МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший бакалаврський
(рівень вищої освіти)

на тему *Розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур*

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1531
спеціальності *G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

В.П. Собченко
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.ф.-м.н., Світанько М.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, професор, д.т.н., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Факультет _____
Кафедра __*електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти _*перший бакалаврський*_____
Спеціальність *G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»* (код і назва)

Освітня програма __*Мікро- та наносистемна техніка* _____
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ЕІСПЗ*____
_____*Критська Т.В.*_____
"___30_" травня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

_____*Собченку В`ячеславу Павловичу*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) ___*Розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур*_____
_____
керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*_____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27" грудня 2024 року № 2029-с*_____

2 Строк подання студентом роботи ___*30 травня 2025 року*_____

3 Вихідні дані до роботи __*220 В, 350В, 3-32В, 100 Гц – 200 кГц, MOSFET, INA219*, *ATMEGA*, _____
_____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Діелектрики – загальні відомості, методи та прилади вимірювання характеристик 2. Розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур*_____
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Вимірювання діелектричної проникності матеріалів електронної техніки 2. Функціональна схема детектора напруги 3. Моделювання функціональних блоків пристрою

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Світанько М.В., доцент*	*28.12.2024*	*28.12.2024*
II	*Світанько М.В., доцент*	*28.12.2024*	*28.12.2024*
III	*Світанько М.В., доцент*	*28.12.2024*	*28.12.2024*

7 Дата видачі завдання *28 грудня 2024 року*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*29.03.2025*	
2	*Розрахункова частина*	*26.04.2025*	
3	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*30.05.2025*	
4	*Розробка графічної частини роботи*	*30.05.2025*	
5	*Оформлення пояснювальної записки*	*30.05.2025*	
6	*Нормоконтроль*	*30.05.2025*	
7	*Попередній захист роботи*	*30.05.2025*	

Студент _____ *Собченко В.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Світанько М.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л.Л.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 63 сторінки, 25 рисунків, 33 джерела літератури.

Об’єкт дослідження – анізотропні оптичні структури.

Мета роботи – розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур.

Завдання роботи – розробити структурну схему вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур; розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою; провести моделювання роботи електричних схем пристрою.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus, Arduino.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено труктурну схему пристрою, датчик струму підключено до мікроконтролера Atmega 328, інтегрованого в плату Arduino Uno.

Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – система може бути використана в подальших розробках мікроелектронних інформаційних систем.

ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ, ПОЛЯРИЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРИЧНА ЄМНІСТЬ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ARDUINO.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 28.12.2024 р. по 30.05.2025 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……..6
1. Діелектрики – загальні відомості, методи та прилади вимірювання характеристик…… …. 7
1.1 Загальні відомості про діелектрики ……...……..…….7
1.2 Поляризація діелектриків …….....11
1.3 Діелектрична проникність …….……..…14
1.4 Вимірювачі електрофізичних властивостей діелектриків ……..……..18
2. Розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур ……..…...23
2.1 Структурна схема вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур …….……23
2.1.1 Розрахунок умов проведення експериментів по дослідженню діелектричних властивостей анізотропних оптичних структур……...23
2.2 Генератор змінної напруги …….……35
2.3 Блок реєстрації вимірювального сигналу ..…….. 37
2.4 Моделювання блоку реєстрації та обробки сигналу вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур …….……42
2.4.1 Моделювання схеми сполучення датчика струму і напруги з мікроконтролером ……...……...42
3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур ……..…45
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів……..……45

3.2 Виробнича санітарія……48

3.3 Електробезпека……49

3.4 Пожежна безпека та техногенна безпека……..50

3.5 Розрахунок освітлення робочого місця ……51

Висновки та рекомендації……54

Перелік посилань……..59

Додаток А……...63

Вступ

При проектуванні та розробці нових електротехнічних пристроїв і обладнання з покращеними характеристиками знання електрофізичних, фізико-технічних та механічних властивостей використовуваних матеріалів є обов'язковою умовою раціонального вирішення цього завдання. Забезпечення високої надійності роботи електроенергетичного обладнання ґрунтується насамперед на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються в матеріалах протягом їх експлуатації, знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів, вимогах діючих ДСТУ, нормативних та технічних умовах їх використання. Це є запорукою надійної роботи електричних мереж і комплексу електроенергетичного обладнання.

Використання ізоляційних матеріалів з високими діелектричними властивостями, високою робочою температурою зменшує малогабаритні показники електротехнічних пристроїв, а значить дає змогу підвищувати їх ККД за рахунок зменшення втрат [1,2].

В наш час нові електротехнічні матеріали створюються в результаті як глибокого вивчення фізико-технічних характеристик, так і удосконалення технології виготовлення і широкого використання нових, раніше незастосовуваних в техніці видів сировини. На перше місце у вітчизняній електротехніці ставиться швидке удосконалення якості матеріалів, їх правильний вибір, коли вони використовуються як провідники, діелектрики, напівпровідники або магнітні матеріали. Тому для розуміння властивостей матеріалів, а також інших особливостей потрібно досліджувати їх структуру і будову. Поєднання основних вимог з реальними можливостями виробництва забезпечить якість матеріалів, їх технологічність і високі параметри [1,2].

1. Діелектрики – загальні відомості, методи та прилади вимірювання характеристик

1.1 Загальні відомості про діелектрики

Діелектриками називаються матеріали основною властивістю яких є здатність до поляризації і в яких можливе існування електростатичного поля. Реальний технічний діелектрик тим більше наближається до ідеального, чим менша його питома електропровідність, і чим слабше виражені в нього сповільнені механізми поляризації, пов'язані з розсіюванням електричної енергії і виділенням тепла. Питомий електричний опір діелектриків лежить в межах 10^8-10^{17} Ом·см. Діелектрики поділяють на газоподібні, рідкі і тверді, які можуть бути природніми і синтетичними, а також неорганічними і органічними. За розмірами молекул поділяються на низькомолекулярні та високомолекулярні, за формою молекул – на термопластичні і термореактивні, за електричними властивостями класифікуються на полярні і неполярні [1-10].

Електроізоляційними матеріалами називаються діелектрики, які застосовують для запобігання витоків електричних зарядів, тобто вони повинні розділювати електричні кола одне від одного, або струмопровідні частини від провідникових частин (металеві корпуси, заземлення).

Активні діелектрики (керовані) – це сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики, матеріали для випромінювання і затворів в лазерній техніці, електрети.

Раніше питання використання електроізоляційних матеріалів було досить простим. Широко використовувались в електроізоляційній техніці матеріали природного походження: деревина, бавовняно-паперове волокно,

шовк, рослинні оливи, натуральний каучук, природні смоли, кам’яні породи і т.д [1-10].

За останні роки умови в яких працює електротехнічна апаратура стали значно складнішими. Піднялись робочі напруги електричних машин і апаратів, повітряних і кабельних ліній електропередач. Зросли одиничні потужності електроагрегатів за рахунок підвищення напруги з однієї сторони і також за рахунок збільшення габаритів агрегату (великі значення струмів вимагають збільшення перерізу провідників, за рахунок чого ростуть габарити).

В інших випадках, навпаки, вимагається досить малих габаритів радіоелектронних пристроїв. Тут потрібно вирішувати інші завдання. Так, для мініатюрних пристроїв потрібні матеріали з малими діелектричними втратами. Крім того доводиться мати справу з високими і надвисокими частотами.

Досить часто ізоляційним матеріалам доводиться працювати в умовах підвищеної вологості, дії хімічного середовища, проникаючого випромінювання, механічних зусиль, низьких температур. Одночасно з тим, що погіршуються умови експлуатації апаратів, підвищуються вимоги до надійної роботи електротехнічних пристроїв, що забезпечується в першу чергу надійністю їх електричної ізоляції, контактних з’єднань, напівпровідникових і діелектричноактивних елементів схеми [1-10].

З цього випливає необхідність всестороннього дослідження властивостей нових матеріалів, по яких ще не зібраний достатній досвід експлуатації [1-10].

Для того, щоб свідомо розібратися у вимогах, які виставляються до електротехнічних матеріалів потрібно вивчати ті фізичні явища, які відбуваються в матеріалах при дії на них електромагнітного поля і встановити параметри, що кількісно визначать властивості матеріалів. Як правило, всі нові, що мають високі властивості електротехнічні матеріали, мають синтетичне походження.

Велике значення мають синтетичні високомолекулярні сполуки (органічні та елементоорганічні полімери), а також неорганічні матеріали як скло, керамічні і склокерамічні матеріали, а також вирощені монокристали різноманітних речовин.

За останні роки відкриті нові види діелектричних, провідникових, напівпровідникових, магнітних матеріалів, що мають особливі властивості. Цілий ряд наукових інститутів займається проектуванням і виготовленням матеріалів з новими, наперед заданими властивостями, для подальшого використання в нових принципово нових технічних винаходах.

Так, наприклад, можна говорити про такі винаходи, як лазерна техніка, використання якого стало можливим завдяки вирощуванню монокристалів рубіну з дуже високим ступенем паралельності, апаратура голографії для захисту цінних паперів і багато інших. Для виготовлення електротехнічних матеріалів використовують різноманітні, іноді дуже складні технологічні процеси – виготовлення синтетичних матеріалів, вакуумне напилення напів-провідникових матеріалів на різні основи (мікросхеми), способи глибокої очистки матеріалів. Наприклад, зонна плавка матеріалів і сплавів, рафінування металів способом електролізу [1-10].

Вивчення цього курсу дасть змогу інженерам-електрикам правильно вибрати той чи інший матеріал для роботи в умовах впливу сильних електричних і магнітних полів, а також кліматичних факторів. Цим забезпечиться надійна робота електротехнічних пристроїв протягом тривалого часу без виникнення аварійних режимів.

Електропровідність діелектриків пояснюється наявністю в них вільних заряджених частинок (іонів, моліонів та електронів). Поляризаційні процеси зміщення зв’язаних зарядів в речовині до моменту встановлення рівноважного стану протікають в часі, утворюючи струми зміщення в діелектрику. Струми зміщення настільки короткочасні, що їх не можна зафіксувати приладами. Їх називають абсорбційними струмами.

При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрям, протікають тільки в моменти ввімкнення і вимкнення на-пруги. При змінній напрузі вони протікають протягом всього часу знаходження матеріалу в електричному полі.

Наявність в технічних діелектриках невеликої кількості вільних зарядів приводить до виникнення слабких наскрізних струмів. Струм витікання в технічному діелектрику є сумою наскрізного струму і струму абсорбції[1-10]

$$I = I_{ск} + I_{аб}. \qquad (1.1)$$

Для діелектриків найбільш характерна іонна електропровідність. Вона виникає в матеріалах завдяки присутності практично неминучих забруднень – домішок води, солей, кислот, лугів.

В деяких випадках дії електролізу піддається основ-на речовина при проходженні через неї струму. Прикладом може бути звичайне скло, в якому завдяки його прозорості можна спостерігати утворення і перенесення продуктів електролізу (ріст дендритних кристалів із атомів металу, що входять до складу скла – Na, Fe).

Моліонна електропровідність за своєю фізичною суттю близька до іонної. Цей вид електропровідності спостерігається в колоїдних системах, що є тісною сумішшю двох фаз, з яких одна фаза у вигляді дрібних частинок рівномірно розподілена в другій – дисперсному середовищі.

З колоїдних систем у техніці найчастіше зустрічаються емульсії (обидві фази є рідинами) і суспензії – тверда речовина і рідина.

В *електронній електропровідності* носіями заряду є вільні електрони. Такі складні сполуки як TiO_2; $BaTiO_3$; $BaTi_4O_9$; $CaTiO_3$; $SrTiO_3$ проявляють електронний характер провідності.

За своїм призначенням електроізоляційні матеріали не повинні пропускати електричний струм під дією прокладеної постійної електричної напруги, тобто вони мають бути непровідниками. Проте, як показує досвід, ідеальних ізоляторів не існує і всі вони пропускають незначний струм під дією прикладеної напруги [1-10].

1.2 Поляризація діелектриків

Найважливішою властивістю діелектриків є їхня здатність до поляризації під дією прикладної електричної напруги. Процес поляризації є зміною розташування в просторі частинок діелектрика, які мають електричні заряди, причому діелектрик одержує індукований (наведений) електричний момент, а в конденсаторі, який утворений діелектриком з електродами утворюється електричний заряд.

Інтенсивність поляризації визначається поляризованістю *P*, що вимірюється в Кл/м^2. В однорідному полі, коли дипольні електричні моменти всіх *n* молекул орієнтовані паралельно (рисунок 1.1), поляризованість визначається за формулою [1-10]:

$$Đ = \frac{\sum_{з=1}^{n} \mu_i}{S \cdot h}, \qquad (1.2)$$

де μ_i – сумарний електричний момент молекули; $V = S \cdot h$ – об'єм діелектрика між обкладками конденсатора [1-10].

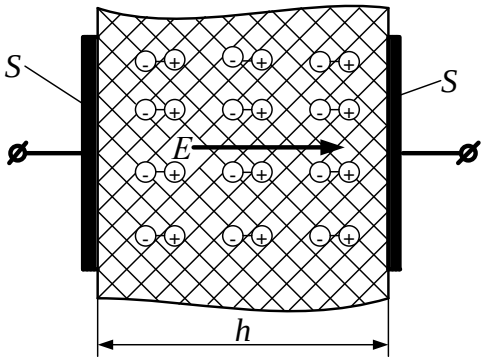


Рисунок 1.1. - Розміщення зарядів у поляризованому діелектрику.

Оскільки в глибині діелектрика додатні і від'ємні заряди взаємно компенсуються, то нескомпенсовані електричні заряди залишаються на поверхні діелектрика. Таким чином, у випадку однорідного електричного поля поляризованість діелектрика дорівнює поверхневій густині його зарядів.

Якщо збільшувати напруженість електричного поля, то поверхнева густина електричних зарядів буде також збільшуватись, відповідно буде збільшуватись і поляризованість діелектрика.

Для більшості діелектриків поляризованість прямо пропорційна напруженості електричного поля і їх називають лінійними. В деяких діелектриків, особливо у сегнетоелектриків ця залежність не є прямо пропорційною і їх називають нелінійними. В останній час вони знаходять все ширше застосування, оскільки дають змогу керувати електричними та оптичними властивостями матеріалів шляхом зміни напруженості електричного поля, температури і т.д. Такі діелектрики прийнято називати анізотропними.

Діелектрик, ввімкнений в електричне коло, можна розглядати як конденсатор визначеної ємності.

Величина заряду (Кл) визначається, як [1-10]

$$Q = C \cdot U, \tag{1.3}$$

де C – ємність конденсатора, Ф; U – напруга, В.

При паралельному з’єднанні конденсаторів сумарна (еквівалентна) ємність дорівнює сумі ємностей віток:

$$C_{екв} = \sum_{i=1}^{n} C_i. \tag{1.4}$$

При послідовному з’єднанні конденсаторів еквівалентна ємність буде виражена формулою:

$$\frac{1}{C_{екв}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}. \tag{1.5}$$

Енергія електричного поля (Дж), що накопичена в ділянці ізоляції з ємністю C, до якої прикладена напруга U:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}. \tag{1.6}$$

В будь-якому діелектрику, поміщеному в електричне поле, спостерігаються такі явища: зміщення зарядів різних видів поляризації,

переміщення зарядів або струму по об’єму структури або на поверхні та нагрів діелектрика від енергії розсіяння[11-16].

Ємність конденсатора з діелектриком і накопичений в ньому електричний заряд зумовлені сумарною дією механізмів поляризації, що представлені на схемі заміщення діелектрика (рисунок 1.2.).

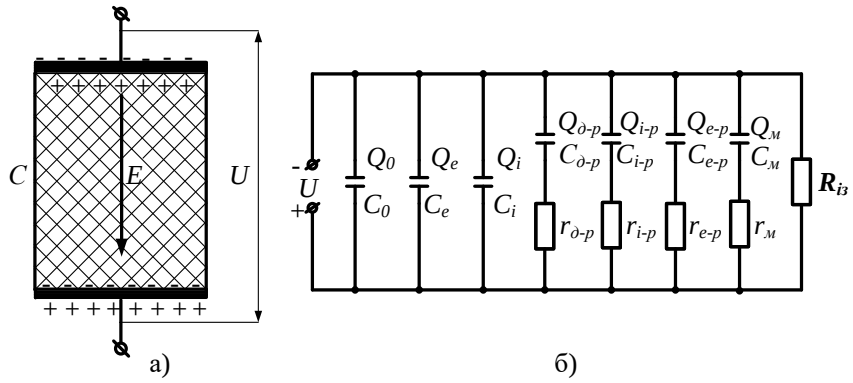


Рисунок 1.2 - Діелектрик складної будови з різними механізмами поляризації в електричному полі (а) і його еквівалентна схема (б).

Електронна поляризація є жорстким зміщенням і деформацією електронних оболонок атомів та іонів. Діелектрична проникність речовини з чисто електронною поляризацією чисельно дорівнює квадрату показника заломлення світла *n*. Електронна поляризація матеріалу зменшується при збільшенні температури в зв’язку з тепловим розширенням діелектрика.

Іонна поляризація характерна для твердих тіл з іонною будовою і зумовлюється зміщенням жорстко зв’язаних іонів. З підвищенням температури вона посилюється в результаті послаблення жорстких сил між іонами із-за збільшення відстані між ними при тепловому розширенні.

Дипольно-релаксаційна поляризація відрізняється від електронної та іонної тим, що вона пов’язана з тепловим рухом частинок. Дипольні молекули, що знаходяться в хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля, що і є причиною поляризації.

Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в неорганічному склі і в деяких неорганічних кристалічних речовинах. Тут іони речовини під дією електричного поля зміщуються в напрямі поля[11-16].

Електронно-релаксаційна поляризація характерна для діелектриків з високими степенем заломлення та електронною електропровідністю.

Міграційна поляризація розуміється як додатковий механізм поляризації, що може проявлятися в твердих діелектриках з неоднорідною структурою та наявності домішок.

1.3. Діелектрична проникність

Про явище поляризації судять за значенням діелектричної проникності ε. Параметр матеріалу, що характеризує здатність матеріалу утворювати ємність, називається ***діелектричною проникністю*** ε і показує, в скільки разів збільшується ємність конденсатора, коли між пластини конденсатора внести даний матеріал, не змінюючи габаритів конденсатора, в порівнянні з вакуумом. Потрібно врахувати, що ємність конденсатора залежить від його геометричних розмірів і властивостей матеріалу[11-16].

$$C = \varepsilon C_0, \tag{1.7}$$

де C_0 – ємність вакуумного конденсатора.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \Lambda; \qquad \Lambda = \frac{S}{h}; \qquad C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{h}, \tag{1.8}$$

де S – площа обкладок конденсатора, м^2; h – товщина ізоляційного шару, м; ε_0 – електрична постійна, $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; Λ – приведена довжина конденсатора, м.

Добуток $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon$ називається абсолютною діелектричною проникністю або питомою ємністю конденсатора.

Для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h}, \tag{1.9}$$

де S – площа обкладок, м^2; h – товщина ізоляційного шару, м.

Для циліндричного конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{2\pi l}{ln\frac{d_2}{d_1}} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{2\pi l}{ln\frac{r_2}{r_1}} = 2{,}42 \cdot 10^{-11} \frac{\varepsilon l}{lg\frac{d_2}{d_1}} = 2{,}42 \cdot 10^{-11} \frac{\varepsilon l}{lg\frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.10)$$

Тут l – довжина конденсатора, м; r_1, r_2 – радіуси внутрішньої і зовнішньої обкладок, м.

Якщо $d_2 - d_1 = d_1$, то

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \pi l \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} = 2{,}78 \cdot 10^{-11} \varepsilon l \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}. \quad (1.11)$$

Для сферичного конденсатора:

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}. \quad (1.12)$$

Для кабелів, систем паралельних проводів введено поняття питомої ємності, тобто ємності, віднесеної до одиниці довжини кабелю [11-16]..

$$K = \frac{C}{l} \left[\frac{мкФ}{км}\right]. \quad (1.13)$$

Для коаксіального кабелю:

$$K = 0{,}024 \frac{\varepsilon}{lg\frac{d_2}{d_1}} = 0{,}024 \frac{\varepsilon}{lg\frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.14)$$

Для *двох паралельних круглих проводів* діаметром $d(r)$ кожний і при віддалі між осями проводів h при умові ($d = h$):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot 10^{-9} \frac{\pi l}{ln\frac{d}{2h}} = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot 10^{-9} \frac{\pi l}{ln\frac{r_2}{r_1}} = 0{,}0121 \frac{\varepsilon}{lg\frac{d}{2h}} = 0{,}0121 \frac{\varepsilon}{lg\frac{r}{h}}. \quad (1.15)$$

Запишемо формули, що визначають опір та ємність ділянки ізоляції.

$$R = \frac{\rho}{\Lambda}, \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon \Lambda. \quad (1.16)$$

Перемноживши праві і ліві частини, одержимо

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho. \quad (1.17)$$

Таким чином для будь-якого конденсатора або ділянки ізоляції добуток CR не залежить від габаритів і форми конденсатора, а залежить винятково від ε і ρ. Іноді у випадку, коли об'ємний опір R_V значно перевищує R_S, то в цю формулу може бути підставлено $CR_{із}$. Добуток $CR_{із}$ має певний фізичний

зміст: він є опором ізоляції, віднесеним до одиниці ємності. Крім цього цей добуток характеризує процес саморозряду конденсатора (рисунок 1.3) [11-16].

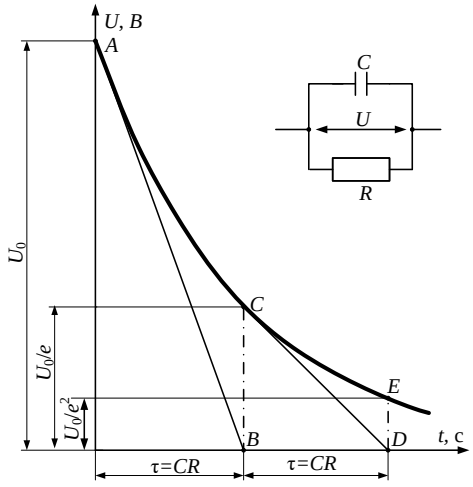


Рисунок 1.3 - Залежність напруги на конденсаторі при його саморозряді від часу та схема його саморозряду.

Рівняння спаду напруги *u* на електродах конденсатора в функції часу *t*, що був під напругою U_0 для схеми заміщення (рис.1.3) має вигляд:

$$u = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{CR_{ç}}} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \qquad (1.18)$$

$\tau = CR_{ç}$ – *постійна саморозряду*, тобто час, за який напруга *U* на конденсаторі зменшується в *e* = 2,718 разів. Чим більше $CR_{із}$, тим якість ізоляції якнайкраща.

На практиці часто приходиться зустрічатися із задачею визначення діелектричної проникності ε_c композиційного діелектрика, що є сумішшю двох або більше компонентів.

Діелектрична проникність складних діелектриків може бути в першому наближенні визначена на основі логарифмічного закону:

$$\varepsilon^x = y_1 \cdot \varepsilon_1^{\,x} + y_2 \cdot \varepsilon_2^{\,x}, \qquad (1.19)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – відносні діелектричні проникності першого і другого компонентів суміші; y_1, y_2 – об’ємні концентрації першого і другого компонентів суміші.

Сума концентрацій задовольняє умові: $y_1 + y_2 = 100\%$ або $y_1 + y_2 = 1;$ $x -$ константа, що задовольняє умові $-1 \le x \le 1,$ і характеризує шаровий розподіл компонентів (рисунок 1.4) [11-16].

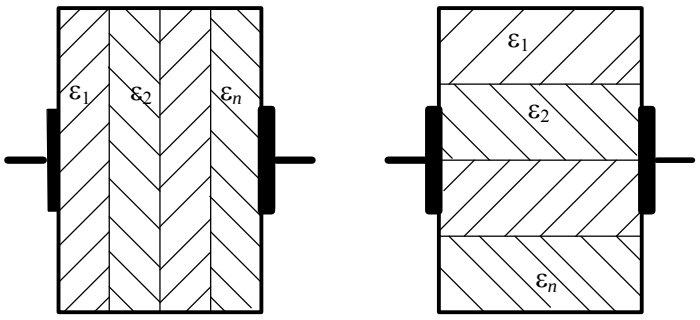


Рисунок 1.4 - Плоский конденсатор з різними діелектриками (ε_1, ε_2, ..., ε_n), що з'єднані послідовно (а) і паралельно (б).

Для паралельного сполучення діелектриків (x = 1) [11-16].:

$$\varepsilon_c = y_1 \cdot \varepsilon_1 + y_2 \cdot \varepsilon_2. \qquad (1.20)$$

Для послідовного сполучення (двошаровий діелектрик (x = –1)):

$$\frac{1}{\varepsilon_c} = \frac{y_1}{\varepsilon_1} + \frac{y_2}{\varepsilon_2} \quad \text{або} \quad \varepsilon_c = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{y_1\varepsilon_2 + y_2\varepsilon_1}. \qquad (1.21)$$

Формули (1.20), (1.21) можуть використовуватись в багатьох практичних випадках. Встановлено, що для конденсаторного паперу досить добре підходить модель послідовно з'єднаних шарів паперу і повітря.

При хаотичному розподілі компонентів, що спостерігається в технічних діелектриках, наприклад, кераміці, пластмасі, коли $x \to 0,$ маємо:

$$lg\,\varepsilon_c = y_1 \cdot lg\,\varepsilon_1 + y_2 \cdot lg\,\varepsilon_2. \qquad (1.22)$$

Слід відмітити, що формула (1.22) придатна для розрахунку не тільки діелектричної проникності, але й магнітної проникності і питомої електропровідності сумішей. У всіх випадках потрібно вважати, що компоненти утворюють тісну фізичну суміш, але хімічно один з одним не реагують [11-16]..

1.4 Вимірювачі електрофізичних властивостей діелектриків [17]

Вимірювач RC E 4980A (рисунок 1.5)



Рисунок 1.5 - Вимірювач RC E 4980A

- Робочий діапазон частот від 20 Гц до 2 МГц, роздільна здатність 4 десяткових розряди на будь-якій межі.
- Базова похибка вимірювання імпедансу 0,05%
- Високошвидкісні вимірювання: 5,6 мс.
- Випробувальний сигнал 20В СКЗ змінного струму.
- Вбудоване джерело напруги зміщення 40В постійного струму.
- Постійний струм зміщення до 40А з зовнішнім джерелом постійного струму 42841А.
- Свіпування за списком з 201 точки.

Прецизійний вимірювач LCR E4980AL (рисунок 1.6)



Рисунок 1.6 - Прецизійний вимірювач LCR E4980AL

- Спрощена версія моделі E4980A
- Від 20 Гц до 300 кГц/500 кГц/1 МГц, роздільна здатність 4 розряди у всіх піддіапазонах
- Похибка вимірювання 0,05%, висока відтворюваність результатів вимірювань як на нижніх, так і на верхніх межах вимірювання імпедансу
- Вимірювальний сигнал: напруга від 100 мкВ до 2 СКЗ, сила струму від 1 мкА до 20 мА
- Напруга зміщення: 1,5 В/2 В
- Автоматичний контроль рівня сигналу
- Вимірювання опору постійному струму
- Свіпування за списком з 201 точки
- Інтерфейси LAN, USB і GPIB

Можливість модернізації (діапазон частот, інтерфейс сортувальника, інтерфейс

Вимірювач LCR E4982A (рисунок 1.7)



Рисунок 1.7 – Вимірювач LCR E4982A

- Вимірювання: опір, індуктивність, ємність, добротність, тангенс кута втрат, фазовий зсув, провідність
- Частота тест-сигналу: 1 МГц...3 ГГц, роздільність 100 кГц
- Швидкість вимірювань: 0,9 мс (режим 1), 2,1 мс (режим 2), 3,7 мс (режим 3)
- Базова похибка 0,8%
- Діапазон вимірювань 140 мОм-4,8 кОм
- Сумісність з SCPI командами
- Тестуюча голівка маленького розміру
- Інтерфейси: USB, GPIB, LAN, Відеовихід VGA (D-Sub)
- Маса: 13 кг

Отже, для вимірювання діелектричної проникності анізотропних діелектриків (сегнетоелектриків, піроелектриків, електретів, оптично прозорих структур для електрооптичних і акустооптичних модуляторів) використання стандартної універсальної промислової апаратури потребує додаткової оцінки на вплив зовнішніх вимірювальних факторів – таких як електричне поле (прикладена зовнішня напруга), чистота зони експерименту, зовнішня температура, вплив оптичних полів.

Тому, метою роботи є розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

1) провести аналіз існуючих методів вимірювання діелектричної проникності;

2) розробити структурну схему пристрою вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур ;

3) розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою;

4) провести моделювання роботи електричних схем пристрою за допомогою сучасних САПР;

5) розробити заходи по умовам дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

2. Розробка вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур

2.1 Структурна схема вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур

2.1.1 Розрахунок умов проведення експериментів по дослідженню діелектричних властивостей анізотропних оптичних структур

Для складання структурної схеми експерименту проведено розрахунок вхідних параметрів вимірювача – струмів та електричних полів, які будуть прикладені до досліджуваних матеріалів. На підставі розрахунків обирається структурна схема із відповідними до умов експерименту функціональними блоками.

Струм, що проходить через ділянку ізоляції або через зразок електроізоляційного матеріалу при встановленому процесі провідності після прикладання постійного струму називається наскрізним струмом витікання і дорівнює сумі об'ємного і поверхневого струмів [1-10].

$$I_{iç} = I_V + I_S . \qquad (2.1)$$

Для твердих діелектриків розрізняють об'ємну провідність ізоляції G_V і поверхневу провідність G_S (рис.1.6.).

Об'ємна провідність при низьких температурах зумовлена рухом слабо закріплених іонів. При підвищених температурах провідність зумовлена переносом іонів основної речовини діелектрика, що звільнилися з вузлів

кристалічної решітки. У гігроскопічних матеріалах (тканини, пориста кераміка) об’ємна провідність збільшується у вологому повітрі за рахунок поглинання вологи, яке проходить тим сильніше, чим більша відносна вологість повітря.

Поверхнева електропровідність діелектрика на практиці залежить від стану його поверхні, а саме ступеня її зволоження і забруднення. Найменшим значенням питомої поверхневої провідності володіють неполярні діелектрики, поверхня яких не змочується водою. Полярні діелектрики характеризуються більш високими значеннями питомої поверхневої провідності. Для зменшення поверхневої провідності електроізоляційних матеріалів їх покривають вологостійкими, які не змочуються водою, речовинами, наприклад, кремній-органічними лаками [1-10].

У відповідності з поняттями провідностей введемо поняття об’ємного і поверхневого опорів, оскільки опір – величина, обернена до провідності, $R = 1/G.$

Об’ємний опір розраховують по формулі:

$$R_V = \rho_V \cdot \frac{h}{S}, \tag{2.2}$$

де ρ_V – питомий об’ємний опір, Ом·м; S – площа електроду, м^2; h – товщина зразка, м.

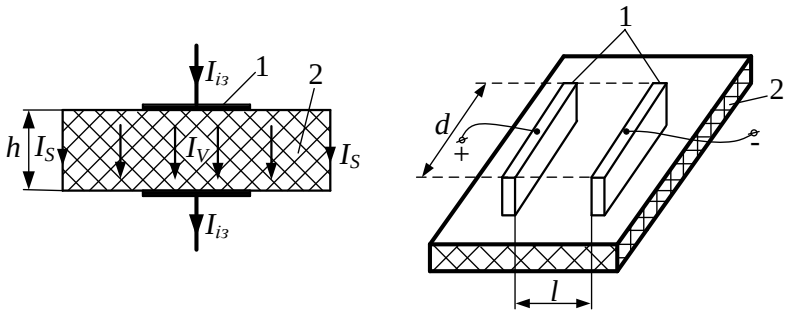


Рисунок 2.1 - До визначення об’ємного та поверхневого опорів діелектрика.

Поверхневий опір [1-10]:

$$R_S = \rho_S \cdot \frac{l}{d}, \tag{2.3}$$

де ρ_S – питомий поверхневий опір матеріалу, Ом; d – ширина електродів, м; l – віддаль між електродами, м.

Повний опір ізоляції твердого діелектрика визначають, як опір паралельного ввімкнення цих двох опорів:

$$R_{із} = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S}. \quad (2.4)$$

Тоді струм, що проходить через ділянку ізоляції дорівнює:

$$I_{із} = \frac{U}{R_{із}}. \quad (2.5)$$

Величина питомого об'ємного опору ρ_V становить:

– для чистих, однокомпозиційних, однорідних матеріалів (кристали, полімери та подібні їм діелектрики) $\rho_V < 10^{15}$-10^{13} Ом·м;

– для технічних діелектриків, для яких характерна релаксаційна поляризація $\rho_V < 10^{13}$-10^{10} Ом·м;

– для складних діелектриків, композиційних і шарових матеріалів $\rho_V < 10^{10}$ Ом·м[1-10].

Питомий поверхневий опір ρ_S визначається адгезією матеріалу до вологи, урахуванням забруднення і шерехуватості його поверхні:

– для діелектриків з незмочуваною поверхнею, нерозчинною або такою, що не вбирає у себе вологу $\rho_S < 10^{13}$-10^{11} Ом;

– для діелектриків, що частково вбирають у себе вологу, а також з непровідним забрудненням $\rho_S < 10^{11}$-10^{10} Ом;

– для діелектриків, що поглинають у себе вологу і розчинюють її $\rho_S < 10^9$ Ом.

Часто при розрахунку ізоляції використовують приведену довжину діелектрика: $\Lambda = \frac{S}{h}$.

Розглянемо випадок ділянки ізоляції між електродами, що мають вид коаксіальних циліндрів (рис.2.2.) з осьовою довжиною l, м, діаметром внутрішнього електроду d_1 (радіус r_1) і діаметром зовнішнього електроду d_2 (радіус r_2), тобто циліндричний конденсатор.

Приведена довжина для циліндричної ділянки ізоляції:

$$\Lambda = \frac{2\pi l}{ln\frac{d_2}{d_1}} = \frac{2\pi l}{ln\frac{r_2}{r_1}}. \qquad (2.6)$$

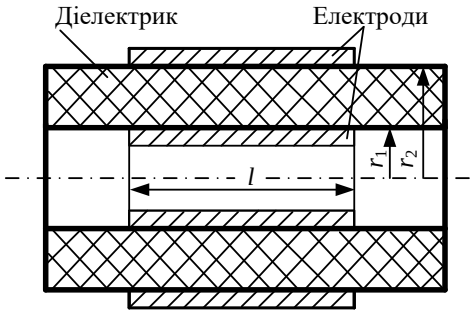


Рисунок 2.2 - Ділянка ізоляції між електродами у вигляді двох коаксіальних циліндрів (циліндричний конденсатор).

Поверхневий опір конденсатора:

$$R = \frac{\rho_V}{2\pi l} \cdot ln\frac{d_2}{d_1} = \frac{\rho_V}{2\pi l} \cdot ln\frac{r_2}{r_1}. \qquad (2.7)$$

Якщо $d_2 - d_1 = d_1$, тоді:

$$R = \frac{\rho(d_2 - d_1)}{\pi l(d_2 + d_1)} = \frac{\rho(r_2 - r_1)}{\pi l(r_2 + r_1)}, \qquad (2.8)$$

або

$$\Lambda = \pi l \cdot \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} = \pi l \cdot \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}. \qquad (2.9)$$

Питомий поверхневий опір ρ_S характеризує властивість електроізоляційного матеріалу створювати на поверхні поверхневий опір.

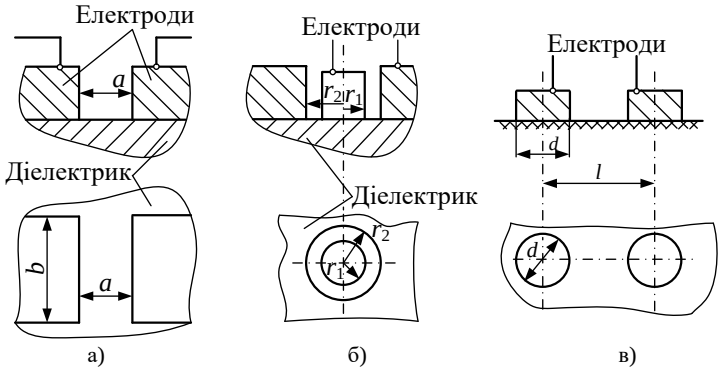


Рисунок 2.3 - До визначення поверхневого опору між плоскими електродами (а), між концентричними електродами (б), між дисковими електродами (в).

Для плоских електродів (рис.2.3,а):

$$R_S = \rho_S \cdot a / b\,. \tag{2.10}$$

Поверхневий опір кільцевого проміжку дорівнює (рис.2.3,б):

$$R_S = \frac{\rho_S}{2\pi} ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{\rho_S}{2\pi} ln \frac{r_2}{r_1}. \tag{2.11}$$

Якщо $d_2 - d_1 = d_1$, то

$$R_S = \frac{\rho_S (d_2 - d_1)}{\pi (d_2 + d_1)} = \frac{\rho_s (r_2 - r_1)}{\pi (r_2 + r_1)}. \tag{2.12}$$

Поверхневий опір між двома дисковими електродами, що мають діаметр d і віддаль l (рис.2.3,в):

$$R_S = \frac{\rho_S}{2\pi} ln \left(\frac{l}{d} + \sqrt{\left(\frac{l}{d}\right)^2 - 1} \right). \tag{2.13}$$

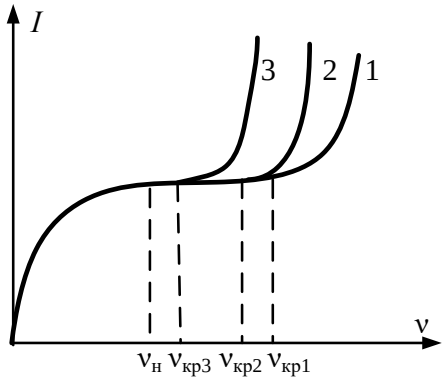
Якщо $d = l$, тоді приблизно:

$$R_S \approx \frac{2\rho_S}{\pi} \cdot \frac{2l - d}{2l + d} = \frac{2\rho_S}{\pi} \cdot \frac{l - r}{l + r}. \tag{2.14}$$

Ці формули справедливі, якщо знехтувати розтіканням ліній струму від країв електродів в частину об’єму ізоляції, що не охоплюється електродами.

Гази при невеликих напруженостях електричного поля володіють дуже малою електропровідністю. Струм у газах може виникнути тільки при наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація молекул газу виникає по двох причинах: або внаслідок будь-яких зовнішніх факторів, або внаслідок співударів заряджених частинок (вільних електронів) газу з нейтральними молекулами.

Інколи, особливо в розріджених газах, можлива поява електропровідності за рахунок іонів, утворених в результаті співударів заряджених частинок з молекулами газу. Така іонізація називається ударною. В слабких електричних полях ударної іонізації немає і відповідно немає самостійної електропровідності[1-10].



Риунок 2.4. Електропровідність газу 1, рідини 2 і твердого діелектрика 3.

На кривій 1 рис. 2.4. розрізняють: до $\nu_н$ несамостійну іонізацію, коли зі збільшенням концентрації заряду ν спостерігається збільшення струму *I* до його насичення $\nu_н$. Тут зовнішнє електричне поле змінює величину струму (на лінійній ділянці за законом Ома, на нелінійній – не виконується). Потім виділяється область насичення струму (від $\nu_н$ до $\nu_{кр}$), коли явище рекомбінації призводить до збільшення струму, хоча концентрація зарядів зростає (широка ділянка цієї кривої характерна для газів, тобто для матеріалів, у яких мала кількість домішок). Ділянка кривої 1 за межами $\nu_{кр1}$ – це самостійний процес іонізації, коли зовнішні фактори (ультрафіолетові промені, рентгенівське випромінювання і світловий тиск) суттєво підвищують електропровідність газу.

Електропровідність *рідин* пов'язана з будовою їх молекул (крива 2). В неполярних рідинах електропровідність залежить від вмісту дисоційованих домішок, в тому числі і від води. В полярних рідинах електропровідність визначається не тільки домішками, але й дисоціацією молекул власне рідини (крива 2, ділянка від $\nu_н$ до $\nu_{кр2}$). Неможливість повного видалення з рідких діелектриків домішок, здатних до дисоціації, ускладнює отримання високоякісних електроізоляційних рідин з малою питомою електропровідністю. Найбільш точною для визначення питомої електропровідності при зміні температури є формула [1-10].

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha t}, \qquad (2.15)$$

де γ, α – константи для заданої рідини; *t* – температура, ^{o}C.

Зменшити питому провідність можна шляхом очистки рідкого діелектрика. При довготривалому пропусканні електричного струму через неполярну рідину спостерігається зменшення електропровідності із-за переносу вільних іонів домішок до електродів. Цей процес носить назву електричної очистки діелектрика. Питома провідність будь-якої рідини залежить від температури. З її збільшенням збільшується рухливість іонів через зменшення в'язкості рідини, що призводить до збільшення електропровідності.

Для спрощення розрахунків за формулами (1.7 - 1.22) може бути використана номограма (рис. 2.5). На трьох її шкалах відкладені $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ (для випадку $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$), y_1 (y_2) і $\varepsilon_c/\varepsilon_2$. Точки на шкалах, що відповідають умові (1.22) лежать на одній прямій, так, що за двома відомими величинами легко знаходиться третя [1-10].

Як приклад, на номограмі показано знаходження діелектричної проникності ε_c для пластмаси, що складається із 20 % наповнювача ($y_1 = 0{,}2$) – порошка рутилу ($\varepsilon_1 = 110$) і 80 % ($y_2 = 0{,}8$) зв'язуючого – полістиролу ($\varepsilon_2 = 2{,}6$). Пунктирна пряма, що з'єднує точки $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 42{,}4$ і $y_1 = 0{,}2$ ($y_2 = 0{,}8$), перетинає третю шкалу в точці $\varepsilon_c/\varepsilon_2 = 2$. Таким чином, $\varepsilon_c = 2 \cdot 2{,}6 = 5{,}2$.

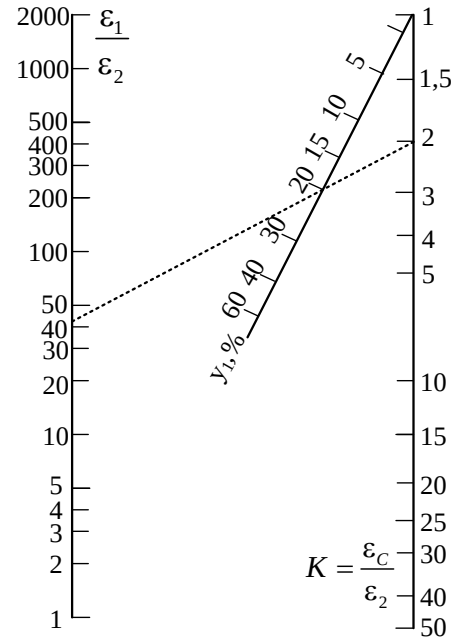


Рисунок 2.5. Номограма розрахунку діелектричної проникності суміші за формулою (1.22) [1-10].

Діелектрик, знаходячись в електричному полі, втрачає властивості ізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення, при якому руйнуються молекулярні зв’язки. Це явище має назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якому проходить пробій, називається пробивною напругою, а відповідне значення напруженості поля – електричною міцністю діелектрика. Пробій (довготривалий чи короткочасний) призводить до втрат діелектричних властивостей і утворенню каналу з високою електричною провідністю.

Електрична міцність діелектрика в місці пробою:

$$E_{пр} = U_{пр} / h, \qquad (2.16)$$

де $E_{пр}$ – електрична міцність діелектрика, кВ/м, $U_{пр}$ – пробивна напруга, кВ, h – товщина діелектрика в місці пробою, м.

Проходження струму через ділянку ізоляції зображено на рис.2.6.

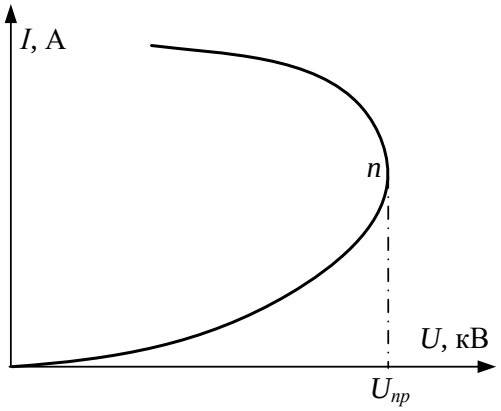


Рисунок 2.6 - Вольтамперна характеристика ізоляції при пробої.

Точка *n* на графіку, для якої $dI / dU \to \infty$, відповідає пробою. Подальші явища в діелектрику після пробою визначаються характером електротехнічного матеріалу і потужністю джерела. В місці пробою виникає дуга, що може викликати плавлення, обгоряння, розтріскування або розкладення (для полімерів) як діелектрика, так і електродів. Після зняття напруги залишається слід в твердому діелектрику, у вигляді пробитого, проплавленого або пропаленого отвору. Для електричних апаратів пробій ізоляції, як правило, явище аварійного характеру, що виводить їх з ладу і потребує ремонту або заміни.

Електрична міцність високоякісних твердих діелектриків, як правило вища від електричної міцності рідких чи газоподібних діелектриків. Тому, якщо відстань між близькими точками електродів по поверхні твердої ізоляції ненабагато перевищує відстань по об'єму ізоляції, то при підвищенні напруги в першу чергу пробивається не ізоляція, а проходить поверхневий пробій – перекриття ізоляції, тобто розряд в прилеглому до ізоляції шарі газоподібного діелектрика, наприклад повітря (перекриття фарфорових ізоляторів). Низька електрична міцність спостерігається у діелектриків з відкритими порами (дерева, паперу, неглазурованої кераміки).

Зовнішньою ізоляцією в багатьох видах електротехнічних конструкцій: в трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередач – є повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з $E_{пр}$ більшості рідких та твердих діелектриків. Явище пробою газу залежить

від степені однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами з заокругленими краями, а також між сферами при віддалі між ними, що співрозмірні з діаметром сфери. В такому полі пробій наступає практично миттєво при досягненні строго визначеної напруги, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім переходить в дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність. Появу іскри при заданій віддалі між електродами використовують для визначення значення прикладеної напруги (вимірювання високих напруг з допомогою шарових розрядників). При малих відстанях між електродами спостерігається значне збільшення електричної міцності повітря.

Електричний пробій однорідних діелектриків по своїй природі є чисто електронним процесом, коли з електронів у твердому тілі утворюється електронна лавина. Цей вид пробою має місце тоді, коли впливом електропровідності і діелектричними втратами знехтувано.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків характерний для технічних діелектриків, що містять газові ввімкнення. Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення. Вище цього значення спостерігається суттєве зниження електричної міцності, що говорить про появу теплового пробою.

Електротепловий пробій виникає у випадку, коли кількість тепла, що виділяється всередині діелектрика за рахунок діелектричних втрат, буде більшою за кількість тепла, що відводиться в навколишнє середовище. Тепловий пробій є наслідком зменшення активного опору діелектрика під впливом нагріву в електричному полі, що приводить до збільшення активного струму і подальшого нагріву діелектрика аж до його термічного руйнування.

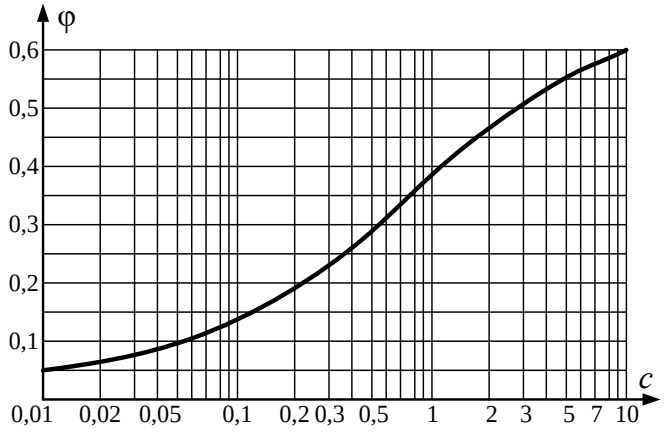
Для визначення пробивної напруги (кВ) при тепловому пробої користуються емпіричною формулою:

$$U_{пр.еф.} = 382\sqrt{\frac{\gamma_T}{f \cdot \varepsilon \cdot tg\delta_0 \cdot \alpha}} \cdot \varphi(c), \qquad (2.17)$$

де γ_T – коефіцієнт теплопровідності діелектрика, Вт/(м·К); f – частота напруги, Гц; ε – діелектрична проникність діелектрика; $tg\delta_0$ – втрати діелектрика при температурі навколишнього середовища; α – температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат ($TK_{tg\delta}$); φ(c) – функція, значення якої для плоских зразків знаходять по рис.2.7; c – аргумент, що обчислюється по формулі:

$$c = \frac{\gamma_{T1} \cdot \sigma \cdot h}{2\gamma_T \cdot (\gamma_{T1} + \sigma \cdot l)}, \qquad (2.18)$$

де γ_{T1} – коефіцієнт теплопровідності матеріалу електродів; σ – коефіцієнт теплопередачі в електроди, Вт/(м^2·К); h – товщина діелектрика, м; l – товщина електроду, м.



Риунок 2.7 - Залежність φ(c).

При необмеженому зростанні c величина φ(c) прямує до границі, що дорівнює 0,663. Звідси, для кожного діелектрика, навіть при необмеженому збільшенні товщини ізоляції, пробивна напруга при електротепловому пробої не може бути більшою граничного значення (кВ), яке отримується з формули (2.17) при підстановці в неї φ(c) = 0,663

$$U_{пр.еф.} = 253\sqrt{\frac{\gamma_T}{f \cdot \varepsilon \cdot tg\delta_0 \cdot \alpha}}. \qquad (2.19)$$

Формула (1.61) показує, що при електротепловому пробої пробивна напруга залежить як від частоти прикладеної напруги, зменшуючись при зростанні f, так і від температури навколишнього середовища (початкової

робочої температури діелектрика), зменшуючись при збільшенні цієї температури за рахунок збільшення $tg\delta_0$.

Отже, кількісні розрахунки і аналіз номограм провідності показав, що для ефективного вимірювання діелектричної проникності саме оптично прозорих діелектриків необхідно застосувати джерело наруги не менше 1 кВ змінного струму. У подальшому із збільшенням порядку симетрії може виникнути ситуація, коли вихідну напругу доведеться підвищувати.

Також аналіз показав, що стркми зсуву, які виникають у системі реєстрації будуть сильно впливати на якість контактної групи вимірювача. Тому для більш точного і безпечного вимірювання при підвищених напругах слід спеціально підготквати зразки із зазделегіть якісними контактами. Це зменшить негативний вплив підвищених електричних полів і ризик пробою діелектричного середовища.

Вирішенням перерахованих проблем може стати металізація поверхні діелектрика одним із вакуумних методів, або методом лазерного напилювання [18].

У роботя пропонується використати лазерний метод напилюванняконтактів. На рисунку 2.8 представлена схема лазерного напилювання контактів.



Рисунок 2.8 – Схема лазерного напилювання контактів

У даному пристрої для напилювання, схема якого наведена на рисунку 2.8 , лазер використовується як джерело високої енергії. Як видно з рисунка,

схема напилювання включає безпосередньо лазерну пушку, мішень з матеріалу, який необхідно розпилювати та підкладку, на яку наноситься речовина.

Переваги методу. Дозволяє одержати плівки з високою однорідністю.

Недолік методу. Метод розпилення досить локальний, тому що діаметр пучка, що впливає на поверхню металу становить лише 0,5 – 5,0 мм. Тому значна локальність пучка є недоліком цього методу.

Лазерний метод дозволяє розпорошити (розпилювати) й осадити практично будь–які метали, особливо ефективний цей метод для тугоплавких металів, які не можна розпилювати іншими методами.

Таким чином на підставі висновків із розрахунків і технологічних обмежень структурна схема вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур буде мати наступний вигляд (рисунок 2.9)

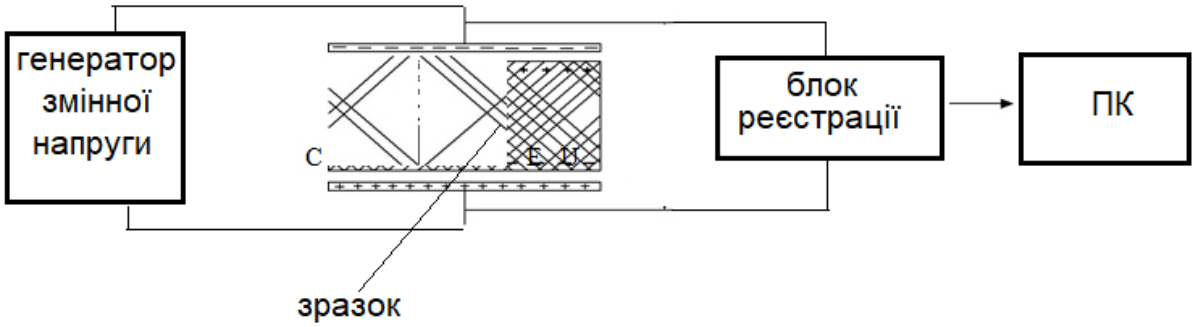


Рисунок 2.9 - Структурна схема вимірювача діелектричної проникності

2.2 Генератор змінної напруги

За модель генератора використали схему, представлену у роботі [19]. Як джерело енергії була використана одна фазова мережа 220 В, 50 Гц. Мережевий трансформатор (Т) служить для живлення системи управління та захисту (SUS) та "гальванічної розв'язки" генератора з джерела енергії. З

виходу блоку випрямляч (C) - фільтр (F) постійна напруга +350 у комутаторі (k) постачається до навантаження (H). Режим роботи комутатора встановлюється системою управління та захисту. Схема генератора представлена на рисунку 2.10.

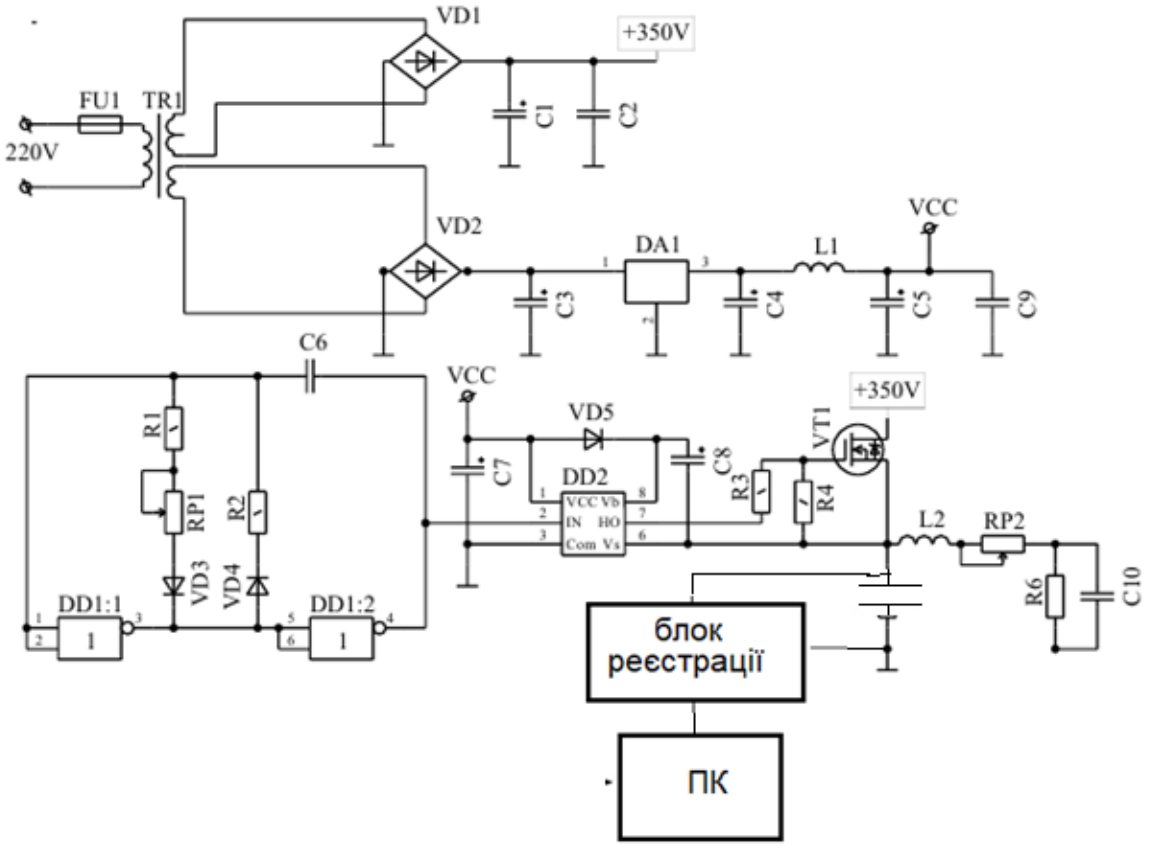


Рисунок 2.10 – Схема генератора змінної напруги

Трансформатор TR1 містить дві вторинні обмотки - перша, з коефіцієнтом перетворення КТ, близьким до 1, служить для створення робочої напруги генератора U = 350 В (VD1, C1, C2). Стабілізатор напруги підключений до другої обмотки +15 В (VD2, C3, C4, DA1, L1, C5, C9) до системи управління потужністю та захистом.

Генератор управління імпульсами (DD1.1, DD1.2, C6, VD3, VD4, R1, R2, RP1) [5] дозволяє відрегулювати тривалість в діапазоні від 2 мкс до 65 мкс. Координація генератора з перемикачем VT1 здійснюється верхнім ключовим драйвером IR2117 (DD2, VD5, C7, C8).

Як навантаження, ми використовується досліджуваний зразок. Імпульс напруги з навантаження видаляється на 0,5 метра з довжиною з скрученою парою (опір хвилі близько 50 Ом) [19]. Вхідний опір R6 та вхідна здатність C10 осцилоскопа формують вхідний фронт імпульсу. Для виправлення фронту імпульсу використовували ланцюг RP2, L2.

У якості комутатора використовується MOSFET - транзистор IRF840 з параметрами: максимальна робоча напруга - 500 В, час перемикання - 20 нс [6]. Відомо, що високошвидкісні перемикачі характеризуються впливом ефекта Міллера - сильного впливу "прохідної" здатності MOSFET - транзистора на форму імпульсу [19, 21]. Щоб придушити ефект Міллера, навантаження включається в коло стік - витік MOSFET - транзистора [19-22]. Таке включення навантаження дозволило отримати форму імпульсу, що мало відрізняється від часу перемикання MOSFET - транзистора.

2.3 Блок реєстрації вимірювального сигналу

Блок реєстрації сигналу, який надходить від досліджуваного зразка, складається із цифрового датчика струму і напруги, виконаного на мікросхемі INA219 [23]. Мікросхема INA21- вимірювач струму та напруги з нульовим дрейфом і володіє малими розмірами і вагою при дуже великих можливостях та високою точністю вимірювань.

Мікросхема вимірює параметри протікання струму у будь-якому напрямку з автоматичним перемиканням полярності вимірювання. Застосувати модуль можна в системах, які контролюють процес заряду/розряду акумуляторних батарей, джерелах живлення з контролем напруги і споживаного навантаженням струму. Можливості зміни I^2C адреси вимірювача дозволяють підключити на одну шину до 4-х таких пристроїв. Для збільшення точності вимірювань передбачений регістр калібрування.

Характеристики INA21 [23]:

- Тип модуля: вимірювання єлектричного струму
- Робоча температура: від -40С до 85С
- Дрейф в робочому температурному діапазоні: 100мкВ
- Максимальний вимірюваний струм: 3,2А
- Точність вимірювання струму: 0,8мА
- Роздільна здатність вимірювача: 12-біт
- Інтерфейс: I2C
- Швидкість інтерфейсу: 3,4МГц
- Максимальна вимірювана напруга: + -26 В
- Калібрування: калібрувальний регістр
- Внутрішні дані: виміряний струм та потужність
- Фільтрація: x128 відліків
- Напруга живлення: від 3В до 5В

На рисунку 2.11 представлений модуль ддатчика струму інапруги CJMCU219 [23].

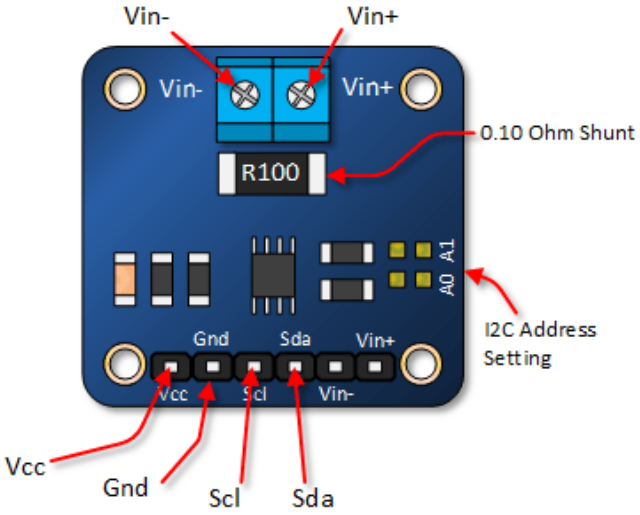


Рисунок 2.11 - Модуль датчика струму і напруги CJMCU219[23]

Датчик струму підключено до мікроконтролера Atmega 328, інтегрованого в плату Arduino Uno [24, 25]. Після обробки вимірювальний

сигнал надхоить да персонального комп'ютера через USB канал, з'єднаний із платою мікроконтролера.

На рисунку 2.12 представлена схема датчика, сполученого із мікроконтролером Atmega 328.

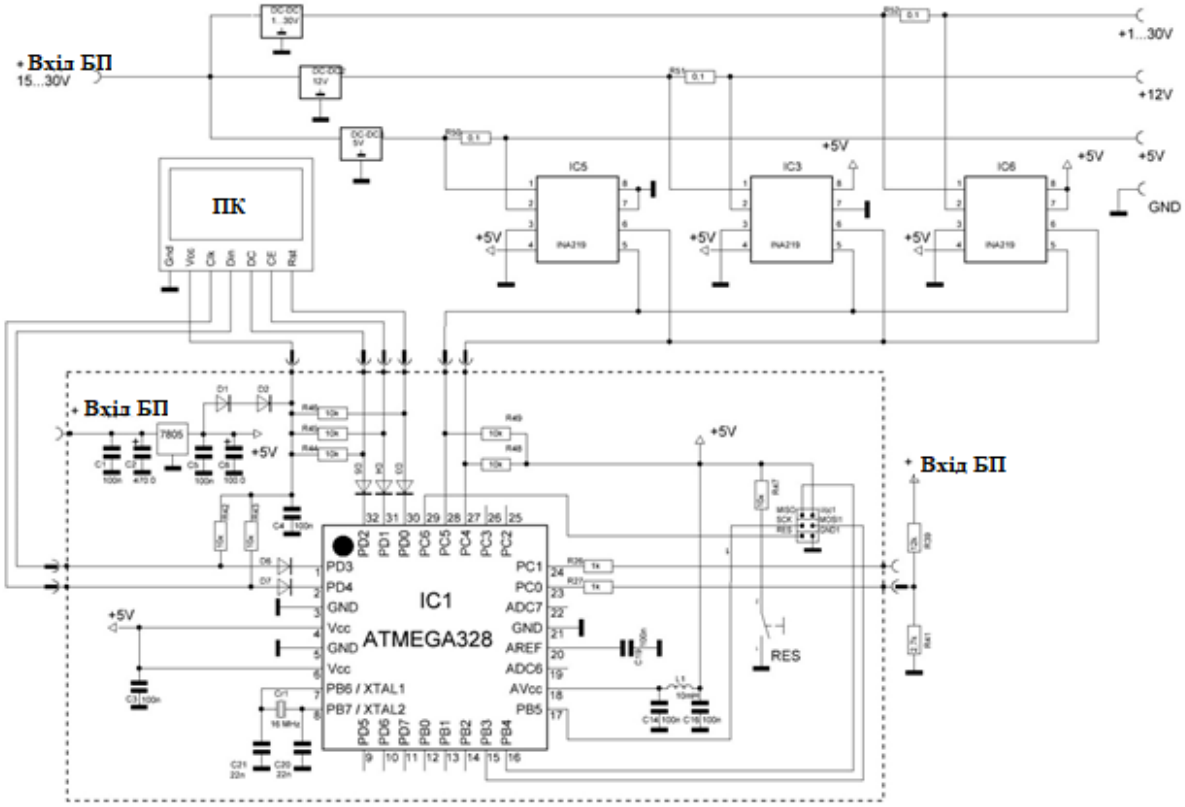


Рисунок 2.12 Схема датчика INA21, сполученого із мікроконтролером Atmega 328 [24, 25].

На рисунку 2.13 Представлений зовнішній вигляд плати Arduino Uno [25], на рисунку 2.14 – схема солучення датчика струму і напруи з платою Arduino Uno [24, 25].

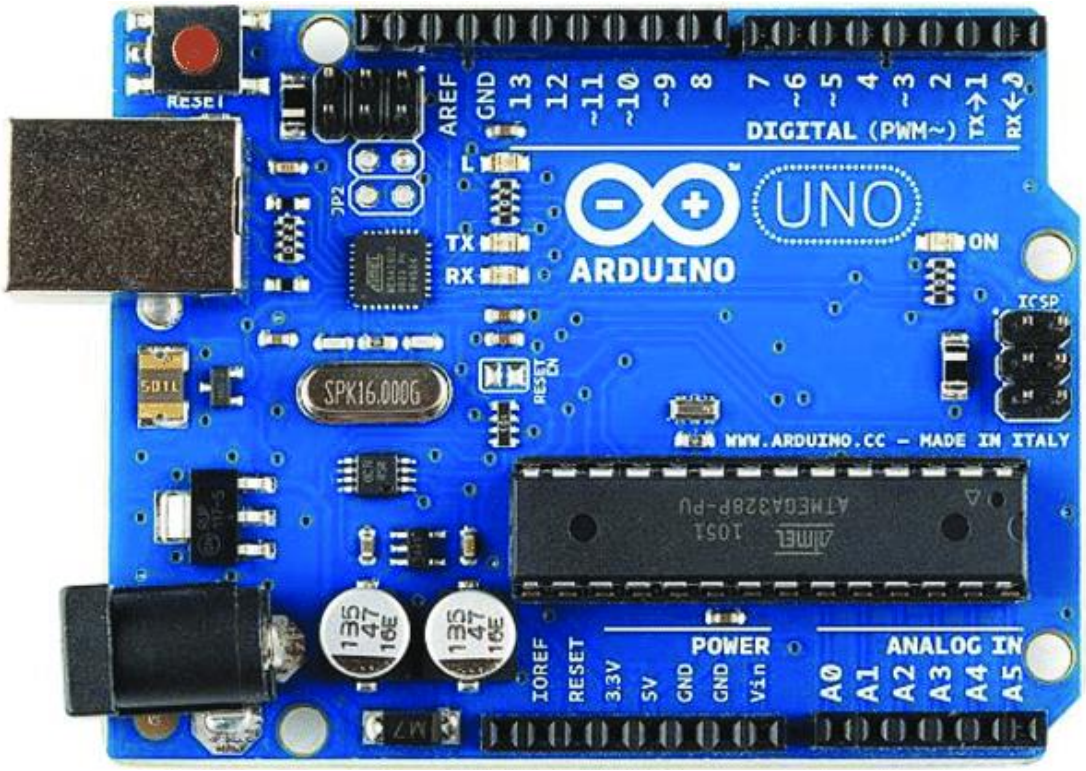


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд плати Arduino Uno

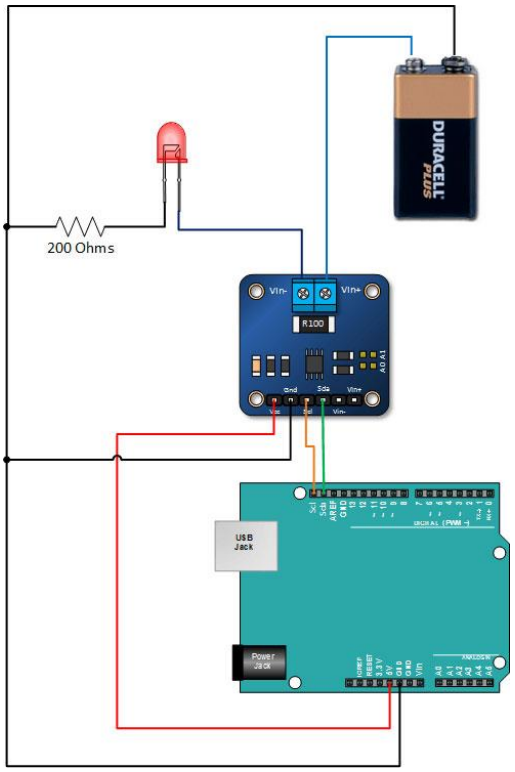


Рисунок 2.14 - Схема солучення датчика струму і напруги з платою Arduino Uno

Програма керування датчиком струму і напруги за допомого системи Arduino представлена у Додатку А. У якості базової конструкції тексту програми використовували матеріали сайту, що є у вільному доступі. На рисунку 2.15 представлений інтерфейс сайту бібліотек програм для базових блоків датчиків.



Рисунок 2.15 - Інтерфейс сайту бібліотек прорам для базових блоків датчиків

2.4 Моделювання блоку реєстрації та обробки сигналу вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур

2.4.1 Моделювання схеми сполучення датчика струму і напруги з мікроконтролером

Моделювання роботи датчика струму і мікроконтролера проводилось у середовищі Prproteus [26, 27]. Схемі моделі представлена на рисунку 2.16.

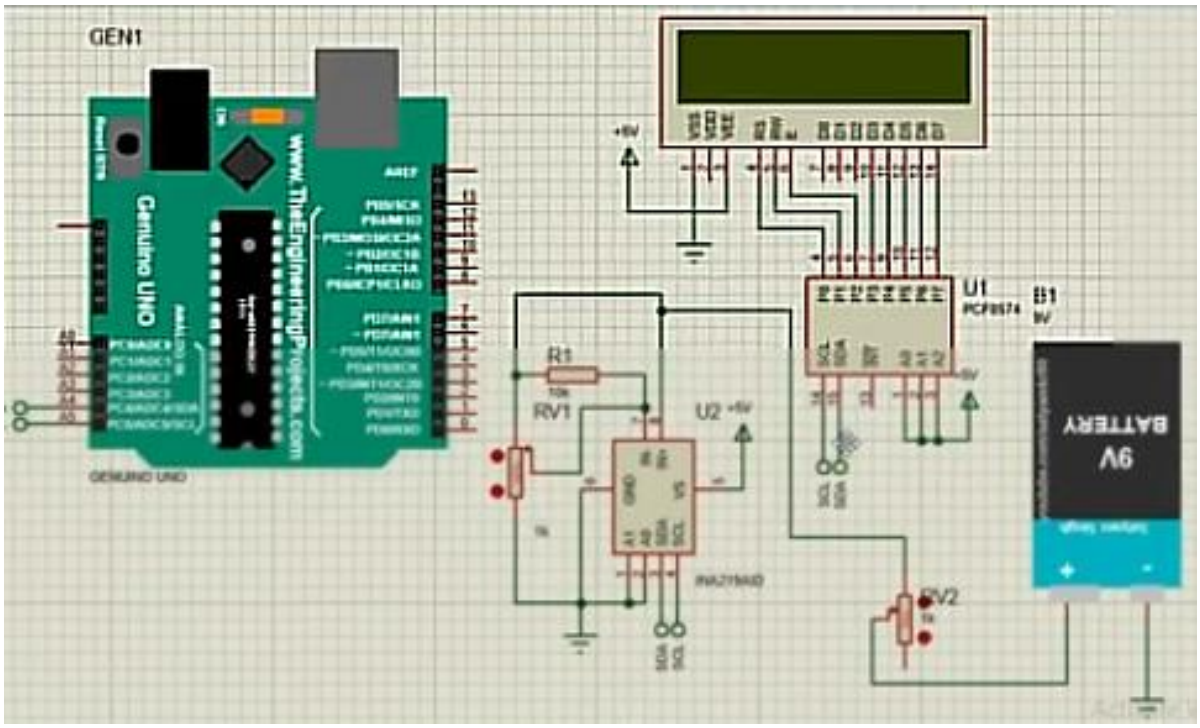


Рисунок 2.16 – Модель датчика струму INA21 і мікроконтролера Atmega 328 на платі Arduino Uno [26, 27].

Для відображення достовірності отримуваних сигналів у моделі використовували LCD індикатор. Результати представлені на рисунку 2.17.

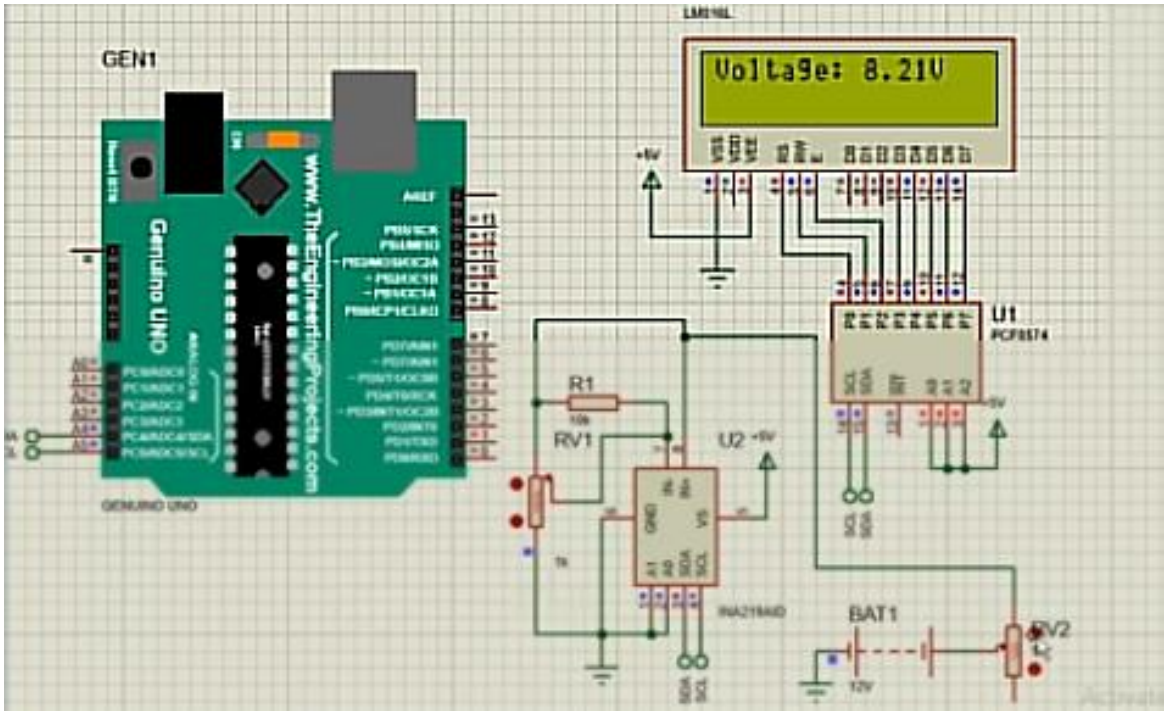


Рисунок 2.17 – Результати моделювання датчика струму INA21 і мікроконтролера Atmega 328 на платі Arduino Uno.

Як видно із результатів, представлених на рисунку 2.17, достовірність даних, отиманих під час моделювання експерименту підтверджується.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) для вимірювання діелектричної проникності анізотропних діелектриків (сегнетоелектриків, піроелектриків, електретів, оптично прозорих структур для електрооптичних і акустооптичних модуляторів) використання стандартної універсальної промислової апаратури потребує дадаткової оцінки на вплив зовнішніх вимірювальних факторів –таких як електричне поле (прикладена зовнішня напруга), чистота зони експерименту, зовнішня температура, вплив оптичних полів;

2) кількісні розрахунки і аналіз номограм провідності показали, що для ефективного вимірювання діелектричної проникності саме оптично прозорих діелектриків необхідно застосувати джерело наруги не менше 1 кВ змінного струму. У подальшому із збільшенням порядку симетрії може виникнути ситуація, коли вихідну напругу доведеться підвищувати.

3) аналіз показав, що струми зсуву, які виникають у системі реєстрації будуть сильно впливати на якість контактної групи вимірювача. Тому для більш точного і безпечного вимірювання при підвищених напругах слід спеціально підготувати зразки із зазделегіть якісними контактами. Для підготовки зразків у роботі запропонований лазерний метод напилювання контактів, який дозволяє розпорошити (розпилювати) й осадити практично будь–які метали, особливо ефективний цей метод для тугоплавких металів, які не можна розпилювати іншими методами. Це зменшить негативний вплив підвищених електричних полів і ризик пробою діелектричного середовища;

4) запропонована схема блоку реєстрації сигналу, який складається із цифрового датчика струму і напруги, виконаного на мікросхемі INA219 - вимірювачі струму та напруги з нульовим дрейфом, що володіє малими розмірами і вагою при дуже великих можливостях та високою точністю вимірювань;

5) для більш ефективної і якісної обробки отриманих результатів вимірювань датчик струму підключено до мікроконтролера Atmega 328, інтегрованого в плату Arduino Uno;

6) моделювання роботи датчика струму і мікроконтролера проводилось за допомогою САПР Prproteus;

7) достовірність даних, отриманих під час моделювання експерименту підтверджується.

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем вимірювача діелектричної проникності анізотропних оптичних структур

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Виконання завдань дипломної роботи планується в дослідницькій лабораторії кафедри ЕІСПЗ ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ. Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої небезпеки, оскільки приміщення інженерної академії належать до приміщень без підвищеної небезпеки. Проте використання електроустаткування може нести в собі ряд шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я людей чинників, що працюють з ним. Основну небезпеку дослідницької лабораторії представляють використання електроприладів, які працюють при напрузі небезпечній для життя.

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний характер. Проходячи через організм, електричний струм виробляє термічну, електролітичну і біологічну дію [28-33].

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, шляху струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища.

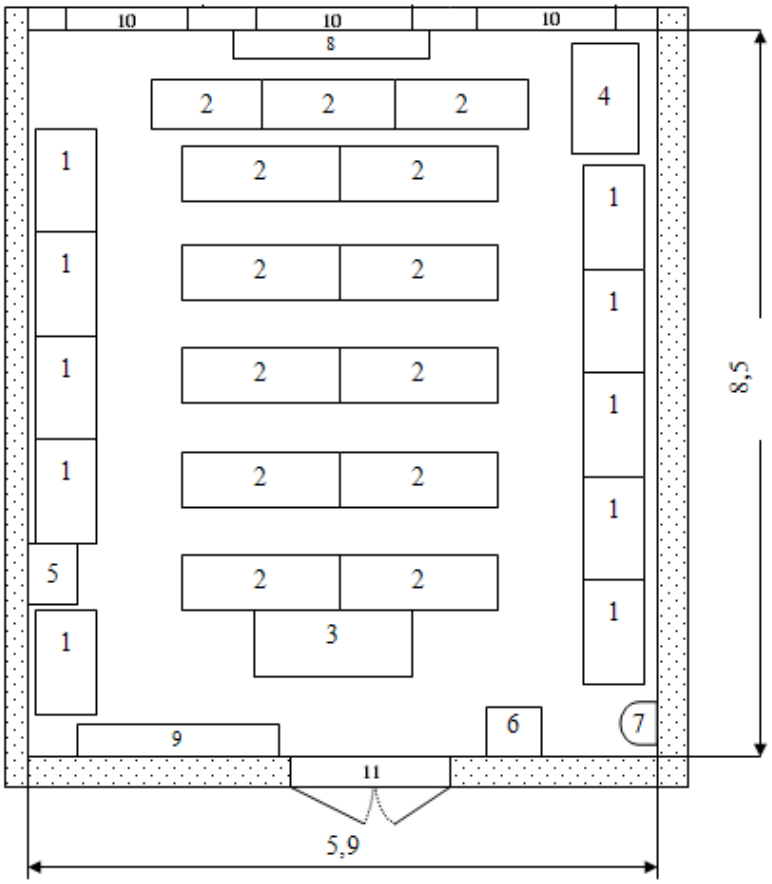
У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нервово-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

В даному розділі як об’єкт дослідження розглянуто приміщення в якому проводяться лабораторні роботи та роботи з відео термінальними пристроями. План приміщення наведено на рисунку 3.1.



1 - стіл комп’ютерний, 2 - стіл аудиторний, 3 - стіл викладача, 4 - установка Холла, 5 - шафа силова, 6 - сейф, 7 - умивальник, 8 - спліт система, 9 - дошка аудиторна, 10 - вікно, 11 - двері

Рисунок 3.1 – План розташування робочих місць

Приміщення, в якому знаходяться відео термінальні пристрої, має такі характеристики:

- довжина приміщення 8,5 м;
- ширина приміщення 5,9 м;
- висота 4 м;
- число вікон 3;
- кількість робочих місць 28;
- забарвлення інтер'єру: біла стеля, блідо-бежеві стіни, підлога бетонна, обтягнута лінолеумом коричневого кольору.

Відповідно до ПХТ 12.0.003-74 небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [28-33].

В даному приміщені діють такі фізичні небезпечні та шкідливі фактори:

• підвищений рівень вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;

• підвищені чи знижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря;

• небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів;

• недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла.

Також присутні небезпечні та шкідливі психофізіологічні фактори, до яких належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Одним із заходів є підвищення комфортності роботи шляхом раціоналізації параметрів робочого місця та робочого приміщення з ергономічної точки зору [28-33].

Обсяг приміщення на одного працюючого за санітарними нормами має становити не менше 20 $м^3$, а площа приміщення – не менше 6 $м^2$. Ширина основних проходів у приміщенні повинна становити не менше 1,5 м. Ширина виходів з приміщення повинна бути не менше 1 м, висота – не менше 2,2 м. Дане приміщення має обсяг V=188,06 $м^3$, а площу S=50,15 $м^2$. Таким чином, наше приміщення не відповідає нормам з ергономічної точки зору.

Для зменшення впливу психофізіологічних факторів складено правильний графік трудового дня, встановлено необхідний час перерв, темп та ритм роботи, які необхідні для зменшення дії на організм людини фізичних зусиль, що в свою чергу дозволяють захистити людину від перевтомлення та втрати здоров'я [28-33].

3.2 Виробнича санітарія

Мікроклімат характеризується наступними параметрами: температура, вологість, швидкість повітря, атмосферний тиск, шум [28].

Для нашого приміщення температура підтримується завдяки вентиляції (природної і штучної) в теплу пору року, та за допомогою опалення та герметизації приміщення в холодну пору року. Оптимальні норми температури для холодної пори року 21-23°С, для теплої складає 22-24°С.

Наше приміщення відповідає цим температурним нормам.

В даному приміщенні є два види вентиляції:

– природна (аерація через вікна і двері);

– примусова (приточно-витяжна).

Функціонально близьким, але відмінним від вентиляції за способом повітрообміну є кондиціонування. В даному приміщені є наявність кондиціонера, який підтримує в приміщенні комфортні умови незалежно від зовнішніх умов (визначеної температури, вологості, чистоти повітря і швидкості повітряних потоків).

Вологість повітря в даному приміщенні не 40-60%, що відповідає оптимальним нормам. Це реалізується за допомогою вентиляції і кондиціонування приміщення, а також за рахунок проведення вологих збирань.

У приміщенні є наявність відео термінальних пристроїв та навчальних стендів для проведення лабораторних робіт. Всі ці устаткування мають низький рівень шуму, що в свою чергу не перевищує допустиму норму рівня шуму в 65 дБ.

У нашому приміщенні, де знаходяться відео термінальні пристрої, використовується змішане освітлення, тобто поєднання природного і штучного освітлення.

В якості природного - бокове освітлення через вікна. В даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення.

Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі [28-33].

Нормами для даних робіт в даному приміщенні встановлена необхідна освітленість робочого місця Ен = 300лк (середня точність роботи по розрізненню деталей розміром від 1 до 10 мм).

3.3 Електробезпека

Приміщення за ступенем небезпеки ураження людей електричним струмом відповідно до ПУЕ і ГОСТу 12.1.013-78 являється приміщенням без підвищеної небезпеки [28-33].

Приміщення сухе, добре опалюване з струмонепровідною підлогою, з температурою 18-24 °С, з вологістю 40-50%. З електроустаткувань в ньому знаходяться відео термінальні пристрої та учбові стенди, які знаходяться під напругою.

Причини ураження електричним струмом [28-33].

1. Пошкодження устаткування.

2. Пошкодження ізоляції.

3. Коротке замикання на землю або на корпус.

4. Порушення правил техніки безпеки и роботи с електроустаткуванням.

Для забезпечення електробезпеки в даному приміщенні використовуються такі технічні засоби:

- захисне заземлення;
- мала напруга;
- захисне відімкнення;
- ізоляція струмопроводів;
- знаки безпеки.

Захисне заземлення — навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою.

Учбові стенди, які знаходяться в приміщенні, працюють на мінімально можливих напругах, що забезпечує додаткову безпеку.

Усі електроустаткування можна у разі потреби вимкнути через електронний щит управління, який миттєво знеструмлює усі стенди та відео термінальні пристрої. Скрізь, де встановлені розетки є попереджувальні знаки.

3.4 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [7,9].

Основними причинами пожеж в даному приміщенні є:

- необережне поводження з вогнем;

- незадовільний стан електротехнічних пристроїв, порушення правил їх

- монтажу та експлуатації;

- невиконання вимог нормативних документів з питань пожежної безпеки.

Приміщення за класом пожеж відноситься до категорії “Е” [28-33]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглекислих вогнегасники типу ОУ-2. Для мінімізації виникнення пожежі в даному приміщені вчасно проводиться профілактичний огляд та ремонт електроустаткування. В приміщенні є план евакуації згідно якого люди повинні залишити приміщення у разі виникнення пожежі. Ширина шляхів евакуації в світлі повинна бути не менше 1 м, дверей - не менше 0.8 м. При дверях, що відкриваються з приміщень в загальні коридори, за ширину евакуаційного шляху коридором слід приймати ширину коридору, зменшену:

- на половину ширини дверного полотна - при однобічному розташуванні дверей,

- на ширину дверного полотна - при двосторонньому розташуванні дверей.

Висота проходу на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м. У підлозі на шляхах евакуації не допускаються перепади висот менше 45 см і виступи, винятком порогів в дверних отворах. Висота дверей у просвіті на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м.

3.5 Розрахунок освітлення робочого місця

Загальний світловий потік визначається за формулою [32]:

$$F_{зсп} = \frac{E_н \cdot S \cdot z1 \cdot z2}{V} \qquad (3.1)$$

де $E_н$ - нормована освітленість ($E_н$ = 300лк), S - площа приміщення; z1 - коефіцієнт, що враховує старіння ламп і забруднення світильників (z1=1,5); z2 - коефіцієнт, що враховує нерівномірність освітлення приміщення (z2 = 1,1); V - коефіцієнт використання світлового потоку, визначається в залеж-

ності від коефіцієнтів відбиття від стін, стелі, робочих поверхонь, типів світильників і геометрії приміщення.

Площа приміщення:

$$S = A \cdot B = 8{,}5 \cdot 5{,}9 = 50{,}12 см^2 \quad (3.2)$$

Виберемо з таблиці коефіцієнт використання світлового потоку за наступними даними:

- коефіцієнт відбиття білої стелі Rп=70%;
- коефіцієнт відбиття від стін, забарвлених в світлу фарбу Rст=50%;
- коефіцієнт відбиття від підлоги, покритої лінолеумом темного кольору Rр=10%;
- індекс приміщення

$$I = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8{,}5 \cdot 5{,}9}{4 \cdot (8{,}5 + 5{,}9)} = 0{,}87 \quad (3.3)$$

Знайдений коефіцієнт [3]: V = 0,62.

За формулою (1.1) визначаємо загальний світловий потік:

$$F_{зсп} = \frac{300 \cdot 50{,}15 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}5}{0{,}62} = 40039 \text{ лк.}$$

Для організації загального штучного освітлення виберемо лампи типу ЛБ65.

Люмінесцентні лампи мають ряд переваг перед лампами розжарювання: їх спектр ближче до природного; вони мають велику економічність (більше світловіддача) і термін служби у 10-12 раз більше. Поряд з цим є й недоліки: їх робота супроводжується іноді шумом; гірше працюють при низьких температурах; їх не можна застосовувати у вибухонебезпечних приміщеннях; мають малу інерційність. Для нашого приміщення люмінесцентні лампи підходять.

Світловий потік однієї лампи ЛБ65 становить не менш $F_л$ = 4600 лм. Число N ламп, необхідних для організації загального освітлення визначається за формулою:

$$N = \frac{F_{зсп}}{F_{л}} = \frac{40039}{4600} = 12 \qquad (3.4)$$

В якості світильників вибираємо ПВЛ-1, 2×65 Вт. Електрична потужність однієї лампи ЛБ65 $W_л$ = 65 Вт.

Потужність всієї освітлювальної системи:

$$W_{ос} = W_{л} \cdot N = 65 \cdot 12 = 780 Вт \qquad (3.5)$$

Розміщення світильників ПВЛ-1, 2×65 Вт представлено на рисунку 3.2.

Таким чином, щоб забезпечити світловий потік $F_{зсп}$ = 40039 лм в даному приміщенні використовується 6 світильників по 2 лампи ЛБ65 в кожному. Згідно розрахунків освітленість приміщення відповідає встановленим нормам.

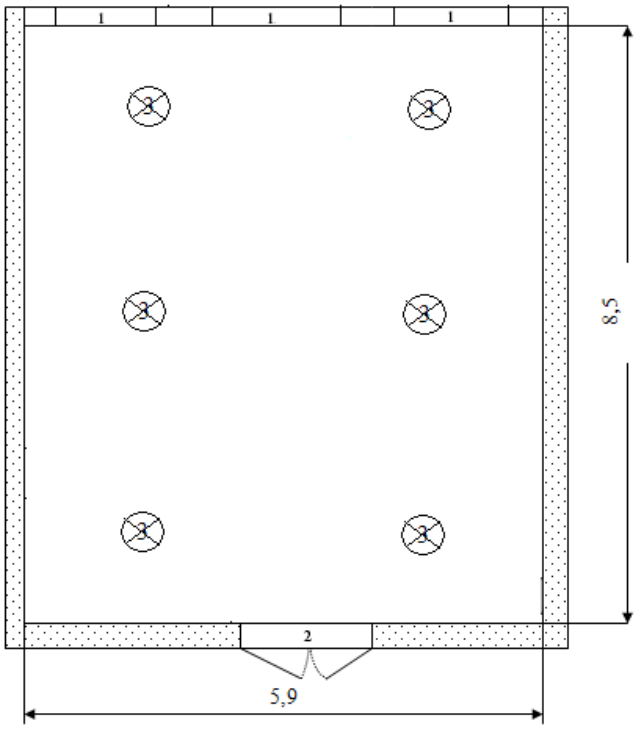


Рисунок 3.2 – План розташування світильників

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) для вимірювання діелектричної проникності анізотропних діелектриків (сегнетоелектриків, піроелектриків, електретів, оптично прозорих структур для електрооптичних і акустооптичних модуляторів) використання стандартної універсальної промислової апаратури потребує додаткової оцінки на вплив зовнішніх вимірювальних факторів – таких як електричне поле (прикладена зовнішня напруга), чистота зони експерименту, зовнішня температура, вплив оптичних полів;

2) кількісні розрахунки і аналіз номограм провідності показали, що для ефективного вимірювання діелектричної проникності саме оптично прозорих діелектриків необхідно застосувати джерело наруги не менше 1 кВ змінного струму. У подальшому із збільшенням порядку симетрії може виникнути ситуація, коли вихідну напругу доведеться підвищувати;

3) аналіз показав, що струми зсуву, які виникають у системі реєстрації будуть сильно впливати на якість контактної групи вимірювача. Тому для більш точного і безпечного вимірювання при підвищених напругах слід спеціально підготувати зразки із заздалегідь якісними контактами. Для підготовки зразків у роботі запропонований лазерний метод напилювання контактів, який дозволяє розпорошити (розпилювати) й осадити практично будь–які метали, особливо ефективний цей метод для тугоплавких металів, які не можна розпилювати іншими методами. Це зменшить негативний вплив підвищених електричних полів і ризик пробою діелектричного середовища;

4) запропонована схема блоку реєстрації сигналу, який складається із цифрового датчика струму і напруги, виконаного на мікросхемі INA219 - вимірювачі струму та напруги з нульовим дрейфом, що володіє малими

розмірами і вагою при дуже великих можливостях та високою точністю вимірювань;

5) для більш ефективної і якісної обробки отриманих результатів вимірювань датчик струму підключено до мікроконтролера Atmega 328, інтегрованого в плату Arduino Uno;

6) моделювання роботи датчика струму і мікроконтролера проводилось за допомогою САПР Proteus;

7) достовірність даних, отриманих під час моделювання експерименту підтверджується.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших дослідженнях нових матеріалів пристроїв електроніки;

2) макетний варіант системи може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Перелік посилань

1. Essential Graduate Physics *Lecture Notes and Problems* веб-сайт. URL: https://sites.google.com/site/likharevegp/part-em-classical-electrodynamics / (дата звернення: 10.01.2025).

2. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство: Навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, Л. П. Переверзєва, С. А. Воронов, Ю. І. Якименко. Київ: НТУУ «КПІ», 2007. Ч. 2 : Діелектрики. 392 с.

3. Poplavko Y. M., Ilchenko M. E. and Pereverzeva L. P. Pyroelectric response of piezoelectrics. Ferroelectrics (USA). 1992. No 134. P. 207–212.

4. Pereverzeva L. P., Poplavko Y. M. et al. Pyroelectricity in non-central crystals. Acta Physica Polonica A. 1993. 84. No 2. P. 287 - 291.

5. Poplavko Y. M., Pereverzeva L. P. Pyroelectricity of partially clamped piezoelectrics. Ferroelectrics (USA). 1992. No 130. P. 361–366.

6. Poplavko Y. M., Pereverzeva L. P., N.-I. Cho. Feasibility of microelectronic quartz temperature and pressure sensors. Japan J. Appl. Phys. Vol.37. 1998. P. 4041–4048.

7. Poplavko Y. M., N.-I. Cho. Clamping influence on ferroelectric integrated film microwave properties. Semiconductor Science and Technology. Vol.14. 1999. P. 961–966.

8. Poplavko Y. M., Molchanov V. I., Borisov V. N. Microwave dielectric relaxation in barium lantanide tetratitanates (BLT). Ferroelectrics (USA). 1994. No 156. P. 351–356.

9. Poplavko Y. M., Yakimenko Y. I. Microwave properties of integrated film in comparison with bulk ferroelectric and paraelectric. ISIF. Abstarcts, Aachen. 2000. P. 184.

10. Voronov A., Pereverzeva L. P., Poplavko Y. M. Dielectric properties of relaxors as pyroelectric and piezoelectric materials // Электроника и связь. 2005. № 25. С. 12–20.

11. Ivitskiy I., Sivetskiy V., Bazhenov V., Ivitska D. (2017) Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1, 5(85), 4–9.

12. Bazhenov V., Protasov A., Ivitskiy I., Ivitska D. (2017) Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 4, 5(88), 4–9.

13. Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В. (2013) Удосконалений електростатичний метод неруйнівного контролю. Методи та прилади контролю якості, 2(31), 26–28.

14. Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л. (2015) Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю. Україна Пат. на винахід 109357, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/22. № 201404947.

15. Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В. (2016) Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю. Україна Пат. на винахід 112917, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22. № a201502540.

16. Баженов В.Г., Івіцька Д.К. (2016) Електростатичний амплітуднофазовий метод неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю. Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», Київ, 2016.

17. Вимірювачі RLC веб-сайт. URL : https://www.unitest.com / (дата звернення: 10.01.2025).

18. Калинушкін Є. П., Федоркова Н. М., Синиціна Ю. П. та ін. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання : Навч. посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2009. 175 с.

19. Борцов А. В.Генератор імпульсних напруг для повірки високовольтних дільників напруги // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, Харків : ХПІ № 1 2020 С. 40-42.

20Khorovits P., Khill U. Iskusstvo skhemotekhniki: V 2-kh tomakh. Per. s angl. Moscow: Mir. 1983. – T.1. 598 p.

21. Гуржій А.М., Самсонов В.В., Поваротнюк Н.І. // Імпульсна та цифрова техніка: Підручник. – Харків : Компанія “Сміт”, 2005. 424 с.

22. Верьовкін Л. Л., Світанько М. В. Кісельов Є. М. Мікропроцесорна техніка // Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання контрольної роботи. Запоріжжя : ЗДІА. 2014. С.15-29.

23. Цифровий датчик струму та напруги на INA219 з шиною I^2C веб-сайт. URL : arduino.ua / (дата звернення: 10.01.2025).

24. Практичне використання мікросхеми INA219 з шиною I^2C веб-сайт. URL : sxem.org / (дата звернення: 10.01.2025).

25. Mullapudi Chaitanya Krishna Implementation of Arduino-based Counter System // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 9 Issue 09, September-2020 URL : gro.treji.www / (дата звернення: 10.01.2025).

26. Курс Arduino. Базовий веб-сайт. URL: http : // https://siluette.com.ua/uk/product/arduino/ (дата звернення: 10.01.2025).

27. Antognetti, P.; Massobrio, G.: Semiconductor device Modeling with SPICE. New York: McGrawwHill, 1988.

28. Атаманчук П. С., Мендерецький В. В., Панчук О. П., Білик Р. М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2017. 322 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi56/0041366.pdf.

29. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 263 "Цивільна безпека" ден. та заоч. форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/2018/f359035.pdf.

30. Бєлоконь К. В., Рижков В. Г., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 180 с. URL http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356296.pdf.

31. Бєлоконь К. В., Суржицька Л. А., Цимбал В. А., Карнаух А. А. Цивільний захист : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 69 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356329.pdf.

32. Охорона праці. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей / Укл. В.Г. Рижков – Запоріжжя, 2005. – 43 с.

33. Безпека життєдіяльності. Методичні вказівки до практичних занять та контрольні завдання для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл. В.Г. Рижков. – Запоріжжя, 2005. – 24 с.

Додаток А

Програма керування датчиком струму і напруги

```
#include <Wire.h>
#include  // isert library

Adafruit_INA219 sensor219; // Declare and instance of INA219

void setup(void)
{

  Serial.begin(9600);
  sensor219.begin();

}

void loop(void)
{
  float busVoltage = 0;
  float current = 0; // Measure in milli amps
  float power = 0;

  busVoltage = sensor219.getBusVoltage_V();
  current = sensor219.getCurrent_mA();
  power = busVoltage * (current/1000); // Calculate the Power


  Serial.print("Bus Voltage:   ");
  Serial.print(busVoltage);
  Serial.println(" V");

  Serial.print("Current:       ");
  Serial.print(current);
  Serial.println(" mA");

  Serial.print("Power:         ");
  Serial.print(power);
  Serial.println(" W");

  Serial.println("");

  delay(2000);
}
```