобудування, приладобудування, радіоелектроніка та інше.

# Розділ 1. ПРИНЦИПИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПРИЛАДИ НІ ЇХ ОСНОВІ

## 1.1 Вимірювання товщини діелектричних плівок методом сканування довжини оптичної хвилі

Метод сканування довжини хвилі (SWM) - це оптичний метод, який використовується для вимірювання товщини діелектричних плівок. Цей метод ґрунтується на залежності між довжиною хвилі світла та коефіцієнтом його поглинання плівкою.

### Принцип роботи

Метод SWM використовує джерело світла, яке випромінює світло з широким спектром довжин хвиль. Це світло проходить через діелектричну плівку, а потім відбивається від підкладки. Відбите світло аналізується спектрометром, який визначає довжини хвиль, які поглинаються плівкою.

Товщина плівки розраховується на основі наступної формули:

$$d = \lambda / (4n * k), \quad (1.1)$$

де  $d$  - товщина плівки;

$\lambda$  - довжина хвилі світла;

$n$  - показник заломлення плівки;

$k$  - коефіцієнт поглинання плівки.

### *Переваги методу SWM.*

**Бесконтактний метод:** Цей метод не потребує контакту з плівкою, тому він не руйнівний.

**Швидкий:** Вимірювання товщини плівки може бути виконано за лічені секунди.

Точний: Цей метод може забезпечити точність до 1 нм.

Може використовуватися для плівок на різних підкладках: Цей метод може використовуватися для вимірювання товщини плівок на металевих, діелектричних та напівпровідникових підкладках.

#### *Недоліки методу SWM*

Вимагає дорогого обладнання: Для цього методу потрібне джерело світла з широким спектром довжин хвиль, спектрометр та комп'ютер для аналізу даних.

Складніший у порівнянні з деякими іншими методами: Цей метод може бути складнішим у використанні та інтерпретації результатів, ніж деякі інші методи вимірювання товщини плівок.

Точність може бути обмежена для дуже тонких плівок: Точність методу SWM може бути обмежена для плівок товщиною менше 100 нм.

#### *Застосування методу SWM*

Метод SWM використовується в різних галузях, таких як:

Контроль якості: Цей метод використовується для контролю якості діелектричних плівок при їх виробництві.

Вимірювання товщини плівок в електронних пристроях: Цей метод використовується для вимірювання товщини плівок в електронних пристроях, таких як конденсатори, резистори та мікросхеми.

Дослідження властивостей діелектричних плівок: Цей метод використовується для дослідження властивостей діелектричних плівок, таких як їх показник заломлення, коефіцієнт поглинання та діелектрична проникність.

Прикладом приладу який використовує даний метод вимірювання може слугувати еліпсометр М-2000 (рис.1.1 та рис.1.2) від компанії J.A. Woollam

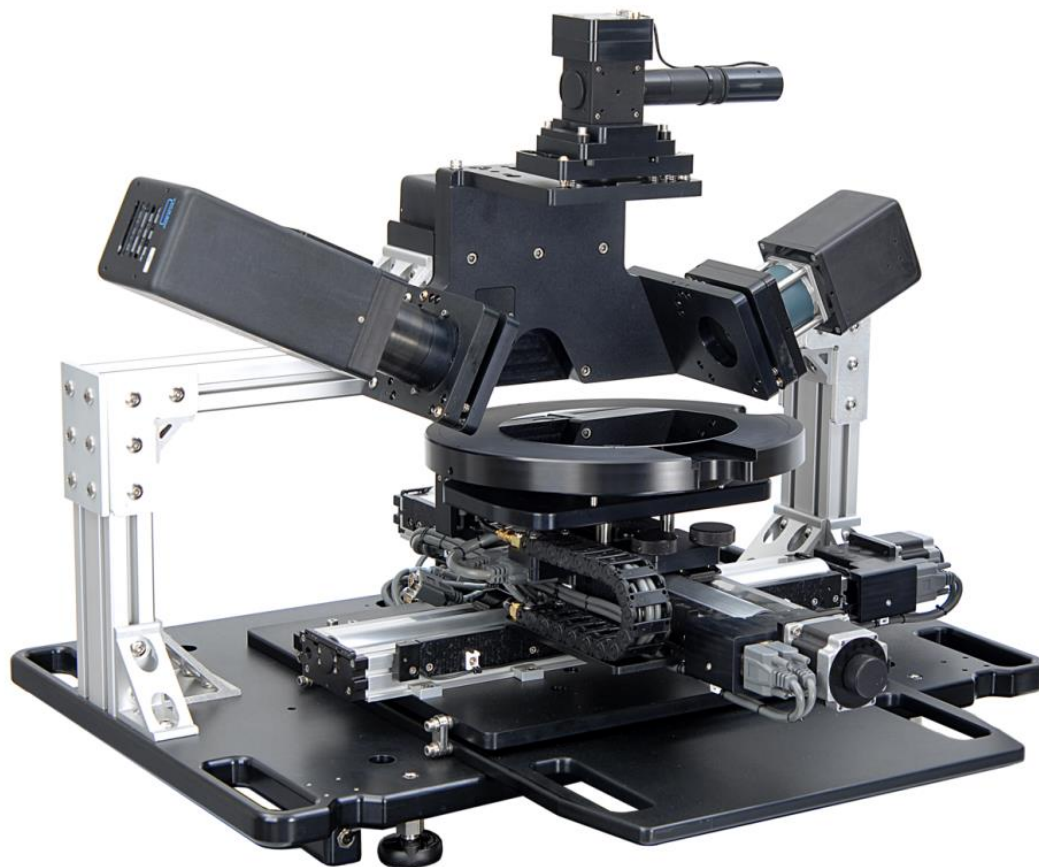


Рисунок 1.1 - Еліпсометр J.A. Woollam M-2000

## Та має такі характеристики

### Spectral Range

#### Model:

V	370nm to 1000nm, 390 wavelengths
VI	370nm to 1690nm, 580 wavelengths
U, X	245nm to 1000nm, 470 wavelengths
UI, XI	245nm to 1690nm, 660 wavelengths
X-210	210nm to 1000nm, 485 wavelengths
XI-210	210nm to 1690nm, 675 wavelengths
D	193nm to 1000nm, 500 wavelengths
DI	193nm to 1690nm, 690 wavelengths

"I" indicates NIR upgrade

### Spectral Resolution Bandwidth

#### Model:

V, U, X, D	1.6nm pixel resolution ~ 5nm bandwidth
VI, UI, XI, DI	1.6nm pixel resolution (UV/Vis) 3.4nm pixel resolution (NIR) ~ 5nm bandwidth (UV/Vis) ~ 10nm bandwidth (NIR)

### Data Acquisition Rate

The maximum data acquisition rate is determined by the compensator rotation speed, which is 20Hz for most M-2000\* models. Typical measurements for best signal-to-noise average between 1 and 5 seconds.

### Beam Diameter

2mm to 5mm, depending on model configuration.

\*See Focus Option section (pg. 5) for focused beam sizes.

### Beam Divergence

Less than 0.3° (without focusing).

### Measurable Quantities

Ellipsometry:	$\Psi$ (0°-90°) and $\Delta$ (0°-360°)
Transmission intensity:	%Transmission
Reflection intensity:	% Reflection
Depolarization:	% Depolarization
Mueller-matrix:	Measure and fit 11 normalized elements of the Mueller-matrix. Useful for samples that are both anisotropic and depolarizing.

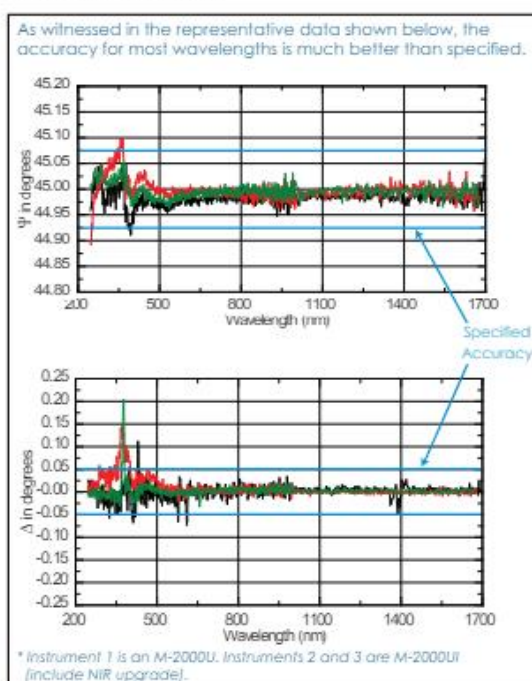
### Typical Accuracy

Straight-through measurement of empty beam:  
(Met by 95% of the measured wavelengths with ten second averaging time.)

$$\Psi = 45^\circ \pm 0.075^\circ \quad \tan(\Psi) = 1 \pm 0.0013$$

$$\Delta = 0^\circ \pm 0.05 \quad \cos(\Delta) = 1 \pm 0.0000015$$

\*When looking at ellipsometric specifications, it is easy to erroneously compare  $\Delta$  to  $\cos(\Delta)$  and  $\Psi$  to  $\tan(\Psi)$ . We provide both numbers for your convenience. The Woollam Company M-2000 is orders of magnitude better than the competition when measuring  $\Delta$  near 0° and 180°. This is a benefit of our patented rotating compensator technology.



### Typical Repeatability

Thirty repeated straight-through measurements of empty beam; each with zone-averaging and ten second averaging:

$$\delta\Psi = 0.015^\circ *$$

$$\delta\Delta = 0.015^\circ *$$

\*1-standard deviation

Thirty repeated measurements of SiO<sub>2</sub> (2nm)/Si at 65° angle and ten second averaging with fixed sample position:

$$\delta\text{thickness} = 0.002\text{nm}*$$

\*1-standard deviation

Рисунок 1.2 – Характеристики еліпсометру J.A. Woollam M-2000

M-2000 найчастіше використовується для вимірювання товщини тонких плівок і оптичних констант. Він чутливий до менш ніж моношару матеріалу (суб-нм) на поверхні, але може визначати товщину прозорих плівок до десятків мікрон. M-2000 також може вимірювати оптичні константи (як  $n$ , так і  $k$ ) для будь-якого типу матеріалу, будь то діелектрик, органіка, напівпровідник або метал. Крім оптичних констант, існують додаткові властивості матеріалу, які можна опосередковано визначити на основі того, як вони впливають на зміну оптичного відгуку матеріалу.

Коли вимірювальний промінь світла від M-2000 взаємодіє з тонкою плівкою, він створює особливості спектральних даних, зумовлені кожним компонентом світлового променя, що повертається. Будь-яке світло, яке потрапляє в плівку і відбивається від поверхні розділу фаз, рекомбінує з поверхневим відбиттям. Результатом є конструктивна і деструктивна інтерференція, що залежить від відносної фази кожного компонента світла, як показано на рисунку 1.3, і від довжини світлової хвилі. Світло, що проходить через тонку плівку, затримується як товщиною, так і показником заломлення ( $n$  визначає фазову швидкість). Таким чином, на отримані дані безпосередньо впливають властивості плівки

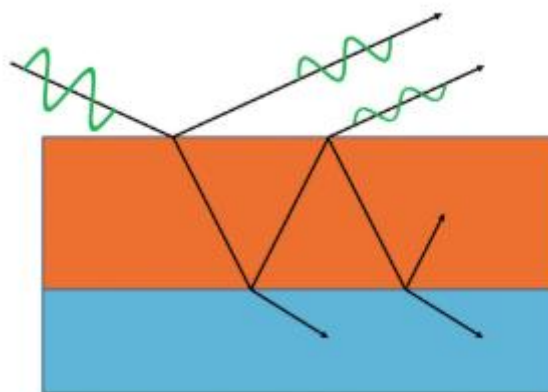


Рисунок 1.3 - Відбиття від декількох поверхонь

На рисунку 1.4 показано два вимірювання діелектричних шарів на кремнії. Кількість коливань зростає зі збільшенням товщини плівки.

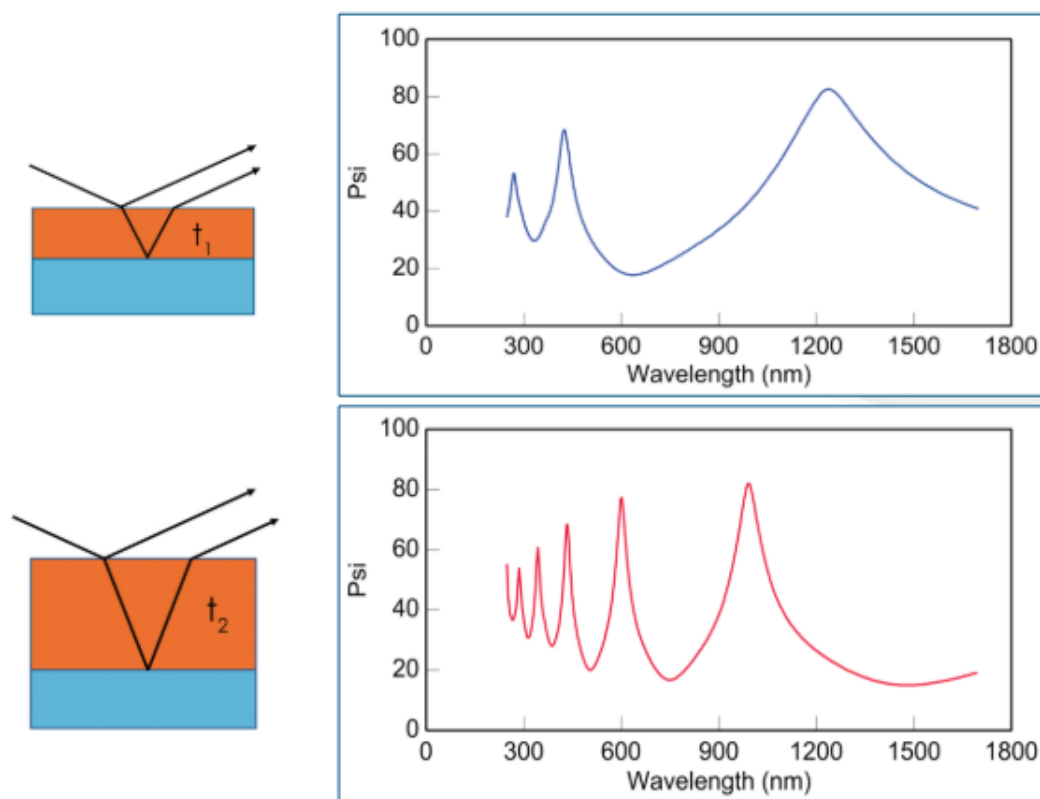


Рисунок 1.4 - Експериментальні дані для двох тонких плівок. Кількість коливань зростає для плівки №2, оскільки  $t_2 > t_1$

Показник заломлення ( $n$ ) Амплітуда коливань даних пов'язана з оптичними константами плівки. Якщо показник заломлення плівки близький до показника заломлення підкладки, то менше світла буде відбиватися від поверхні. Це продемонстровано на прикладі плівки  $\text{SiO}_2$  на склі (рис. 1.5), де показник заломлення скла і  $\text{SiO}_2$  дуже близькі. Коли плівка і підкладка мають дуже різні індекси, коливання можуть бути набагато більшими, як у випадку з  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  на склі (Рис. 1.5).

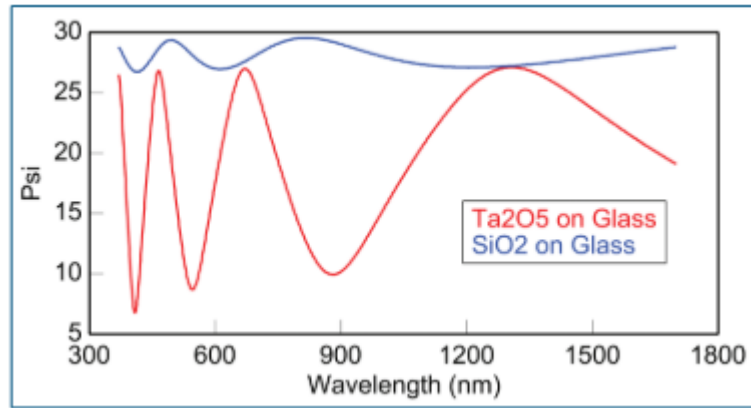


Рисунок 1.5 - Дані з прозорих плівок на склі з різними показниками заломлення

Коефіцієнт поглинання ( $k$ ) На виміряні дані також впливає поглинання плівки. Кількість світла, що проходить через плівку, може частково або повністю поглинатися перед поверненням на поверхню. Це впливає на форму вимірних даних, як показано на рисунку 1.6. У прозорій області для цього шару органічного барвника світло створює типову осцилюючу форму даних. У видимій області, де барвник поглинає світло, коливання даних пригнічуються. Тут вимірюється лише відбиття від поверхні.

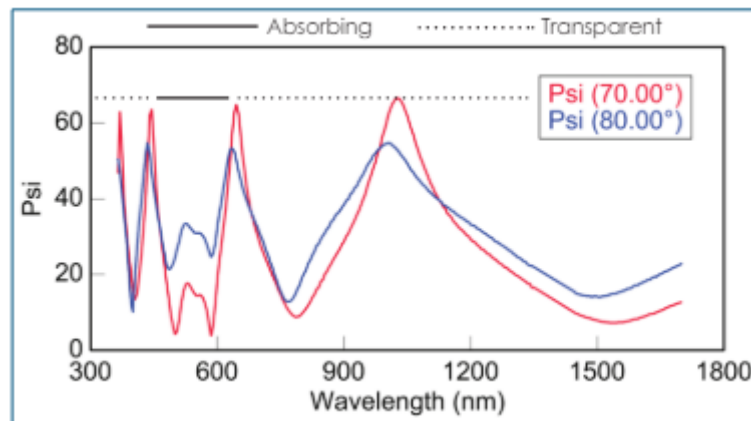


Рисунок 1.6 - Вимірювання з органічним барвником, що показує області, де плівка прозора і де плівка поглинаюча

Інші загальні властивості матеріалу можна виміряти за допомогою M-2000 на основі змін оптичних констант, що індукуються в шарі. Ці властивості включають: склад, кристалічність, провідність, анізотропію, поверхневу і міжфазну шорсткість. На рисунку 1.7 показано зміну оптичних констант при

зміні кристалічності в тонкій плівці германію.

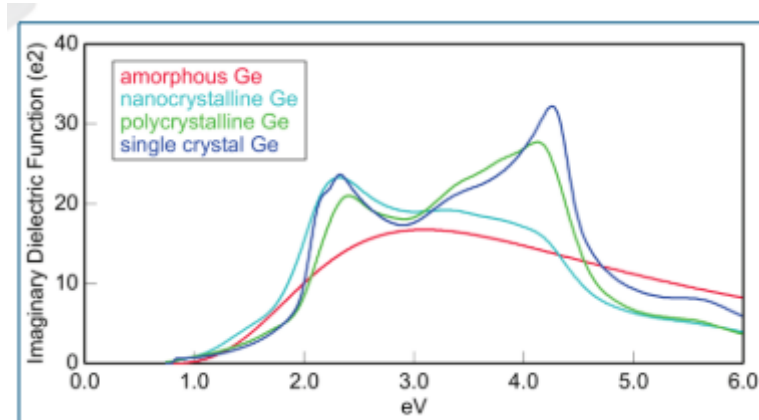


Рисунок 1.7 - Серія плівок германію з різною кристалічністю. Піки поглинання добре виражені, коли матеріал має далекосяжну кристалічну структуру. У напрямку до аморфного стану особливості поглинання розширюються

M-2000 - це універсальний спектроскопічний еліпсометр, придатний для роботи з різними типами зразків. Покриття можуть бути діелектриками, органікою, напівпровідниками і навіть тонкими металами. Але незважаючи на прекрасні характеристики він має суттєвий мінус – високу ціну, що нам як студентам не дуже підходить.

## 1.2 Вимірювання товщини діелектричних плівок з використанням методу інтерференції

Метод інтерференції для вимірювання товщини діелектричних покриттів є одним з найбільш точних та чутливих методів, що базується на фізичному явищі інтерференції світла. Принцип його дії полягає у використанні міжвзаємодії між хвилею світла, яка відбивається від верхньої та нижньої поверхні діелектричного покриття.

Коли монохроматичне світло падає на поверхню діелектричного покриття, частина цього світла відбивається від верхньої поверхні покриття, а частина - від нижньої. Ці дві хвилі взаємодіють між собою, утворюючи інтерференційні полоси. Положення цих полос залежить від різниці оптичних шляхів, яка в свою чергу залежить від товщини покриття.

Зміна товщини покриття призводить до зсуву інтерференційних полос. Цей зсув може бути вимірний за допомогою інтерферометра або іншого спеціального обладнання. Знання цього зсуву і використання відомих параметрів, таких як довжина хвилі світла, дозволяє обчислити товщину діелектричного покриття з високою точністю.

Перевагою цього методу є його висока точність, можливість вимірювати дуже тонкі покриття та відсутність контакту з досліджуваним об'єктом, що дозволяє вимірювати тонкі і вразливі матеріали без пошкоджень. Однак він може бути чутливим до зовнішніх умов, таких як коливання температури і вологості, що може вплинути на точність вимірювань.

Формула для розрахунку товщини покриття:

$$d = m * \lambda / 2n, \quad (1.2)$$

де  $d$  - товщина покриття;

$m$  - порядок інтерференції;

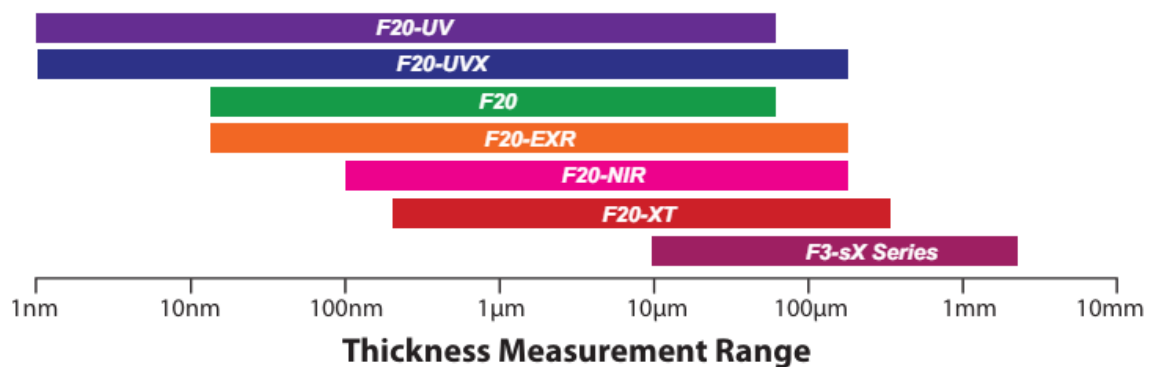
$\lambda$  - довжина хвилі світла;

$n$  - показник заломлення покриття.

В якості прикладу приладу, який використовує даний метод вимірювання товщини діелектричного покриття – є рефлектометр Filmetrics F20 (рис.1.8 та рис.1.9), зображення якого наведено нижче.



Рисунок 1.8 - Рефлектометр Filmetrics F20



General Specifications	F20-UV	F20-UVX	F20	F20-EXR	F20-NIR	F20-XT
Spectrometer Wavelength Range:	190 - 1100 nm	190 - 1700 nm	380 - 1050 nm	380 - 1700 nm	950 - 1700 nm	1440 - 1690 nm
Light Source:	External, D2 + Halogen		Internal, Halogen			
Measurement Specifications						
Thickness Measurement Range*:	1 nm - 40 $\mu$ m	1 nm - 250 $\mu$ m	15 nm - 70 $\mu$ m	15 nm - 250 $\mu$ m	100 nm - 250 $\mu$ m	0.2 $\mu$ m - 450 $\mu$ m
Min. Thickness to Measure n & k*:	50 nm	50 nm	100 nm	100 nm	500 nm	2 $\mu$ m
Accuracy*: The greater of	1 nm or 0.2%	1 nm or 0.2%	2 nm or 0.2%	2 nm or 0.2%	3 nm or 0.4%	5 nm or 0.4%
Precision <sup>1</sup> :	0.02 nm	0.02 nm	0.02 nm	0.02 nm	0.1 nm	1 nm
Stability <sup>2</sup> :	0.05 nm	0.05 nm	0.05 nm	0.05 nm	0.12 nm	1 nm
Spot Size:	Standard 1.5 mm, Optional down to 20 $\mu$ m					600 $\mu$ m
Sample Size:	From 1 mm to 300 mm diameter and up					
General Requirements						
Power:	100 - 240 VAC, 50 - 60 Hz, 0.3-0.1 A					
Computer Interface:	USB 2.0					
Certifications:	CE EMC and safety directives					
Operating System						
PC:	Windows XP (SP2) - Latest Windows (64-bit)					
Mac:	OS X Lion - Latest Mac OS running Parallels					

\* Material dependent

<sup>1</sup> 1 $\sigma$  of 100 measurements of 500 nm SiO<sub>2</sub>-on-Si. Average of 1 $\sigma$  over 20 successive days.

<sup>2</sup> 2 $\sigma$  of daily average of 100 measurements of 500 nm SiO<sub>2</sub>-on-Si over 20 successive days.

Рисунок 1.9 – Характеристики рефлектометрів Filmetrics серії F20

Коли світло потрапляє на межу розділу двох матеріалів, воно частково відбивається.

Хвилеподібна природа світла призводить до того, що відбиття від декількох поверхонь розділу дозволяє інтерферувати одне з одним, що призводить до коливань у спектрі довжин хвиль відбитого світла.

За частотою цих коливань ми визначаємо відстань між різними поверхнями розділу (рис.1.10) і, таким чином, товщину матеріалів (чим більше коливань, тим більша товщина). Також вимірюються інші характеристики матеріалу, такі як

показник заломлення та шорсткість.

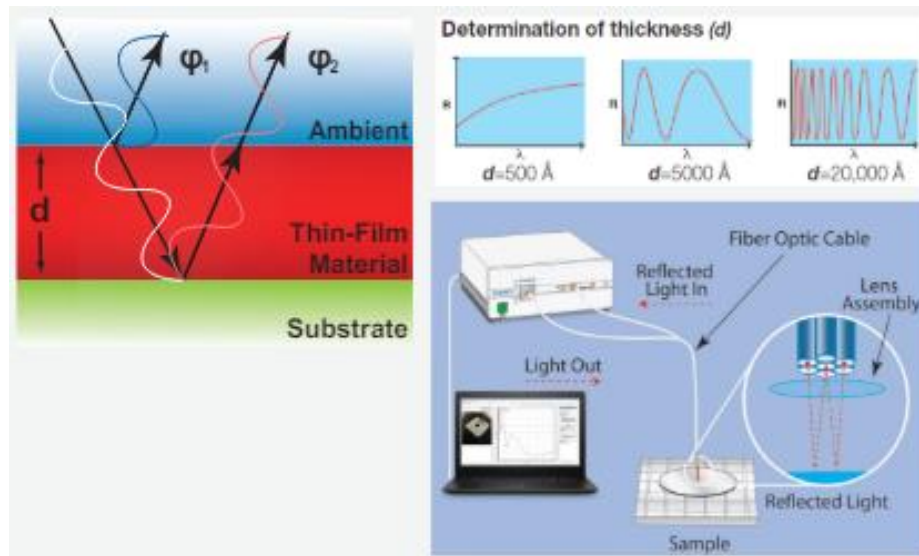


Рисунок 1.10 – Принцип роботи Filmetrics F20

Filmetrics F20 відомий своєю простотою підключення до комп'ютера та використання програмного забезпечення (ПЗ). Прилад зазвичай постачається з усім необхідним для підключення обладнанням, таким як USB-кабель, який дозволяє легко підключитися до комп'ютера з USB входом.

ПЗ для Filmetrics F20 зазвичай має інтуїтивний і простий інтерфейс, що дозволяє користувачам швидко ознайомитися з його функціями та можливостями. Воно часто має графічний інтерфейс, який спрощує процес збору даних та аналізу результатів.

Після підключення до комп'ютера та запуску програмного забезпечення, користувачу зазвичай пропонується набір інструментів для налаштування вимірювань, збору даних та виведення результатів. Це може включати вибір типу вимірювання, встановлення параметрів вимірювання та аналіз результатів.

Загалом, простота підключення до ПК та використання програмного забезпечення робить Filmetrics F20 зручним і ефективним інструментом для вимірювання оптичних властивостей тонких плівок.

Filmetrics F20 дозволяє вибирати модель вимірювання товщини.

При вимірюванні  $n$  і  $k$  для плівки необхідно вказати загальну залежність цих величин від довжини хвилі. Ця залежність визначається типом матеріалу, що вимірюється. Наприклад, ізолятори, напівпровідники і метали мають унікальний тип залежності  $n$  і  $k$  від довжини хвилі. Десятки моделей для цих різних залежностей були запропоновані і використані протягом багатьох років. FILMeasure використовує декілька найбільш універсальних і прийнятних з цих моделей. Для ізоляторів використовується модель Коші, для напівпровідників - аморфна модель або модель Моста-Лоренца, а для металів - модель Друде. Існує також низка спеціальних моделей для конкретних застосувань. Ці моделі та значення початкових коефіцієнтів вибираються автоматично, коли матеріал вибирається зі списку Material у діалоговому вікні Edit Recipe

Опція FFT у випадаючому списку товщини є альтернативною опцією, яка дозволяє FILMeasure вибрати початкову товщину для аналізу. Метод перетворення Фур'є аналізує коливання, присутні в спектрі, і визначає товщину плівки на основі періодичності цих коливань. Він дещо менш надійний, ніж метод сітки, але краще знаходить правильну товщину у випадках, коли форма початкового теоретичного спектра відрізняється від виміряних даних (тобто, спектр відбиття є неідеальним) або у випадках, коли вимірюється більш ніж одна товщина плівки.

Як вже було описано вище, існує декілька методів, які FILMeasure може використовувати для визначення товщини. Жоден з них не є досконалим - кожен з них є компромісом між швидкістю, точністю і надійністю (тобто здатністю знайти найкраще рішення серед багатьох майже однаково хороших). Оскільки товщина може змінюватися на багато порядків і існує багато наближених розв'язків, часто краще використовувати дуже надійний метод, щоб наблизитися до найкращого розв'язку, а потім дозволити більш точному методу взяти верх. Одним з дуже надійних методів є метод сітки, який можна активувати, вибравши опцію Сітка у випадаючому списку товщини. Метод сітки перебирає весь допустимий діапазон товщин (визначений початковим припущенням і

обмеженнями), щоб знайти найкращу початкову товщину. Однак, на деяких дуже складних багат шарових спектрах метод сітки може заплутатися і дати неправильну відповідь. У таких випадках краще використовувати метод перетворення Фур'є для визначення початкових товщин або вводити їх вручну.

Загалом, Filmetrics F20 має низку переваг:

- Висока точність: Прилад забезпечує високу точність вимірювання товщини покриття та інших оптичних властивостей шарів.

- Широкий діапазон вимірювань: Filmetrics F20 може вимірювати товщину шарів у широкому діапазоні, що дозволяє застосовувати його для різних видів матеріалів та застосувань.

- Швидкість вимірювання: Прилад здатний проводити вимірювання досить швидко, що дозволяє ефективно використовувати його в промислових умовах.

- Недеструктивність: Filmetrics F20 використовує недеструктивний метод вимірювання, тобто не пошкоджує випробовувані зразки.

- Простота використання: Прилад має зручний інтерфейс та просту у використанні програмне забезпечення.

Але незважаючи на всі переваги, також є низка недоліків:

- Залежність від властивостей матеріалу: Результати вимірювань можуть бути вплинуті властивостями матеріалу, такими як прозорість та інші оптичні властивості.

- Обмеження по товщині: Існує обмеження по товщині покриття, яке можна виміряти за допомогою цього приладу.

- Необхідність калібрування: Прилад потребує періодичного калібрування для забезпечення точності вимірювань.

- Вартість: Filmetrics F20 має високу вартість, що робить його менш доступним для деяких користувачів.

І основним недоліком для нас знову ж таки є його вартість, та вартість створення приладу з аналогічним методом вимірювання товщини, тому цей варіант нам також не підходить.

### 1.3 Вимірювання товщини діелектричних плівок методом подряпини

Метод подряпини для вимірювання товщини діелектричного покриття є простим та досить поширеним способом визначення товщини тонких плівок. Основна ідея полягає в тому, що після того, як покриття нанесено на підкладку або поверхню, на нього наносяться подряпини або жорсткість, наприклад, за допомогою різця чи іншого інструменту.

Після створення подряпини на поверхні покриття можна виміряти глибину цієї подряпини, що дозволить визначити товщину діелектричного покриття. Глибина подряпини зазвичай визначається за допомогою мікроскопа або іншого вимірювального обладнання з високою точністю.

Перевагами цього методу є простота та доступність використання, а також можливість вимірювати товщину плівки без спеціалізованого обладнання. Однак його недоліком є те, що він може бути менш точним порівняно з більш складними та точними методами, такими як метод інтерференції, а також потенційна можливість пошкодження досліджуваного матеріалу під час створення подряпини.

Формули для розрахунку товщини покриття:

$$d = h + r, \quad (1.3)$$

де  $d$  - товщина покриття;  
 $h$  - глибина подряпини;  
 $r$  - радіус закруглення гострого інструмента.

Для подряпин, нанесених під кутом  $90^\circ$ :

$$D = h + r / \cos(\theta), \quad (1.4)$$

де  $\theta$  - кут нахилу інструмента.

Для подряпин, нанесених під кутом  $45^\circ$ :

$$d = h + r / \sqrt{2}. \quad (1.5)$$

Оскільки неозброєним оком точно виміряти товщину подряпини неможливо, тому для цієї задачі необхідно використовувати спеціальне обладнання, як наприклад мікроскоп з профілометром. За зразок візьмемо оптичний профілометр WYKO NT9100 (рис.1.11 та рис.1.12).



Рисунок 1.11 - Оптичний профілометр WYKO NT9100

Wyko NT9100 Optical Profiling System - це прилад, який використовує оптичні методи для вимірювання профілю поверхні зразка. Основний принцип його роботи полягає в скануванні поверхні з використанням лазерного світла та аналізі відбитого від неї світла для отримання високоякісних даних про мікроструктуру та геометрію поверхні.

Для вимірювання подряпини за допомогою Wyko NT9100, процедура виглядає наступним чином:

- Підготовка зразка: Зразок, на якому потрібно вимірювати товщину плівки, очищається від бруду та інших домішок, щоб забезпечити точність вимірювань.

- Нанесення подряпини: На поверхню зразка наноситься мікроскопічна

подряпина за допомогою механічного або лазерного засобу. Ця подряпина може мати відомі розміри та глибину.

- Розміщення зразка на приладі: Зразок розміщується на столі приладу Wyko NT9100.

- Проведення сканування: Починається процес сканування поверхні зразка. Лазерне світло освітлює поверхню, після чого відбите світло збирається об'єктивом та реєструється детектором.

- Аналіз даних: Отримані дані профілю поверхні аналізуються та обробляються для визначення параметрів подряпини та товщини плівки.

- Отримання результатів: Результати вимірювання можуть бути представлені у вигляді зображень, графіків або числових значень, які вказують на глибину та розміри подряпини, а також товщину діелектричної плівки.

#### SPECIFICATIONS

Measurement Capability	Non-contact, three-dimensional, topography and film thickness
Objectives	1.5X, 2.5X, 5X, 10X, 20X, 50X for magnifications from 0.75X to 100X; Long working distance objectives available; Optional motorized turret; Optional Through Transmissive Media objectives
Field-of-View Multipliers	0.55X, 0.75X, 1X, 1.5X, 2X
Measurement Array	640 x 480, non-interlaced; Optional 1392 x 1040 camera
Light Source Optical Assembly	Long-lifetime green and white LEDs Dual LED illuminator; Three-position FOV turret, closed-loop, 10mm scan
Stages	Automated 100mm Z-axis; ±6° tip/tilt stage; 100mm XY manual stage, standard; 150mm XY auto stage, optional
Computer System Software	Latest Dell® with 24/7 support line; Vision running under Microsoft® Windows XP® Professional; Production mode, built-in databasing with pass/fail for any parameter; Optional Stitching, MATLAB/TCPIP, Film Analysis, Optical Analysis, and SureVision

Vertical Measurement Range	0.1nm to 10mm std.
Vertical Resolution <sup>1</sup>	<0.1nm
RMS Repeatability <sup>2</sup>	0.05nm
Vertical Scan Speed	User-selectable up to 24µm/sec
Lateral Spatial Sampling	0.1 to 13.2µm (≤160nm with high resolution camera)
Optical Resolution <sup>3</sup>	0.49µm min.
Field-of-View	7.68 x 5.76mm max, 0.06 x 0.05mm min with std-resolution camera; 7.84 x 5.87mm max, 0.09 x 0.07 min with high-res camera;
Reflectivity	<1 to 100%
Step Height	0.8% accuracy; <0.1% at 1σ repeatability
Profiler Footprint	320mm W x 510mm D x 645mm H; 70kg (excluding peripheral electronics and air table)
Certification	CE, NRTL

Рисунок 1.12 – Характеристики оптичного профілометра WYKO NT9100

Це прилад, з використанням методу подряпини, для вимірювання товщини діелектричних покриттів має низку переваг, але з цим методом вимірювання нас цікавлять в першу чергу недоліки:

- Висока вартість: Прилад має доволі високу вартість, що робить його менш доступним для деяких користувачів або лабораторій.

- Складність використання: Незважаючи на те, що він має високу точність, використання приладу може вимагати певного рівня навичок та підготовки для ефективного використання.

- Залежність від умов вимірювання: Результати вимірювань можуть бути вплинуті різними факторами, такими як стан поверхні зразка, температура та вологість.

Та найбільший з недоліків методу вимірювання товщини методом подряпини за допомогою пристроїв, таких як Wyko NT9100 Optical Profiling System, полягає у його деструктивності, що робить цей метод кінцево не релевантним для нас. Під час вимірювання на поверхню досліджуваного зразка

наноситься мікроподряпина, яка може пошкодити або змінити властивості плівки. Це особливо важливо в тих випадках, коли досліджується цінний чи неповторний зразок, або коли необхідно проводити багаторазові вимірювання на тому ж зразку.

Деструктивний характер методу може ускладнювати дослідження, оскільки вимірювання може призвести до неповернених змін у структурі та властивостях плівки. Крім того, такий підхід може бути неприйнятним у випадках, коли потрібно зберегти цілісність та невторчаність зразка, наприклад, у випадках, коли він використовується у подальших дослідженнях чи застосуваннях.

#### **1.4 Вимірювання товщини діелектричних плівок методом рентгенівської флуоресценції**

Метод вимірювання товщини діелектричних матеріалів за допомогою рентгенівської флуоресценції є одним зі способів неруйнівного контролю товщини плівок та шарів матеріалів. Основна ідея полягає в тому, що коли рентгенівське випромінювання падає на досліджуваний матеріал, атоми цього матеріалу реагують на це і випромінюють своє власне випромінювання, яке називається рентгенівською флуоресценцією.

Коли рентгенівське проміння попадає на атоми матеріалу, частинка проміння збуджує атоми, і вони відповідають, випромінюючи власне випромінювання. Цей випромінювальний спектр може містити інформацію про елементний склад та структуру матеріалу. Крім того, він може змінюватися залежно від товщини шару матеріалу, через який проходить рентгенівське проміння.

Таким чином, шляхом аналізу рентгенівського випромінювання можна отримати інформацію про товщину діелектричного покриття чи плівки. Для цього проводиться вимірювання і аналіз спектра рентгенівської флуоресценції, що відбувається за допомогою спеціалізованого обладнання, такого як рентгеновський спектрометр. Цей аналіз дозволяє визначити товщину покриття

на основі властивостей рентгенівського випромінювання.

Цей метод дозволяє виміряти товщину плівок та покриттів з високою точністю та непошкоджуючим способом, що робить його важливим інструментом у багатьох галузях, таких як електроніка, металургія, медицина та інші. Однак для його застосування потрібне спеціалізоване обладнання та кваліфікований персонал для аналізу отриманих даних.

Формула для розрахунку товщини покриття:

$$d = (I_c - I_b) / (k * \mu_c * \rho_c), \quad (1.6)$$

де  $d$  - товщина покриття;

$I_c$  - інтенсивність флуоресцентного випромінювання від покриття;

$I_b$  - інтенсивність флуоресцентного випромінювання від підкладки;

$k$  – константа;

$\mu_c$  - масовий коефіцієнт поглинання рентгенівського випромінювання покриття;

$\rho_c$  - щільність покриття.

Формула для розрахунку масового коефіцієнта поглинання:

$$\mu = \rho * \sigma / Z, \quad (1.7)$$

де  $\mu$  - масовий коефіцієнт поглинання;

$\rho$  - щільність матеріалу;

$\sigma$  - атомний коефіцієнт поглинання;

$Z$  - атомний номер елемента.

За приклад приладу, який використовує метод рентгенівської флуоресценції (XRF) ми візьмемо S1 TITAN від компанії Bruker (рис.1.13 та рис.1.14).



Рисунок 1.13 – Портативний XRF аналізатор Bruker S1 TITAN

Принцип роботи Bruker S1 TITAN полягає в використанні рентгенівської флуоресценції для вимірювання товщини діелектричних плівок (рис.1.15, рис.1.16 та рис.1.17). Прилад генерує рентгенівське випромінювання, яке направляється на досліджуваний зразок. Коли це випромінювання взаємодіє з атомами у зразку, воно викликає випромінювання флуоресцентного випромінювання, яке має характеристичні енергії для кожного хімічного елементу. Bruker S1 TITAN реєструє ці енергії флуоресцентного випромінювання і використовує їх для визначення складу матеріалу та товщини його плівок. Таким чином, прилад дозволяє швидко та неруйнівно визначати товщину діелектричних плівок на місці без необхідності спеціальної підготовки зразків.

Як працює неруйнівний рентгенівський аналіз для аналізу покриттів Bruker S1 TITAN.

1. Рентгенівські промені від первинного джерела можуть проникати і збуджувати речовину.

2. Рентгенівські промені ослаблюються характерними способами, проходячи через речовину.

3. Сигнали від основного матеріалу і покритого шару можуть бути виявлені одночасно.

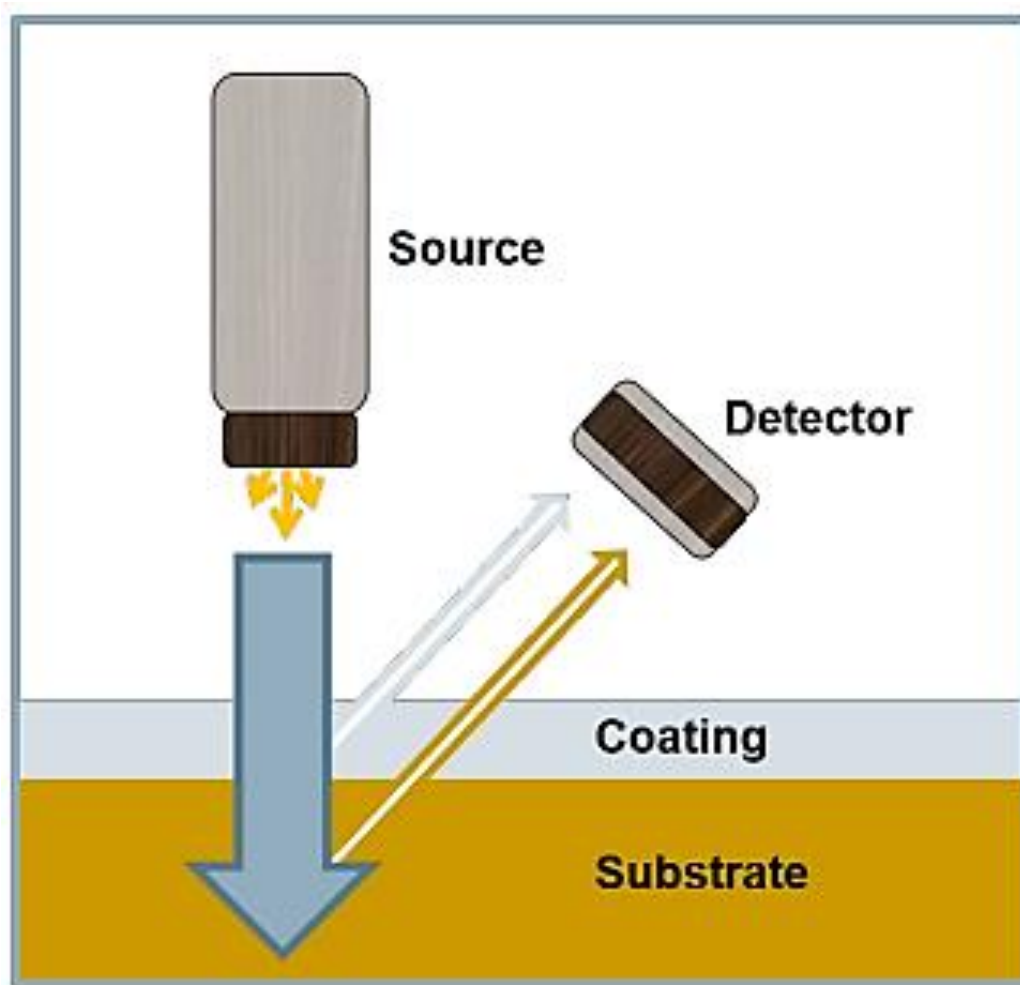


Рисунок 1.14 – Принцип роботи XRF аналізатора

4. Сила сигналу використовується для визначення товщини покриття.
5. Друге зчитування визначає товщину основи.
6. Калібрування з відмінною кореляцією можуть бути попередньо завантажені на S1 TITAN для точних і повторюваних вимірювань покриття.

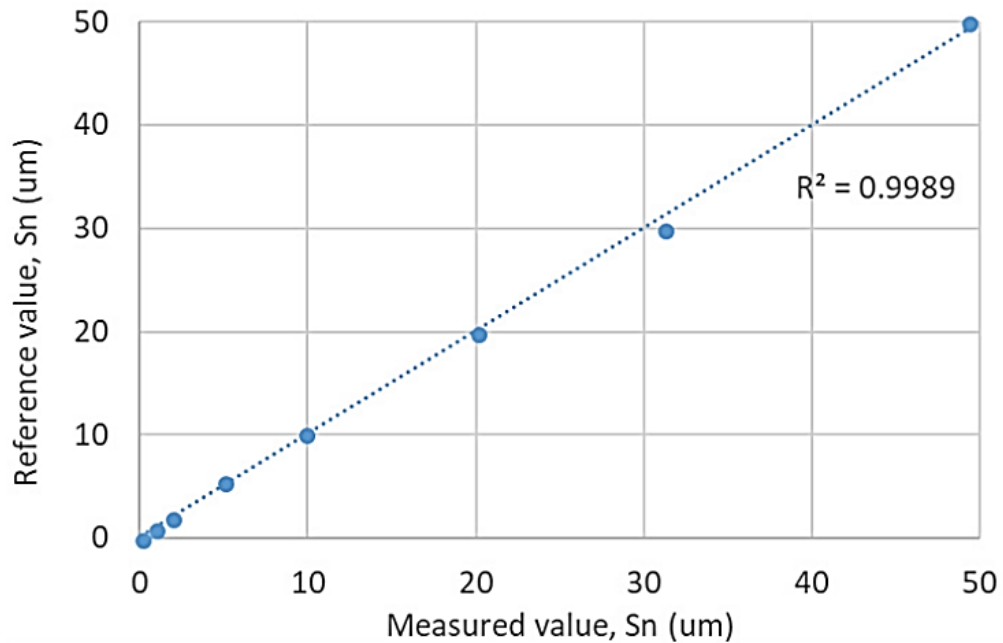


Рисунок 1.15 - Точність вимірювання покриття для 60 вимірювань

Measurement	Sn, $\mu\text{m}$
1	10.01
2	10.07
3	10.06
4	9.99
5	9.94
6	10.06
7	10.05
8	10.07
9	10.00
10	10.05
<b>Average, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>10.03</b>
<b>STDEV, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.04</b>

Рисунок 1.16 - Збіжність результатів для 15 вимірювань покриття

Сам прилад з цим методом має низку переваг, серед яких:

1. Портативність: Прилад є портативним, що дозволяє проводити вимірювання на місці, навіть у важкодоступних місцях.
2. Швидкість вимірювання: Вимірювання здійснюється швидко, що

дозволяє ефективно виконувати завдання контролю якості та досліджень.

3. Необхідність мінімальної підготовки зразків: Для вимірювання не потрібна спеціальна підготовка зразків, що зберігає час та зусилля оператора.

4. Неруйнівність вимірювань: Вимірювання здійснюються неруйнівно, що означає, що зразок не пошкоджується під час аналізу.

5. Можливість широкого застосування: Портативні XRF аналізатори можуть бути використані для аналізу різних типів матеріалів та зразків, що робить їх корисними для різноманітних застосувань у виробництві, лабораторіях та на місці роботи.

Але і також низку недоліків:

1. Обмеженість глибини проникнення: Рентгенівське випромінювання може бути обмеженим в глибину проникнення, що може ускладнити вимірювання товщини плівок, особливо якщо вони мають значну товщину.

2. Залежність від складу матеріалу: Точність вимірювання може залежати від хімічного складу та структури матеріалу, що може призвести до неточних результатів для певних типів діелектричних плівок.

3. Необхідність калібрування: Прилад може потребувати періодичного калібрування для забезпечення точності вимірювань, що може бути часо- та ресурсомістким процесом.

4. Вплив зовнішніх умов: Деякі зовнішні фактори, такі як шуми від інших джерел рентгенівського випромінювання або зміни у середовищі вимірювання, можуть впливати на точність та надійність вимірювань.

5. Вартість та обслуговування: Портативні XRF аналізатори, такі як Bruker S1 TITAN, можуть бути відносно дорогими у придбанні та обслуговуванні, що може бути обмеженням для деяких користувачів або організацій.

Сукупність цих недоліків робить його також не релевантним для нас, як і сам метод. Саме тому ми зробимо наш прилад для вимірювання товщини діелектричного покриття який буде працювати за ємнісним методом

	S1 TITAN 800	S1 TITAN 500	S1 TITAN 500S
<b>Detection</b>	Graphene window silicon drift detector (SDD), 20 mm <sup>2</sup> detector area, typical resolution < 145 eV at 450,000 cps including Detector Shield™		
<b>Excitation</b>	Rh target tube, 4 W, 6 - 50 kV, 5 - 200 μA	Rh target tube, 2 W, 15 - 40 kV, 5 - 100 μA	Rh target tube, 2 W, 15 - 29 kV, 5 - 100 μA
<b>Collimator (Spot size)</b>	8 mm, 5 mm or 3 mm	8 mm	8 mm
<b>Filter</b>	5-position automatic filter changer	fixed Al/Ti filter	no filter
<b>Elemental range</b>	Mg - U	S - U	Mg - U
<b>Color CMOS Camera</b>	optional (640 x 480 pixels)		
<b>Dimensions</b>	L x W x H: 25 cm x 28 cm x 9 cm (10 in x 11 in x 3.7 in)		
<b>Weight</b>	approx. 1.5 kg (3.3 lbs) including battery		
<b>Display</b>	9.4 cm (3.7 in), LCD (TFT active matrix), 640 x 480 pixels, 64k color, resistive touchscreen		
<b>Testing Modes</b>	Assay, Grade ID, Grade Pass/Fail, Limit testing		
<b>Power</b>	Li-Ion battery (7.2 V nominal), Battery charger, AC adapter (9 V DC @ 3 A)		
<b>System safety</b>	Password protection, no sample (backscatter) shutoff, IR proximity sensor		
<b>Optional accessories</b>	<p>There are a variety of optional accessories available for the S1 TITAN. Please refer to the S1 TITAN Accessories brochure for complete details.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Benchtop stand with full safety interlock</li> <li>■ Portable desktop stand (small samples)</li> <li>■ Barcode scanner</li> <li>■ Mobile printer</li> <li>■ GPS receiver</li> <li>■ Laptop kit</li> <li>■ Field geo sample preparation kit</li> <li>■ Alloy check sample kit</li> <li>■ Weld adapter</li> <li>■ Belt holster</li> </ul>		

Рисунок 1.17 – Характеристики приладів лінійки S1 TITAN компанії Bruker

## Висновки до розділу 1

У розділі був проведений аналіз методів та засобів вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів, а саме: методу сканування довжини оптичної хвилі; методу інтерференції; методу нанесення подряпини; методу рентгенівської флуоресценції. За допомогою запропонованих методів та засобів сьогодні можна вимірювати товщину покриття різних діелектричних матеріалів, але більш доцільно на виробництві для реалізації моніторингу вимірювального параметру використовувати саме ємнісний різницевий метод. Запропонований метод дозволяє оперативно вимірювати товщину покриття на поверхні різних плівок, пропускаючи їх через ємнісний перетворювач, і не вимагає складного налаштування приладів та системи, що може бути необхідним для реалізації вимірювання в режимі реального часу на виробництві.

## Розділ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ МАТЕРІАЛІВ ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ

### 2.1 Спосіб вимірювання товщини покриття матеріалів

Запропонований метод вимірювання товщини покриття матеріалу передбачає використання змінного конденсатора для визначення ємності між його пластинами. Потім виміряну ємність конденсатора пов'язують з товщиною покриття матеріалу. Однак безпосереднє вимірювання товщини покриття за допомогою ємнісного методу неможливе через наявність матеріалу під покриттям. Товщина покриття знаходиться в діапазоні від 0,050 до 0,350 мм. Тому вимірювання товщини можна здійснити за такою послідовністю дій:

- спочатку вимірюється загальна товщина матеріалу разом з покриттям  $h$ ;
- потім вимірюється товщина матеріалу без покриття  $h_m$ ;
- для визначення товщини покриття  $h_n$  використовуємо формулу:  
$$h_n = h - h_m;$$
- для вилучення покриття необхідно просто видалити невеликий фрагмент матеріалу, який потрібний лише для розміщення вимірювального датчика товщини. Це не вплине на загальний відсоток відходів матеріалу;
- для усунення впливу діелектричних властивостей матеріалу на результат вимірювання можна використовувати конденсатор з повітряним середовищем.

### 2.2 Розрахунок параметрів моделі повітряного конденсатора при вимірюванні товщини матеріалу з покриттям

Можна використовувати так званий "плоский" конденсатор для вимірювання. Він складається із двох пластин однакової форми, що знаходяться паралельно одна одній. Можна ігнорувати крайові ефекти.

Ємність  $C$  такого конденсатора можна виразити за допомогою наступної формули:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{h}, \quad (2.1)$$

де  $\varepsilon_0$  - діелектрична проникність вакууму,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ ;  $\varepsilon$  - усереднена діелектрична проникність повітря,  $\varepsilon = 1,00$ ;  $S$  - площа обкладок конденсатора;  $h$  - відстань між обкладками конденсатора. Розрахуємо параметри "плоского" конденсатора.

Електроди "плоского" конденсатора у формі квадрата зі сторонами 0,03 м (30 мм). В такому випадку, площа обкладок конденсатору:

$$S = 0.03 \cdot 0.03 = 0.0009 \text{ м}^2.$$

Звідки отримуємо, що ємність  $C$  конденсатору дорівнює:

$$C = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1.00 \cdot 0.0009}{h},$$

або

$$C = \frac{7.965000 \cdot 10^{-15}}{h}.$$

Отримавши ємність  $C$  конденсатора, ми можемо отримати відстань  $h$  між його обкладками:

$$h = \frac{7.965000 \cdot 10^{-15}}{C}.$$

Тепер обчислимо значення відстані між обкладками конденсатора, що відповідає заданим значенням ємності  $C$  для "плоского" конденсатора. Результати представлені на рисунку 2.1.

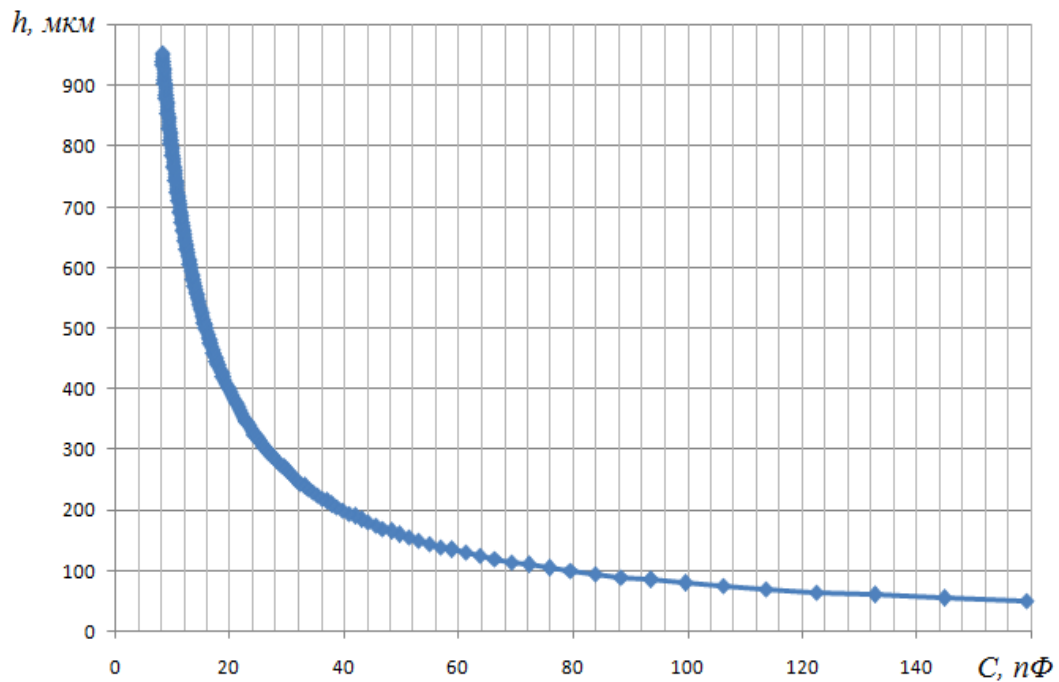


Рисунок 2.1 - Значення залежності відстані  $h$  між обкладинками конденсатора від ємності  $C$  "плоского" конденсатора

В результаті отримуємо, що між ємністю  $C$  "плоского" конденсатора та відстанню між його обкладинками  $h$  існує функціональна залежність, яку можна виразити однозначно.

*Визначення товщини  $h_{M+n}$  матеріалу і покриття.*

Товщину матеріалу і покриття ( $h_{M+n}$ ) можна визначити за формулою

$$h_{M+n} = \frac{7.965000 \cdot 10^{-15}}{C_{M+n}},$$

де  $C_{M+n}$  - ємність "плоского" конденсатора при вимірюванні товщини  $h_{M+n}$  матеріалу і покриття.

*Визначення товщини  $h_M$  матеріалу.*

Товщину  $h_M$  можна визначити за цією за формулою:

$$h_M = \frac{7.965000 \cdot 10^{-15}}{C_M},$$

де  $C_M$  - ємність "плоского" конденсатора при вимірюванні товщини  $h_M$  матеріалу і покриття.

*Визначення товщини  $h_n$  покриття.*

Визначення товщини  $h_n$  відбувається за формулою:

$$h_n = h_{M+n} - h_M. \quad (2.2)$$

### 2.3 Розрахунок параметрів перетворювача вимірювального каналу

Під час вимірювання товщини різних покриттів матеріалів виникла ситуація, коли припущено, що середнє значення діелектричної проникності самого матеріалу дорівнює  $\varepsilon_M \approx 1$  а середнє значення діелектричної проникності покриття матеріалу дорівнює  $\varepsilon_n \approx 1$ . Однак у деяких випадках це припущення не відповідає дійсності, оскільки значення діелектричної проникності може відрізнитися від одиниці, наприклад,  $\varepsilon_M = 1.5$  або  $\varepsilon_M = 1.7$ , що також стосується і  $\varepsilon_n$ .

У зв'язку з цим виникає питання, яким чином потрібно змінити процедуру вимірювання товщини покриття, щоб забезпечити його коректність.

Розглянемо кроки цієї процедури:

1. Потрібно задати конкретне значення  $\varepsilon_M$ , яке можна отримати експериментально або з довідників.

2. Також необхідно задати конкретне значення  $\varepsilon_n$ , яке можна отримати експериментально або з довідників.

3. Відомо, що ємність багатошарового конденсатора визначається за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\varepsilon_i}}, \quad (2.3)$$

де  $S$  - площа пластин;  $h_i$ - товщини  $i$ -го шару діелектрика;  $\varepsilon_i$ -діелектрична проникність  $i$ -го шару діелектрика.

4. Щодо ємності конденсатора без покриття матеріалу, використовується формула:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{h_M}{\varepsilon_M}}. \quad (2.4)$$

5. Для ємності конденсатора з матеріалом із покриттям використовується формула:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{h_M}{\varepsilon_M} + \frac{h_n}{\varepsilon_n}}. \quad (2.5)$$

6. Якщо виразити ємність конденсатора без покриття за допомогою формули (C1)  $h_M$ , отримаємо вираз:

$$h_M = \frac{\varepsilon_M \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{C_1}. \quad (2.6)$$

При розгляді вимірювання товщини покриття матеріалу з урахуванням повітряного прошарку з товщиною  $h_{\text{пов}}$  та діелектричною проникністю  $\varepsilon_{\text{пов}}$ , необхідно пам'ятати про вологість матеріалу, яка може впливати на результати вимірювання. У таких випадках важливо уникати контакту верхньої та нижньої обкладок конденсатора з поверхнями матеріалу або його покриттям.

У попередніх розрахунках використовується формула  $C$  як основа для обчислень. Розглянемо основні параметри цієї формули та перепишемо її в розгорнутому вигляді.

Спочатку перепишемо формулу  $C$  в більш розгорнутому вигляді, а потім зосередимося на основних параметрах, що входять у цю формулу:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{h_{\text{пов}}}{\varepsilon_{\text{пов}}} + \frac{h_M}{\varepsilon_M} + \frac{h_n}{\varepsilon_n}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{h_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n + h_n \varepsilon_M \varepsilon_{\text{пов}}}{\varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n}} = \\ &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n \cdot S}{h_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n + h_n \varepsilon_M \varepsilon_{\text{пов}}} \end{aligned}$$

(2.7)

$$\begin{aligned}
C &= \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{h - (h_M + h_n)}{\varepsilon_{\text{пов}}} + \frac{h_M}{\varepsilon_M} + \frac{h_n}{\varepsilon_n}} = \\
&= \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{(h - (h_M + h_n)) \cdot \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n + h_n \varepsilon_M \varepsilon_{\text{пов}}}{\varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n}} = \\
&= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n \cdot S}{(h - (h_M + h_n)) \cdot \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n + h_n \varepsilon_M \varepsilon_{\text{пов}}} = \\
&= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n \cdot S}{h \varepsilon_M \varepsilon_n - h_M \varepsilon_M \varepsilon_n - h_n \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n + h_n \varepsilon_M \varepsilon_{\text{пов}}} = \\
&= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n \cdot S}{h \varepsilon_M \varepsilon_n - h_M \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n + h_n (\varepsilon_M \varepsilon_{\text{пов}} - \varepsilon_M \varepsilon_n)}.
\end{aligned}$$

Розглянемо обмеження для товщини матеріалу та покриття. Відповідно до технології виробництва, товщина матеріалу  $h_M$  не може перевищувати 2,0 мм. Для діелектричної проникності  $\varepsilon_M$  матеріалу вважаємо, що вона лежить в межах від  $\varepsilon_M = 1,5$  до  $\varepsilon_M = 3,5$ , приймаючи значення  $\varepsilon_M = 2,5$ .

Щодо покриття  $h_n$ , за технологією нанесення воно не може бути товще, ніж 0,1 мм. Для діелектричної проникності покриття вважаємо, що вона лежить в межах від  $\varepsilon_n = 1.2$  до  $\varepsilon_n = 2.2$ , приймаючи значення  $\varepsilon_n = 1.8$ .

Сумарна товщина  $h_{M+n}$  матеріалу і покриття не може перевищувати  $h_{M+n} = 2.1$  мм. Однак для забезпечення запасу можливого збільшення товщини матеріалу і покриття, відстань між обкладинками конденсатора становить  $h = 3.0$  мм, тоді  $h_{M+n} = h_M + h_n = 2,1$  мм з можливим збільшенням товщини  $h_M$  матеріалу і  $h_n$  покриття, так як залишається запас.

Відповідно, товщина  $h_{\text{пов}}$  повітряного прошарку може бути розрахована за формулою:

$$h_{\text{пов}} = h - (h_M + h_n) = 3\text{мм} - (2\text{мм} + 0.1\text{мм}) = 0.9\text{мм}$$

Припустимо, що діелектрична проникність повітряного прошарку  $\varepsilon_{\text{пов}} =$

1.0. Площа пластин конденсатора нехай дорівнює  $S = 100\text{мм} \cdot 100\text{мм} = 10^4\text{мм}^2$ . Товщину пластин конденсатора можна не враховувати, оскільки заряди в конденсаторі розміщуються на внутрішніх поверхнях пластин (негативні заряди притягуються до позитивних зарядів і навпаки).

$$C = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 1.0 \cdot 2.5 \cdot 1.8 \cdot 10^4\text{мм}^2}{3.0\text{мм} \cdot 2.5 \cdot 1.8 - 2.0\text{мм} \cdot 2.5 \cdot 1.8 + 2.0\text{мм} \cdot 1.0 \cdot 1.8 + h_n(2.5 \cdot 1.0 - 2.5 \cdot 1.8)}$$

$$= \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 45000}{8.1 - 2.0 \cdot h_n} = \frac{0.00000039825}{8.1 - 2.0 \cdot h_n}$$

звідки

$$h_n = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_M \varepsilon_n \cdot S}{C} - (h \varepsilon_M \varepsilon_n - h_M \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{\text{пов}} \varepsilon_n)}{\varepsilon_m \varepsilon_{\text{пов}} - \varepsilon_m \varepsilon_n}$$

тоді

$$h_n = \frac{\frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 1.0 \cdot 2.5 \cdot 1.8 \cdot 10^4\text{мм}^2}{C} - (3.0\text{мм} \cdot 2.5 \cdot 1.8 - 2.0\text{мм} \cdot 2.5 \cdot 1.8 + 2.0\text{мм} \cdot 1.0 \cdot 1.8)}{2.5 \cdot 1.0 - 2.5 \cdot 1.8} =$$

$$= \frac{8.1 - 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{45000}{C}}{2.0} = \frac{8.1 - \frac{0.00000039825}{C}}{2.0} =$$

$$= 4.05 - \frac{0.000000199125}{C}.$$

Формули для  $C$  та  $h_n$  можна розглядати як взаємно замінні. Результати розрахунків занесені до таблиці 2.1, та залежність відображено на рисунку 2.2. Отриману характеристику для ємнісного перетворювача можна використовувати для налаштування роботи моделі вимірювального каналу приладу для визначення товщини покриття матеріалів.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків статичної характеристики ємнісного перетворювача

Товщина $h_n$ покриття, мм	Ємність $C$ конденсатора, $n\Phi$
0,010	49,29
0,015	49,35
0,020	49,41
0,025	49,47
0,030	49,53
0,035	49,60
0,040	49,66
0,045	49,72
0,050	49,78
0,055	49,84
0,060	49,91
0,065	49,97
0,070	50,03
0,075	50,09
0,080	50,16
0,085	50,22
0,090	50,28
0,095	50,35
0,100	50,41

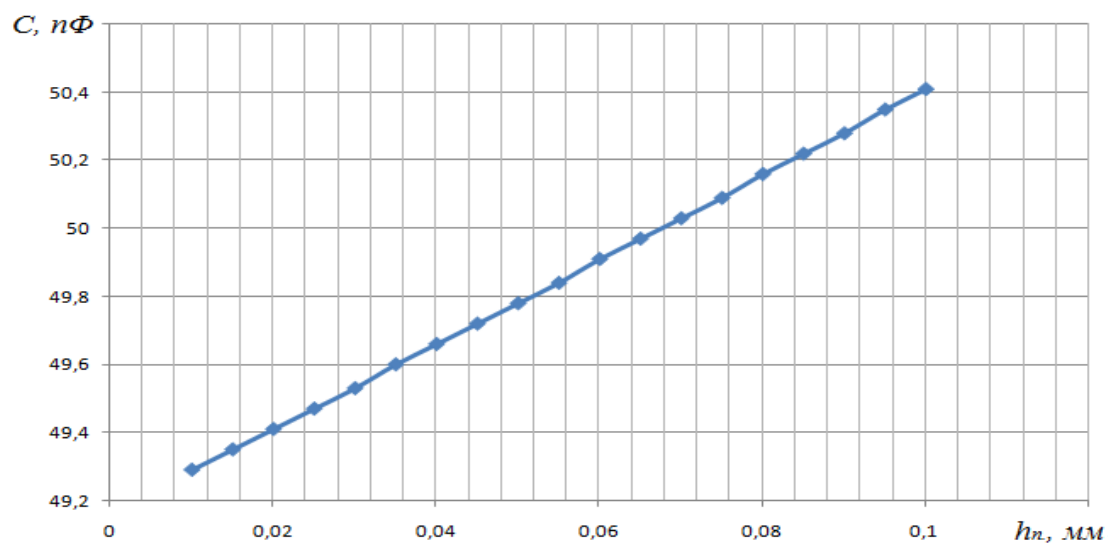


Рисунок 2.2 - Залежність ємності конденсатора від товщини покриття

Як можна побачити з графіку на рисунку 2.2 залежність ємності перетворювача від товщини покриття є лінійною у вимірювальному діапазоні товщин покриття матеріалу та має прямопропорційний характер. Зазначене вказує на те, що для практичної реалізації вимірювального приладу не буде необхідним додаткове налаштування системи для обробки вхідного сигналу з перетворювача після підсилення.

При ймовірнісних щільностях складових похибок, які спричиняються величинами, що входять у вираз (2.7), розподіляються за нормальним законом, то вираз для відносної похибки перетворювача можна подати так:

$$\delta_{h_{п.}} = \frac{\Delta h_{п.}}{h_{п.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mu}{\mu}\right)^2} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

де  $\gamma = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{пов} \varepsilon_M \varepsilon_n \cdot S}{C} - (h \varepsilon_M \varepsilon_n - h_M \varepsilon_M \varepsilon_n + h_M \varepsilon_{пов} \varepsilon_n)$ , а параметр різниці добутків діелектричних проникностей різних середовищ  $\mu = \varepsilon_m \varepsilon_{пов} - \varepsilon_m \varepsilon_n$ .

Як показали дослідження, складові загальної похибки не перевищують:  $\delta_\gamma = (\Delta \gamma / \gamma) \cdot 100\% \leq 3,2\%$ ,  $\delta_\mu = (\Delta \mu / \mu) \cdot 100\% \leq 4,1\%$ , а сама загальна відносна похибка  $\delta_{h_{п.}} = (\Delta h_{п.} / h_{п.}) \cdot 100\% \leq 5,2\%$ .

## Висновки до розділу 2

Запропонований ємнісний різницевий метод вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу. Він передбачає використання змінного конденсатора перетворювача для визначення ємності між його пластинами та опорного каналу, значення напруги з якого повинне відніматися від значення напруги у вимірювальному каналі. Різницю зазначених напруг у кінцевому результаті пов'язують із параметром товщини покриття діелектричного матеріалу.

У розділі також була отримана статична характеристика для ємнісного перетворювача, що буде в подальшій роботі використовуватися для налаштування моделі вимірювального приладу.

### Розділ 3. СТВОРЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 3.1 Створення структурної та електричної схем вимірювального приладу товщини покриття матеріалу

Відповідно до отриманої статичної характеристики ємнісного перетворювача, яка наведена у другому розділі, була розроблена структурна (рис.3.1) та електрична (рис.3.2) схеми приладу для вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу. Якщо розділити загальну схему приладу на менші складові частини, то їх можна показати як: частина 1 - схема аналогова (СА) та частина 2 - схема, до якої підключається СА, представлена мікроконтролером та екраном LCD для виведення вимірювальної інформації у цифровому вигляді. Екран LCD дасть можливість відображати значення вимірюваної величини товщини покриття діелектричного матеріалу в цифровому вигляді, а також відображати оцифровані значення напруг в опорному каналі  $U_0$  та в каналі вимірювальному  $U_1$ .

До СА, у свою чергу, можна віднести наступні структурні частини: первинний перетворювач (ПП) або ємнісний сенсор (ЄС) 1, вторинний перетворювач (ВП) 2, підсилювач напруги 3, детектор (Д) 4, джерело опорної напруги (ДОН) 5, мікроконтролер (МК) 6 та LCD екран 7. До складу МК6 входить модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який оцифровує інформацію, що надходить з двох каналів приладу.

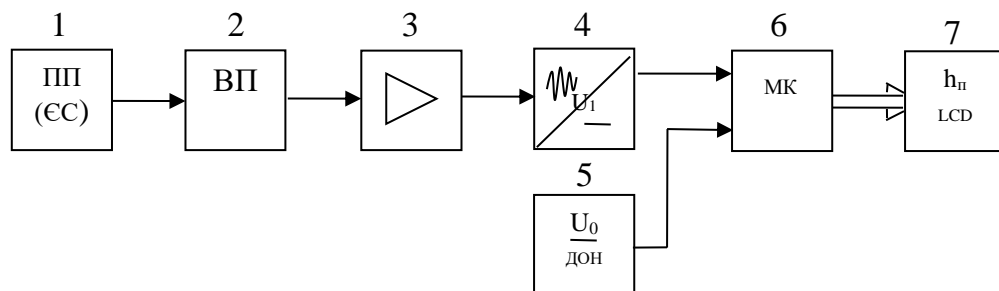


Рисунок 3.1 - Структурна схема цифрового вимірювального приладу  
товщини покриття матеріалу

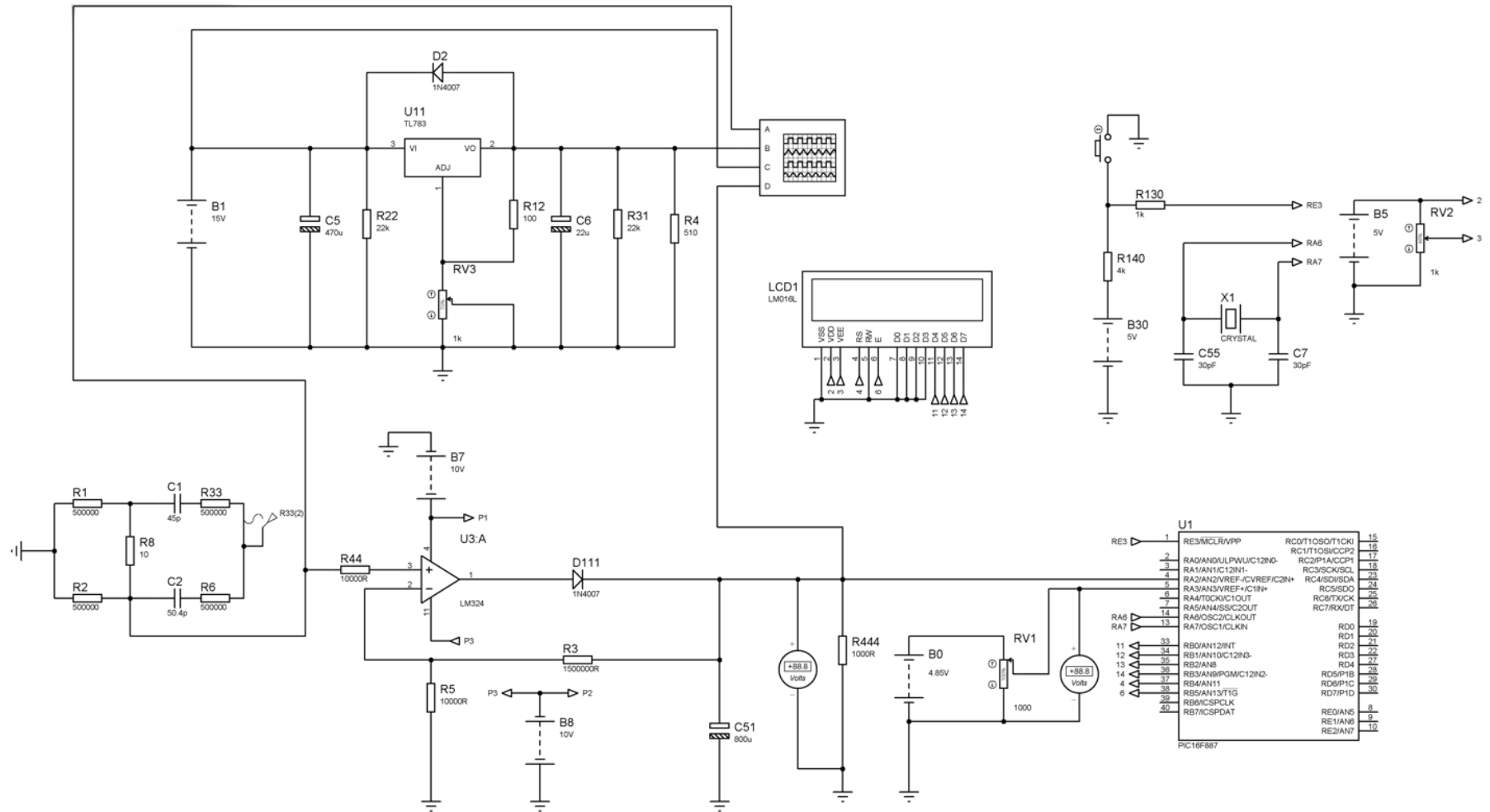


Рисунок 3.2 – Спрощена електрична схема цифрового вимірювального приладу товщини покриття діелектричного матеріалу

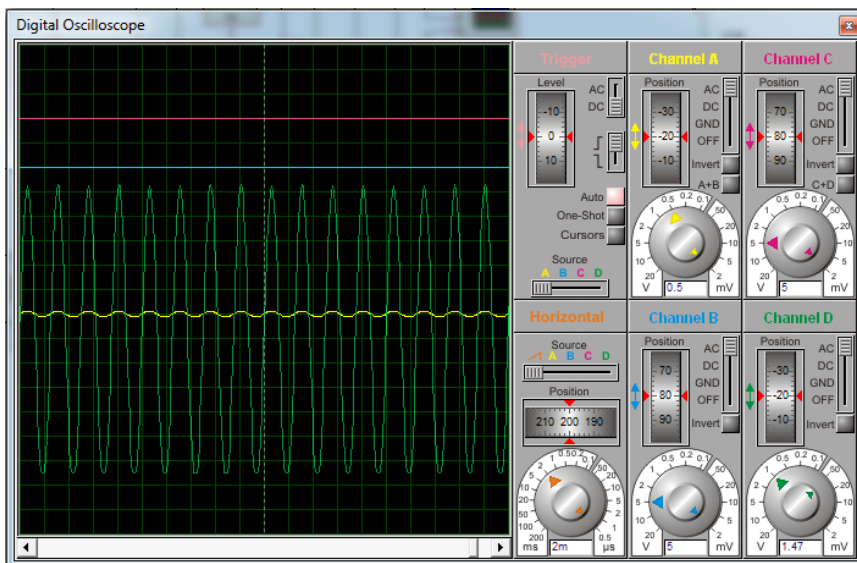
### 3.2 Опис роботи вимірювальної схеми приладу

Цифровий вимірювальний прилад буде працювати наступним чином.

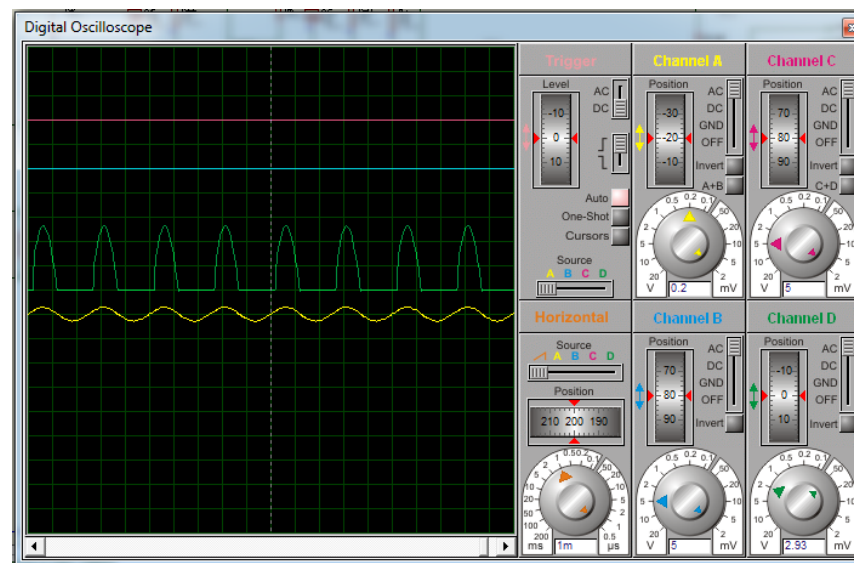
*ПП1* включається в схему *ВП2*, яка живиться змінною напругою, цей перетворювач створює у своїй вимірювальній діагоналі невелику змінну напругу, яка буде змінюватися пропорційно до значення товщини матеріалу з покриттям разом. Утворена змінна напруга з виходу *ВП2* надходить до підсилювача 3, що підсилює її (рис.3.3,а). Далі діод *D111* з *D4* пропускає тільки додатню напівхвилю вимірювального сигналу (рис.3.3,б), а конденсатор *C51* перетворює цю напругу в однополярну постійну напругу (рис.3.3,в). Після цього вона надходить на один аналоговий вхід *МК6*, на другий його аналоговий вхід подається постійна напруга з *ДОН5* опорного каналу приладу, що відповідає пропорційно величині товщини самого матеріалу без покриття. Напругу на *ДОН5* визначають як напругу, яка утворюється у вимірювальному каналі при поміщенні між пластинами *ПП1* діелектричного матеріалу, що контролюється без нанесеного покриття.

Внутрішнім модулем *АЦП МК6* відбувається оцифровка виміряних значень напруг з опорного каналу  $U_0$  (напруга з *ДОН5*) та з вимірювального каналу  $U_1$ . Далі ці значення виводяться у цифровому вигляді на LCD екран для можливості налаштування вимірювального приладу перед початком роботи під різний діелектричний матеріал, а вже потім з отриманих цифрових кодів, які відповідають напругам з каналів приладу, визначається їх різниця, що буде пропорційною товщині покриття діелектричного матеріалу. Товщина покриття матеріалу також виводиться на LCD екран приладу після кожного вимірювання. Напруга вимірювального сигналу підсилюється підсилювачем 3 так, щоб різниця напруг  $U_1 - U_0$  відповідала чисельно товщині покриття матеріалу без введення у формулу перетворення в *МК6* додаткового коефіцієнта множення.

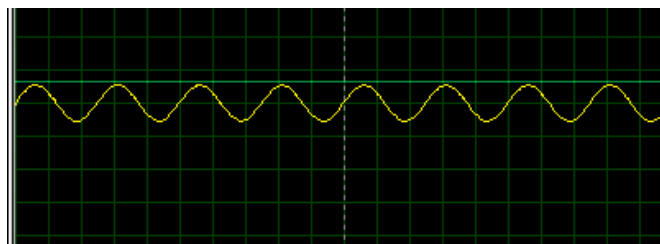
Таким чином, у ході симуляції роботи розробленої схеми приладу на рис.3.4, рис.3.6, рис.3.8 показані напруги каналів для трьох точок статичної характеристики, отриманої в розділі 2, а товщина відповідного їм покриття діелектричного матеріалу показана на рис.3.5, рис.3.7 та рис.3.9.



а



б



в

Рисунок 3.3 – Покрокове перетворення вимірювального сигналу в частині СА приладу

а – підсилення вимірювального сигналу змінної напруги;

б – пропускання додатної напівхвилі вимірювального сигналу змінної напруги після підсилення;

в – перетворення в однополярну напругу  $U_1$  вимірювального сигналу після пропускання додатної напівхвилі



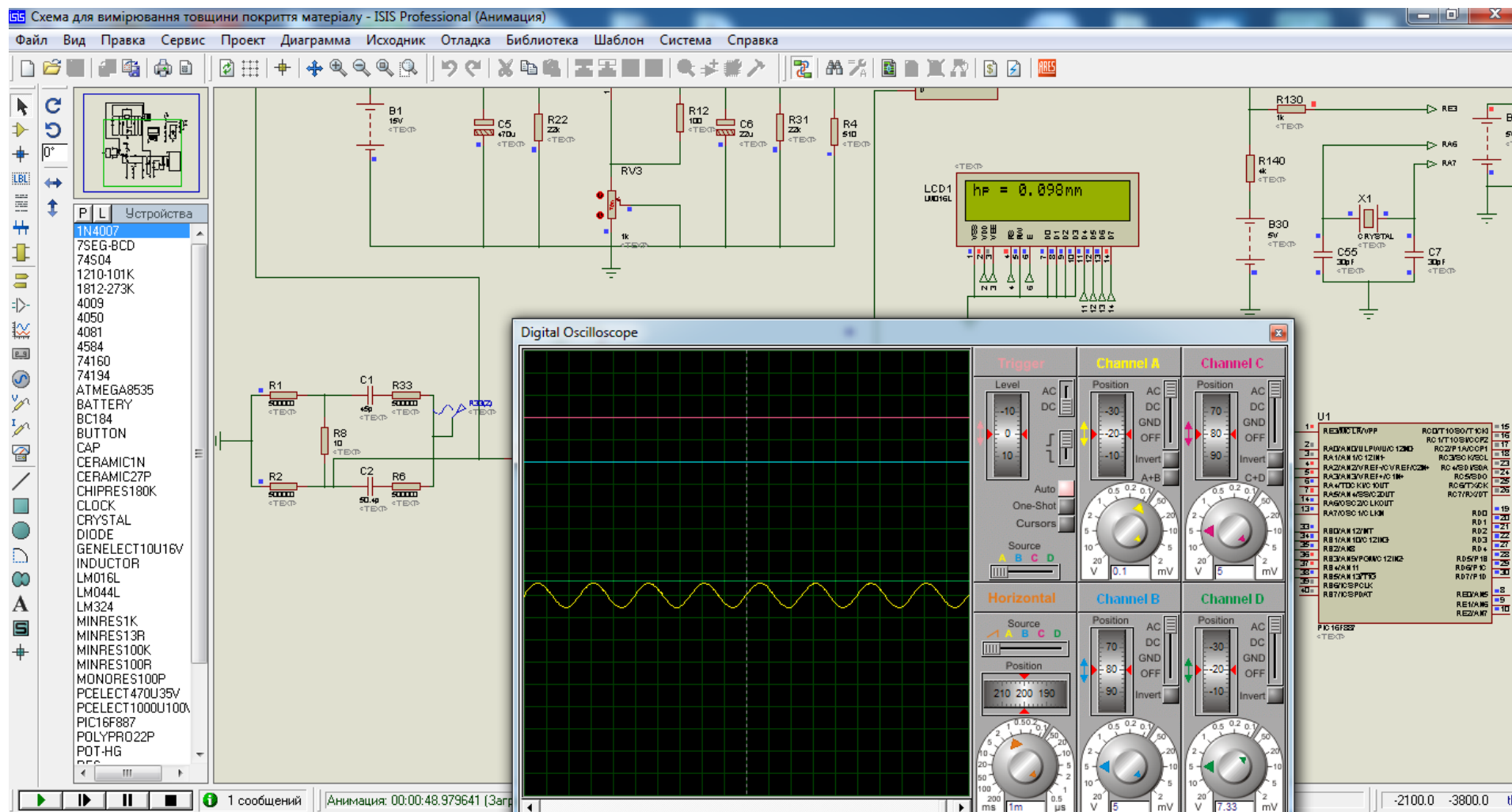


Рисунок 3.5 – Виведення на LCD екран приладу товщини покриття діелектричного матеріалу ( $h_{п.} = 98 \text{ мкм}$ , ємність перетворювача  $C = 50,4 \text{ нФ}$  для вимірювального каналу згідно статичної характеристики на рис.2.2)

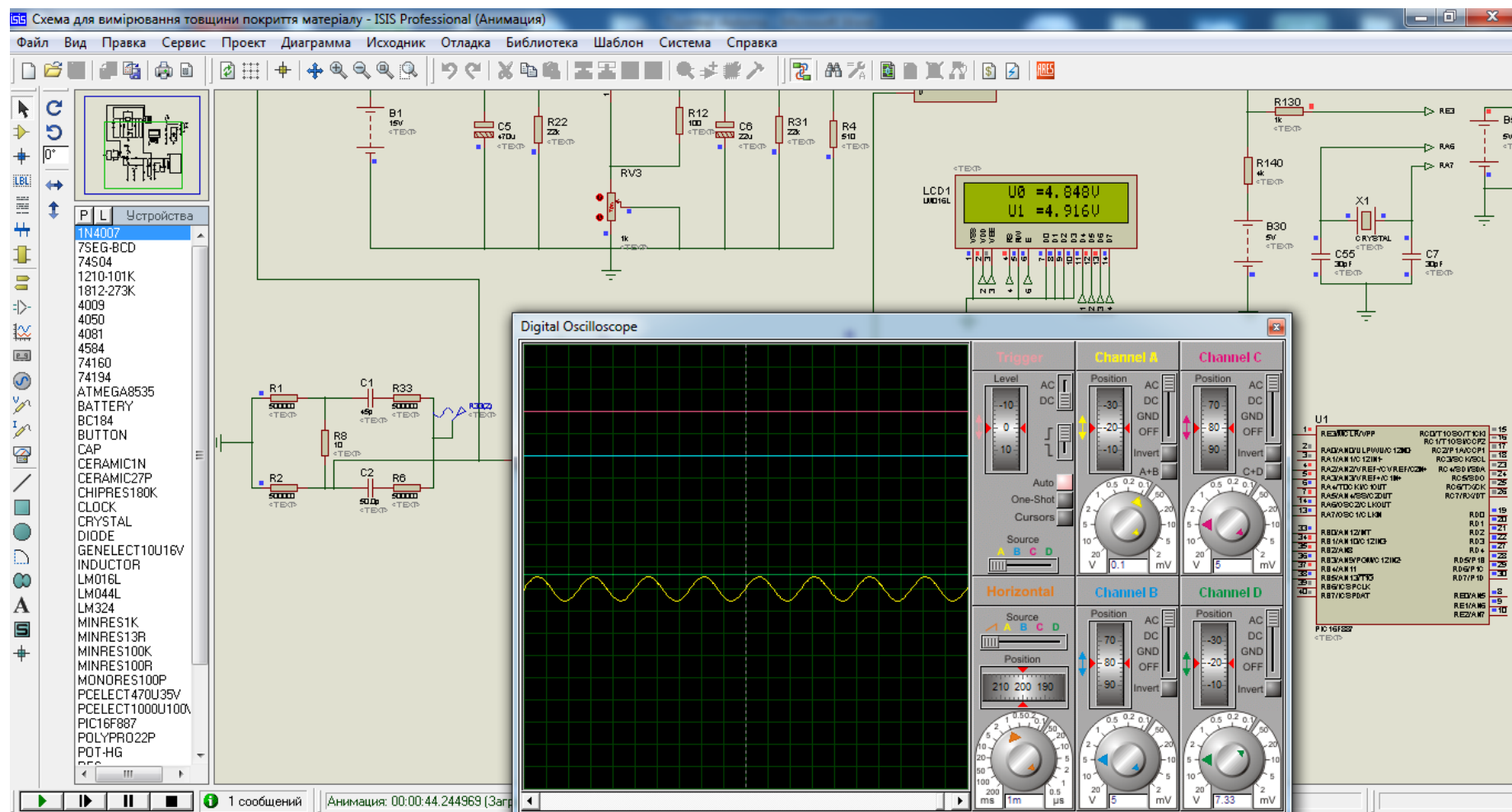
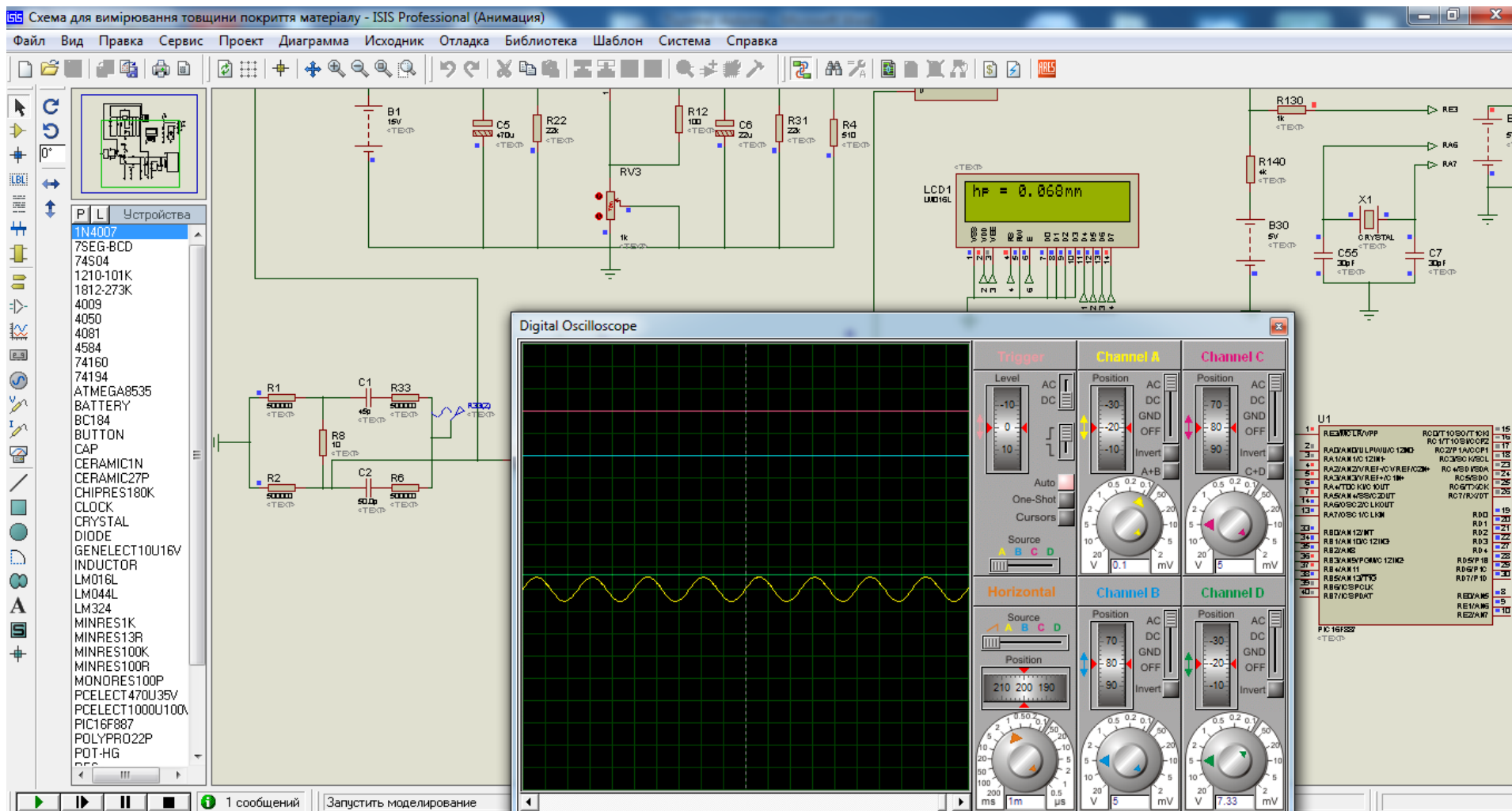


Рисунок 3.6 – Вихідні напруги  $U_0 = 4,848 V$ ,  $U_1 = 4,916 V$  опорного та вимірювального каналів виведених на LCD екран, які відповідають товщині матеріалу без покриття та товщині матеріалу з покриттям (при  $h_n = 68 \text{ мкм}$  та при ємності перетворювача  $C = 50,0 \text{ нФ}$  для вимірювального каналу згідно статичної характеристики на рис.2.2)



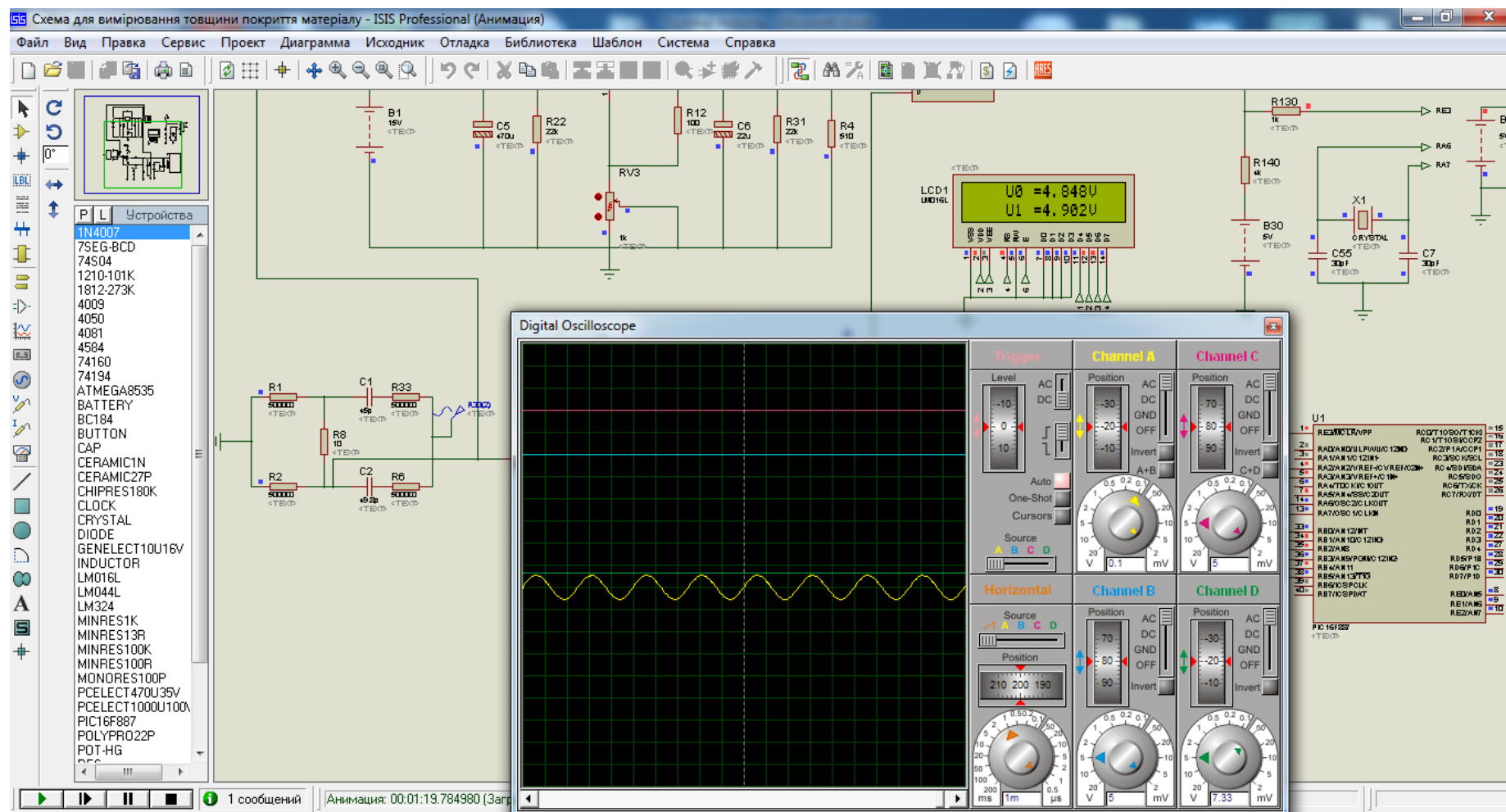


Рисунок 3.8 – Вихідні напруги  $U_0 = 4,848 V$ ,  $U_1 = 4,902 V$  опорного та вимірювального каналів виведених на LCD екран, які відповідають товщині матеріалу без покриття та товщині матеріалу з покриттям (при  $h_n = 54 \text{ мкм}$  та при ємності перетворювача  $C = 49,8 \text{ нФ}$  для вимірювального каналу згідно статичної характеристики на рис.2.2)

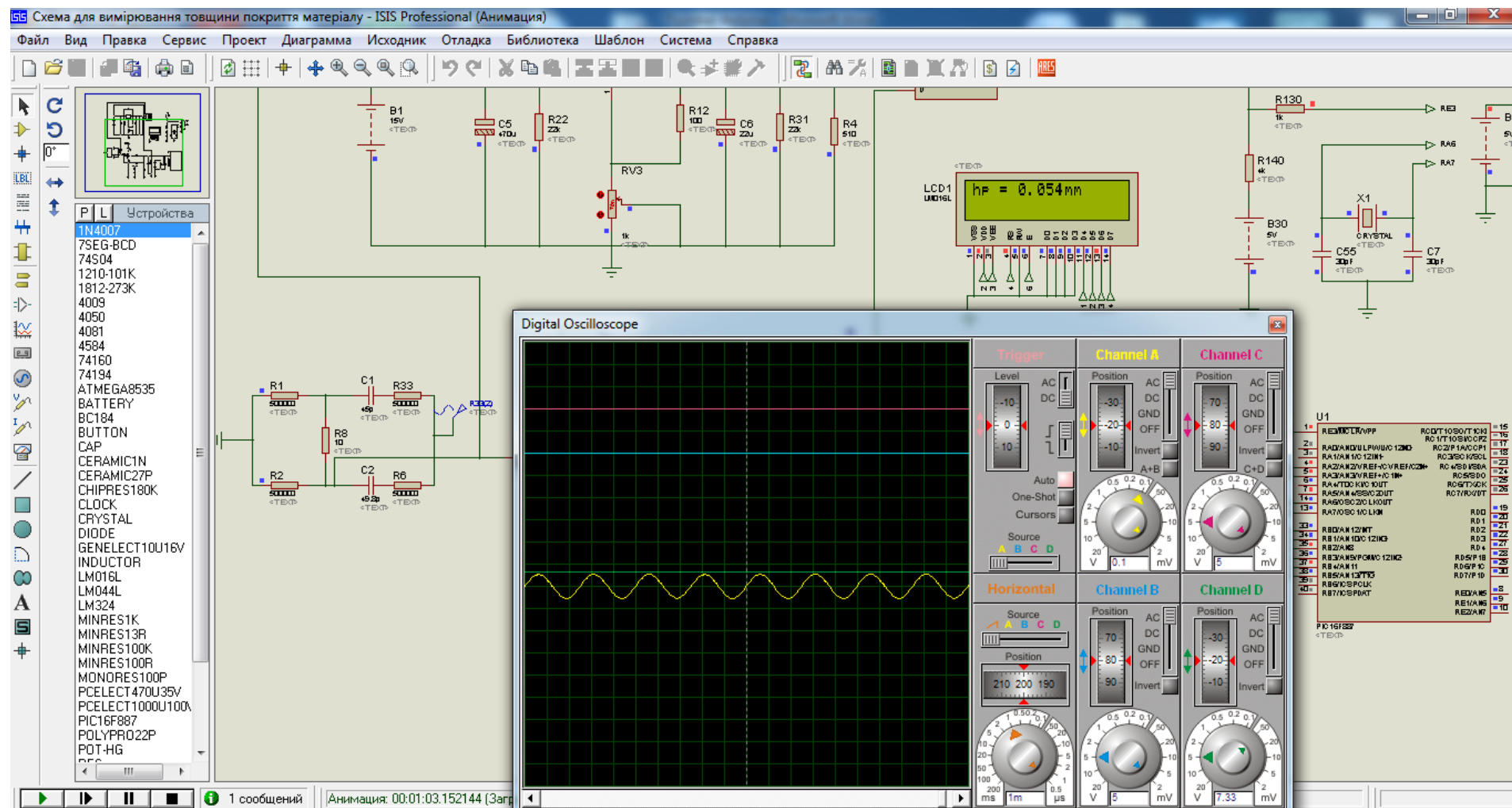


Рисунок 3.9 – Виведення на LCD екран приладу товщини покриття діелектричного матеріалу ( $h_{п.} = 54 \text{ мкм}$ , ємність перетворювача  $C = 49,8 \text{ нФ}$  для вимірювального каналу згідно статичної характеристики на рис.2.2)

Симуляція роботи розробленого приладу показала відповідність значень моделі схеми розрахунковим її значенням. Вихідний код, який відповідає відніманню напруг  $U_1-U_0$  записувався та проходив обробку в МКБ відповідно до тестової програми, яка показана нижче.

### **Тестова програма мікроконтролера вимірювального приладу**

```
sbit LCD_RS at RB4_bit;
sbit LCD_EN at RB5_bit;
sbit LCD_D4 at RB0_bit;
sbit LCD_D5 at RB1_bit;
sbit LCD_D6 at RB2_bit;
sbit LCD_D7 at RB3_bit;

sbit LCD_RS_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB0_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB1_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB2_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISB3_bit;

// End LCD module connections

unsigned char ch;
unsigned char ch1;
unsigned char ch2;
    unsigned char ch3;
unsigned int adc_rd;
unsigned int adc_rd1;
char *text;
long tlong;
long tlong1;
```

```
long tlong2;
void main() {
INTCON = 0;
TRISA = 0x04;
TRISD = 0x00;
TRISE = 0;
ANSELH = 0;
PORTD = 0;
PORTE = 0;
Lcd_Init();
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
text = "Stud.";
Lcd_Out(1,1,text);
text = "Gr.";
Lcd_Out(2,1,text);
ADCON1 = 0x82;
TRISA = 0x0F;
Delay_ms(500);
while(1){
Delay_ms(500);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
text = "  U1 = ";
adc_rd = ADC_Read(2);
adc_rd1 = ADC_Read(3);
Lcd_Out(2,1,text);
tlong = (long)adc_rd * 5000;
```

```
tlong1 = (long)adc_rd1 * 5000;
tlong = tlong / 1023;
tlong1 = tlong1 / 1023;
tlong2 = tlong - tlong1;
tlong2 = tlong2;
ch = tlong / 1000;
ch1 = tlong1 / 1000;
ch2 = tlong2 / 1000;
Lcd_Chr(2,9,48+ch);
Lcd_Chr_CP('.');
ch = (tlong / 100) % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch);
ch = (tlong / 10) % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch);
ch = tlong % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch);
Lcd_Chr_CP('V');
text = "  U0 = ";
Lcd_Out(1,1,text);
Lcd_Chr(1,9,48+ch1);
Lcd_Chr_CP('.');
ch1 = (tlong1 / 100) % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch1);
ch1 = (tlong1 / 10) % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch1);
ch1 = tlong1 % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch1);
```

```

Lcd_Chr_CP('V');
Delay_ms(1000);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
text = "hp =   mm";
Lcd_Out(1,1,text);
Lcd_Chr(1,6,48+ch2);
Lcd_Chr_CP('.');
ch2 = (tlong2 / 100) % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch2);
ch2 = (tlong2 / 10) % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch2);
ch2 = tlong2 % 10;
Lcd_Chr_CP(48+ch2);
Delay_ms(2000);
}
}

```

Розроблені структурна та електрична схеми, а також симуляція їх роботи, показали можливість створення вимірювального приладу, що може забезпечити оперативний моніторинг товщини покриття діелектричного матеріалу в процесі виробництва.

### **Висновки до розділу 3**

У розділі були наведені розроблені структурна та спрощена електрична схеми приладу, який працює на основі різницевого ємнісного методу вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу.

Було описано склад та принцип дії приладу, а також показана симуляція його роботи відповідно до зроблених раніше розрахунків.

Також був створений код мікроконтролера для тестової програми вимірювального приладу.

## Розділ 4. СТВОРЕННЯ ПРОЄКТУ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ

### 4.1 Огляд існуючих програмних середовищ для створення проєктів друкованих плат

Для створення проєкту друкованої плати вимірювального приладу треба обрати потужну, зручну та доступну проєктну систему для професійного створення схем та друкованих плат. Проведемо аналіз декількох з них.

*DesignSpark PCB* може з успіхом застосовуватися як професійними розробниками, так і радіоаматорами, вона аналогічна до інших сучасних програм створення електронних пристроїв і має в своїй основі редактор схем та модуль розведення друкованих плат. Проєктне середовище дозволяє працювати з платами площею до одного квадратного метра, обмежень на кількість аркушів та шарів немає. Присутня функція автотрасування, її результат можна відкоригувати вручну.

Цей програмний пакет є абсолютно безкоштовним. При цьому він не містить жодних обмежень ні щодо кількості елементів схеми, ні за часом використання. На офіційному сайті у вільному доступі знаходиться бібліотека компонентів ModelSource, що містить понад 85 000 схем друкованих плат і 35 000 тривимірних моделей, представлених більш ніж у 20 форматах, сумісних із найвідомішими пакетами розробки електронного обладнання. При першому запуску необхідно пройти процедуру безкоштовної реєстрації, для чого потрібний вихід в інтернет. Якщо цього не зробити, то збереження результатів робіт буде недоступним.

Програмний пакет DesignSpark PCB був розроблений компанією RS Components, штаб-квартира якої розташована у місті Корбі (Великобританія). Пройшовши шлях від невеликої компанії з продажу запасних частин для радіостанції, створеної 1937 року у Лондоні, до великої компанії RS Components.

Компанія має представництва у 27 країнах світу, пропонуючи понад 550

000 найменувань різної продукції, включаючи всі необхідні компоненти для автоматизації виробництва та інформаційних технологій, а також офісне обладнання, інструменти, вимірювальні пристрої та довідкові книги.

*Kicad* є системою автоматизованого проєктування, що дозволяє створювати професійні електричні схеми, розробляти для них друковані плати та готувати вихідні дані для виробництва.

Програма KiCad написана мовою C++. До її складу входять такі складові.

#### 1. Основні додатки:

- менеджер проєктів kicad, що дозволяє створювати та налаштовувати параметри нових робіт;

- редактор електричних схем eeschema для малювання та компонування схем, що включає редактор символів;

- редактор друкованих плат pcbnew, що формує схему електричних ланцюгів і включає редактор посадкових місць.

#### 2. Додаткові утиліти:

- переглядач файлів формату Gerber – gerbview;

- програма для визначення посадочних місць відповідно до компонентів на схемі – svrpcb;

- редактор перегляду звітів wyoeditor.

Крім того KiCad включає безліч бібліотек електронних компонентів, для яких є виконані в програмі Wings3D тривимірні моделі. Редактор eeschema дозволяє створювати багатолістові ієрархічні схеми та проводити їх перевірку на відповідність електричним правилам. У ньому створюються переліки елементів у вигляді таблиці і netlist-список для моделювання схеми в редакторі друкованих плат. Додаткова опція дозволяє зберегти netlist у популярному форматі Spice та провести симуляцію схеми у сторонньому додатку.

Pcbnew працює з платами, що містять 16 мідних та 12 технічних шарів, внутрішні шари металізації, термальні контактні майданчики, наскрізні та внутрішні перехідні та мікро-перехідні отвори. Існує можливість використовувати зовнішні трасувальники, наприклад FreeRouter і TopoR, є

калькулятор друкованих плат і опція автоматичного та ручного розміщення компонентів. Наприкінці роботи генеруються технологічні файли на виготовлення (для фотоплотерів та свердлильних верстатів), а також пропонується пошаровий друк у форматах HPGL, PostScript, DXF, PDF та SVG з рамкою формату або без неї. KiCAD створює списки компонентів для замовлення, а також логотип розробника на платі може експортувати креслення у форматах DXF і PDF.

Розмір схеми або плати в KiCad не обмежений, на будь-якому етапі роботи можна повернутись назад, внести зміни, а потім легко перенести їх далі. Опція 3D Viewer дозволяє на базі OpenGL збудувати об'ємне зображення друкованої плати. Якість рендерингу, звичайно, нижча, ніж у платних аналогів, але цілком достатньо для візуальної оцінки. На жаль, основні формати тривимірних моделей компонентів, що надаються виробниками, \*.iges і \*.step – програма не підтримує.

До недоліків системи проектування варто віднести незручний і інтуїтивний інтерфейс. Програму складно опанувати без читання відповідної документації.

Основна перевага середовища KiCad, окрім повнофункціональності – це вільна ліцензія та відкриті для змін коди, формати даних, бібліотек, схем, проєктів друкованих плат.

До програми регулярно виходять оновлення. Для системи Windows пропонується складання у вигляді інсталяційного EXE-файлу або у вигляді ZIP-архіву. Для інсталяції програми необхідно запустити EXE-файл або розархівувати архів у папку C: Program Files KiCad.

Ця система проектування підтримує англійську, португальську, іспанську, чеську, польську, французьку та багато інших мов.

KiCad є крос-платформним програмним засобом та працює на операційних системах FreeBSD, Linux, MS Windows, Apple Mac OS X та Solaris.

**P-CAD** потужна система автоматизованого проектування друкованих плат радіоелектронних та обчислювальних пристроїв.

Програма здатна виконати весь цикл розробки друкованих плат, інтерактивне розміщення елементів та автотрасування провідників, пошук помилок на будь-якій стадії проєкту, підготовку документації, перевірку цілісності всіх сигналів, аналіз перехресних спотворень. Зручна довідкова система та інтерфейс користувача знижують "пориг входження" для новачків.

P-CAD складається з двох автономних модулів – Schematic (редактор електричних схем) та PCB (редактор друкованих плат). Проєкти схем можуть містити до 999 аркушів, а проєкти плат – до 999 шарів розміром 60х60 дюймів. Існують можливості інтерактивного розведення диференціальних пар для мінімізації електромагнітних перешкод, мультимаршрутне трасування за заданими параметрами, ортогональне перетягування провідників. Крім основних підпрограм P-CAD має допоміжні: Library Executive (менеджер бібліотек), Symbol Editor (редактор символів елементів), Pattern Editor (редактор посадкових місць, корпусів елементів) та деякі інші. Бібліотеки P-CAD зберігають понад 27 тисяч елементів, сертифікованих за стандартом ISO 9001. Повністю підтримуються формати Gerber та ODB++.

Серед останніх покращень P-CAD – додавання потужного трасувальника Situs із середовища проєктування Altium Designer, пакету CAMtastic для підготовки друкованої плати до виробництва та пакетів аналогового та цифрового моделювання nVisage та Xspice.

З 1996 року компанія ACCEL Technologies представила публіці першу версію P-CAD під назвою ACCEL EDA. Продукт набув популярності серед проєктувальників цифрових пристроїв. 17 січня 2000 року ACCEL Technologies була поглинена провідним розробником САПР Protel International. У березні 2000 року ACCEL EDA змінила назву на P-CAD. Система автоматизованого проєктування використовує англomовний інтерфейс.

#### **4.2 Порядок створення проєкту друкованої плати вимірювального приладу за допомогою програми PROTEUS та KiCad**

Послідовність створення проєкту наступна:

1) Розроблення принципової електричної схеми пристрою, який проектується.

2) Розроблення, компіляція програмного забезпечення, якщо воно необхідне. Якщо схема містить мікроконтролер, наявність програми його роботи є обов'язкова. На цьому етапі виконується відлагодження програми і її під'єднання до проекту середовища програми PROTEUS.

3) Моделювання роботи пристрою в середовищі програми PROTEUS.

Програма симуляції запускається викликом ISIS Professional - складової частини PROTEUS. При появі вікна програми пропонується переглянути приклади проектів.

Програма ISIS Professional має наступні робочі області: основне меню; лінійка інструментів; вікно мінімакета сторінки; під ним – панель DEVICES схемних, графічних та інших компонентів, з яких складається схема; меню вибору компонентів схеми; кнопки управління процесом моделювання схеми. Основну площу вікна програми займає робоче поле, в якому власне і створюється схема (модель) пристрою, що проектується. Для нашого випадку це схема вимірювального приладу.

У вікні панелі DEVICES відображуються всі компоненти проекту, що використовуються в схемі.

Кнопка з літерою "P" відкриває форму пошуку в бібліотеках PROTEUS (рис.4.1) елемента, який додається до схеми. Кнопка з літерою "L" запускає менеджер бібліотек і з його допомогою можна приєднати нові бібліотеки компонентів.

Ліва панель інструментів багатofункціональна і функції основних її інструментів такі:

- 1) – стрілка - вказівник для виділення областей, побудови з'єднань та ін.;
- 2) – панель DEVICES - компоненти проекту і пошук нових пристроїв;
- 3) – проставити вручну місце з'єднання провідників;
- 4) – редактор присвоєння назви провіднику;

- 5) – додати текст у довільне місце схеми;
- 6) – провести шину - на схемі широка темно-синя лінія;
- 7) – створення підсхеми (блоку, який має власну схему і елементи з'єднання);
- 8) – Terminals - кінцеві елементи схеми: живлення (VCC), земля (GND), виводи і т.п.;
- 9) – режим Device Pin - додати вивід до компонента;
- 10) – графічне відображення, збереження і аналіз результатів моделювання;
- 11) – запис процесу моделювання у файл і відтворення даних;
- 12) – генератори різних форм напруги та струму;
- 13) – визначення місця на провіднику для вимірювання напруги;
- 14) – визначення місця на провіднику для вимірювання струму;
- 15) – Virtual Instruments - віртуальні вимірювальні прилади;
- 16) – проведення провідників на схемі.
- 17) – поворот виділеного компонента або блока за годинниковою стрілкою на 90 градусів;
- 18) – поворот виділеного компонента або блока проти годинникової стрілки на 90 градусів;
- 19) - поле для визначення довільною кута повороту;
- 20) - дзеркальне відображення елемента в горизонтальній площині;
- 21) - дзеркальне відображення елемента у вертикальній площині.

Створення схеми починається з вибору її компонентів з обширних бібліотек, які є складовою частиною програми PROTEUS. Спеціальна форма-меню пошуку та вибору компонентів активується натисненням на клавіатурі кнопки з літерою "P", або натисненням на ліву кнопку «миші» над зображенням кнопки "P" (Pick Up). У вікні "Keywords" (ключові слова) (рис. 4.1) можна задати для пошуку ключове слово, наприклад, початок назви компонента, а потім вибрати компонент. В полі "Description" (опис) побачимо опис елемента.

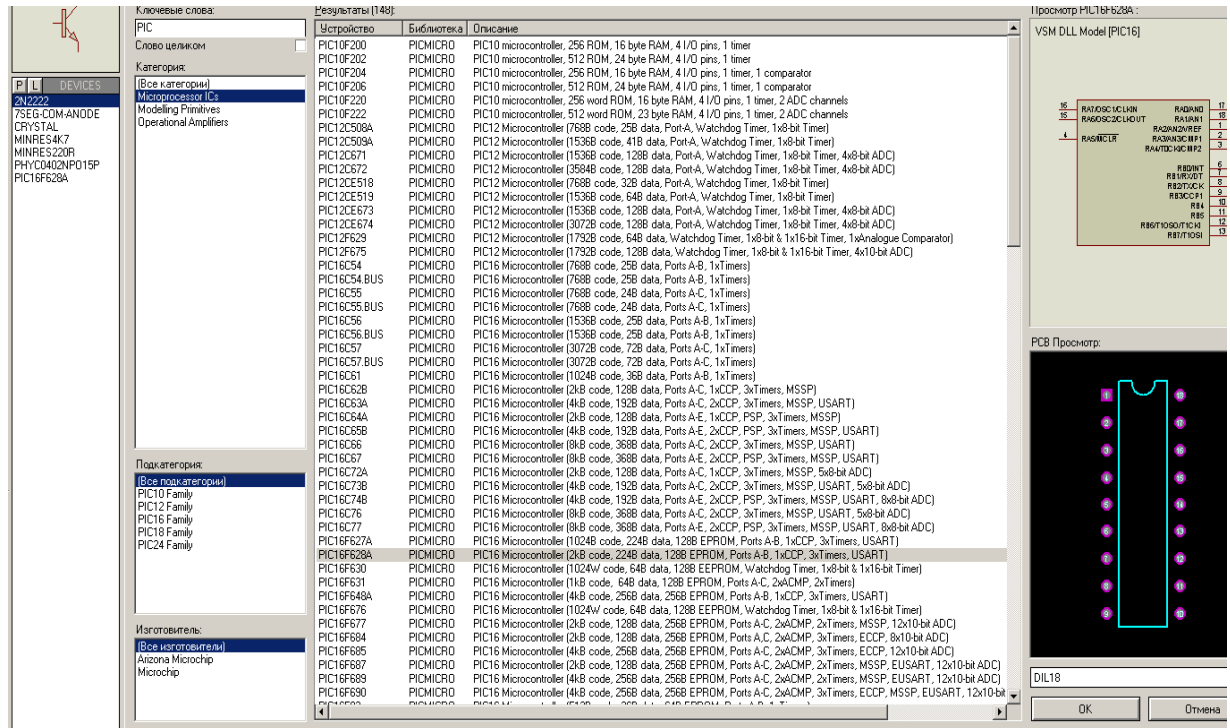


Рисунок 4.1 – Вікно бібліотеки вибору елементів схеми; контекстне меню додавання елементів

В правій частині форми приводиться назва моделі компонента, його умовне зображення на схемі, а внизу форми - "Footprint", або "PCB-Перегляд" - вигляд елемента на друкованій платі. Ще нижче - назва корпусу компонента DIL18 - прямокутний пластмасовий корпус з 18 виводами.

Щоб розмістити компонент на схемі необхідно натиснути на кнопку "ОК", а потім навести курсор миші в потрібне місце на листі схеми і натиснути ліву клавішу миші. Можна спочатку додати всі компоненти схеми у вікно компонентів, а потім скористатися контекстним меню правої кнопки миші. Наприклад, додати мікроконтролер PIC16F887 у вікно компонентів із бібліотеки і перейти в контекстному меню по шляху *Розмістити (Place) → Компонент (Component) > PIC16F887*.

Можна також скористатися копіюванням через буфер обміну компонентів, які вже присутні на схемі, але при цьому доведеться вручну вводити порядковий номер нового елемента.

Виділяють будь-який компонент або інший елемент схеми за допомогою правої кнопки миші. При цьому його колір змінюється на червоний і одночасно виділяться всі провідники, які приєднані до нього - виділяються червоним до першого з'єднання з чим-небудь. Відмінити виділення всіх елементів можна «клацанням» правої кнопки миші на пустому місці поля.

Для мікроконтролера головна програма, за якою він працюватиме. В полі "Program File" слід вказати:

.cof - файл, якщо для симуляції використовується первинний текст програми на мові Сі;

.asm - файл, якщо для симуляції використовується первинний текст програми на мові Асемблер;

.hex - файл прошивки, якщо немає первинного тексту на жодній з мов.

Якщо є первинний текст .asm, то потрібно далі вказати назву .hex файла, а також, використавши меню *Source>Add/Remove Source File...* додати назву файла з текстом програми на асемблері і вибрати необхідний компілятор.

Тепер при запуску симуляції буде проведена компіляція файла \*.asm і при відсутності помилок мікроконтролер почне працювати за вже оновленим файлом \*.HEX.

Для керування симуляцією використовуються кнопки надані внизу ліворуч робочого листа :

"Play" - запуск або продовження призупиненої симуляції; "Step" - виконати мінімальний крок програми мікроконтролера (як правило, це одна команда на асемблері). Цією кнопкою також можна почати симуляцію;

"Pause" - пауза симуляції. Можна продовжити симуляцію кнопками "Play" або "Step";

"Stop" - зупинка симуляції. Після цього симуляція почнеться з початку кнопками "Play" або "Step". Щоб побачити всі параметри того чи іншого компонента потрібно поставити «галочку» напроти Edit all properties as text (рис. 4.2). При цьому відкриється вікно програми.

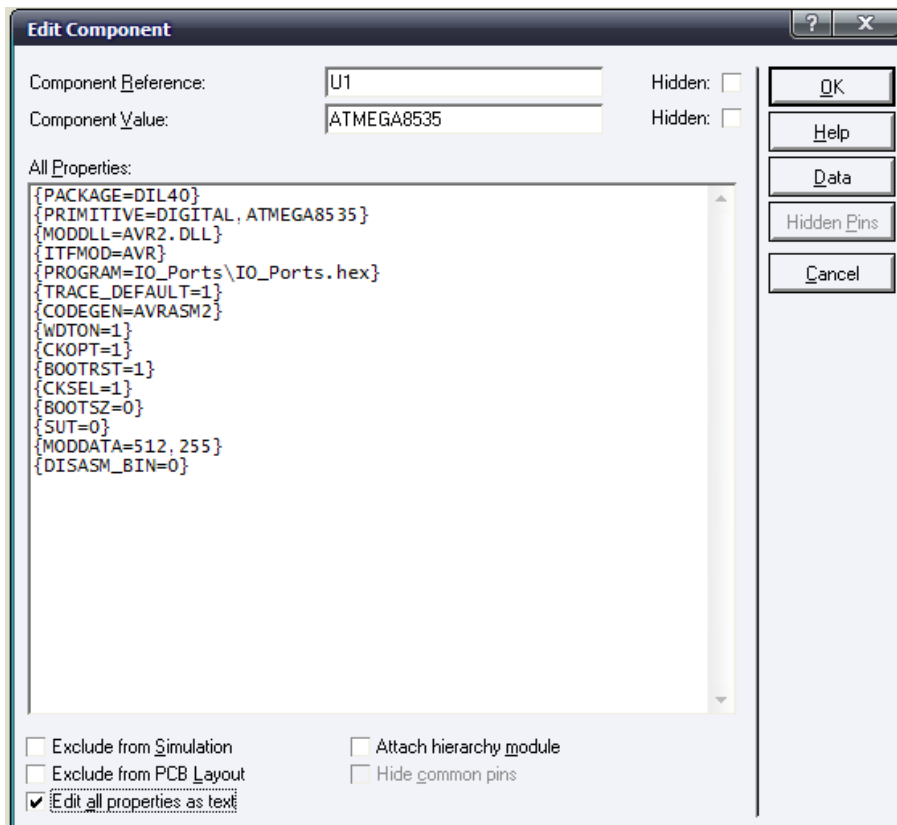


Рисунок 4.2 – Діалогове вікно властивостей компонента схеми

Крім того, керувати процесом симуляції програми на асемблері можна за допомогою кнопок F10, F11, F12 та їх комбінацій з кнопками Alt і Ctrl або через меню DEBUG.

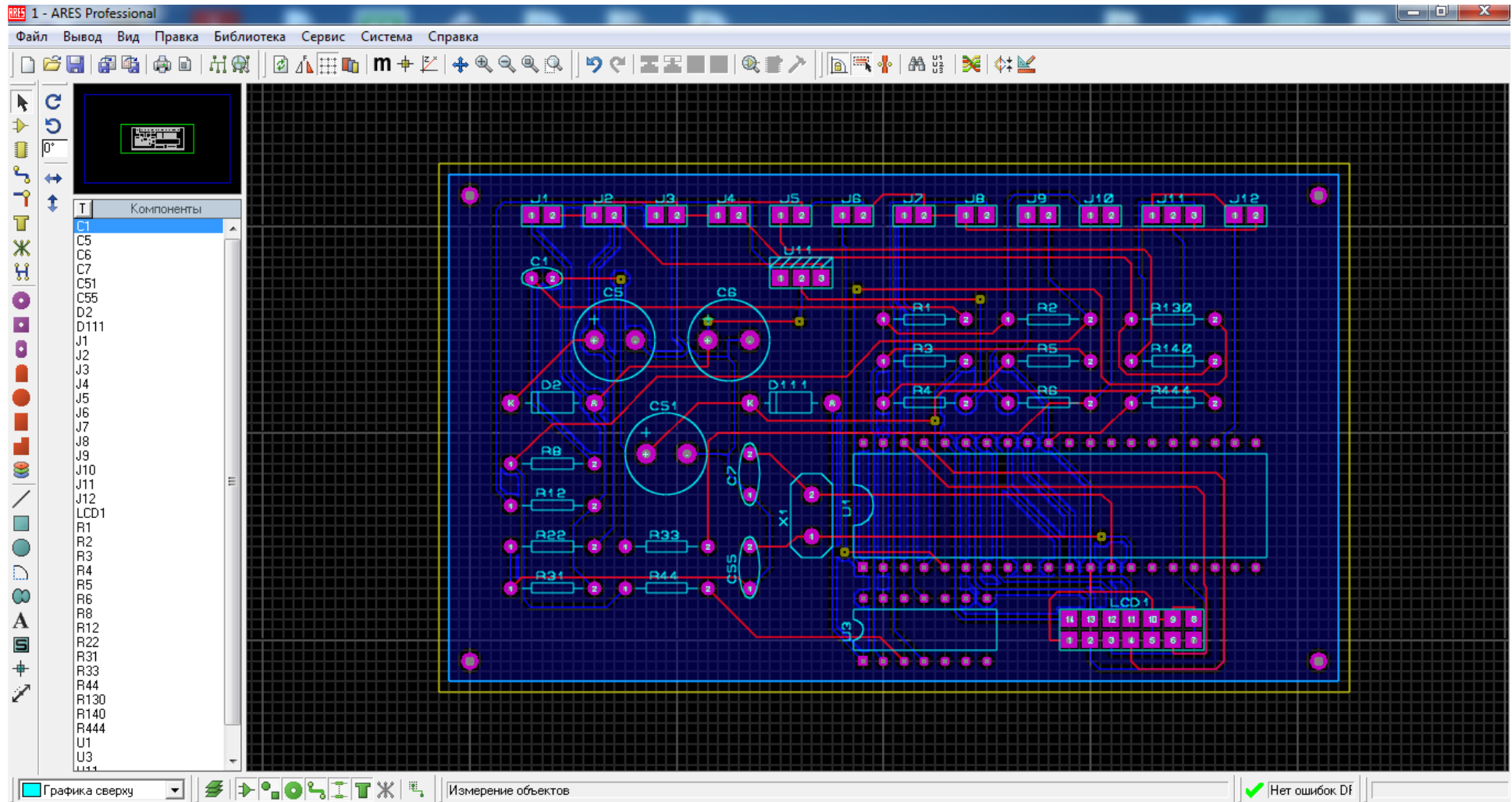


Рисунок 4.3 – Розроблений проект друкованої плати електронного блоку вимірювального приладу товщини покриття діелектричного матеріалу в редакторі створення плат ARES програми PROTEUS

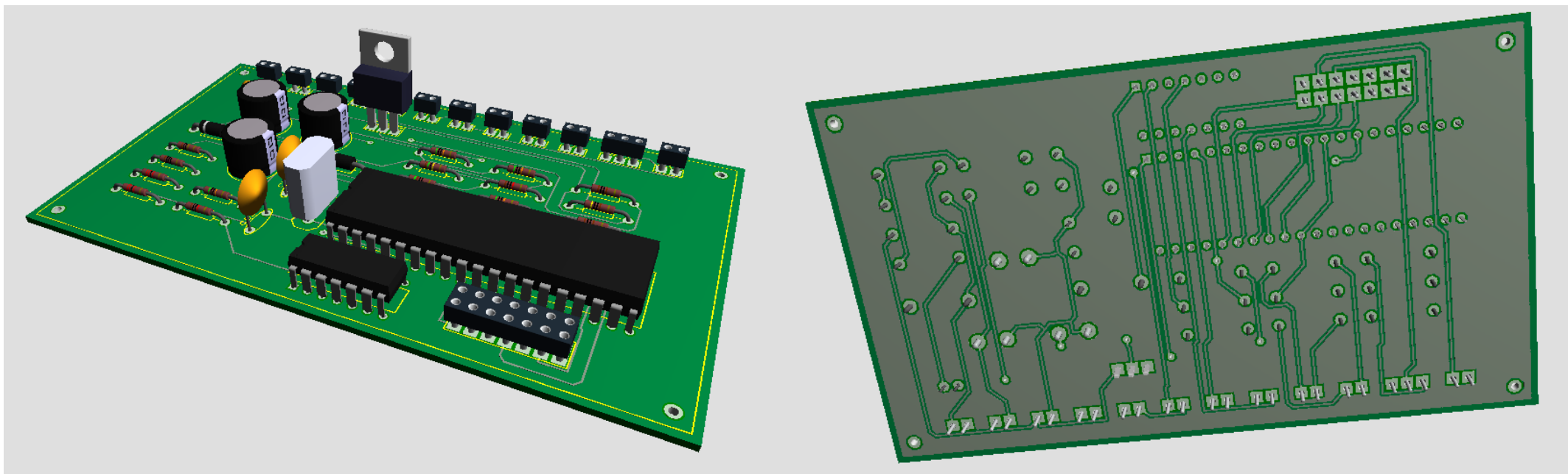


Рисунок 4.4 – 3D проєкт друкованої плати електронного блоку вимірювального приладу товщини покриття діелектричного матеріалу з різних сторін в програмі PROTEUS

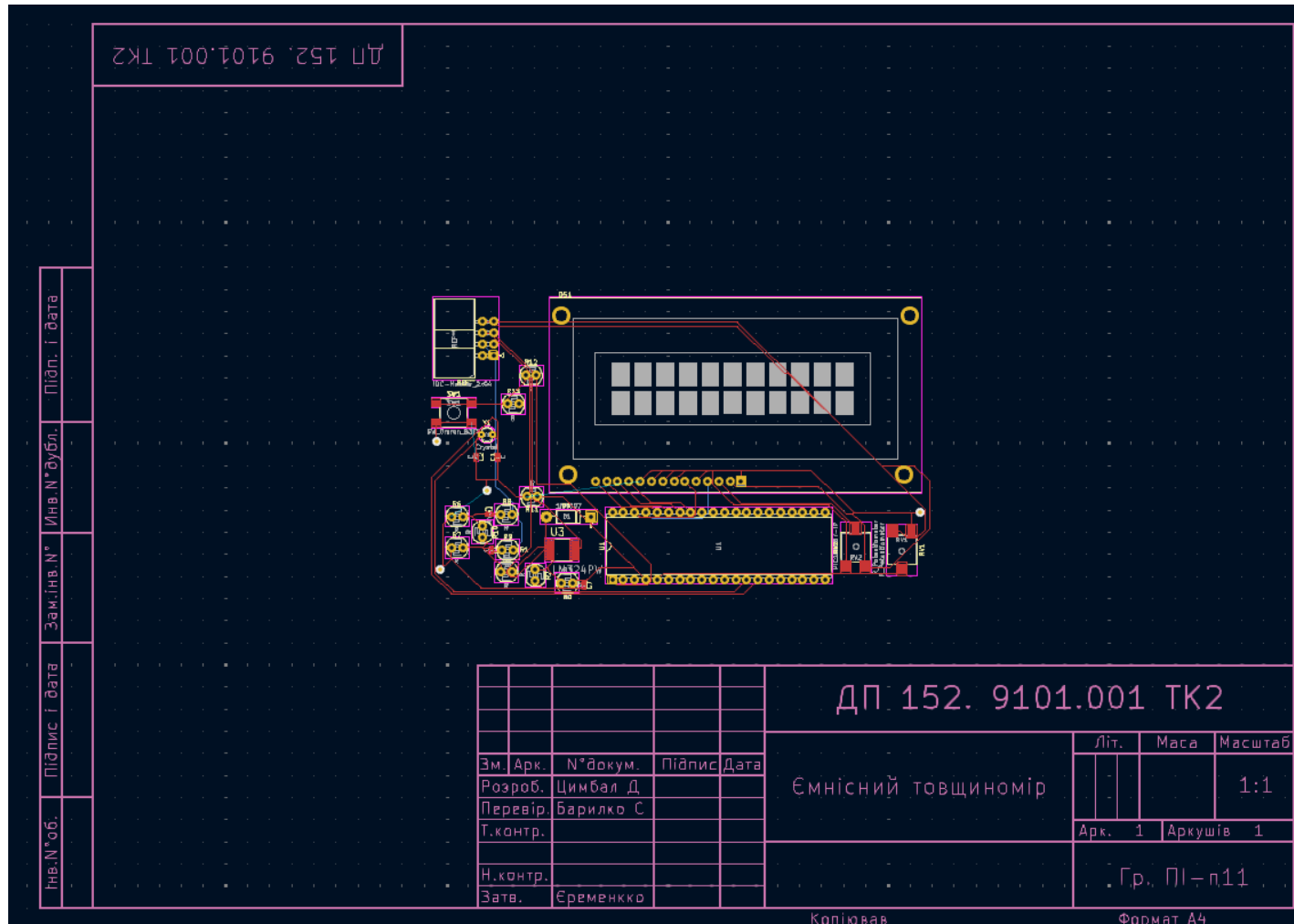


Рисунок 4.5 – Проект друкованої плати готового ємнісного товщиноміра в редакторі створення плат KiCad 8.0

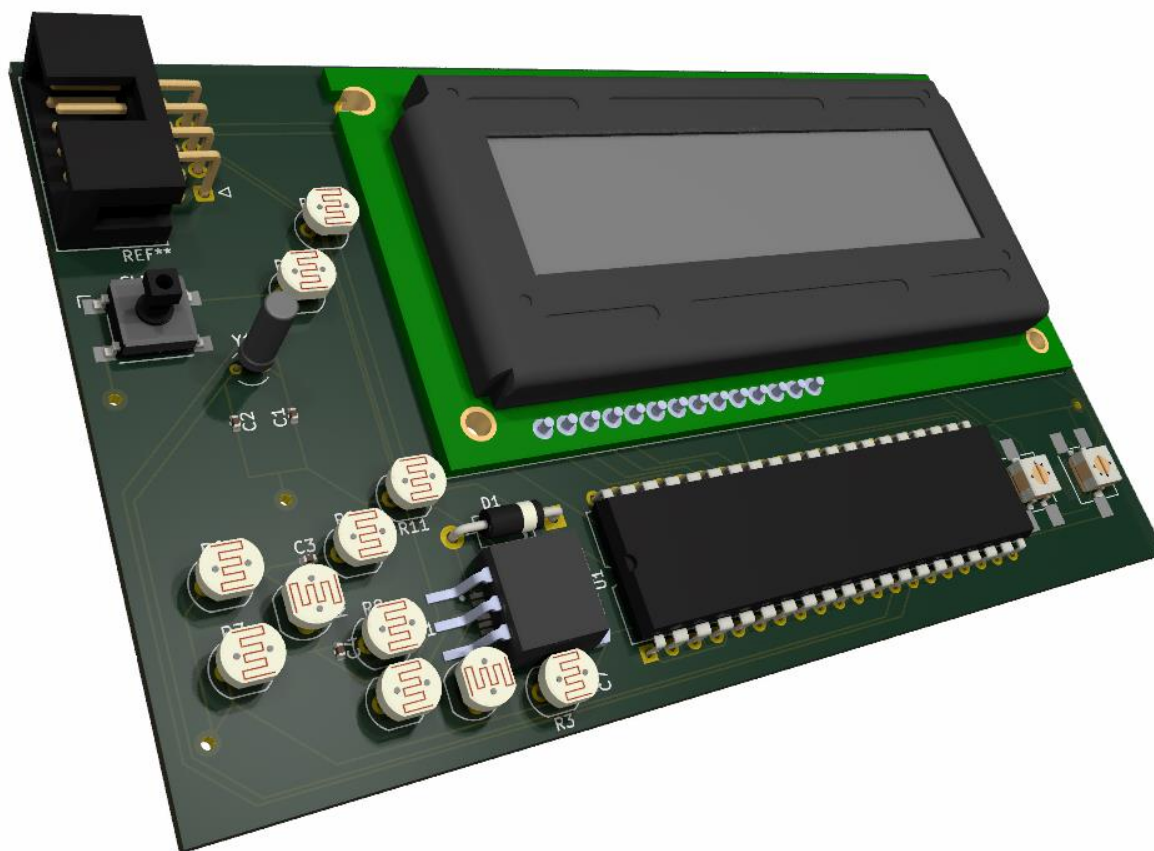


Рисунок 4.6 – 3D проєкт готового емнісного товщиноміра зробленого в редакторі створення плат KiCad 8.0

Виділена команда дозволяє встановити час симуляції схеми (від початку до припинення процесу симуляції). Якщо вибрати цю команду, то виведеться поле, в якому можна задати вказаний час (при цьому для одиниць вимірювання прийнято:  $n$  - наносекунди,  $\mu$  - мікросекунди,  $m$  - мілісекунди, секунди можна не позначати). Процес симуляції схеми буде здійснюватись заданий час, якщо до його закінчення в програмі мікроконтролера не зустрінеться точка зупинки Breakpoint ( $BP$ ) - симуляція зупиниться на ній.

Після проведення повної симуляції роботи моделі електричної схеми вимірювального приладу, що було показано у попередньому розділі, також був розроблений проєкт друкованої плати до приладу в програмі PROTEUS та KiCad 8.0 (рис.4.3 - рис.4.6, також креслення проєкту наведені в додатках).

Створений проєкт дасть можливість у подальшому провести експериментальні дослідження вимірювання товщини покриття різних діелектричних матеріалів із застосуванням ємнісного різницевого методу для моніторингу параметра на виробництві.

#### **Висновки до розділу 4**

Був наведений огляд різних програмних середовищ, які можуть бути використані для створення проєкту друкованої плати вимірювального приладу. Також була розроблена друкована плата електронного блоку приладу для вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу.

Наведені етапи створення проєкту вимірювального приладу.

- 1) Розроблення принципової електричної схеми приладу, який проєктується.
- 2) Розроблення, компіляція програмного забезпечення, якщо воно необхідне. На цьому етапі виконується відлагодження програми і її під'єднання до проєкту середовища програми PROTEUS.
- 3) Моделювання роботи приладу та створення його друкованої плати.

## Загальні висновки

Був проведений аналіз методів та засобів вимірювання товщини покриття діелектричних матеріалів, а саме: методу сканування довжини оптичної хвилі; методу інтерференції; методу нанесення подряпини; методу рентгенівської флуоресценції. За допомогою запропонованих методів та засобів сьогодні можна вимірювати товщину покриття різних діелектричних матеріалів, але більш доцільно на виробництві для реалізації моніторингу вимірювального параметру використовувати саме ємнісний різницевий метод. Запропонований метод дозволяє оперативно вимірювати товщину покриття на поверхні різних плівок, пропускаючи їх через ємнісний перетворювач, і не вимагає складного налаштування приладів та системи.

Запропонований ємнісний різницевий метод вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу передбачає використання змінного конденсатора перетворювача для визначення ємності між його пластинами та опорного каналу, значення напруги з якого повинне відніматися від значення напруги у вимірювальному каналі. Різниця зазначених напруг у кінцевому результаті пов'язується із параметром покриття діелектричного матеріалу.

Також показані структурна та спрощена електрична схеми приладу, який працює на основі різницевого ємнісного методу. Описано склад та принцип дії приладу, а також показана симуляція його роботи відповідно до зроблених раніше розрахунків. Створена тестова програма вимірювального приладу.

Наведений огляд різних програмних середовищ, які можуть бути використані для створення проєкту друкованої плати вимірювального приладу. Також була розроблена друкована плата електронного блоку приладу для вимірювання товщини покриття діелектричного матеріалу.

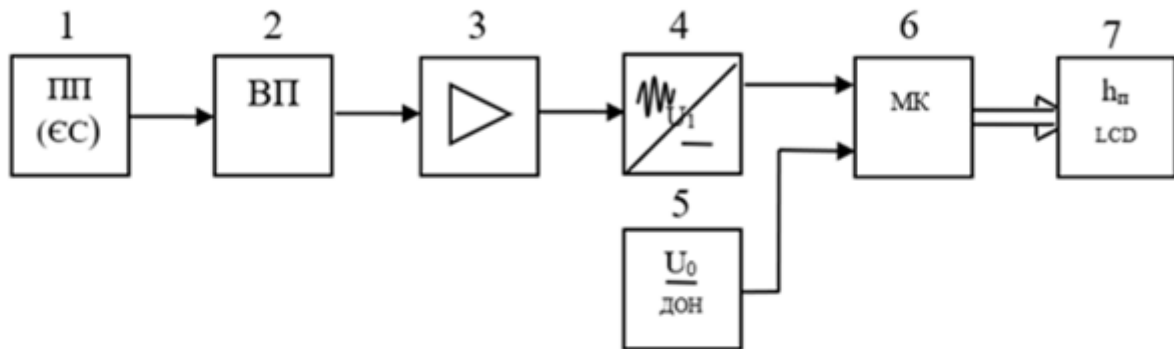
### Список використаних джерел

1. Основи вимірювальної техніки / К.Ф. Кузнецов, Ю.Є. Коваленко, І.В. Литвиненко та ін. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 350 с.
2. Методи та засоби вимірювання товщини покриттів / П.І. Василенко, М.В. Поляков, І.Г. Ігнатенко. – Київ: Либідь, 2015. – 278 с.
3. Фізичні основи неруйнівного контролю / І.В. Зубко, В.О. Підгорний, Ю.М. Савченко. – Одеса: Астропринт, 2013. – 420 с.
4. Технології неруйнівного контролю матеріалів / Г.С. Мельничук, Л.М. Голубев, С.І. Лавриненко та ін. – Київ: КНУТД, 2014. – 389 с.
5. Прилади для контролю покриттів / А.В. Ткачук, В.В. Сидоренко, М.О. Іванов та ін. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 340 с.
6. Товщиномірні технології в сучасних системах контролю / І.О. Дяченко, О.М. Костюк, Р.В. Колесник. – Дніпро: НГУ, 2018. – 312 с.
7. Прилади і методи вимірювання параметрів діелектриків / А.С. Герасимов, О.В. Кириченко, Ю.В. Павленко. – Харків: ХНУ, 2019. – 275 с.
8. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / В.С. Соловійов, І.В. Іващенко, П.О. Кір'ян. – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – 358 с.
9. Товщиноміри покриттів: принципи дії та конструкції / О.М. Чернявський, В.І. Коваленко, І.М. Семенов. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 310 с.
10. Методи і засоби вимірювання товщини покриттів / В.І. Петренко, О.В. Лисенко, Н.М. Король. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 289 с.
11. Сучасні методи неруйнівного контролю / І.М. Петриченко, М.О. Гончаренко, С.М. Мельник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 377 с.
12. Технології контролю та діагностики покриттів / О.М. Тарасенко, С.В. Бондаренко, Ю.М. Кравченко. – Харків: ХНУРЕ, 2014. – 345 с.
13. Електронні прилади та системи неруйнівного контролю / В.М. Шерстюк, А.В. Лапко, І.С. Лисенко. – Київ: КНУТД, 2017. – 320 с.
14. Товщиноміри покриттів: практичний посібник / В.І. Коваленко, І.М.

- Семенов. – Київ: Політехніка, 2016. – 260 с.
15. Сучасні методи вимірювання діелектричних властивостей матеріалів / О.П. Петров, С.М. Лисенко, В.М. Карпенко. – Дніпро: НГУ, 2015. – 280 с.
  16. Основи технічної діагностики та неруйнівного контролю / В.І. Сидоренко, О.М. Ткаченко, П.В. Гончар. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – 355 с.
  17. [https://www.qd-latam.com/downloads/26/M-2000\\_Spec\\_Sheet\\_2015.pdf](https://www.qd-latam.com/downloads/26/M-2000_Spec_Sheet_2015.pdf)
  18. <https://www.jawoollam.com/download/pdfs/m-2000-brochure.pdf>
  19. <https://www.manualslib.com/manual/1235911/Filmetrics-F20.html#manual>
  20. [https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/wp-content/uploads/2020/03/F20\\_User\\_Manual.pdf](https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/wp-content/uploads/2020/03/F20_User_Manual.pdf)
  21. <https://www.gambetti.it/wp-content/uploads/2019/04/Filmetrics-Datasheet-F20-released2018Dec17-K6j.pdf>
  22. [https://aggiefab.tamu.edu/wp-content/uploads/2020/04/Wyko\\_NT9100.pdf](https://aggiefab.tamu.edu/wp-content/uploads/2020/04/Wyko_NT9100.pdf)

## **ДОДАТКИ**

ДП 152.0103.001 ТК1



Первинний перетворювач (ПП) / ємнісний сенсор (ЄС) 1

Вторинний перетворювач (ВП) 2

Підсилювач напруги 3

Детектор (Д) 4

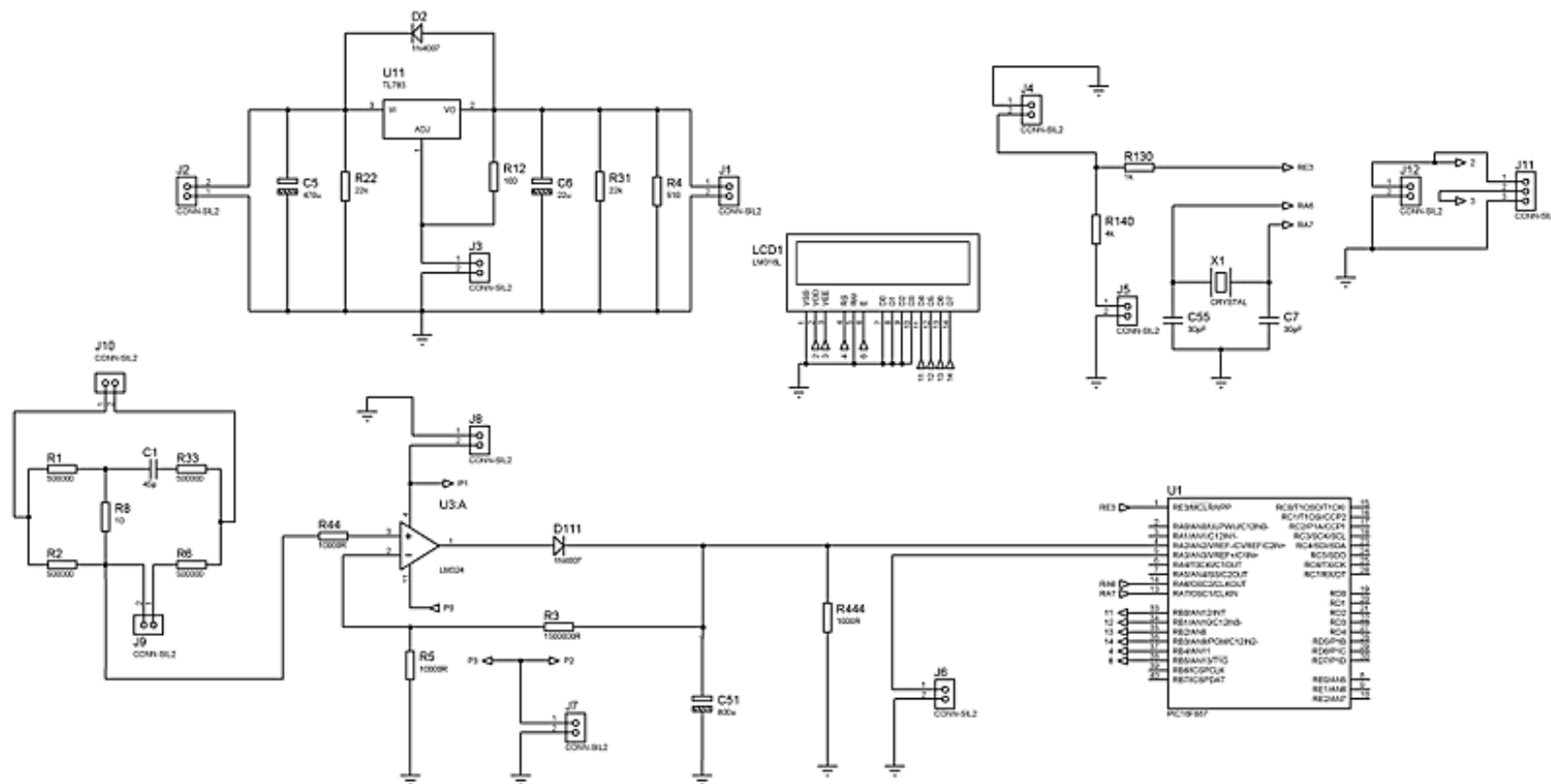
Джерело опорної напруги (ДОН) 5

Мікроконтролер (МК) 6

LCD екран 7.

Підп. і дата					Лім.	Маса	Масштаб
Зам. №					Аркуш 1	Аркушів 1	1:1
Інв. № дубл.					<p><b>ДП 152.0103.001 ТК1</b></p> <p>Цифровий вимірювальний прилад товщини покриття матеріал, схема структурна</p>		
Інв. № ориг.					<p>ПБФ</p>		
Зм. Л. № докум. Підп. Дата							
Розроб. Цимбал Д.О.							
Перевір. Барилко С.В.							
Т.контр.							
Н.контр.							
Затв. Єременко В.С.							

ДП 152.0103.001 ТК2



Підп. і дата

Зам.інв.№

Підпис і дата

Інв.№ об.

ДП 152.0103.001 ТК2

Електрична схема  
цифрового вимірювального  
приладу товщини покриття  
діелектричного матеріалу

Літ.

Маса

Масштаб

1:1

Арк.

1

Аркушів 1

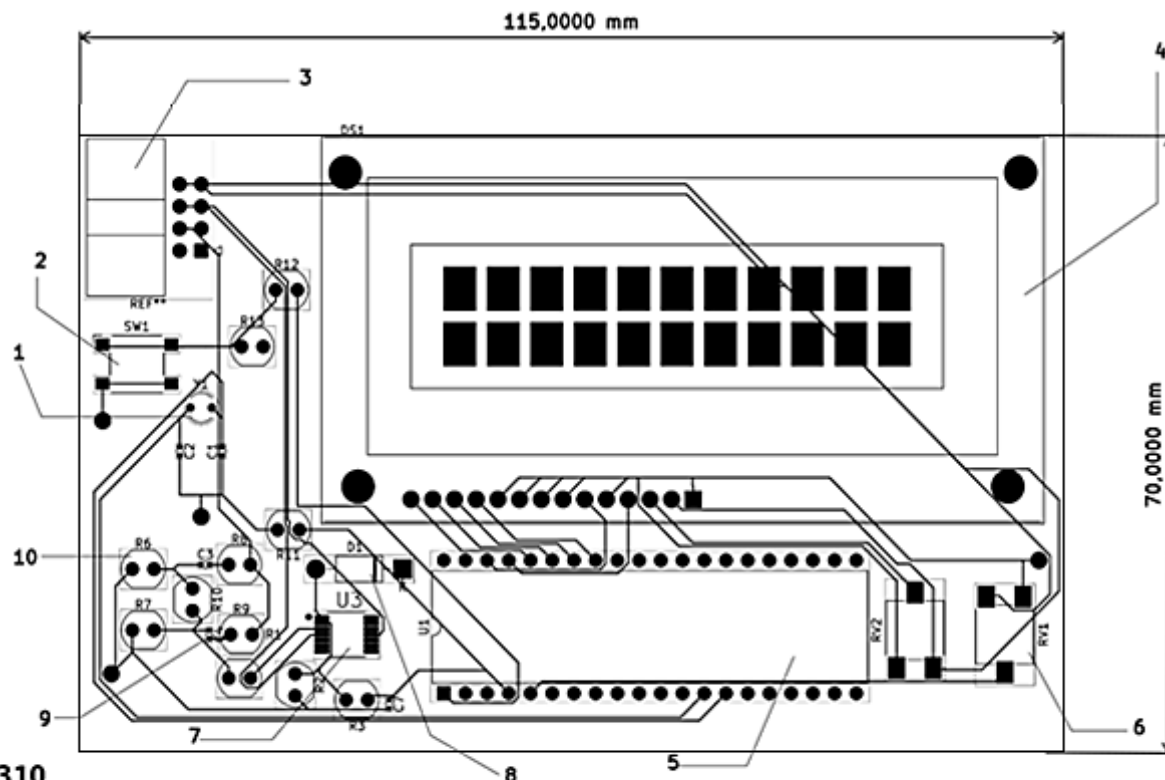
ПБФ

Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Цимбал Д.		
Перевір.	Барилко С.		
Т.контр.			
Н.контр.			
Затв.	Єременков В.		

Копіював

Формат А4

ДП 152.0103.001 ТКЗ



- 1** Резонатор AT310  
**2** Перемикач Omron B3FS  
**3** Коннектор IDC  
**4** Дисплей LM016L  
**5** Мікроконтролер PIC16F887  
**6** Потенціометр  
**7** Операційний підсилювач LM324PW  
**8** Діод 1N4007  
**9** Конденсатор  
**10** Резистор

ДП 152.0103.001 ТКЗ			
Зм. Арх.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Цимбал Д.		
Перевір.	Барилко С.		
Т.контр.			
Н.контр.			
Затв.	Еременков		
Блок електронний вимірювального приладу плата друкована			Літ.   Маса   Масштаб       1:1
			Арк. 1   Аркушів 1
			ПБФ

Копіював

Формат А3

Ім'я, № об.	Підпис і дата	Зам. Ім'я, №	Інв. №, дубл.	Підп. і дата

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A3			ДП 152.0103.001 ТК1	Цифровий вимірювальний прилад товщини покриття матеріалу, схема структурна		
A3			ДП 152.0103.001 ТК2	Електрична схема цифрового вимірювального приладу товщини покриття діелектричного матеріалу		
A4			ДП 152.0103.001 ТК3	Блок електронний вимірювального приладу плата друкована		
				<u>Стандартні вироби</u>		
				<u>Конденсатори:</u>		
		1		45Ф 10В ±10%	1	C1
		2		50.4Ф 10В ±10%	1	C2
		3		470мкФ 15В ±10%	1	C5
		4		22мкФ 15В ±10%	1	C6
		5		30пФ 5В ±10%	2	C7, C55
		6		800 мкФ 10В ±10%	1	C51
<b>ДП 152.0103.001 ТК СП</b>						
Інв. № ориг.	Змн.	Арк.	№ докцм.	Підп.	Дата	
	Розроб.		Цимбал Д.			Лім.
	Перев.		Барилко С.			Арк.
	Н. контр.					Аркцшів
Затв.		Єременко В				1 2
Специфікація						ПБФ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				<i>Конектори:</i>		
		7		IDC-2.54-2x4P	1	J1
				<i>Резистори:</i>		
		8		500 кОм 0.5Вт ±10%	4	R1,R2,R33,R6
		9		100 кОм 0.5Вт ±10%	2	R44, R5
		10		1500 кОм 0.5Вт ±10%	1	R3
		11		1 кОм 0.5Вт ±10%	2	R444,R130
		12		4 кОм 0.5Вт ±10%	1	R140
		13		100 Ом 0.5Вт ±10%	1	R12
		14		22 кОм 0.5Вт ±10%	2	R22,R31
		15		510 Ом 0.5Вт ±10%	1	R4
				<i>Потенціометри:</i>		
		16		1 кОм 0.5Вт ±10%	3	RV1-RV3
				<i>Мікросхеми:</i>		
		17		LM324	1	U3:A
		18		PIC16F887	1	U1
		19		TL783	1	U11
				<i>Інші елементи:</i>		
		20		Діод 1N4007	2	D111, D2
		21		LCD дисплей LM016L	1	LCD1
		22		Резонатор	1	X1
Інв. № ориг.	ДІП 152.0103.001 ТК СП					Арк.
						2
Змін	Арк.	№ докцм.	Підп.	Дата		