

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Кафедра електричної інженерії



**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО  
ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**  
З КУРСУ

**«Стійкість конструкцій ізоляції  
та енергоефективність  
систем електропостачання»**

для здобувачів вищої освіти  
за ОПП Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка  
другого рівня вищої освіти

ID 4612

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Стійкість конструкції ізоляції та енергоефективність систем електропостачання» для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Уклад.: Вакуленко О.О., Сисак І.М., Осадца Я.М. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. – 82 с.

**Укладачі:** Вакуленко Олександр Олексійович  
старший викладач кафедри електричної інженерії

Сисак Іван Михайлович  
кандидат технічних наук, доцент  
доцент кафедри електричної інженерії

Осадца Ярослав Михайлович  
кандидат технічних наук, доцент  
доцент кафедри електричної інженерії

**Рецензент:** Андрійчук Володимир Андрійович  
доктор технічних наук, професор  
професор кафедри електричної інженерії

Методичні вказівки розглянуто і затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії  
Протокол № 1 від 28.08.2024р.

Схвалено методичною радою ФПТ Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.  
Протокол № 1 від 30.08.2024 р.

## **ЗМІСТ**

|                                                                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1</b><br>«Дослідження стійкості ізоляції емальованих проводів до дії<br>теплових та механічних навантажень».                                                          | <b>6</b>  |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2</b><br>«Дослідження стійкості полімерних конструкційних матеріалів<br>до дії теплових та механічних навантажень»                                                    | <b>18</b> |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3</b><br>«Дослідження стійкості до дії підвищеної вологості матеріалів<br>електроізоляційних конструкцій»                                                             | <b>28</b> |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4</b><br>«Дослідження зміни електричної міцності ізоляції емальпроводів при<br>довготерміновій дії теплових навантажень»                                              | <b>45</b> |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5</b><br>«Дослідження теплового режиму ізоляційної конструкції<br>електродвигуна типу <i>АОЛ-012-2</i> в залежності від знакозмінного<br>навантаження на вісь ротора» | <b>58</b> |
| <b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6</b><br>«Дослідження зміни фізико-механічних властивостей гумових<br>сумішей при довготривалій дії підвищених температур»                                            | <b>68</b> |
| <b>Рекомендована література</b>                                                                                                                                                               | <b>81</b> |

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

### **«Дослідження стійкості ізоляції емальованих проводів до дії теплових та механічних навантажень».**

#### **Мета роботи:**

- ознайомитись з стандартними методиками визначення конструктивних розмірів, механічних показників, стійкості до короткотермінової дії електричних та механічних навантажень на ізоляцію емальованих проводів;
- навчитись виготовляти зразки з емальпроводів для випробування їх ізоляції дією тепла, підвищеної напруги та механічної деформації;
- оволодіти практичними навичками роботи на обладнанні з випробувань ізоляції емальованих проводів;
- навчитись проводити систематизацію результатів випробувань ізоляції емальпроводів та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик;
- навчитись проводити класифікацію ізоляції емальпроводів на відповідність вимогам стандартів.

#### **Стислі теоретичні відомості**

#### **Методи випробувань емальованих проводів на адгезію лакового шару ізоляції**

##### Відбір зразків

Випробуванню повинні бути піддані проводи, які не мають механічних пошкоджень і що зберігалися в умовах, зазначених у стандарті або технічних умовах на провідники. Зразки проводу перед випробуванням повинні бути змотані в котушки без розтягів і згинів. Поверхня зразків повинна бути очищена без розтягів і згинів чистим сухим м'яким матеріалом.

Для випробування проводу ривком до розриву або відносного подовження від котушки з проводом відбирають три зразки довжиною не менше 300 мм кожен; для випробування крученням навколо поздовжньої осі проводу - один зразок довжиною не менше 600 мм.

##### Апаратура

Для проведення випробування проводу ривком до розриву або відносного подовження застосовують установку, схема якої вказана на рис. 1.1, а також переглядові лупи типу ЛП та лінійку вимірювальну металічну 1–1000 кл. 1.

Для випробування проводу крученням навколо поздовжньої осі застосовують установку (тут – установка типу **К-5**), схема якої вказана на рис. 1.2; відстань між затискачами – 500 мм.

##### Проведення випробування

Випробування повинно бути проведене при температурі навколишнього повітря ( $25 \pm 10$ ) °С і відносній вологості не більше 75%, якщо в стандарті або технічних умовах на проводи не передбачені інші температура або вологість.

Допускається випробування при іншій температурі і відносній вологості навколишнього повітря, якщо результати випробувань задовольняють вимогам

стандарту або технічних умов на провідники.

При отриманні незадовільних результатів зразки повинні бути витримані не менш 6 годин до початку випробування при температурі  $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ , відносній вологості навколишнього повітря не більше 75% і випробувані в цих умовах.

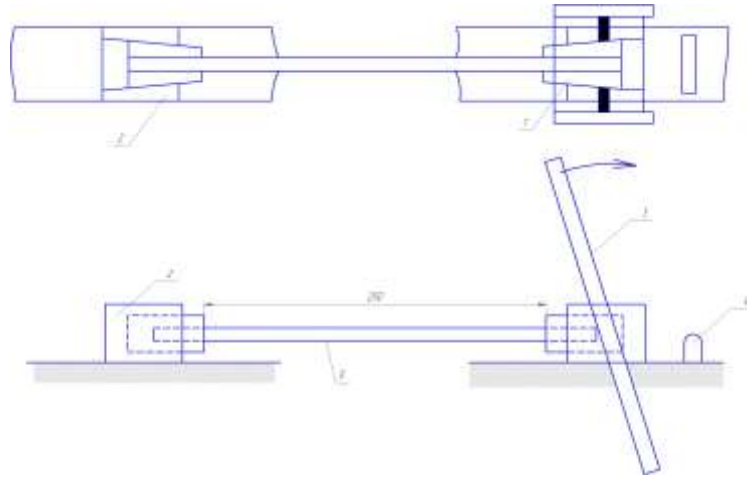


Рисунок 1.1 – Схема установки для випробувань ізоляції емальпроводу ривком:  
1 – рухомий затискач; 2 – нерухомий затискач; 3 – важіль; 4 – регулюючий стопор; 5 – зразок провідника

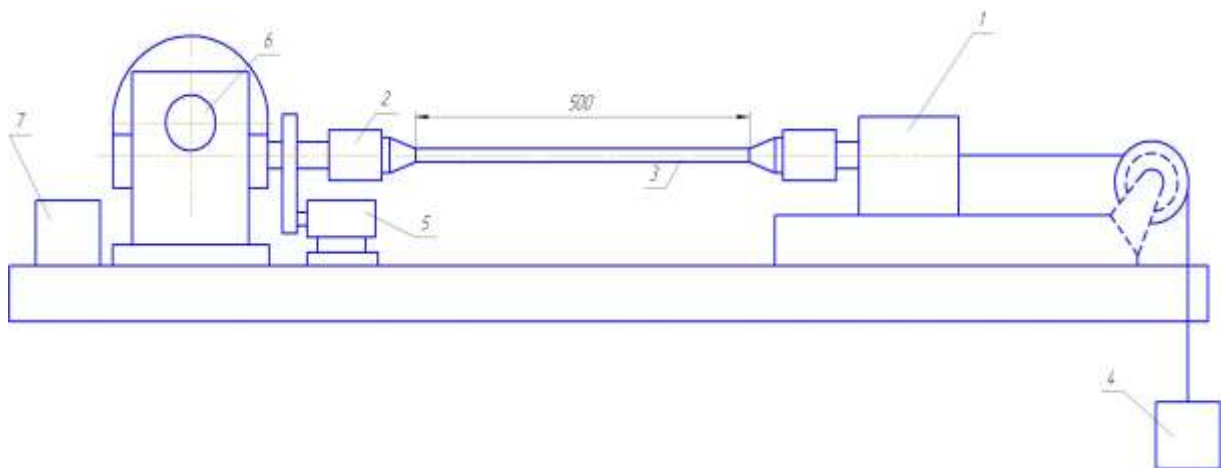


Рисунок 1.2 – Схема установки для випробування ізоляції емальпроводу крученням:

1 – ковзний затискач; 2 – обертовий затискач; 3 – зразок проводу; 4 – навантаження, 5 – лічильник обертів; 6 – електродвигун; 7 – пусковий пристрій

Проводи з номінальним діаметром до **1,000 мм включно** повинні бути випробувані на адгезію *ривком* до розриву або до відносного подовження, зазначеного в стандартах або технічних умовах на провідники. Зразок провідника з розрахунковою довжиною 250 мм повинен бути закріплений у затискачах установки і розтягнутий ривком.

Після випробування зразка його поверхня повинна бути оглянута з використанням спеціальної переглядової лупи:

- (40 ... 15)-кратного збільшення для провідників з номінальним діаметром до **0,040 мм включно**;

- (6 ... 10)-кратного збільшення для провідників з номінальним діаметром від **0,040 до 0,500 мм включно**;

- 6-кратного збільшення або без застосування збільшувальних приладів для провідників з номінальним діаметром **вище 0,500 мм**.

На поверхні зразка не повинно бути тріщин (розривів до провідника) і відставання ізоляції. На відстані до 2 мм від розірваних кінців зразка допускаються тріщини та інші пошкодження.

Проводи з номінальним діаметром **більше 1,0 мм** повинні бути випробувані на адгезію *методом кручення* навколо поздовжньої осі провідника (див. методи А і Б).

#### Метод А

Зразок провідника з розрахунковою довжиною 500 мм закріплюють у затискачах установки (див. рис. 1.2). Потім до ковзного затискача прикладають навантаження, що відповідає зазначеному в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Навантаження на провідник

| Номінальний діаметр провідника, мм | Навантаження, <i>H</i> |
|------------------------------------|------------------------|
| Від 1,000 до 1,400 вкл.            | 25                     |
| Від 1,400 до 1,800 вкл.            | 40                     |
| Від 1,800 до 2,240 вкл.            | 60                     |
| Від 2,240 до 2,500 вкл.            | 100                    |

Після цього скребком, як показано на рис. 1.3 а, відступаючи на відстань 10 мм від кожного з місць затискання емаьпроводу, видаляють емалеву ізоляцію з протилежних сторін проводу до отримання поперечного перерізу, відповідного вказаному на рис 1.3 б.

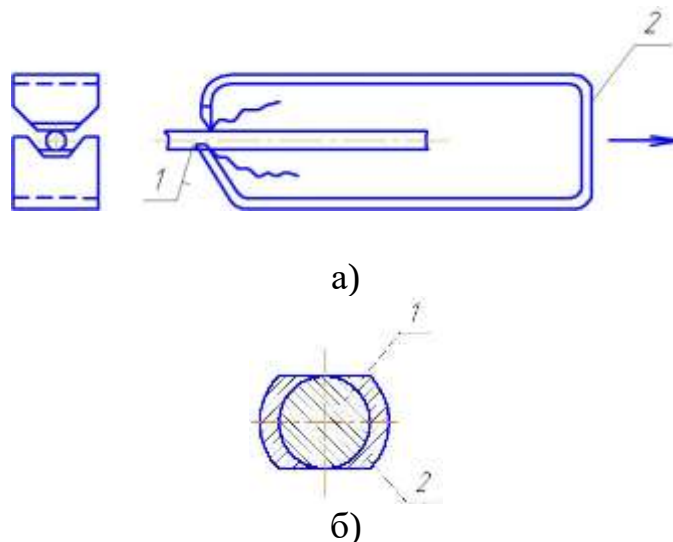


Рисунок 1.3 – Схеми устаткування для зняття ізоляції з емаьпроводу:

1 – провідник (основа проводу); 2 – ізоляція

Сила стиснення робочих лез скребка повинна забезпечувати видалення емалі та отримання рівної поверхні провідника без видалення при цьому значної кількості самого проводу. Емаль не слід видаляти до самих фіксуючих пристроїв.

Потім зразок закручують навколо поздовжньої осі. Кручення проводять з частотою  $(60 \dots 100) \text{ хв}^{-1}$ . Число кручень обчислюють за формулою:

$$n_{кр} = \frac{K}{d_{ном}}, \quad (1.1)$$

де  $n_{кр}$  – число кручень, яке округлюють до найближчого більшого цілого числа;

$d_{ном}$  – номінальний діаметр проводу, мм;

$K$  – коефіцієнт, зазначений у стандарті або технічних умовах на емальпровід конкретної марки (тут прийнято  $K=110$ ).

Після випробування зразок оглядають без застосування збільшувального приладу. На поверхні зразка після випробування не повинно бути тріщин (розривів ізоляції до проводу) і відшаровування ізоляції. Емалеву ізоляцію, яку легко видалити з проводу (наприклад, за допомогою нігтя великого пальця), слід вважати такою, що втратила адгезію, навіть якщо вона не повністю видаляється з проводу.

### Метод Б

Від котушки з випробуваним емальпроводом повинні бути відібрані два зразки довжиною не менше 100 мм.

Зразок проводу з розрахунковою довжиною 50 мм закріплюють у затискачах установки для кручення провідника і закручують навколо своєї осі до тих пір, поки число кручень не досягне значення, зазначеного в стандартах або технічних умовах на провідники.

Кручення повинно бути зроблено із частотою обертання  $(60 \dots 100) \text{ хв}^{-1}$  під натягом 4,9 МПа ( $\sim 0,5 \text{ кгс}\cdot\text{мм}^{-2}$ ) для алюмінієвого провідника і 9,8 МПа ( $\sim 1 \text{ кгс}\cdot\text{мм}^{-2}$ ) для **мідного** провідника та провідника зі сплавів опору. Граничне відхилення від вказаних величин натягу  $\pm 20\%$ .

Після випробування зразок оглядають без застосування збільшувального приладу. На поверхні зразка не повинно бути тріщин (розривів ізоляції до провідника) і відшаровування ізоляції.

При розбіжності в оцінці якості повинна бути застосована лупа 4-кратного збільшення.

При випробуванні тріщини та інші пошкодження на відстані до 2 мм від розірваних кінців зразка не є бракувальними ознаками.

### **Метод випробувань ізоляції емальованих проводів на «тепловий удар»**

#### Відбір зразків

Випробовування повинні проводитись на проводах, які не мають механічних пошкоджень і які зберігаються в умовах, що вказані в стандартах чи технічних умовах на проводи конкретних марок.

Від котушки з випробувальним емальпроводом повинно бути відібрано без розтягу і згинів три зразки довжиною  $(200 \dots 250) \text{ мм}$  кожний.

Поверхня зразків повинна бути очищена без розтягів і згинів чистим, сухим і м'яким матеріалом (типу марлі або ін.).

### Апаратура

Для проведення випробування повинна використовуватись така апаратура: установка для намотування зразка на стрижень, схема якої приведена на рис. 1.4.

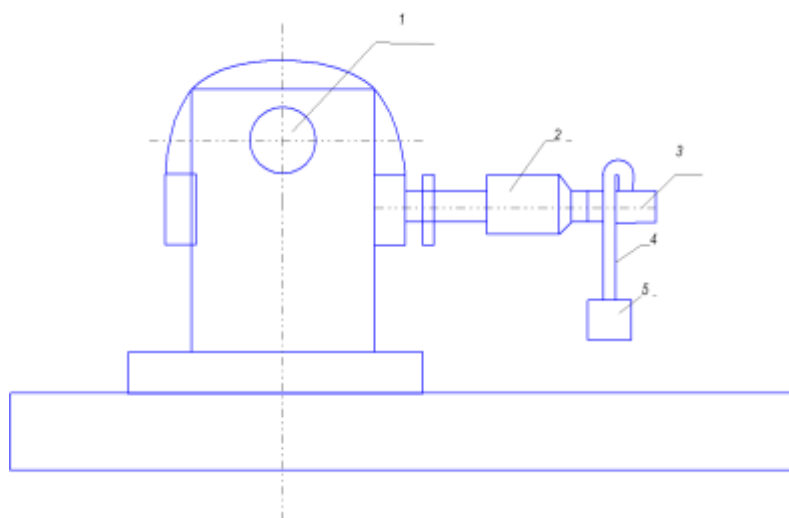


Рисунок 1.4 – Схема установки для намотування зразка на стрижень:  
1 – електромеханічний привід, 2 – рухомий затискач, 3 – стрижень, 4 – зразок емальпроводу, 5 – вантаж

В установку входять:

- комплект циліндричних стрижнів з граничним відхиленням по діаметру  $\pm 10\%$  від значень, встановлених в стандартах або в іншій нормативно-технічній документації на проводи (параметр шорсткості  $Ra$  стрижнів повинен бути не більшим  $0,63 \text{ мкм}$ );
- набір різноважок, що забезпечуватимуть відповідний натяг проводів при намотуванні;
- лупа 4-кратного збільшення;
- термостат з перемішуванням повітря і автоматичним регулюванням температури (тут - термошафа сушильна електрична типу **СНВС-200** з максимальною робочою температурою  $200^{\circ}\text{C}$ ).

Допустимі відхилення температури в місці встановлення термопари не повинні перевищувати значень, вказаних в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Допустимі відхилення температури

| Температура в термостаті,<br><i>град.К (град.С)</i> | Допустимі відхилення температури<br>від номінальних |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| до 423 (150) включно                                | $\pm 2,5$                                           |
| вище 423(150) до 473 (200) включно                  | $\pm 3,5$                                           |
| вище 473 (200) до 573 (300) включно                 | $\pm 6,0$                                           |
| вище 573 (300) до 673 (400) включно                 | $\pm 10,0$                                          |

### Проведення дослідів

Дослід має бути проведений при температурі навколишнього середовища  $(298 \pm 10) \text{ K}$  ( $(25 \pm 10)^{\circ} \text{ C}$ ), відносній вологості  $(45 \dots 75)\%$  і тиску  $(84 \dots 107) \text{ кПа}$   $((630 \dots 800) \text{ мм рт. ст.})$ , якщо в стандарті чи в іншій нормативно-

технічній документації на проводи не передбачені інші показники температури чи вологості. Перед початком випробувань зразки повинні бути витримані не менше 6 год. при температурі  $(298 \pm 10) K$  ( $(25 \pm 10)^{\circ} C$ ) і відносній вологості повітря (45 ... 75)%.

Випробування має проводитись способом А або Б.

#### Спосіб А. Випробування на навив.

Кожен зразок повинен бути навитий **10–ма** щільно прилеглими один до одного і до стрижня витками. Навив має бути проведений з натягом, забезпеченим вантажем масою 0,5 кг для алюмінієвого провідника і 1,0 кг для мідного провідника чи із сплавів опору, що припадає на  $1 \text{ мм}^2$  площі поперечного січення провідника.

Граничне відхилення від значень маси повинно бути в межах  $\pm 20\%$ .

При навиванні не повинно бути перекручування зразка навколо його осі. Після навивання зразок повинен бути знятий зі стрижня.

Якщо це необхідно згідно вимоги нормативно–технічної документації, то перед навиванням на стрижень провід повинен бути розтягнений до відповідного видовження за способом Б.

#### Спосіб Б. Випробування на розтяг.

Ізоляція емальпроводів повинна бути випробувана розтягуванням на розривній машині. Зразок проводу має бути видовжений зі швидкістю (мм / хв.) до розриву або до певного значення подовження відповідно до вимог стандарту.

Граничне відхилення від ударного значення швидкості становить  $\pm 20\%$ .

Після навиву чи розтягу зразки повинні бути підвішені на 30 хв. в термостаті з усталеною температурою так, щоб вони не торкалися стінок термостата. Температура в термостаті повинна відповідати вимогам, зазначеним у стандарті чи технічних умовах на проводи. Тривалість перебування зразків у термостаті повинна бути відрхована з моменту встановлення в ньому необхідної температури після розташування у ньому зразків.

Зразки проводів витягують з термостата і після витримки не менше 30 хв. в нормальних умовах роблять зовнішній огляд поверхні ізоляції із застосуванням лупи:

- (15 ... 10)-кратного збільшення для проводів з номінальним діаметром провідника **до 0,04 мм включно**;
- (10 ... 6)–кратного збільшення для проводів з номінальним діаметром **від 0,040 до 0,5 мм включно**;
- без застосування збільшувальних приладів для проводів з номінальним діаметром провідника **вище 0,5 мм**.

При розбіжностях в оцінюванні результатів випробування проводів з номінальним діаметром провідника вище 0,5 мм повинна бути застосована лупа 4-кратного збільшення.

На поверхні зразків проводу після випробування не повинно бути тріщин (розривів ізоляції до провідника) і відшаровування ізоляції.

### Метод випробувань ізоляції емальпроводів на еластичність у вихідному стані та після дії підвищеної температури

#### Відбір зразків

Випробуванням повинні бути піддані проводи, які не мають механічних пошкоджень і які зберігались в умовах, вказаних в стандарті чи технічних умовах на проводи.

Зразки проводу перед випробуванням повинні бути змотані з котушки без розтягування і згинів. Поверхня зразків повинна бути протерта без розтягування і згинів чистим сухим м'яким матеріалом.

Від котушки з випробувальним проводом повинні бути відібрані по три зразки.

#### Апаратура

Для проведення випробування повинна використовуватись така апаратура:

- розривні машини. В залежності від діаметра провідника для випробування повинна бути застосована машина, граничне розривне зусилля якої вказане в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Граничне розривне зусилля

| Номинальний діаметр проводу, мм |              |                                         |                                                     | Граничне розривне зусилля машини, Н (кгс) |
|---------------------------------|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| мідного                         | алюмінієвого | константанового, манганінового твердого | константанового, манганінового, ніхромового м'якого |                                           |
| 0,020-0,250                     | 0,08-0,35    | 0,02-0,25                               | 0,02-0,25                                           | 29,4(3)                                   |
| 0,200-0,800                     | 0,50-1,18    | 0,18-0,50                               | 0,2-0,750                                           | 196,0(20)                                 |
| 0,690-1,500                     | 1,06-2,50    | 0,450-0,850                             | 0,60-1,00                                           | 490,0(50)                                 |

- пристрій для навивання зразків на стрижень, схема якого вказана на рис. 1.5.

В комплект пристрою входять:

- набір циліндричних стрижнів з граничним відхиленням по діаметру  $\pm 10\%$  від величин, встановлених в стандартах чи технічних умовах на проводи (шорсткість  $Ra$  оброблювальної поверхні стрижнів повинна бути не більше 0,63 мкм);

- набір різноважок, які забезпечують відповідний натяг при намотуванні;

- термостат з перемішуванням повітря і автоматичним регулюванням температури (тут - термошафа сушильна електрична типу **СНВС-200** з максимальною робочою температурою 200°C) з точністю, вказаною в табл. 1.4;

- лупа 4-кратного збільшення.

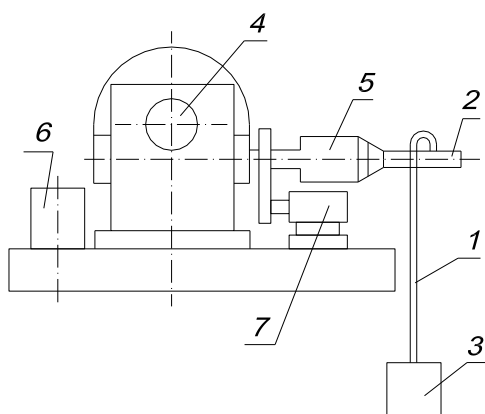


Рисунок 1.5 – Схема пристрою для навивання зразків на стрижень:  
1 – зразок проводу; 2 – стрижень; 3 – навантаження; 4 – електромеханічний привод

Таблиця 1.4 – Точність підтримання температури в термошафі

| Температура, град. С | Точність, град. С |
|----------------------|-------------------|
| До 150               | $\pm 2,5$         |
| Від 150 до 200       | $\pm 3,5$         |
| Від 200 до 300       | $\pm 6,0$         |
| Від 300 до 400       | $\pm 10,0$        |

Випробування повинні бути проведені при температурі навколишнього повітря  $(25 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості не більше 75%, якщо у стандарті або технічних умовах на проводи не передбачені інші температура або вологість.

Допускається випробування при іншій температурі і відносній вологості навколишнього повітря, якщо результати випробувань задовольняють вимогам стандарту або технічних умов на проводи. При отриманні незадовільних результатів зразки повинні бути витримані не менше 6 годин до початку випробування при температурі  $(25 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості навколишнього повітря не більше 75%, після чого випробувані в цих умовах.

#### Випробування на розтяг

Випробування ізоляції проводів на еластичність способом на розтяг проводиться на розривній машині.

Зразок проводу розрахунковою довжиною 200 мм повинен бути розтягнутий зі швидкістю  $(300 \pm 20)$  мм / хв. до розриву чи до певної величини подовження відповідно до вимог стандарту або технічних умов.

#### Випробування навиванням на стрижень

Випробування ізоляції проводів на еластичність способом навивання на стрижень проводиться на установці, схему якої показано на рис. 1.5

Зразок проводу навивають десятьма щільними витками на стрижень, діаметр якого встановлено у відповідному стандарті.

Навивання повинно бути проведене при навантаженні 4,9 МПа ( $0,5 \text{ кгс} / \text{мм}^2$ ) для алюмінієвого провідника і 9,8 МПа ( $1 \text{ кгс} / \text{мм}^2$ ) для мідного провідника, а також для провідників із сплавів опору. Граничне відхилення від зазначених величин натягу  $\pm 20\%$ .

При випробуванні проводів частота обертання стрижня повинна бути  $600 \text{ хв}^{-1}$ . Для проводів з діаметром більше 1,0 мм - не більше  $400 \text{ хв}^{-1}$ .

При навиванні не повинно бути перекручування зразка навколо його осі. Після навивання зразок повинен бути знятий зі стрижня.

Якщо у НТД вказана необхідність попереднього розтягування проводу перед навиванням на стрижень, то зразок проводу попередньо розтягують до встановленого відносного видовження.

Після випробування зразка проводу його поверхня повинна бути оглянута із застосуванням переглядової лупи:

- (10 ... 15)-кратного збільшення для проводів з номінальним діаметром проводу до 0,04 мм включно;

- (6 ... 10)-кратного збільшення для проводів з номінальним діаметром від 0,040 до 0,5 мм включно,

- без застосування збільшувальних приладів для проводів з номінальним діаметром проводу вище 0,5 мм.

При розбіжностях в оцінюванні результатів випробувань проводів з номінальним діаметром проводу вище 0,5 мм повинна бути застосована лупа 4-кратного збільшення.

### **Метод випробувань ізоляції емальованих проводів на визначення кількості точкових ушкоджень**

#### Відбір зразків

Випробуванню повинні бути піддані проводи, що не мають механічних пошкоджень і зберігалися в умовах, зазначених у стандартах або технічних умовах на проводи.

Обсяг вибірки повинен бути зазначений у стандартах або технічних умовах на проводи.

На кожній котушці проводять одне визначення кількості точкових пошкоджень на довжині проводу  $(15,0 \pm 0,15) \text{ м}$ .

#### Апаратура

Для визначення кількості точкових ушкоджень повинна бути застосована установка, що складається з:

- вологого контакту - двох фетрових пластин, опущених у посудину з електролітом (0,015%-ним розчином сульфату натрію в дистильованій воді) і забезпечують надійний контакт з проводом на довжині  $(20 \pm 2) \text{ мм}$ ;

- джерела постійної напруги величиною  $(60 \pm 3) \text{ В}$ , до одного з контактів якого під'єднана ванна з розчином, а до іншого - жила випробуваного проводу;

- лічильника точкових ушкоджень (прилад власного виготовлення);

- світлового або звукового (чи іншого) показчика наявності дефекту;

- пристрою для перемотування зразка проводу завдовжки  $(15 \pm 0,15) \text{ м}$  зі швидкістю  $(25 \dots 30) \text{ м/хв.}$ , що забезпечує при цьому витягування випробуваного проводу не більше 1% (власного виготовлення як показано на рис. 1.6).

Установка повинна забезпечувати:

- фіксацію ослаблених місць проводу з опором ізоляції  $250\text{ кОм}$  і менше з похибкою верхнього порогу спрацьовування не більше  $50\text{ кОм}$ ;
- виявлення й індикацію безперервних дефектів ізоляції з частотою реєстрації (10 ... 12) ушкоджень за 1 с для пошкоджених ділянок проводу;
- силу електричного струму, що проходить через місце пошкодження ізоляції і провід, не більше  $1\text{ мА}$ .

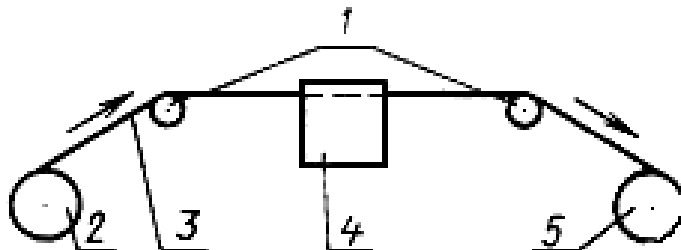


Рисунок 1.6 – Схема пристрою перемотувальної установки для визначення точкових ушкоджень ізоляції емальпроводу:

1 – направляючі ролики; 2 – віддавальний пристрій, 3 – випробуваний емальпровід; 4 – датчик з електролітом; 5 – приймальний пристрій

#### Підготування та проведення випробування

Випробування повинно бути проведене при температурі навколишнього повітря  $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$  і відносній вологості не більше 80%. Допускається проводити випробування за інших умов, якщо при цьому зберігаються всі метрологічні й технічні параметри установки.

Для проведення випробування котушку з проводом закріплюють у віддавальному пристрої установки. Зачищений від ізоляції кінець проводу протягають через вологий контакт і закріплюють у приймальному пристрої.

Потім вмикають установку і пропускають досліджуваний відрізок проводу встановленої довжини через вологий контакт.

Провід витримав випробування, якщо число точкових пошкоджень на випробувальній ділянці ізоляції проводу не перевищує значення, зазначеного в стандарті або технічних умовах.

#### **Підготовка до лабораторної роботи**

При підготовці до лабораторної роботи виконати наступне

1. Отримати комплект технічної документації на прилади та обладнання, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та обладнання в цілому.
3. В заготовці «Звіт з лабораторної роботи»:
  - подати основні вимоги нормативної документації щодо випробуваних зразків досліджуваного емальпроводу, методики проведення замірів та випробувань, вимоги до класу точності приладів й устаткування;
  - подати розшифрування всіх надписів та позначок на приладах й обладнанні;
  - обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

- обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;
- скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;
- побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;
- проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе питання.

### Завдання до виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з електричними схемами установок, розміщенням їх елементів та вимірювальних комплексів, задіяних при виконанні даної лабораторної роботи, ходом виконання роботи, правилами безпеки на робочих місцях з визначення електричних, механічних й теплових показників ізоляції емальпроводу. Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.

2. Дослідити стійкість ізоляції емальованих проводів до дії теплових та механічних навантажень, використовуючи наявні набори емальпроводів на котушках. Отримані результати замірів занести у відповідні таблиці.

При цьому:

- заміряти опір  $R_T$  зразка досліджуваного емальпроводу довжиною **(1,0 + 0,1) м** при кімнатній температурі  $T$ , використавши таке приладдя:
- міст постійного струму типу **МО-62** кл. 0,1;
- набір термометрів лабораторних типу **ТЛ-6-3-Б-1-8** кл. 1 у складі 8-и термометрів із загальним діапазоном заміру  $(- 30 \dots + 350)^\circ\text{C}$ ;
- лінійка вимірювальна металічна 1-1000 кл. 0,1;
- визначити номінальний діаметр досліджуваного зразка емальпроводу за формулами:

$$\begin{aligned} R_{20} &= \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S} [Ом], \\ R_{20} &= k_T \cdot R_T [Ом], \end{aligned} \quad (1.2)$$

де  $\rho_{Cu} = (1,7101 \dots 1,7103) \cdot 10^{-2} \left[ \frac{Ом \cdot мм^2}{м} \right]$  - питомий опір міді, заміряний при температурі  $20^\circ\text{C}$ ;

$l$  та  $S$  – відповідно довжина,  $м$  та січення,  $мм^2$  досліджуваного зразка мідного провідника;

$$k_T = \frac{1}{1 + 0,00393 \cdot (T - 20)} - \text{температурний коефіцієнт опору.}$$

- випробувати ізоляцію емальпроводу на адгезію до мідного провідника згідно методики п. 3.1 в залежності від його діаметра;
- випробувати ізоляцію емальпроводу на «тепловий удар»;
- випробувати ізоляцію емальпроводу на еластичність ізоляції;

- випробувати ізоляцію емальпроводу на наявність «точкових пошкоджень» ізоляції.

3. Типи емальованих проводів різних виробників, які використовуються в даній лабораторній роботі для випробувань їх ізоляції на адгезію, «тепловий удар», еластичність й наявність «точкових пошкоджень»:

- ПЕТ 155–0,71 ( $200^{\circ}\text{C}/5\text{d}/30\text{ хв.}$ );
- ПЕТ 155–1,70 ( $200^{\circ}\text{C}/10\%+7\text{d}/30\text{ хв.}$ );
- ПЕТД 200–1,80 ( $220^{\circ}\text{C}/3\text{d}/30\text{ хв.}$ );
- ПЕТД 2–200–0,56 ( $220^{\circ}\text{C}/2\text{d}/30\text{ хв.}$ );
- ПЕЕІДХ 2–200–1,18 ( $220^{\circ}\text{C}/3\text{d}/30\text{ хв.}$ ).

4. Привести всі засоби управління установкою чи вимірювального комплексу у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення виконання лабораторної роботи.

### **Звіт**

1. Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.
2. Подати функціональні схеми установок, задіяних при виконанні даної роботи, та принципові електричні схеми вимірювальних ланок (при потребі).
3. Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.
4. Подати результати розрахунків згідно формул (1.1) та (1.2).
5. Визначити похибки замірів досліджуваних величин.
6. Дати висновки щодо стійкості ізоляції емальованого проводу до дії теплових й механічних навантажень.
7. Визначити марку досліджуваного емальованого проводу.
8. Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Поясніть принципи дослідження стійкості ізоляції емальованих проводів.
2. Які основні вимоги повинні задовільняти прилади, що використовуються в лабораторній роботі?
3. Проаналізуйте схеми замірів дослідної величини.
4. Поясніть принцип дії дослідних установок та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.
5. Якими є умови й способи проведення випробувань емальованих проводів на адгезію ізоляції?
6. Якими є умови й способи проведення випробувань ізоляції емальованих проводів на «тепловий удар»?
7. Якими є умови проведення випробувань ізоляції емальованих проводів на еластичність у вихідному стані та після дії підвищеної температури?
8. Якими є умови проведення випробувань ізоляції емальованих проводів на визначення кількості точкових ушкоджень?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### «Дослідження стійкості полімерних конструкційних матеріалів до дії теплових та механічних навантажень»

#### Мета роботи:

- ознайомитись зі стандартними методиками визначення теплостійкості;
- ознайомитись зі стандартними методиками визначення температури розм'якшення полімерних конструкційних матеріалів: згідно методу Віка, згідно методу Мартенса (без обмеження строку), на згин під навантаженням.
- ознайомитись зі стандартними методиками визначення показника текучості розплаву та температури плавлення термопластичних матеріалів, температури плавлення плівкових матеріалів типу поліетилентерефталатної (поліестерової);
- навчитись проводити співставлення отриманих результатів з показниками та властивостями полімерних матеріалів як елементів ізоляційних конструкцій;
- навчитись виготовляти зразки з конструкційних матеріалів для випробування їх дією тепла, підвищеної напруги та механічної деформації;
- оволодіти практичними навичками роботи на обладнанні з випробовувань конструкційних матеріалів;
- навчитись проводити систематизацію результатів випробувань конструкційних матеріалів та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик;
- виробити навички проведення випробувань на комплексі обладнання згідно даної тематики.

#### Стислі теоретичні відомості

**Метод визначення температури розм'якшення термопластів згідно методу Віка** полягає у визначенні температури, при якій стандартний індентор під дією навантаження занурюється у випробуваний зразок, що нагрівається з постійною швидкістю, на глибину 1 мм.

Стандарт передбачає використання двох випробувальних навантажень:

- метод А - величиною близько 1 кгс;
- метод Б – величиною близько 5 кгс.

Величина навантаження передбачається в стандартах або технічних умовах на певний вид пластмаси.

Метод непридатний, якщо крива залежності глибини занурення індентора від температури має S-подібну форму. Такі криві при зануренні індентора на глибину до 1 мм отримують при первинному визначенні придатності методу для дослідження даної пластмаси.

При використанні даного стандарту слід мати на увазі, що метод призначений для порівняльних випробувань пластмас і що верхня межа робочих температур виробів з пластмас, зазвичай, не співпадає з температурою

розм'якшення згідно методу Віка.

Прилад для випробування повинен складатися з випробувального і вимірювального пристроїв та термокамери з системою регулювання і вимірювання температури. Прилад може бути розрахований на одночасне випробування декількох зразків. В цьому випадку він забезпечується відповідною кількістю випробувальних і вимірювальних пристроїв.

Випробувальний пристрій (рис. 2.1) складається з жорсткої рами, в якій встановлений вільно рухомий у вертикальному напрямі *стрижень* 3 з *майданчиком для вантажів* 4. Основа рами служить опорою для випробуваного *зразка* 1. Нижній кінець стрижня закінчується *індентором* 2 циліндричної форми завдовжки 3 мм і площею поперечного перерізу  $(1,000 \pm 0,015) \text{ мм}^2$ , що відповідає діаметру  $(1,13 \pm 0,01) \text{ мм}$ . Індентор має бути виготовлений із загартованої нержавіючої сталі; нижня поверхня його має бути перпендикулярна осі стрижня і вільна від задирок. Вага стрижня з індентором і площадкою для вантажів не повинна перевищувати 100 гр.

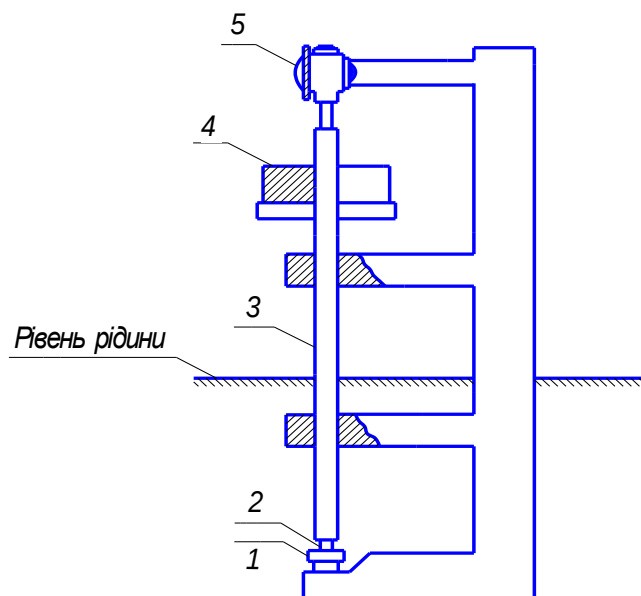


Рисунок 2.1 – Схема випробувального пристрою в рідкому середовищі:

1 – зразок; 2 – індентор; 3 – стрижень; 4 – вантаж; 5 – вимірювальний пристрій

Маса вантажів має бути підібрана таким чином, щоб загальне зусилля, що діє на випробуваний зразок, із врахуванням ваги стрижня з індентором й майданчиком і зусилля з боку вимірювального пристрою, складало  $(1025 \pm 25)$  гс при навантаженні згідно методу А і  $(5025 \pm 25)$  гс при навантаженні згідно методу Б.

Випробувальний пристрій повинен бути сконструйований так, щоб при повірці приладу в межах використовуваних температур внутрішні деформації вимірювального пристрою в результаті термічного розширення не перевищували 0,02 мм. При такій повірці зразок пластмаси замінюється стандартним зразком з боросилікатного скла або інвару. Випробувальний пристрій рекомендовано виробляти з використанням сплавів, що мають малі коефіцієнти термічного розширення.

Вимірювальний пристрій 5 з ціною поділки 0,01 мм служить для виміру

глибини занурення індентора у випробуваний зразок. Рекомендовано застосовувати вимірювальний пристрій, споряджений приладом для запису залежності глибини занурення індентора в зразок від температури.

Рекомендовано також передбачати автоматичне включення звукової і світлової сигналізації в момент закінчення дослідження кожного зразка і автоматичне відключення нагріву термокамери у момент закінчення випробування всіх встановлених в зразків.

Термокамера з системою регулювання і вимірювання температури служить для нагріву теплопередавальної рідини і зануреного в неї зразка. На час випробування зразок повинен знаходитися не менше, ніж на 36 мм нижче поверхні теплопередавальної рідини. Нагрівальний пристрій термокамери і система терморегулювання повинні забезпечувати рівномірне підвищення температури теплопередавальної рідини із швидкістю 5 °C за 6 хв або із швидкістю 2 °C за хвилину. Для більш рівномірного прогрівання теплопередавальної рідини необхідно використовувати мішалку. Відхилення від заданої температури в процесі випробування не повинне перевищувати  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Для виміру температури теплопередавальної рідини використовують ртутний термометр з ціною поділки 1 °C. Похибка шкали не повинна перевищувати 0,5 °C. Замість ртутного термометра допускається використання термопари або інших пристроїв, що забезпечать вимір температури з вказаною точністю.

В якості теплопередавальної рідини рекомендовано використовувати трансформаторну оливу, рідкий парафін, гліцерин, силіконову оливу та ін. рідини. У кожному окремому випадку слід переконатися в тому, що вибрана рідина досить стійка при температурі випробування і не впливає на випробовувану пластмасу. Якщо відповідна рідина не знайдена, то визначення температури розм'якшення згідно методу Віка виконують у повітряному середовищі відповідно.

#### Зразки для випробування.

Виготовлення зразків для випробування повинно виконуватись формуванням або способом механічної обробки листів чи пластин. Механічна обробка не повинна змінювати властивості випробовуваного зразка.

Зразок повинен мати форму диска діаметром не менше 10 мм або квадратної пластинки із стороною не менше 10 мм. Найбільший діаметр або найбільша сторона зразка визначаються конструкцією приладу.

Товщина зразка має бути в межах (3,0 ... 6,5) мм. Опорна і випробовувана поверхні зразка мають бути гладкими і плоскопаралельними.

Для зразків, що виготовляються формуванням, рекомендована товщина  $3,0^{+0,2}$  мм.

При випробуванні листових матеріалів товщиною до 6,5 мм товщина зразків має дорівнювати товщині листа. Якщо товщина листа перевищує 6,5 мм, то товщина зразка має бути доведена до  $3,0^{+0,2}$  мм механічною обробкою однієї (опорні) поверхні зразка; випробовувана поверхня не повинна піддаватися

обробці.

Допускається проводити випробування листових матеріалів товщиною (1,5 ... 3,0) мм. В цьому випадку випробуванню піддають два зразка, щільно покладені один на одного.

Спосіб і режим виготовлення зразків передбачаються в стандартах або технічних умовах на пластмаси.

Результати випробувань можуть в окремих випадках залежати від умов виготовлення зразків. У цих випадках до дослідів проводять термічну обробку зразків, якщо це передбачено в стандартах або технічних умовах на пластмаси.

#### Проведення випробування

Визначення температури розм'якшення термопластів згідно методу Віка при випробуванні в рідкому середовищі повинно проводитися на двох рівноцінних зразках від партії випробовуваного матеріалу.

Зразки перед випробуванням кондиціонують (перевид. із зм.; без терміну придатності) при контрольній стандартній атмосфері, якщо в стандартах або технічних умовах на пластмаси не вказані.

Підготовлений до випробування зразок розміщують у випробуваному пристрої на підставку рами під ненавантажений індентор, забезпечуючи щільне прилягання поверхні зразка до підставки рами. Індентор має бути розташований можливо ближче до середини випробовуваного зразка і на відстані не менше 3 мм від країв зразка.

Випробувальний пристрій із зразком занурюють в термокамеру з рідиною. Термометр встановлюють так, щоб кулька його знаходилася поблизу випробовуваного зразка.

Випробування починають при температурі  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ , якщо це не впливає на результат випробування; дозволяється починати випробування при вищій температурі, але вона повинна бути нижчою за температуру розм'якшення згідно методу Віка не менше, ніж на  $50^\circ\text{C}$ . Якщо температура розм'якшення згідно методу Віка випробовуваної пластмаси нижча за  $75^\circ\text{C}$ , то рекомендовано починати випробування при температурі нижче  $25^\circ\text{C}$  так, щоб різниця між температурою розм'якшення згідно Віка і початковою температурою випробування складала не менше  $50^\circ\text{C}$ .

Через 5 хв. після занурення випробувального пристрою в рідину (індентор не навантажений) записують покази вимірювального пристрою або встановлюють його на 0. Після чого відповідно до вибраного навантаження (*метод А* або *метод Б*) встановлюють вантажі. З цієї миті температура теплопередавальної рідини повинна рівномірно підвищуватися відповідно до вибраної швидкості ( $5^\circ\text{C}$  за 6 хв. або  $2^\circ\text{C}$  за 1 хв.).

В мить, коли глибина занурення індентора в зразок досягла 1 мм, зчитують температуру, яка є температурою розм'якшення згідно методу Віка даного зразка.

Якщо на зразку після випробування виявилися зміни, які могли вплинути на результат випробування (наприклад, тріщини, вздуття і т. ін.), випробування вважається недійсним. В цьому випадку необхідно провести випробування

іншого зразка.

Для охолодження теплопередавальної рідини в проміжках між випробуваннями термокамери, зазвичай, забезпечують охолоджувальним змійовиком. Перед початком нового випробування змійовик видаляють з термокамери або зливають рідину, що охолоджує, щоб уникнути порушення режиму нагрівання.

#### Розрахунок результатів випробування

Температуру розм'якшення згідно методу Віка випробуваної пластмаси обчислюють як середнє арифметичне відповідних температур для двох зразків із заокругленням до цілих одиниць °С.

Якщо результати випробувань двох зразків відрізняються більш ніж на 2 °С, то випробування повторюють на нових зразках. Результати повторного випробування є остаточними.

Результати випробування оформлюють протоколом, в якому повинні бути вказані:

- а) найменування і марка пластмаси;
- б) найменування підприємства-виробника;
- в) спосіб виготовлення зразків (формування чи механічна обробка);
- г) товщина кожного зразка;
- д) умови термічної обробки;
- е) умови кондиціювання;
- ж) найменування теплопередавальної рідини;
- з) випробувальне навантаження (*метод А* чи *метод Б*);
- и) швидкість нагріву;
- к) значення температури розм'якшення згідно методу Віка кожного зразка;
- л) температура розм'якшення згідно методу Віка пластмаси;
- м) дата випробування;
- н) номер стандарту.

### **Метод випробування температури розм'якшення термопластів згинаючим зусиллям**

**Відбір проб, а також режим і спосіб виготовлення зразків** повинні відповідати нормативно-технічній документації на матеріал.

Зразки для випробувань виготовляють формуванням, а з готових виробів і листів - способом механічної обробки.

Зразок для випробувань повинен мати форму бруска із такими розмірами: завдовжки не менше 110 мм, висотою  $(10 \pm 0,2)$  мм, шириною  $(4 \pm 0,2)$  мм.

Зразки з листів товщиною від 4 до 10 мм вирізують так, щоб ширина зразка співпадала з товщиною листа; при цьому лист не повинен зрізатися по товщині.

Зразки для випробувань повинні бути без здуття, раковин, пор, задирок, сколів, тріщин.

Для випробування при одному й тому ж напруженні беруть три зразки.

Для визначення температури розм'якшення при згині застосовують

випробувальний пристрій (рис. 2.2), що складається з металевої рами, на основі якої є дві опори для розміщення зразка. Зусилля на зразок передається за допомогою вантажу через стрижень з наконечником. Наконечник і опори в місцях контакту зі зразком повинні мати циліндричне заокруглення радіусом  $(93 \pm 0,2)$  мм. Зусилля повинно бути прикладене до зразка посередині відстані між опорами у вертикальному напрямку.

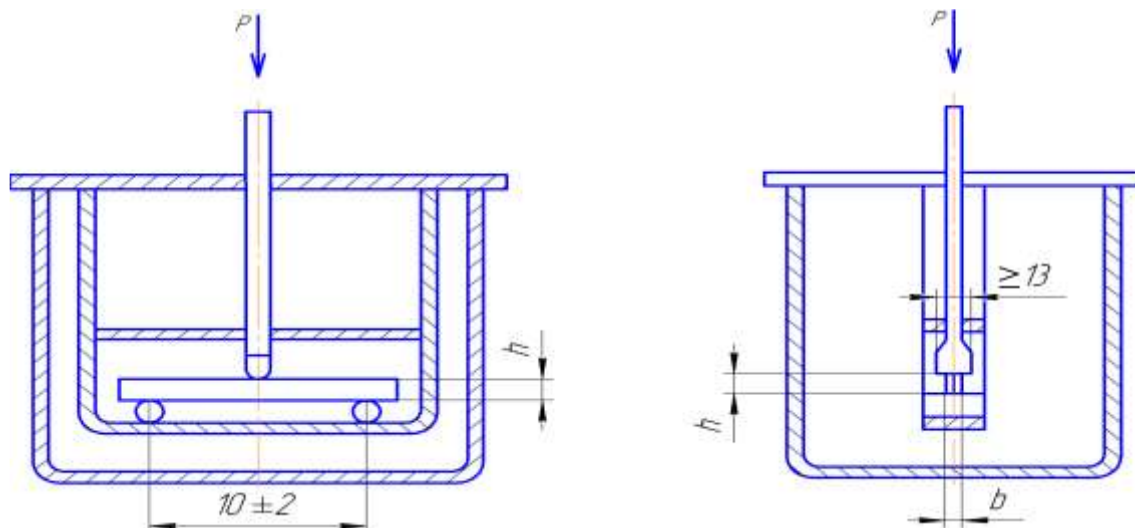


Рисунок 2.2 – Схема пристрою для визначення температури розм'якшення при згині

Для зменшення деформації випробувального пристрою в результаті термічного розширення в процесі нагріву рама і стрижень повинні мати однаковий й по можливості низький коефіцієнт термічного розширення.

Деформацію випробувального пристрою визначають, провівши випробування із застосуванням зразка, виготовленого з жорсткого матеріалу з малим коефіцієнтом розширення (наприклад, з інвару або боросилікатного скла). Якщо величина деформації складає 0,01 мм або більше, то знайдена величина повинна враховуватися як поправка шляхом алгебраїчного додавання з величиною прогину випробуваних зразків.

Термокамера для нагрівання зразків повинна бути забезпечена нагрівачем і програмуємим пристроєм для підвищення температури теплопередавального середовища. Як для середовищ що передають тепло можуть застосовуватися рідкі середовища (силіконове масло, гліцерин, рідкий парафін та ін.) і повітряне середовище.

Застосовуване середовище має бути стійка в робочому інтервалі температур, і не повинне надавати впливу на матеріал зразка і під час дослідів повинне перемішуватися. Запрограмований пристрій повинен забезпечувати рівномірне підвищення температури рідкого середовища із середньою швидкістю  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в 1 хв ( $120 \pm 10^{\circ}\text{C}$  в 1 год), повітряного середовища - з середньою швидкістю  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  в 1 хв ( $50 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в 1 год). Рекомендується передбачати розміщення в термокамері і випробування одночасно декількох зразків.

Для вимірювання температури середовищ які передають тепло використовують

термометри з ціною поділки шкали не більше 1 °С і похибкою відліку за шкалою не більше 0,5 °С. Термометри встановлюють по обидві сторони зразка так, щоб кульки термометрів були розташовані поблизу середньої частини зразка.

Для вимірювання величини згину в середині зразка використовують пристрій з ціною поділки не більше 0,01 мм.

#### Підготування до випробування

Перед випробуванням зразки пластмас кондиціонують.

Вимірюють висоту і ширину зразків у середній частині з похибкою не більше 0,1 мм.

Зразок поміщають у камеру на опори, так щоб його висота знаходилася у вертикальній площині. При випробуванні в рідкому середовищі зразок повинен знаходитися від поверхні рідини на глибині не менше 50 мм.

Початкова температура випробування повинна бути  $25 \pm 2$  °С для пластмас,  $23 \pm 2$  °С – для ебоніту. Допускається починати випробування при більш високих температурах, якщо це не впливає на результат випробування.

Випробування проводять при напруженнях:

- 0,45 Н/мм<sup>2</sup> (0,45МПа-метод В)
- 1,85 Н/мм<sup>2</sup> (1,85МПа-метод А)
- 4,90 Н/мм<sup>2</sup> (50 кгс/см<sup>2</sup>);
- 7,40 Н/мм<sup>2</sup> (75 кгс/см<sup>2</sup>).

Величина напруження має бути вказана у нормативно-технічній документації на матеріал.

Розрахункове навантаження ( $P$ ) у ньютонах обчислюють за формулою

$$P = \frac{2\sigma}{3l} \cdot bh^2, \quad (2.1)$$

де  $\sigma$  – задана напруженість, Н/ см<sup>2</sup>;

$l$  - відстань між опорами, см;

$b$  - ширина зразка, см (0,4 см);

$h$  - висота зразка, см ( 1 см);

$P_A = 0,490 \div 0,500$  кгс;

$P_B = 0,123 \div 0,125$  кгс (тільки для стержня).

#### Проведення випробування

До зразка плавно докладають зусилля і через 5 хв виконують заміри величини згину, яку приймають за початкову (нульову) для даного випробування.

Допустиме відхилення застосовуваного навантаження від розрахункового навантаження має бути не більше 2,5 %. Якщо при випробуванні зразок знаходиться під дією зусилля з боку пристроїв для вимірювання згину, то це зусилля повинне враховуватися при виборі навантаження.

Вмикають нагрівач, запрограмований пристрій і пристрій для перемішування тепла у передавальному середовищі .

У процесі випробування фіксують температуру, при якій згин зразка стає рівним 0,33 мм. Цю температуру, визначають як середнє арифметичне значення з показань двох термометрів, приймають за температуру розм'якшення зразка при згині.

Якщо на зразку після випробування виявилися тріщини, випробування вважають недійсним і проводять випробування на іншому зразку.

#### Обробка результатів

Температуру розм'якшення матеріалу при згині в цілих градусах при заданій напрузі визначають як середнє арифметичне із значень температур розм'якшення трьох випробуваних зразків. Температуру розм'якшення матеріалу при згині позначають у відповідності з напруженістю:  $T_{(0,45)}$ ,  $T_{(1,80)}$ ,  $T_{(4,90)}$ ,  $T_{(7,40)}$ .

Якщо результати випробувань трьох зразків відрізняються від середнього арифметичного значення більш ніж на 2 °С, випробування повторюють, використовуючи нові зразки. За кінцевий результат приймають результат повторного випробування.

Якщо температура розм'якшення матеріалу при обранім напруженні виявилася нижче 40 °С, то проводять нове випробування при більш низькому напруженні відповідно до цього стандарту.

Результати випробування записують у протокол, який повинен містити:

- найменування і марку матеріалу;
- найменування підприємства-виробника матеріалу;
- спосіб виготовлення зразків;
- розміри зразків;
- умови кондиціонування зразків;
- найменування середовища яке передає тепло;
- температуру розм'якшення матеріалу при згині;
- особливі зауваження;
- позначення цього стандарту;
- дату випробування.

### **Підготовка до лабораторної роботи**

При підготовці до лабораторної роботи виконати наступне:

1. Отримати комплект технічної документації на прилади та обладнання, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та обладнання в цілому.

3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи"

3.1. Подати основні вимоги нормативної документації щодо випробовуваних зразків досліджуваного конструкційного матеріалу, методики проведення замірів та випробувань, вимоги до класу точності приладів та устаткування;

3.2 Подати розшифровку всіх надписів та позначок на приладах,

обладнанні та пристосуваннях;

3.3. Обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

3.4. Обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

3.5. Скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;

3.6. Побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;

3.7. Проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

### **Завдання до виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з електричною схемою установки чи іншого вимірювального комплексу, розміщенням елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на робочому місці з визначення електричних, механічних чи теплових показників конструкційних матеріалів. Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.

2. Дослідити температури розм'якшення  $T_B$  полімерних матеріалів згідно методу Віка та на згин. Отримані результати замірів занести в таблицю.

5.3. Полімерні матеріали – термопласти для дослідів слід вибирати з нижче поданого переліку:

- поліамід ПА 6–210 КС ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 210);
- поліметилметакрилат «Дакрил–8» ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 107);
- поліметилметакрилат IF 850 NP “LG–MMA” (“LG”) ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 107);
- поліпропілен HP 456J “Moplen” ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 95);
- полікарбонат “Calibre–303 TNT–10 MFR” (“DOW Plastics”) ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 145);
- поліамід ПА СВ 25–ІАП–831 «Арматид» ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 210);
- полістирол 525 ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 85);
- полістирол ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 82);
- співполімер ABS P2H/AT “Novodur” (Bayer) ( $T_B$  (5 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 90);
- поліетилен високого тиску 15803–020 ГОСТ 16337–77 ( $T_B$  (1 кгс),  $^{\circ}\text{C}$ : не менше 95).

5. Привести всі засоби управління установкою чи вимірювального комплексу у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення лабораторної роботи.

### **Звіт**

1. Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.

2. Накреслити функціональну схему установки та принципову електричну схему її вимірювальної ланки.

3. Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.

4. Розрахувати значення та побудувати графічні залежності для згідно дослідних та розрахункових значень.

5. Визначити середні арифметичні значення для кожного досліді. Отримані результати занести в таблицю.

6. Визначити середню квадратичну похибку замірів  $\sigma$  та величину довірчого інтервалу замірів  $\beta$  для кожного досліджуваного проміжку.

7. Проаналізувати залежності. Порівняти дослідні та розрахункові дані.

8. Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

### **Запитання для самоперевірки**

1. У чому полягають особливості визначення температури розм'якшення полімерних матеріалів згідно методу Віка та на згин?

2. В чому зміст понять: температура розм'якшення, температура плавлення, теплова стійкість конструкційних полімерів?

3. В чому полягає фізичний зміст рівняння для визначення розрахункового навантаження при випробуванні полімерних матеріалів на згин?

4. Дайте визначення: теплова стійкість полімерного матеріалу при короткочасній дії температури і приведіть основні величини, що її характеризують.

5. Приведіть відмінності понять: температура розм'якшення полімерного матеріалу й теплова його стійкість.

6. Перерахуйте механізми молекулярної взаємодії, які забезпечують теплову стійкість полімерних конструкційних матеріалів.

7. Чому існує відмінність між температурами розм'якшення різних полімерних матеріалів?

8. Сформулюйте визначення теплової стійкості полімерного матеріалу при довготривалій дії температури.

9. Чому існує залежність між молекулярною структурою й тепловою стійкістю полімерного матеріалу?

10. Як впливають отримані результати на вибір матеріалу для ізоляційної конструкції?

11. Чим пояснюється відмінність у визначенні температури розм'якшення згідно методу Віка?

12. Поясніть принцип дії дослідної установки та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### «Дослідження стійкості до дії підвищеної вологості матеріалів електроізоляційних конструкцій»

#### Мета роботи:

- ознайомитись з стандартними методиками визначення впливу підвищеної вологості на електричні та діелектричні показники твердих електроізоляційних матеріалів;
- навчитись виготовляти зразки для їх випробування дією вологи, напруги промислової та підвищеної частот;
- оволодіти практичними навичками роботи на обладнанні з випробовувань електричних та діелектричних показників твердих електроізоляційних матеріалів, підданих дії підвищеної вологості;
- навчитись проводити систематизацію результатів випробувань матеріалів та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик;
- навчитись проводити класифікацію твердих електроізоляційних матеріалів на відповідність вимогам стандартів щодо їх вологостійкості та здатності до вологонасичення.

#### Стислі теоретичні відомості

##### Механізми вологопроникнення у тверді електроізоляційні матеріали

Якщо на будь-якій поверхні, наприклад на поверхні твердого тіла, відбувається збільшення концентрації деяких молекул, то таке ущільнення речовини на поверхні називається адсорбцією. Вона відбувається під дією поверхневих сил, які називаються адсорбційними силами; адсорбована речовина (тут - вода) називається адсорбатом; тіло, яке утворює поглинаючу поверхню (тут – твердий електроізоляційний матеріал) – адсорбентом.

Адсорбція рідини твердим тілом називається змочуванням.

Із збільшенням тиску оточуючого газу адсорбція зростає, тобто при збільшенні вологості повітря адсорбція на поверхні адсорбента збільшується.

Фізичною адсорбцією називається адсорбція, при якій частинки адсорбату зберігають свої індивідуальні особливості. При хімічній адсорбції (хемосорбції) молекули води утворюють хімічні з'єднання з адсорбентом (тут – з ізоляційним матеріалом).

Відомо, що *молекулярне електричне поле* всередині твердого діелектрика, величина цього поля та його характер визначається структурою тіла, розподілом внутрішніх електричних зарядів.

Оскільки молекули води є *електричними диполями*, то попадаючи в електричне поле  $E_0$  адсорбенту ( $E_0$  – середнє значення напруженості поля на поверхні діелектрика), розміщуються у напрямку дії електричного поля і притягуються до джерела поля.

Кожна молекула води, яка попадає на поверхню ізоляційного матеріалу, піддається дії сильного тяжіння, направлено всередину рідини нормально до її поверхні. Тому основна властивість поверхні рідини полягає у її прагненні

скоротитися до найменш можливої величини. Це проявляється у сферичній формі мілких краплин води. Та обставина, що поверхня води самочинно скорочується, вказує на існування *вільної енергії поверхні*, тобто на необхідність затрати роботи по її розширенню.

Математично завжди можлива заміна поняття вільної енергії одиниці поверхні поняттям поверхневого натягу, діючого тангенціально до поверхні.

При розгляді механізму змочування матеріалу на поверхні слід враховувати три види *поверхневого натягу* (енергії змочування) на границях: вода – повітря – тверда поверхня.

В цьому випадку зміна енергії тіла буде відбуватись у формі роботи в процесі силової взаємодії тіл.

Робота *сил адгезії*  $W_{T.P.}$  твердого тіла та рідини представляє собою роботу, яку необхідно затратити проти адгезійних сил для відриву твердого тіла від рідини у напрямку нормалі до їх поверхні розділу:

$$W_{T.P.} = \gamma_{P.G.} \cdot (1 + \cos \theta), \quad (3.1)$$

де  $\gamma_{P.G.}$  – енергія поверхневого натягу *рідини* на границі з *газом* (повітрям);

$\theta$  – крайовий кут змочування, *град.* (рис. 3.1).

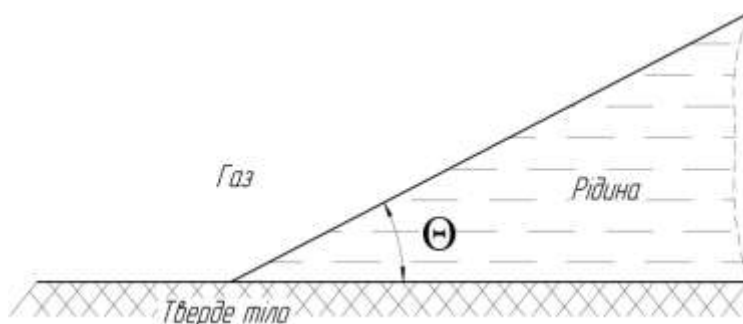


Рисунок 3.1 – Крайовий кут  $\theta$  змочування, утворений рідиною **P** з твердим тілом **T** в середовищі повітря (газу) **G**

Рівняння (3.1) вказує на те, що величина крайового кута визначається співвідношенням між *адгезією* рідини до твердого тіла та *когезією* самої рідини, тобто між енергією зчеплення молекул твердого тіла та води і енергією зчеплення самої води.

При  $\theta = 0^\circ$ ,  $W_{T.P.} = 2\gamma_{P.G.}$  – адгезія води до твердого тіла перевищує енергію зчеплення між молекулами води; краплина води розтікається по поверхні.

При  $\theta \geq 90^\circ$  адгезія мала у порівнянні з когезією молекул води – тверде тіло *гідрофобне* (слабке змочування водою).

Кут змочування  $\theta$  визначається не тільки властивістю води, але й хімічним складом, будовою та властивостями твердого тіла, що змочуються. Так, встановлено, що полімерні діелектрики, які містять в своєму складі *гідроксильні групи* (- OH та ін.) – гідрофільні, а полімери, що містять тільки групи атомів  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5$ ,  $\text{CF}_2$  – гідрофобні.

Будь-який електроізоляційний матеріал, який перебуває у середовищі

повітря, поглинає з нього деяку кількість води, тобто є *вологонепроникним*. Спочатку на поверхні матеріалу відбувається *адсорбція* парів води; потім – їх *дифузія* у напрямку зменшення градієнту концентрації вологи. Слід відмітити, що процес дифузії при зволоженні електроізоляційних матеріалів відбувається, як правило, в непрацюючому електроізоляційному виробі. Якщо ж цей виріб перебуває під струмовим навантаженням, дифузія вологи відбувається з матеріалу, тобто маємо процес сушки електричної ізоляції.

Об'ємне поглинання вологи матеріалом, яке відбувається шляхом *дифузії* у матеріал називається абсорбцією (сорбцією). Розрізняють два типи *абсорбції* – активовану і неактивовану.

Неактивована сорбція (точніше абсорбція) відбувається внаслідок присутності в матеріалі *пор* та *капілярів*. При цьому відбувається *молярне* переміщення вологи вздовж капілярів згідно законів капілярного руху:

- якщо крайовий кут змочування  $\theta < 90^\circ$ , то за рахунок вільної енергії поверхні рідини створюється *виштовхувальний тиск*, який прагне підняти рівень рідини у капілярі, тобто всмоктати її всередину матеріалу;

- якщо ж  $\theta \geq 90^\circ$ , рідина виштовхується з капіляру нижче її загального рівня і абсорбція не відбувається.

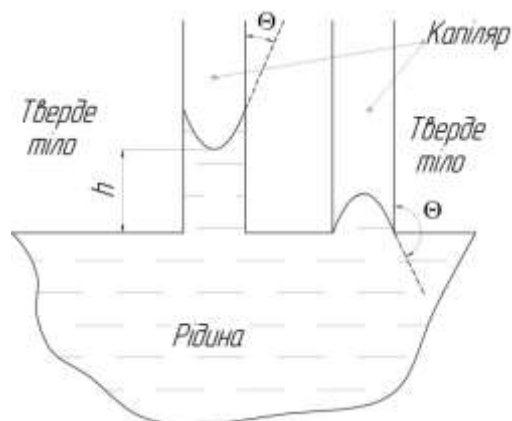


Рисунок 3.2 – Рідина у капілярах при різних кутах змочування

*Неактивована сорбція* характерна для таких матеріалів як мармур, шифер на основі азбесту, шаруваті пластмаси з порами на поверхні.

Для більшості полімерних діелектриків характерна активована сорбція, при якій відбувається безпосереднє проникнення молекул води поміж молекул діелектрика.

Завдяки тепловому відносному руху самих молекул полімеру та їх ланок, молекули води, володіючи малими розмірами (порядку  $2,7 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,7 \text{ Å}$ ), у  $(10^2 \dots 10^4)$  разів меншими, ніж молекули полімеру, можуть проникати у полімер. Для активованої сорбції характерне *молекулярне переміщення* вологи всередині матеріалу згідно законів дифузії.

Цей процес відбувається таким чином. Якщо діелектрик перебуває у вологому повітрі, молекула води, рухаючись з великими швидкостями, будуть вдарятись у поверхню діелектрика. Час від часу окремі молекули полімеру або ланки довгих молекул, отримавши від сусідніх молекул додаткову теплову енергію (*енергію активації*), переходять у нове положення, залишивши за

собою «дірку» (енергетичну), в яку може влетіти молекула води і залишитись там. Оскільки сили тяжіння у такій системі відносно малі (сили Ван-дер-Ваальса), існує ймовірність переходу цієї молекули води у наступну енергетичну «дірку», якщо така утвориться.

Проникнення молекул води у діелектрик пов'язане із затратою додаткової енергії тепла – енергії активації молекул полімеру. У зв'язку з цим для активованої сорбції характерна температурна залежність.

### **Фізика вологопоглинання. Сорбційна точка**

Електроізоляційні пористі матеріали мають цілу величезну систему субмікроскопічних капілярів та відкритих пор, на внутрішніх стінках яких адсорбуються шари молекул води. В тонких капілярах спостерігається капілярна полімолекулярна концентрація вологи. Для цих матеріалів характерна *неактивована (капілярна) сорбція* в тому випадку, якщо розміри, кількість та характер пор не залежать від температури (теплового розширення матеріалу).

Пориста структура матеріалу характерна для ряду пластмас з наповнювачами, шаруватих пластиків, в яких капіляри утворюються між наповнювачем та пов'язуючим, між частинками наповнювача. Багато з наповнювачів самі мають явно виражену пористу структуру (деревина, папір, тканини).

Для матеріалів з тонкими капілярами характерна *активована сорбція* (дифузійна, молекулярна).

*Полярні гідрофільні групи* (активні радикали) полярних електроізоляційних матеріалів, наприклад: OH-, COOH-, CO-, NH-, NH<sub>2</sub>-, O-, CH<sub>3</sub>-, сприяють збільшенню інтенсивності поглинання вологи: чим більше в молекулі гідрофільних груп, тим більше матеріал поглине вологи через сильну взаємодію полярних радикалів з молекулами води.

*Полярні* матеріали, які не мають гідрофільних заміщуваних груп, але володіють *несиметричною* молекулою, також характеризуються підвищеною вологопоглинністю.

Для *полярних* органічних полімерів характерна *активована сорбція*, при якій молекули води переміщуються всередину матеріалу через систему постійно існуючих розщелин (дірок) між макромолекулами та їх частинами. При цьому величина та їх кількість залежить від температури: чим вища температура, тим більша ймовірність утворення розщелини та проникнення через неї молекули води всередину матеріалу.

*Неполярні та слабополярні* електроізоляційні матеріали завдяки відсутності полярних радикалів, гідрофільних груп та наявності високої *симетричності* структури володіють *малою* волого- та водопоглинністю. Для цих матеріалів також характерна *активована сорбція*, яка відбувається згідно того ж механізму, що й у полярних діелектриках, але значно нижчого рівня. Порівняно низькому вологопоглинанню сприяє також можливість групування полімерних ланок у жорстку кристалічну решітку.

Як правило, полімери з тривимірною структурою мають сильно розгалужені молекули, розщелини між якими значно переплетені та мають неправильну форму. Проникаючі всередину такого полімеру (наприклад, фенольної смоли) молекули води (розмір  $\sim 2,4 \text{ \AA}$ ) змушені проходити значний звивистий шлях, однак, в кінцевому підсумку, волого – та водопоглинання все ж буде значним.

Для матеріалів типу гуми (еластоміри) характерний *осмотичний* процес волого – та водопоглинання, оскільки гума містить у своєму складі водорозчинні солі, притаманні попутньо мінеральним наповнювачам (тальк, каолін).

При знаходженні зразка електроізоляційного матеріалу в середовищі вологого повітря або у воді кінетика сорбції може носити різноманітний характер, але найбільший інтерес представляє собою досягнення кінцевого результату – *рівноважного стану*. Рівноважний стан досягається для різних матеріалів у різний час і значно залежить від відносної вологості, температури, товщини матеріалу, тиску води. Так, для плівкових матеріалів (полістирол, триацетат целюлози, поліпропілен, фторопласт) товщиною від 0,03 до 0,1 мм та склотекстолітів товщиною від 0,4 до 1,0 мм рівноважний стан водопоглинання досягається за (500 ... 1000) годин, а для еластомірів (гуми) товщиною 1,0 мм – за 2000 годин.

Величина рівноважного водопоглинання при заданій температурі та відносній вологості повітря є одним з найважливіших критеріїв вологостійкості електроізоляційного матеріалу, так як при ньому для цього матеріалу будуть характерні і певні електричні характеристики.

Якщо відомі умови експлуатації матеріалу та тривалість знаходження його в умовах підвищеної вологості, по значенню рівноважної вологості вибирається застосування того чи іншого матеріалу.

Певне значення рівноважної вологості називається сорбційною точкою і характеризується трьома параметрами: температурою ( $t, ^\circ\text{C}$ ), відотною вологістю ( $\Psi, \%$ ), тривалістю витримки матеріалу, при якій у даних умовах зволоження настає рівноважний стан ( $\tau, \text{год.}$ ).

При випробуванні матеріалів на зволоження у різних кліматичних умовах (наприклад,  $t = 20 ^\circ\text{C}$ ;  $\Psi = 55 \%$  та  $t > 30 ^\circ\text{C}$ ,  $\Psi = 90 \%$ ) застосовують перевідні коефіцієнти, які дозволяють за різні відрізки часу випробувань одержати якісно одні і ті ж результати (наприклад, питомий електричний опір).

Так, зміна фізико-механічних показників термопластичних діелектриків під дією води при температурі  $20 ^\circ\text{C}$  та вологого повітря з відотною вологістю  $\Psi = 50 \%$  при температурі  $40 ^\circ\text{C}$  відбувається ідентично.

Наприклад, для *термореактивних склопластиків* встановлені такі еквівалентні витримки:

- 2 години кип'ятіння у воді;
- 1 місяць перебування у воді при температурі  $20 ^\circ\text{C}$ ;
- 2 місяці перебування на повітрі в умовах відносної вологості  $\Psi = 100 \%$  при температурі  $t = 20 ^\circ\text{C}$ .

При цьому не враховувались зміни їх електричних показників.

Слід відзначити, що спроби створення єдиної методики, придатної для випробування будь-якого електроізоляційного матеріалу у воді або в умовах відносної вологості повітря, не дають позитивних результатів і неможливі через складність фізико-хімічних процесів зволоження, специфічних для кожного матеріалу. Особливо непередбачуваними є прискорені методики випробувань на кип'ятіння зразків матеріалів або витримки їх на повітрі в умовах високої вологості при значних температурах. Так, в багатьох випадках відбуваються процеси екстрагування реагентів в різних полімерах, гідроліз, вилуджування скла деяких склопластів, вимивання наповнювачів у вулканізованих гумових сумішей.

Для прогнозування поведінки електроізоляційних матеріалів на повітрі в умовах підвищеної вологості або у воді найбільш правильним буде визначення *сорбційних точок* для заданих умов експлуатації. При цьому необхідно максимально дотримуватись еквівалентності, товщини зразків та виробів.

### **Особливості заміру електричних та діелектричних показників**

Об'ємний опір - відношення напруги до струму, що протікає через товщину зразка матеріалу між двома улаштованими електродами.

Поверхневий опір - відношення напруги до струму, що протікає поверхнею зразка матеріалу між двома улаштованими електродами, розташованими на одній поверхні зразка.

Опір ізоляції - відношення напруги до загального струму, що протікає поверхнею і через товщу зразка між двома електродами.

Внутрішній опір - відношення напруги до струму, що протікає між двома циліндричними чи конічними електродами, розташованими в спеціально зроблених у зразку отворах з осями, паралельними одна одній і перпендикулярними до можливої «шаруватої» структури електроізоляційного матеріалу.

Питомий об'ємний опір - відношення напруженості електричного поля до щільності струму, що проходить через об'єм зразка матеріалу.

Питомий поверхневий опір - відношення напруженості електричного поля до струму на одиницю ширини поверхні зразка матеріалу.

#### Поверхневий електричний опір.

Проведеними дослідженнями встановлено, що значення поверхневого опору визначаються не абсолютною, а відотною вологістю повітря – чим більше вологи адсорбує поверхня, тим більша поверхнева електропровідність. При збільшенні температури збільшується рухливість іонів у водяному шарі, адсорбованому на поверхні діелектрика, і поверхневий опір різко падає.

Значний вплив на величину поверхневого опору справляє хімічний склад матеріалу. Більш полярний матеріал, володіючи більшим електричним полем, зв'язує на своїй поверхні більше полярних молекул води, ніж не полярний або слабополярний матеріал. Тому, поверхневий опір полярних діелектриків буде меншим, ніж не полярних або слабополярних.

Поверхнева електропровідність діелектрика залежить від стану поверхні матеріалу таким чином, що при інших рівних умовах більш шорстка поверхня адсорбує більше води, ніж гладка. Здатність матеріалу електризуватися і, у зв'язку з цим, притягувати пил також сприяє адсорбції вологи з оточуючого повітря і зменшенню поверхневого опору. Завдяки цьому навіть такі неполярні діелектрики, як фторопласт та поліетилен в умовах 100%-ї відносної вологості повітря володіють низьким поверхневим опором.

З вище наведеного можна зробити висновок: питомий поверхневий опір електроізоляційного матеріалу не може бути критерієм вологостійкості діелектрика; в умовах високої вологості повітря практично піддається заміру або опір плівки забрудненої води на поверхні, або загальний опір матеріалу, з якого неможливо виділити значення поверхневого опору, так як відбувається помітна адсорбція вологи об'ємом матеріалу.

#### Об'ємний електричний опір.

Крива зміни об'ємного опору ізоляції подібна кривій адсорбції і по залежності об'ємного опору від процесу вологопроникнення можна оцінити досягнення матеріалом *рівноважного стану*.

Швидкість наволоження матеріалу протягом перебування зразка в умовах підвищеної вологості повітря або у воді помітно зменшується, що пояснюється зменшенням різниці тисків водяної пари в оточуючому середовищі та всередині досліджуваного електроізоляційного матеріалу або зменшенням градієнта концентрації води у випадку перебування матеріалу у воді.

Якщо почергові зволоження та висихання здійснюють незворотні зміни властивостей матеріалу, наприклад, тріщини, послаблення зв'язків, порушення гладкості поверхні – навіть постійно повторювальні амплітуди коливань температури та вологості з часом викликають помітні зниження об'ємного електричного опору матеріалу.

Зниження величини питомого об'ємного опору електроізоляційних матеріалів в процесі зволоження залежить, в першу чергу, від хімічного складу та структури матеріалу і тому тісно пов'язане з такою характеристикою матеріалу як *вологопоглинання*.

Для більшості електроізоляційних матеріалів через певний час зволоження настає *рівноважний* або близький до нього *стан*, при якому встановлюється постійне значення питомого об'ємного опору. В залежності від типу матеріалу та його товщини у певних умовах (як правило, від (95 ... 100)% вологості з температурою 25 °C, до 100% вологості при температурі 100 °C), *рівноважний стан* складає:

250 ÷ 750 год. для просочувальних лаків та нагрівних смол при товщині (50 ... 60) мм;

250 ÷ 300 год. для пластидів товщиною 4 мм;

1500 ÷ 2000 год. для електроізоляційних плівок товщиною (45 ... 100) мм;

250 ÷ 2500 год. для шаруватих пластиків товщиною (0,4 ... 2) мм;

120 ÷ 500 год. для пластмас з неорганічними наповнювачами товщиною 4 мм;

600 ÷ 720 год. для склопластиків товщиною 0,17 мм;  
2000 ÷ 2200 год. для еластомірів товщиною 1 мм;  
140 ÷ 240 год. для міканітів та слюдонітів товщиною (0,15 ... 1) мм.

#### Тангенс кута діелектричних втрат.

Діелектричні втрати на переполяризацію молекул діелектрика, які вимірюють методом заміру  $tg\delta$ , із збільшенням вмісту води в матеріалі збільшуються пропорційно кількості поглиненої води, що пояснюється, в основному, ростом струму провідності зволоженого діелектрика.

Поряд з явною залежністю  $tg\delta$  діелектрика від вмісту води, спостерігається також залежність від типу розподілу води у діелектрику: у вигляді сферичних або сфероїдних включень, у вигляді каналів, заповнених водою, у вигляді молекулярно– розподіленої води, коли саме поняття форми розподілу втрачає зміст.

Залежність  $tg\delta$  зволоженого діелектрика від частоти діючого електричного поля виявляє наявність максимуму  $tg\delta$ , розміщення якого визначається електропровідністю, а величина – кількістю поглиненої води.

Збільшення діелектричних втрат спостерігається також при дослідженні процесів термо-вологостаріння електроізоляційних матеріалів.

Так, в процесі термо-вологостаріння гетеросилоксанової гуми згідно режиму: (1000 ... 2000) год. при  $\Psi = 100\%$  води, потім - термообробка при температурі  $T = 150^\circ\text{C}$  значно і плавно зростає  $tg\delta$  зразків, причому більше значення  $tg\delta$  відповідає більшому волого – та водопоглинанню, що вказує на явне старіння гуми та порушення поперечних зв'язків окремих макромолекул.

Таким чином, при зволоженні різних діелектричних матеріалів  $tg\delta$  збільшується однозначно, але в одних випадках рівномірно і пропорційно поглиненій воді, а в інших – стрибкоподібно через значні величини струмів провідності.

#### Електрична міцність.

Електрична міцність ізоляційного матеріалу або системи ізоляції є найбільш важливою властивістю, так як при пробі відбувається вихід з ладу електричної ланки, що призводить до відмови у роботі електротехнічного виробу.

Відомо, що в одному і тому ж матеріалі при зміні умов пробі спостерігається зміна *характеру пробі* (тепловий або електричний пробі).

У вологому, достатньо товстому електроізоляційному матеріалі в основному повинен переважати *тепловий пробі*, так як збільшуються діелектричні втрати, матеріал розігрівається, внаслідок чого втрати зростають і процес цей все більше стає явним. Сама ж по собі вода, яка міститься у зволоженому діелектрику, сприяє збільшенню його теплопровідності (відвід тепла від найслабшої з електричної міцності зони), що повинно збільшувати електричну міцність. Електропровідність, що збільшується, з одного боку, сприяє підсиханню матеріалу та збільшенню електричної міцності (у порівняно тонких матеріалах), але з іншого – призводить до збільшення температури теплового поля, яке не встигає вийти з матеріалу (в порівняно товстому

діелектрику), і тоді пробій носить *тепловий характер*.

Слід відзначити, що підвищення електричної міцності зволоженого діелектрика внаслідок його висихання через підвищену електропровідність і покращення тепловіддачі на практиці не відбувається, так як при випробуваннях підвищеною напругою тривалість її прикладання, в більшості випадків, порівняно малий з тривалістю десорбції вологи з матеріалу.

У зволоженому діелектрику при дії на нього електричного поля останнє перерозподіляється таким чином, що напруженості стають зворотно-пропорційні діелектричним проникностям самого діелектрика та води. Оскільки діелектрична проникність води, як правило, для типових діелектриків набагато вища, від діелектричної проникності самих діелектриків, напруженість електричного поля у незволоженій або мало зволоженій частині електроізоляційного матеріалу значно перевищує напруженість поля у зволжених ділянках. Таким чином, навіть в не повністю зволоженого діелектрика у зв'язку із збільшенням його неоднорідності у зовнішньому електричному полі ніби зменшується ефективна товщина, що зумовлює зменшення електричної міцності.

Особливо сильно цей ефект проявляється на волокнистих матеріалах, так як заповнені водою порожнини під дією електричного поля орієнтуються вздовж ліній поля, витягуючись та зменшуючи ефективне січення ізоляції.

На зменшення електричної міцності діелектриків у процесі зволоження помітний вплив можуть справляти тріщини, які утворюються у результаті внутрішніх напруг в матеріалі, особливо в тих із них, що набухають у волозі через тип наповнювача (папір, деревина, тощо).

Хоча й встановлено багаточисленними експериментами, що електрична міцність зменшується в процесі зволоження матеріалу, але це зменшення *не* завжди *пропорційне* кількості поглиненої вологи і в значній мірі залежить від форми розподілу вологи в електроізоляційному матеріалі.

### **Методи вибору та підготування зразків конструкційних матеріалів до вимірювань**

Лабораторна робота поширюється на тверді електроізоляційні матеріали і встановлює методи визначення їх вологостійкості і водостійкості за наступними показниками:

- електрична міцність  $E_M$  ;
- питомий об'ємний електричний опір  $\rho_v$  ;
- внутрішній опір  $R_i$  ;
- опір ізоляції  $R$  ;
- вологопоглинання  $H$  ;
- водопоглинання  $W$  ;
- набухання  $V$  .

Визначення перерахованих показників повинно проводитися після впливу на матеріали:

- а) повітря з відносною вологістю  $(93 \pm 2) \%$  або  $(95 \pm 2) \%$  і температурою

$(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  або  $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ;

б) дистильованої води з температурою  $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ .

Зразки для випробувань не повинні мати жолоблення, що перешкоджає щільному приляганням електродів, тріщин, сколів, вм'ятин, задирок, плям і забруднень, видимих неозброєним оком. Поверхні зразків, що піддавалися механічній обробці, повинні бути гладкими, без вибоїн і подряпин.

Поверхні зразків повинні бути паралельними.

Для визначення електричної міцності, питомого об'ємного опору, внутрішнього опору і опору ізоляції кількість, форма і розміри зразків повинні бути зазначені в стандартах або технічних умовах на матеріал.

Умови нормалізації зразків повинні бути зазначені в стандартах або технічних умовах на електроізоляційний матеріал.

Якщо у стандартах чи технічних умовах на матеріал умови нормалізації не вказані, то безпосередньо перед випробуваннями зразки повинні бути витримані при температурі  $(55 \pm 2) ^\circ\text{C}$  і відносній вологості не більше 20 % протягом 24 год., а потім охолоджені до кімнатної температури в ексикаторі над сухим хлористим кальцієм, силікагелем або іншим абсорбуючим пари води матеріалом, які не мають шкідливого впливу на електроізоляційний матеріал.

Тривалість нормалізації і кондиціонування зразків вибирається з табл. 3.1 і повинна бути вказана в стандарті чи технічних умовах на матеріал з урахуванням складу, структури і товщини матеріалу, а також виду випробування (приймально-здавальні, періодичні, типові, дослідницькі і т. ін.).

Таблиця 3.1 – Тривалість нормалізації і кондиціонування зразків

|        |   |   |   |   |    |    |    |    |     |     |     |      |      |      |      |
|--------|---|---|---|---|----|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Години | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 24 | 48 | 96 | 168 | 336 | 672 | 1344 | 2688 | 4368 | 8736 |
| Тижні  | - | - | - | - | -  | -  | -  | -  | 1   | 2   | 4   | 8    | 16   | 26   | 52   |

Похибка тривалості витримки зразків у заданих умовах повинна бути в межах  $\pm 5\%$  при витримці не більше 96 год. чи  $\pm 2\%$  при більш тривалих випробуваннях.

При нормалізації і кондиціонуванні зразки розташовують так, щоб не створювати перешкод для проникнення вологи або води усією поверхнею зразка; зразки не повинні стикатися один з одним і стінками випробувальної камери.

У період нормалізації і кондиціонування на зразках, що знаходяться у вологому повітрі, не повинен утворюватись конденсат.

Визначення електричних параметрів (електричної міцності, питомого об'ємного опору, внутрішнього опору, опору ізоляції) після впливу на зразки повітря з відносною вологістю  $(93 \pm 2) \%$  або  $(95 \pm 2) \%$  і температурою  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , проводиться безпосередньо у випробувальній камері без порушення заданого режиму. Якщо неможливо проведення вимірювань безпосередньо в камері, допускається вимірювання зразків здійснювати в кімнатних умовах. При цьому час з моменту вилучення зразків з камери до моменту закінчення вимірювання має бути зазначений в стандарті або технічних умовах на матеріал, але не повинен бути більшим за 3 хв.

Визначення електричних параметрів після впливу на зразки

дистильованої води повинно тривати не більше 3 хв. після вилучення їх з води.

Перед визначенням електричних параметрів зі зразку повинна бути видалена вода за допомогою фільтрувального паперу або чистої неворсистої бавовняної тканини.

Вимірювання електричних опорів, електричної міцності до, в процесі або після впливу заданого середовища проводиться на одних і тих же зразках електродами одного типу і розміру, які повинні бути зазначені в стандартах або технічних умовах на матеріал.

Для визначення питомого об'ємного опору плоских зразків повинні застосовуватися гумо-фольгові електроди з ізоляційною основою з фторопласту. Для еластичних (гумоподібних) матеріалів допускається використання натискних електродів з нержавіючої сталі.

Для визначення внутрішнього опору і опору ізоляції зразки кондиціонують зі вставленими електродами.

### **Вимоги до обладнання та схемні рішення при замірі зміни електричних та діелектричних показників конструкційних матеріалів після дії вологи**

Камери для випробування зразків на вологостійкість можуть бути будь-яких типів, але повинні забезпечувати проведення випробувань, а також підтримку заданого режиму в усьому випробувальному обсязі із зумовленою цими стандартами похибками. Допускається використовувати камери типу КТВ-01 (0,4 – 1,0).

Опір ізоляції між вимірювальними вводами у випробувальну камеру має не менше, ніж в 100 разів перевищувати максимально можливий опір досліджуваних зразків. При визначенні електричної міцності пробивна напруга або напруга перекриття між вимірювальними вводами повинна не менше, ніж в 2 рази перевищувати максимально очікуване значення на зразках.

Вимірювальні прилади повинні забезпечувати підтримання заданого випробувального значення напруги безпосередньо при вимірі електричних характеристик зволжених зразків.

При випробуванні зразків на водостійкість застосовується посудина, виготовлена з матеріалу, нейтрального по відношенню до води, і яка має зручну форму для встановлення і вилучення зразків.

### **Опис дослідної установки**

Визначення *вологопоглинання і водопоглинання* повинні проводитися в такому порядку. Зразки повинні бути нормалізовані. Після нормалізації зразки швидко переносять у попередньо зважену посудину, яка щільно закривається (наприклад, ексікатор чи бюксу) і зважують; потім зразок без посудини кондиціонують в заданому згідно стандарту чи нормативу середовищі. Після закінчення часу кондиціонування зразок переносять в ту ж посудину і знову зважують; тривалість перенесення повинна бути не більшою за 30 с.

Похибка зважування посудини і зразків – не більше 0,001 г. При визначенні *вологопоглинання* протирання і видалення вологи із зразків не

допускається. При визначенні *водопоглинання* вода повинна бути видалена із зразків за допомогою фільтрувального паперу або чистої неворсистої бавовняної тканини.

Визначення *набухання* повинно проводитися в такому порядку. Зразки попередньо повинні бути нормалізовані. Після нормалізації визначають геометричні параметри зразків; потім зразки кондиціонують в заданому середовищі; після закінчення часу кондиціонування на кожному зразку визначають ті ж контрольовані параметри.

Геометричні параметри зразків і похибка їх вимірювання, а також допустимий час з моменту вилучення зразків із заданого середовища до моменту закінчення випробування повинні бути зазначені в стандарті чи технічних умовах на матеріал.

### **Вимоги до вимірювальних пристроїв**

Вимірювання опорів повинно проводитися при постійній напрузі, нестабільність якої повинна бути не більшою 1 % при струмі не більше 1 мА. Величина напруги повинна вимірюватися з похибкою не більше 2 %.

Спосіб подачі напруги на зразок (плавний підйом напруги або подача фіксованої напруги) повинен бути вказаний в стандартах або технічних умовах на матеріал. У випадку плавного підйому напруги повинна бути нормована швидкість підйому. Зарядні явища, які виникають в результаті підйому напруги, не повинні впливати на результати вимірювання.

Вимірювальний пристрій повинен забезпечувати вимірювання опору з похибками не більшими за приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Похибки вимірювань опорів

| Величина вимірюваного опору , Ом | Похибка , % |
|----------------------------------|-------------|
| До $10^9$                        | $\pm 5$     |
| Більше $10^9$ до $10^{13}$       | $\pm 10$    |
| Більше $10^{13}$                 | $\pm 20$    |

### **Проведення випробувань**

Перед початком випробувань електроди на зразку повинні бути *закорочені* на час, не менше 1 хв. до подачі випробувальної напруги, якщо немає інших спеціальних вказівок в стандартах або технічних умовах на матеріал.

*Випробувальна напруга*, при якій проводиться вимірювання опору, повинна бути вказана в стандартах або технічних умовах на матеріал. Рекомендовані величини випробувальних напруг такі: 50, 100, 250, 500, 1000 В.

*Тривалість витримки* зразка під напругою повинна бути вказана в стандартах або технічних умовах на матеріал. Для вибору цього часу необхідно досліджувати залежності опору від тривалості витримки під напругою, на основі яких визначається тривалість витримки зразка під напругою.

Якщо в стандартах або технічних умовах на матеріал вказівки про тривалість витримки зразка під напругою відсутні, то *відлік вимірювання*

повинен проводитися на 60-й секунді після прикладення напруги.

При повторенні вимірювання досліджуваний зразок потрібно *деполяризувати*. Деполяризацію проводять шляхом заземлення електродів через вимірювальний пристрій, причому спостерігають за струмом деполяризації.

### Розрахунок та обробка результатів вимірювання.

Розрахунок питомих опорів проводять за формулами, наведеними у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахункові формули для розрахунку питомих опорів

| Найменування показника                                                              | Позначення | Розрахункова формула                                       | Одиниця вимірювання |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Питомий об'ємний опір:</b><br>1. Для плоских зразків:<br>а) круглі електроди;    | $\rho_v$   | $\rho_v = \pi \cdot \frac{D_0^2}{4 \cdot t} \cdot R_v$     | Ом·м                |
| б) прямокутні електроди                                                             |            | $\rho_v = \frac{(a+g)(c+g)}{t} \cdot R_v$                  |                     |
| 2. Для трубчатих і циліндричних зразків                                             |            | $\rho_v = \frac{(d_2 - t) \cdot (l + g)}{t} \cdot R_v$     |                     |
| <b>Питомий поверхневий опір:</b><br>1. Для плоских зразків:<br>а) круглі електроди; | $\rho_s$   | $\rho_s = \pi \cdot \frac{D_0}{g} \cdot R_s$               | Ом                  |
| б) прямокутні електроди                                                             |            | $\rho_s = \frac{2 \cdot (a + c + 2 \cdot g)}{g} \cdot R_s$ |                     |
| 2. Для трубчатих і циліндричних зразків                                             |            | $\rho_s = 2\pi \cdot \frac{d_2}{g} \cdot R_s$              |                     |

де  $R_v$  та  $R_s$  – виміряні опори за схемами об'ємного та поверхневого, відповідно, Ом;.

$d_1$  – діаметр вимірювального електроду для плоского зразка або внутрішній діаметр для трубок, м;.

$d_2$  – зовнішній діаметр трубок або внутрішній діаметр охоронного кільця для плоского зразка, м;

$g$  – ширина зазору між вимірювальним і охоронним електродами, м;

$b$  – ширина електроду, м;

$l$  – товщина зразка, м;

$a$  – довжина вимірювального електроду, м;

$c$  – ширина вимірювального електроду, м;

$D_0 = \frac{d_1 + d_2}{2}$  – середній діаметр трубок або охоронного кільця для плоского зразка.

Внутрішній опір і опір ізоляції зчитують зі шкали приладу або розраховують за формулою:

$$R = \frac{U}{I}, \text{ Ом,}$$

де  $U$  – випробувальна напруга, В;

$I$  – струм, що проходить між електродами через зразок, А.

При замірах за допомогою стрічкових електродів опір ізоляції трубчастих і циліндричних зразків повинен бути приведений до довжини електродів (100 мм) за допомогою співвідношення:

$$R_{100} = \frac{\pi \cdot d}{100} \cdot R_x,$$

де  $d$  – зовнішній діаметр трубки, циліндра, мм;

$R_x$  – виміряний опір, Ом;

$R_{100}$  – опір, відповідний довжині 100 мм.

При замірах зразків шириною менше 25 мм виміряний опір ізоляції має бути віднесений до ширини 25 мм за допомогою співвідношення:

$$R_{25} = \frac{b}{25} \cdot R_x,$$

де  $b$  – ширина зразка, мм;

$R_x$  – виміряний опір, Ом;

$R_{25}$  – опір, відповідний ширині зразка 25 мм.

Обчислення вологопоглинання і водопоглинання  $W$  у відсотках повинно виконуватись за формулою:

$$H(W) = \frac{(m_1 - m)}{m} \cdot 100\%,$$

де  $m$  – маса нормалізованого зразка до розміщення його у випробувальній камері, мг;

$m_1$  – маса зразка після кондиціонування, мг.

За результат вологопоглинання і водопоглинання приймають середнє арифметичне вимірювань п'яти зразків.

Визначення набухання повинно проводитися підрахунком збільшення геометричних розмірів зразків після впливу заданого середовища.

За результат набухання приймають середнє арифметичне визначення п'яти зразків. Приріст розмірів має бути виражений в абсолютних цифрах (у міліметрах) або у відсотках.

### **Підготовка до лабораторної роботи**

При підготовці до лабораторної роботи виконати наступне:

1. Отримати комплект технічної документації на прилади та обладнання, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.
2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та обладнання в цілому.
3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи":
  - 3.1. Подати основні вимоги нормативної документації щодо випробовуваних зразків досліджуваного твердого електроізоляційного матеріалу, методики проведення замірів електричних та діелектричних показників й випробувань на вологостійкість та вологомісткість, вимоги щодо класу точності приладів та устаткування;
  - 3.2. Подати розшифрування всіх надписів та позначок на приладах, обладнанні й пристосуваннях;
  - 3.3. Обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;
  - 3.4. Обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;
  - 3.5. Скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;
  - 3.6. Побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;
  - 3.7. Проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

### **Завдання до виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з електричною схемою установки чи іншого вимірювального комплексу, розміщенням елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на робочому місці з визначення електричних та діелектричних показників твердого електроізоляційного матеріалу.

Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.

2. Дослідити вплив вологості на електроізоляційні показники конструкційного матеріалу. Отримані результати замірів занести в таблицю.

3. Полімерні матеріали – термопласти і реактопласти, які рекомендовано використовувати у даній лабораторній роботі, подано нижче:

– фенопласт марки *03–010–02 ТВ* (питомий об'ємний опір (не менше  $1 \cdot 10^{11}$ ),  $\text{Ом} \cdot \text{см}^{-1}$ ; питомий поверхневий опір (не менше  $1 \cdot 10^{12}$ ),  $\text{Ом}$ ; електрична міцність (не менше 14),  $\text{МВ} \cdot \text{м}^{-1}$ ; тангенс кута діелектричних втрат на частоті 50 Гц (0,1 ... 0,7));

- амінопласт марки *МФВІ* (електрична міцність (не менше 12),  $\text{МВ} \cdot \text{м}^{-1}$ ; дугостійкість (не менше 10), с);

- поліамід склонаповнений марки *BKV30H2.0 "Durethan"* ("Lanxess") (електрична міцність (не менше 20),  $\text{МВ} \cdot \text{м}^{-1}$ );

- плівка поліетилентерефталатна електроізоляційна марки ПЕТ Е–100 (електрична міцність (не менше 90),  $МВ \cdot м^{-1}$ );
- картон електроізоляційний товщиною 1,0 ... 3,0 мм марок ЕВ, ЕВТ (електрична міцність (не менше 10),  $МВ \cdot м^{-1}$ );
- плівкоелектрокартон товщиною 0,20 ... 0,45 мм марки ПЕК (електрична міцність у вихідному стані (8 ... 11),  $МВ \cdot м^{-1}$ ; те ж після дії вологи 93% протягом 48 год. (7 ... 9),  $МВ \cdot м^{-1}$ ; питомий об'ємний опір у вихідному стані ( $1 \cdot 10^{13}$  ...  $5 \cdot 10^{13}$ ),  $Ом \cdot см^{-1}$ ; те ж після дії вологи 93% протягом 48 год. (не менше  $1 \cdot 10^{12}$ ),  $Ом \cdot см^{-1}$ );

4. Привести всі засоби управління установкою чи вимірювального комплексу у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення лабораторної роботи.

### Звіт

1. Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.
2. Накреслити функціональну схему установки та принципову електричну схему її вимірювальних ланок.
3. Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.
4. Розрахувати значення вологості електроізоляційного матеріалу та побудувати графічні залежності для його різних марок згідно дослідних та розрахункових значень.
5. Визначити середні арифметичні значення для кожного досліду. Отримані результати занести в таблицю.
6. Визначити середню квадратичну похибку замірів  $\sigma$  та величину довірчого інтервалу замірів  $\beta$  для кожного досліджуваного проміжку.
7. Проаналізувати залежності вологості від режиму кондиціонування . Порівняти дослідні та розрахункові дані.
8. Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

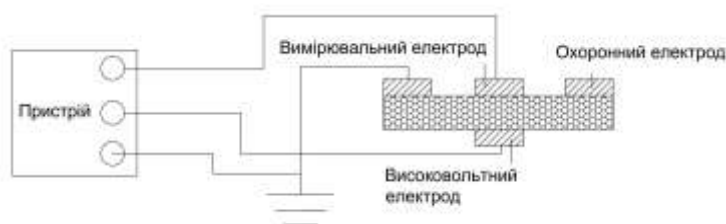


Рисунок 3.3 – Схема під'єднання вимірювальних електродів для заміру діелектричних втрат (тангенс дельта)

### Запитання для самоперевірки

1. У чому полягають особливості вологопоглинання електроізоляційних конструкційних матеріалів.
2. В чому зміст понять: вологомісткість, вологонасиченість, вологопроникність?
3. В чому полягає фізичний зміст рівняння з визначення вмісту вологи в

електроізоляційному конструкційному матеріалі?

4. Дайте визначення поняття вологомісткість матеріалу і приведіть основні величини, що його характеризують.

5. Приведіть відмінності понять вологомісткість, вологонасиченість, вологопроникність.

6. Перерахуйте механізми вологопоглинання електроізоляційних конструкційних матеріалів.

7. Чому існує відмінність між вологомісткістю, вологонасиченістю і вологопроникністю електроізоляційного конструкційного матеріалу?

8. Сформулюйте визначення вологопроникності матеріалу і приведіть основні величини, що його характеризують.

9. Чому існує залежність між сорбцією й абсорбцією електроізоляційного конструкційного матеріалу?

10. Як впливають отримані результати на стійкість матеріалу до дії вологи?

11. Чим пояснюється відмінність між сорбцією й абсорбцією електроізоляційного конструкційного матеріалу?

12. Поясніть принцип дії дослідної установки та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.

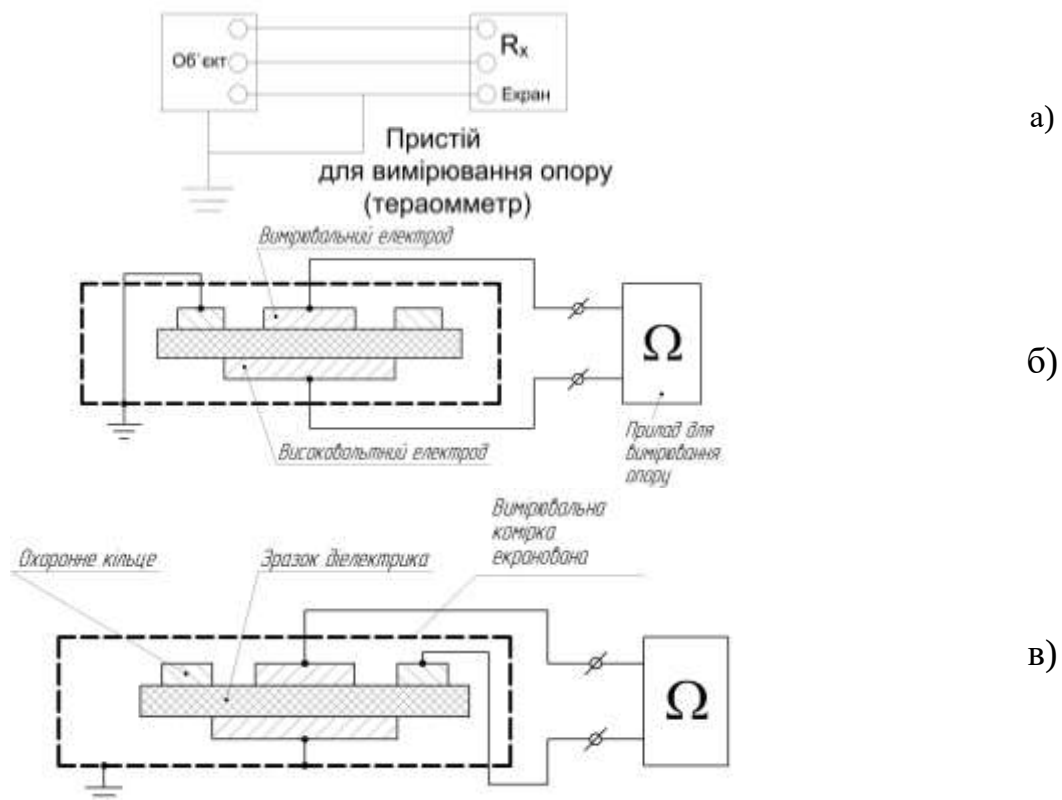


Рисунок 3.4 – Схема електричних з'єднань пристрою для вимірювання опорів діелектриків:

а) загальна; б) для заміру питомого об'ємного опору; в) для заміру питомого поверхневого опору

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### «Дослідження зміни електричної міцності ізоляції емальпроводів при довготерміновій дії теплових навантажень»

#### Мета роботи:

- ознайомитись з стандартними методиками визначення класу нагрівостійкості емальпроводів;
- вивчити стандартні процедури оцінки класів та діапазонів нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів;
- навчитись виготовляти зразки з емальпроводів для випробування їх ізоляції дією тепла та підвищеної напруги;
- навчитись проводити систематизацію отриманих результатів випробувань та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик;
- оволодіти практичними навичками роботи на обладнанні робочих місць з випробувань ізоляції емальованих проводів;
- навчитись проводити класифікацію ізоляції емальпроводів на відповідність вимогам стандартів.

#### Стислі теоретичні відомості

##### Нагрівостійкість. Загальні положення

Надійність електричних пристроїв визначається здатністю електроізоляційного матеріалу без пошкодження та зміни практично важливих його властивостей витримувати дію робочих температур протягом терміну експлуатації ізоляції. Ця здатність називається **нагрівостійкістю** матеріалу до тривалої дії температур.

Критерієм роботоздатності електроізоляційного матеріалу можуть бути різноманітні фізико-механічні та електроізоляційні показники, рівень яких є достатнім для утримання виробу у робочому стані. Вибір показників залежить від конкретних умов роботи матеріалу. Так, у багатьох випадках **нагрівостійкість** оцінюють температурою і часом, при яких матеріал зберігає до 50 % вихідної механічної міцності та відносного видовження, певну еластичність (плівки та лакові покриття), пробивну напругу до встановленого значення (при випробуванні проводів та ін. електроізоляційних матеріалів).

**Теплова стійкість** полімерних матеріалів при тривалій експлуатації (до дій граничних робочих температур) визначається їх складом та хімічною будовою макромолекул, стійкістю проти деструкуючої дії теплової енергії й кисню повітря. Так як первинний акт термічного або термоокислювального розкладу полімеру – це *розрив зв'язків*, їх міцність, яка оцінюється енергією зв'язку, найбільш суттєво впливає на стійкість полімерних молекул до деструкуючих дій. Міцність макромолекул визначається міцністю найбільш *слабких ланок* – тому не всі зв'язки рвуться одночасно.

Опір ланки розриву залежить від взаємного впливу атомів та груп, від екрануючої дії атомів, розміщених поблизу менш міцних зв'язків. Ланцюгова

реакція розкладу полімерів, яка йде слідом після *розриву ланки* (ініціювання), відбувається з швидкістю, залежною від хімічної будови макромолекул, *каталітичного* або *інгібітуючого* впливу продуктів розкладу.

Так, наслідком значної полярності C-F – зв'язку між ланками політетрафторетилену (фторопласту) є сильне міжмолекулярне тяжіння, що у поєднанні з малим радіусом фтору забезпечує щільну упаковку ланок та захист менш міцних C-C - зв'язків.

Будь-яке порушення однорідності та щільності оболонки навколо карбону зумовлює розрихлення структури макромолекули, збільшує ушкоджувальність вуглецевих зв'язків і, як наслідок, знижує нагрівостійкість *фтормістких* полімерів.

Іншим класом полімерів з високою нагрівостійкістю є *циклоланкові полімери* (поліетилентерефталат, полікарбонат, поліаміди та ін.), ланки молекул яких побудовані, в основному, з *ароматичних кілець* та *гетероциклів*.

Особливість їх молекул полягає в тому, що кожний атом карбону ароматичного кільця зв'язаний електронами (π-електрони), які утворюють стійку замкнену систему у вигляді єдиної кільцевої хмаринки. Крім того, умовою ароматичності є також спареність всіх π-електронів. Якщо ж число π-електронів непарне, то два електрони не притягуються, а відштовхується один від одного і система стає нестійкою.

Ланцюгова реакція термічного або термоокислювального розкладу полімерів супроводжується деструкцією ланок, утворенням розгалужених та просторових структур, виділенням летких низькомолекулярних молекул.

Кінцевий результат змін властивостей електроізоляційних матеріалів може бути досягнений в результаті тривалого повільного *старіння* при низьких температурах або під дією більш високих температур, але за менший час.

Тому, з метою знаходження якнайбільш повної характеристики стійкості електроізоляційного матеріалу до *теплого старіння*, визначають зміну властивостей при *різних* термінах витримки та температурах.

Згідно отриманих даних будують криву залежності максимально допустимої температури (при якій матеріал зберігає умовно встановлені властивості) від тривалої теплової дії.

На рис. 4.1 в логарифмічному масштабі часу поданий графік *старіння* у повітряному середовищі поліефірмідної ізоляції емальпроводів з температурним індексом W155, для яких за критерій роботоздатності прийняте збереження напруги пробою ізоляції зразків при *випробувальній нарузі*.

Якщо один з факторів, наприклад, час, буде умовно прийнятий однаковим, по температурі, відповідній цьому часу, може бути співставлена нагрівостійкість різних матеріалів. Як правило, за такий час приймається *20000 год* і температуру, яка відповідає цьому часу, визначають екстраполяцією.

Знайдена таким чином температура близька до температури, *максимально допустимої* для використання матеріалів в електричних машинах і апаратах, які працюють *тривалий час* (ряд років) у звичайних умовах.

Цей принцип покладений в основу методики визначення температури нагрівостійкості емальпроводів (умовний час екстраполяції – 20000 год.), рекомендованої стандартом Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК 216-1, 2, 3, 4) та рядом національних стандартів зарубіжних країн (DIN 46453 ч.2 (Німеччина), JIS C3003 p22 (Японія)).

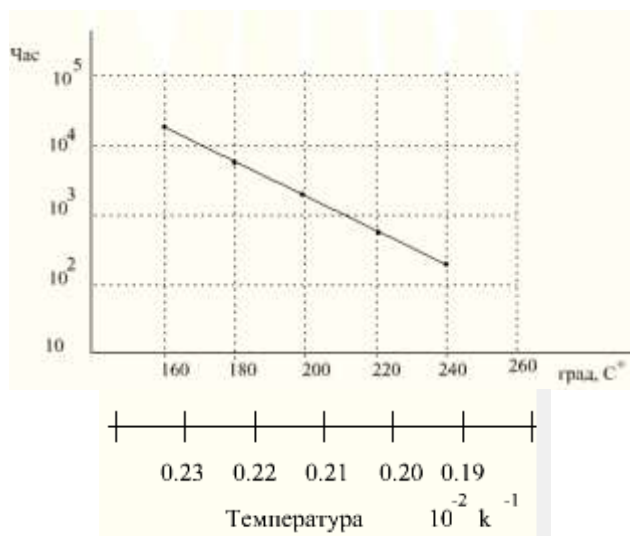


Рисунок 4.1 – Графік нагрівостійкості поліефірімідної ізоляції емальпроводів (випробувальна напруга  $U_{\text{випр}} = (500 \dots 1100) \text{ В}$  в залежності від товщини ізоляції)

Для конструкційних електроізоляційних матеріалів прийнято за умовний час екстраполяції – 5000 год.

## Методика прискорених випробувань для оцінки нагрівостійкості

### Призначення

Метод оцінки *нагрівостійкості* призначений для визначення зміни властивостей матеріалів в процесі тривалої дії температури протягом всього строку служби електрообладнання.

Випробування на нагрівостійкість дозволяє встановити незворотні зміни основних властивостей електроізоляційних матеріалів в залежності від *температури* та *тривалості* теплового старіння.

Рекомендована *методика оцінки нагрівостійкості* містить:

- вибір методу та зразків для випробування;
- вибір кінцевих точок;
- проведення старіння груп зразків, щонайменше, при трьох підвищених температурах або неперервно, або періодично циклами з охолодженням до кімнатної температури в період між циклами;
- випробування зразків дією електричного поля, механічних або інших навантажень з метою встановлення рівня тих чи інших властивостей;
- графічне зображення результатів випробування у вигляді залежності тривалості до виходу зразків з ладу від температури;
- визначення діапазону нагрівостійкості або температурного індексу.

### Вибір методу випробувань та зразків

Метод випробування повинен забезпечувати визначення рівня тієї властивості зразка, яка має суттєве значення в умовах експлуатації виробу.

Тип досліджуваних зразків повинен відображати особливості умов застосування матеріалів в реальних виробках. Найчастіше для цього використовуються зразки, які застосовують при стандартних випробуваннях.

Умови випробувань, наскільки це можливо, повинні імітувати роботу матеріалу в реальних умовах. При цьому, контрольована властивість співставляється з вимогами до цієї властивості в умовах експлуатації.

*Метод* випробувань та *кінцева точка* вибираються такими, щоб визначати процес руйнування електроізоляційного матеріалу з врахуванням реальних умов.

#### Вибір кінцевих точок

*Кінцева точка* характеризує таку сутність руйнування матеріалу, при якій його здатність витримувати навантаження в реальних умовах експлуатації систем ізоляції стає неможливою. При цьому, ступінь руйнування, яка визначається *кінцевою точкою*, узгоджується з допустимим в умовах експлуатації рівнем контрольованої характеристики.

Існують два однаково прийнятні способи визначення *кінцевої точки*:

а) відсоткове підвищення або пониження параметру, що заміряється, по відношенню до вихідного рівня. За вихідне значення параметру приймається (якщо інше не обумовлене) середнє арифметичне результатів випробувань не менше 10 зразків, підданих термообробці найменшою температурою старіння протягом 48 год.;

б) фіксоване значення параметру. Ця величина вибирається, керуючись вимогами умов експлуатації.

#### Вибір кількості та підготовка дослідних зразків

Точність результатів випробувань у значній мірі залежить від кількості досліджуваних зразків, які піддаються старінню при температурі. Щоб добитися необхідної точності при значному розкиді результатів випробувань, необхідно збільшувати кількість досліджуваних зразків при кожній температурі. Оптимальна кількість зразків встановлюється в процесі накопичення досвіду випробування.

#### Вибір випробувальних температур та тривалості старіння

Мінімальна температура випробування на старіння вибирається за умови забезпечення середнього заміряного строку служби не менше 5000 год. для конструкційного матеріалу й не менше 20000 год. для ізоляції емальованих обмотувальних проводів.

Температура, при якій строк служби складає менше 100 годин, є надто високою. *Випробувальні температури*, переважно, вибираються з ряду через 20 °С. Екстраполяція в бік низьких температур для визначення *діапазону нагрівостійкості* або *температурного індексу* не повинна перевищувати 25 °С. При цьому, найвища температура не повинна перевищувати точку плавлення або розм'якшення матеріалу.

Перевірка рівнів контрольованих показників електроізоляційних матеріалів проводиться при кімнатній температурі з руйнуванням або без руйнування зразка. Температури, пов'язані з переміщенням зразків у термостат, вийманням з нього, зумовлюють термомеханічні напруги в зразках. В цьому випадку кількість випробувальних циклів може справити суттєвий вплив на результати випробувань.

#### Циклічне старіння.

Тривалість старіння при кожній випробуваній температурі вибирається таким чином, щоб зразки піддавались тепловій дії протягом не менше, ніж *десяти циклів* старіння. В цьому випадку, досліджуванні зразки піддаються майже рівній кількості теплових та випробувальних дій при кожній температурі старіння.

Температури старіння, яким віддаються переваги, та відповідні їм тривалості теплових циклів, наведені в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Рекомендовані температури та тривалості циклів теплового старіння

|             | Інтервал температур, який відповідає строку служби <b>20000 годин</b> |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Тривалість циклу, діб |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|
|             | 100                                                                   | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 |                       |
|             | -                                                                     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |                       |
|             | 109                                                                   | 119 | 129 | 139 | 149 | 159 | 169 | 179 | 189 | 199 | 209 | 219 | 229 | 239 |                       |
| Температура | 170                                                                   | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 | <b>1</b>              |
|             | 160                                                                   | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | <b>2</b>              |
|             | 150                                                                   | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | <b>4</b>              |
|             | 140                                                                   | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | <b>7</b>              |
|             | 130                                                                   | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | <b>14</b>             |
|             | 120                                                                   | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | <b>28</b>             |
|             | 110                                                                   | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | <b>49</b>             |

#### Неперервне старіння.

При неперервному старінні випробувальні температури також знаходять у відповідному стовпці табл. 4.1. При цьому, з термошафи виймають тільки ті зразки, які піддаються випробуванням на даній стадії теплового старіння, і охолоджують до температури випробування. Таким чином, в процесі старіння зразки не піддаються побічним діям та температурам.

При випробуванні невідомого матеріалу в термошафу завантажують тільки половину підготовлених зразків, а проводять випробування в розрахунок другого, третього та наступних періодів старіння.

Після проведення випробувань декількох періодів старіння в термошафу завантажують залишок зразків для визначення додаткових точок на кривій старіння. Такою процедурою вдається уникнути помилок у виборі тривалості першого періоду старіння та скоротити кількість досліджуваних зразків.

#### Вимоги до приладів теплового старіння (термошафи)

В процесі старіння в термошафі необхідно забезпечити середню

температуру зразків з похибкою не більше  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  при температурі нижчій або рівній  $180^{\circ}\text{C}$  та  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  – при температурі вищій  $180^{\circ}\text{C}$ . Незалежно від числа зразків максимальні коливання температури протягом всього часу старіння не повинні перевищувати  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  від середнього значення.

Слід відзначити, що температура зразка – це температура в термошафі на рівні зразка, заміряна у безпосередній близькості від нього в режимі теплової рівноваги.

Щоб звести до мінімуму вплив нерівномірності температури в термошафі в залежності від місця розташування зразків, їх слід періодично міняти місцем. Корисно також фіксувати положення випробувального зразка, а їх перестановку здійснювати на початку кожного циклу.

Найбільш доцільно використовувати термошафи з циркулюванням внутрішньої атмосфери.

#### Аналіз результатів випробувань та визначення температурного індексу й діапазону нагрівостійкості

Аналіз результатів випробувань складається з трьох операцій:

- визначення часу досягнення *кінцевої точки* при кожній температурі методом перевірки стійкості до заданого випробувального навантаження (випробувальне значення напруги, розтяг (стиск) зразка до певного значення міцності або деформації, твердість та ін.) або по зміні вибраної властивості в часі;

- побудова графіка нагрівостійкості;

- визначення температурного індексу або діапазону нагрівостійкості.

#### Визначення часу досягнення кінцевої точки при кожній температурі.

При *неруйнівному методі випробувань* час до виходу з ладу даного зразка рівний тривалості старіння до моменту, коли зразок перестав витримувати випробування, за вирахуванням половини тривалості останнього перед руйнуванням періоду старіння.

При визначенні *індексу нагрівостійкості* час до виходу з ладу *групи* зразків при кожній температурі визначається як медіанне значення часу до руйнування окремих зразків. Якщо число зразків у групі рівне  $n$ , час виходу з групи рівний:

- часу до руйнування зразка номер  $(n+1)/2$ , якщо  $n$  – непарне;

- середньому арифметичному значенню часу до руйнування зразків номер  $n/2$  та  $(n+1)/2$ , якщо  $n$  – парне.

Згідно цієї методики старіння припиняється, якщо при даній температурі приблизно половина зразків вийшла з ладу.

При встановленні *діапазону нагрівостійкості* визначають логарифм часу до руйнування зразків і в розрахунках використовують їх середнє арифметичне значення при кожній температурі.

Якщо заміряється в процесі старіння деякий вибраний параметр електроізоляційного матеріалу, то будується графік залежності цього параметру від тривалості старіння згідно цих випробувань наприкінці кожного циклу старіння при вибраних температурах (рис. 4.2).

На цьому графіку проводять горизонтальну пряму лінію, яка відображає допустиму границю контрольованого параметру. Ця границя може виражатися у частці від вихідної величини або бути певною фіксованою величиною *критерію кінцевої точки*.

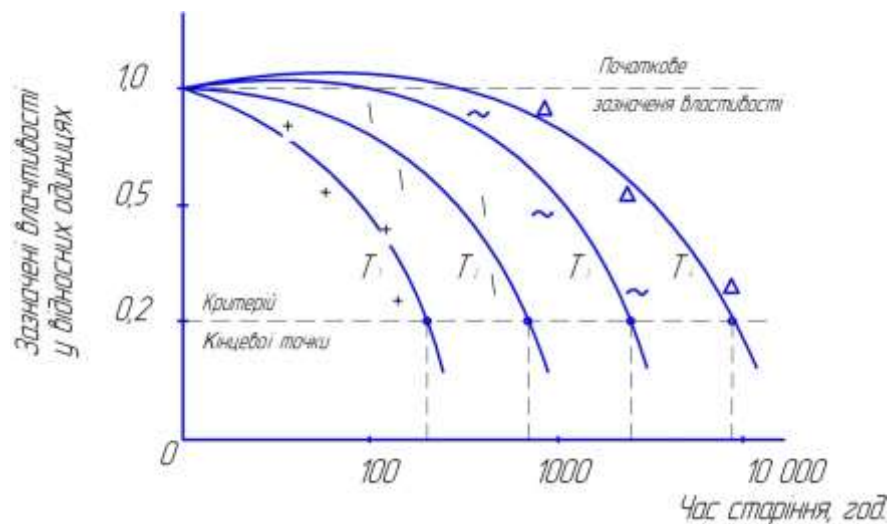


Рисунок 4.2 – Примірні графіки зміни показника електроізоляційного матеріалу при старінні дією (3+1) температур

Випробування проводять при визначеній температурі, причому  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ . Точка перетину кривої зміни деякої властивості з прямою лінією, яка відповідає *критерію кінцевої точки*, визначає час до руйнування при кожній температурі старіння.

При визначенні *діапазону нагрівостійкості* слід оцінити розкид строків служби окремих зразків при кожній випробувальній температурі, щоб обчислити границі інтервалу температур, які визначають діапазони нагрівостійкості.

#### Побудова графіка нагрівостійкості.

Згідно даних випробувань будують графік залежності логарифму часу досягнення кінцевої точки (*вісь ординат*) від величини, зворотної до абсолютної температури (*вісь абсцис*). Зазвичай, залежність будують графічно (див. аналогічний графік на рис. 4.1).

Однак, в деяких випадках відхилення отриманих експериментальних точок від прямої лінії не завжди дозволяє здійснити екстраполяцію продовження графіка в бік збільшення строку служби до рівня 20000 год. (5000 год.)

Тому, у всіх сумнівних випадках графік нагрівостійкості слід будувати за допомогою *методу найменших квадратів* (відповідна методика подана у Комплексній розрахунковій роботі для даної дисципліни).

#### Визначення температурного індексу.

*Температурний індекс* – це число, яке відповідає температурі в градусах шкали Цельсія, взяте з графіка нагрівостійкості, при якій строк служби електроізоляційного матеріалу рівний 5000 год. чи 20000 год.

Пряму лінію на графіку нагрівостійкості екстраполують до строку

служби, згідно якого визначається температурний індекс, – 5000 год. чи 20000 год. Точка їх перетину, спроектована на вісь абсцис, визначає температуру, прийняту за температурний індекс даного матеріалу.

#### Визначення діапазону нагрівостійкості.

Для визначення діапазону нагрівостійкості необхідно знати границю довірчого інтервалу температур, які його визначають.

Залежність тривалості старіння від температури розраховують методом лінійного регресивного аналізу. Для цього обчислюють границі довірчого інтервалу значень логарифму часу старіння при кожній температурі та границі довірчого інтервалу температури регресій. Далі, границі довірчого інтервалу викреслюють в системі координат: величини оберненої абсолютної температури (вісь абсцис), тривалість старіння в логарифмічному масштабі (вісь ординат) (рис. 4.3).

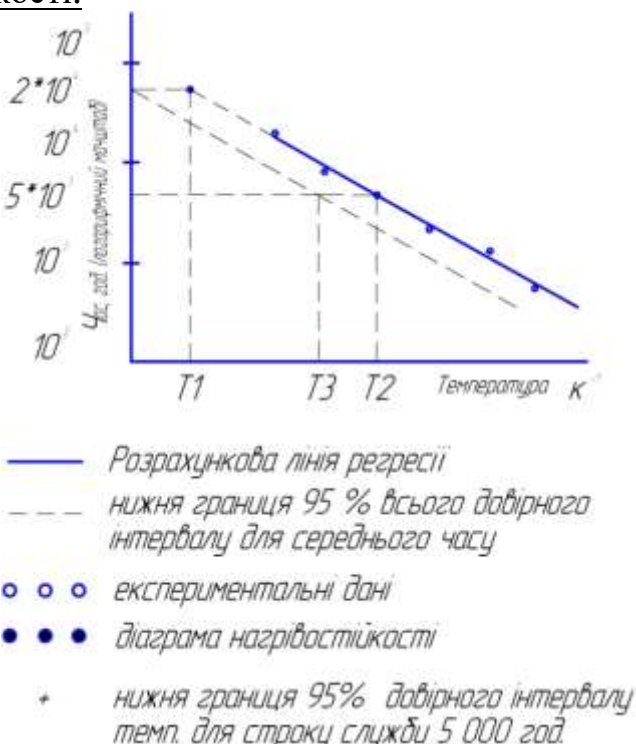


Рисунок 4.3 – Графік нагрівостійкості.  
Діаграма нагрівостійкості (T1 – (T3)T2

При визначенні діапазону нагрівостійкості необхідно перевірити статистичну однорідність результатів за допомогою коефіцієнта варіації ( $K_B$ ), який розраховують для часу 5000 год., на лінійній ділянці лінії регресії згідно такого виразу:

$$K_B = \frac{S_y}{\lg 5000} = \frac{S_y}{3,7} \leq 0,015,$$

де  $S_y^2$  – дисперсія логарифму часу, яка відповідає на лінії регресії температурі зі строком служби 5000 год.

#### **Метод прискореного визначення класу нагрівостійкості ізоляції емальпроводу у відповідності з ГОСТ 10519-76**

##### Зразки для випробування

Зразок для випробувань (див. рис. 3.4) представляє собою два симетрично скручених відрізки проводу (т. зв. «скрутка»). Довжина скрученого проводу – 125 мм. Питомий натяг (на кожен відрізок) при виготовленні зразків –  $(9,8 \pm 0,98)$  Н/мм<sup>2</sup> або  $(1,0 \pm 0,1)$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Число закручувань проводу ( $n$ ) розраховують залежно від діаметра проводу за такою формулою (округлюють до найближчого цілого числа):

$$n = \frac{7,4}{d},$$

де  $d$  – діаметр проводу в ізоляції, мм.

Петлю на протилежному кінці скрученого зразка відрізають, як показано на рис. 4.4. На кінці скручених проводів для фіксації скручувань надягають дистанційну прокладку з матеріалу відповідної нагрівостійкості, наприклад, склотекстоліту товщиною 0,5 мм.

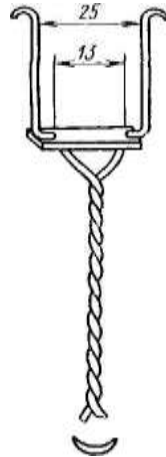


Рисунок 4.4 – Зразок емальпроводу для випробувань електричної міцності лакового шару ізоляції

Для порівняння результатів випробувань або визначення класу нагрівостійкості при періодичних випробуваннях згідно рекомендацій стандартів використовують провід діаметром 1,00 мм.

Формування зразків проводять у шаблоні, приклад якого наведено на рис. 4.5.

Якщо метою випробувань є підбір просочувальних компаундів для даного типу емальованого проводу, то сформовані «скрутки» у вертикальному положенні занурюють у відповідний компаунд. Рекомендовано застосовувати двократне просочування з часом витримки по 15 хв при кожному просочуванні. При кожному наступному просоченні зразки перевертають на 180°.

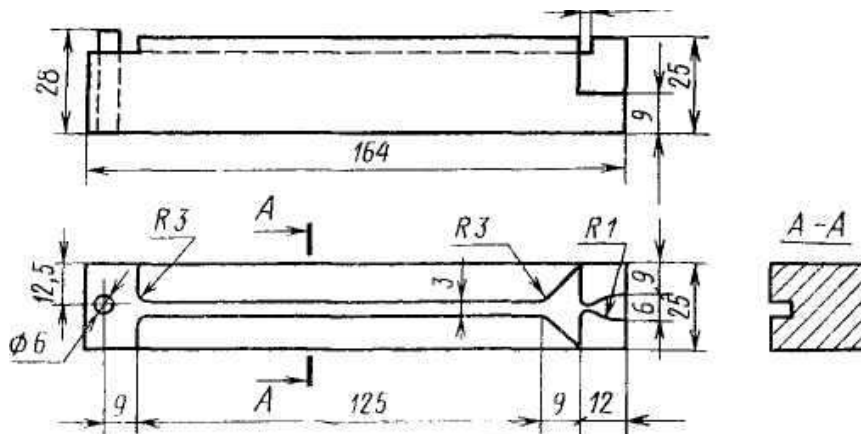


Рисунок 4.5 – Шаблон для формування скручуванням зразків з емальпроводу

Перед сушінням після вилучення проводу з компаунду з вихідних кінців

проводу компаунд повинен бути ретельно видалений. Режим сушіння зразків після просочення вибирають у відповідності зі стандартом або технічними умовами на даний провід. Після кожного просочення «скрутки» сушать у вертикальному положенні і при кожній сушці перевертають на  $180^\circ$  (як і при просоченні).

Не просочені, а також просочені «скрутки» перед початком теплового старіння повинні бути перевірені *випробувальною напругою* при плавному підйомі напруги протягом 1 ... 2 с. Величина напруги повинна дорівнювати номінально допустимій напрузі відповідно до стандарту або технічних умов на дані проводи (див. табл. 4.2).

Якщо при цьому більше 5% зразків не витримують випробування напругою, слід встановити можливість подальших випробувань зразків відповідної партії проводу.

При кожній температурі має бути випробувано не менше 50 зразків.

Таблиця 4.2 – Випробувальна напруга в залежності від діаметральної товщини ізоляції

| Діаметральна товщина ізоляції, мм | Випробувальна напруга при частоті 50 Гц (дійсне значення), В |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0,023 ... 0,024                   | 500                                                          |
| 0,025 ... 0,034                   | 550                                                          |
| 0,035 ... 0,044                   | 600                                                          |
| 0,045 ... 0,054                   | 650                                                          |
| 0,055 ... 0,064                   | 700                                                          |
| 0,065 ... 0,074                   | 750                                                          |
| 0,075 ... 0,084                   | 800                                                          |
| 0,085 ... 0,094                   | 900                                                          |
| 0,095 ... 0,104                   | 1000                                                         |
| 0,105 ... 0,114                   | 1050                                                         |
| 0,115 ... 0,125                   | 1100                                                         |

Примітка. Діаметральна товщина ізоляції – різниця між діаметрами ізольованого та оголеного проводів (фактичні діаметри проводів даної партії).

#### Вимоги до випробувальної апаратури та проведення випробувань

Потужність джерела високої напруги повинна бути такою, щоб при струмі 5 мА падіння напруги не перевищувало 10%. У коло високої напруги може бути введене реле максимального струму, яке спрацьовує при струмі 5 мА.

З метою виключення можливості механічних пошкоджень випробуваних зразків рекомендовано випробування підвищеною напругою виконувати з використанням графітових затискачів, підключення – із застосуванням електrolітів (рис. 4.6).

Основним випробувальним впливом на зразки є циклічне теплове старіння з подальшим випробуванням напругою в кінці кожного циклу.

Випробувальні температури, тривалість їх впливу у кожному циклі, а

також кількість випробувальних температур вибираються відповідно до нормативної документації.

Теплове старіння зразків проводять у термостаті. Підвішені у вертикальному положенні зразки поміщають у попередньо розігрітий до необхідної температури термостат і забирають із нього після закінчення циклу старіння без попереднього охолодження термостату.

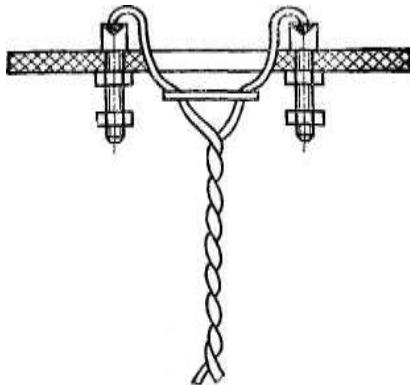


Рисунок 4.6 – Схема під'єднання зразків до графітових затискачів (електролітів)

Після теплового старіння до кожного зразка, охолодженого до температури  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , прикладають на 1 ... 2 с відразу повну величину випробувальної напруги у відповідності з табл. 4.2.

При проведенні порівняльних випробувань з метою їх прискорення допускається прикладання випробувальної напруги не більшої, ніж у два рази за напругу, зазначену в таблиці. Результати випробувань, отримані при такій напрузі, використовуються для порівняння нагрівостійкості різних проводів, але не використовуються для визначення класу нагрівостійкості.

### **Підготовка до лабораторної роботи**

При підготовці до лабораторної роботи виконати наступне:

1. Отримати комплект технічної документації на прилади та обладнання, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та обладнання в цілому.

3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи":

- подати основні вимоги нормативної документації щодо випробовуваних зразків досліджуваного емальпроводу, методики проведення замірів та випробувань, вимоги до класу точності приладів та устаткування;

- подати розшифровку всіх надписів та позначок на приладах, обладнанні та пристосуваннях;

- обмірковувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

- обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

- скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;

- побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;
- проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

### **Завдання до виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з електричною схемою установки та комплексом вимірювального обладнання, розміщенням елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на робочому місці з визначення електричних, механічних чи теплових показників ізоляції емальпроводу. Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.
2. Ознайомитися з стандартними методиками визначення класу нагрівостійкості емальпроводів.
3. Вивчити стандартні процедури оцінки класів та діапазонів нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів.
4. Навчитись виготовляти зразки з емальпроводів для випробування їх ізоляції дією тепла та підвищеної напруги.
5. Навчитись проводити систематизацію отриманих результатів випробувань та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик.
6. Оволодіти практичними навичками роботи на обладнанні з випробувань ізоляції емальованих проводів.
7. Навчитись проводити класифікацію ізоляції емальпроводів на відповідність вимогам стандартів.
8. Дослідити залежність величини випробувальної напруги від тривалості витримки при заданій температурі. Отримані результати замірів занести в таблицю.
9. Привести всі засоби управління установкою чи вимірювального комплексу у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення лабораторної роботи.

### **Звіт**

При підготовці звіту до лабораторної роботи виконати наступне:

1. Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.
2. Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.
3. Побудувати графічні залежності для визначення класу нагрівостійкості досліджуваного емальпроводу згідно дослідних та розрахункових значень.
4. Визначити середні арифметичні значення випробувальних напруг для кожного досліджуваного. Отримані результати занести в таблицю.
5. Визначити середню квадратичну похибку замірів  $\sigma$  та величину довірчого інтервалу замірів  $\beta$  для кожного досліджуваного проміжку.
6. Проаналізувати залежності величин випробувальної напруги від тривалості витримки при заданій температурі та визначити коефіцієнт регресії серії проведених випробувань. Порівняти дослідні та розрахункові дані.
7. Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

### Запитання для самоперевірки

1. У чому полягають особливості визначення класу нагрівостійкості ізоляції емальпроводів?
2. В чому зміст понять: клас нагрівостійкості, температуростійкість?
3. В чому полягає фізичний зміст рівняння лінії регресії при визначенні класу нагрівостійкості емальпроводів?
4. Дайте визначення класу нагрівостійкості емальпроводу і приведіть основні величини, що його характеризують.
5. Приведіть відмінності понять: клас нагрівостійкості та температурний індекс.
6. Перерахуйте механізми, що забезпечують високу нагрівостійкість ізоляції емальпроводів.
7. Чому існує відмінність між класом нагрівостійкості та температуростійкістю ізоляції емальпроводів?
8. Сформулюйте визначення критерію кінцевої точки.
9. Чому існує залежність між напругою пробою ізоляції емальпроводів та температурою її теплового старіння?
10. Як впливають отримані результати з визначення напруг пробою ізоляції емальпроводів та температурою її теплового старіння на коефіцієнт регресії?
11. Чим пояснюється відмінність між класом нагрівостійкості та температурним індексом ізоляції емальпроводів.
12. Поясніть принцип дії дослідної установки та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### «Дослідження теплового режиму ізоляційної конструкції електродвигуна типу АОЛ–012–2 в залежності від знакозмінного навантаження на вісь ротора»

#### Мета роботи:

- ознайомитись з стандартними методиками визначення температури різних частин і типів асинхронних електродвигунів (АЕД);
- ознайомитись з особливостями заміру температури обвитки АЕД:
  - методом термометра;
  - методом термопари;
  - методом опору;
  - методом амперметр–вольтметра;
- навчитись використовувати різні схемні рішення для заміру температури обвиток АЕД;
- навчитись проводити співставлення отриманих результатів температур з класом нагрівостійкості ізоляції й показниками старіння полімерних матеріалів як елементів ізоляційних конструкцій обвиток АЕД;
- навчитись проводити випробування обвиток АЕД дією тепла з використанням ефекту зміни навантаження на вісь ротора;
- оволодіти практичними навичками роботи на обладнанні з теплових випробувань конструкційних матеріалів обвиток АЕД;
- навчитись проводити систематизацію результатів випробувань конструкційних матеріалів та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик;
- виробити навички проведення випробувань на комплексі обладнання згідно даної тематики.

#### Стислі теоретичні відомості

Температуру обвиток визначають при випробуваннях двигуна на нагрівання. Випробування на нагрівання виконують для визначення абсолютної температури або перевищення температури обмотки чи частини електродвигуна відносно температури охолоджуючого середовища при номінальному навантаженні.

Електроізоляційні матеріали, які застосовуються у конструкціях електричних машин, старіють і поступово втрачають електричну та механічну міцність. Швидкість цього старіння в основному залежить від температури при якій ізоляція працює.

Численними дослідженнями встановлено, що довговічність (термін служби) ізоляції скорочується у двічі, якщо температура, при якій вона працює, на 6-8 °С перевищує граничну для даного класу стійкості до нагрівання.

В табл. 5.1 вказані класи стійкості до нагрівання електроізоляційних матеріалів і характерні для них граничні температури.

Випробування на нагрівання може виконуватися при безпосередньому навантаженні або непрямим методом (нагрівання від основних втрат). Випробування проводять до встановленої температури при незмінному навантаженні. В якості встановленої приймають таку, яка протягом 1 год. змінюється не більше ніж на 1 °С. В якості навантаження при випробуваннях на нагрівання застосовують різні пристрої. Найпростішими з них є різноманітні гальма (колодкові, стрічкові та ін.), а також навантаження, які забезпечуються генератором, що працює на реостат.

Таблиця 5.1 – Граничні температури нагрівання ізоляції

| Клас стійкості до нагрівання | Y  | A   | E   | B   | F   | H   | C    |
|------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Гранична температура °С      | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

При випробуваннях на нагрівання визначають не тільки абсолютну температуру, але й перевищення температури обмоток над температурою охолоджуючого середовища.

Допустимі значення цього параметру вказані в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі перевищення температури частин двигуна

| Частини двигуна                                                                                | Гранично допустимі перевищення температури, °С, для ізоляційних матеріалів класів стійкості до нагрівання                                                |                 |                 |                 |                  | Метод вимірювання температури                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                                                                | A                                                                                                                                                        | E               | B               | F               | H                |                                                               |
| Обмотки змінного струму двигунів потужністю 5000 кВт і вище або з довжиною осердя 1 м і більше | 60                                                                                                                                                       | 70              | 80              | 100             | 125              | Опору або температурних індикаторів, які вкладені в пази      |
| Те ж, але потужністю до 5000 кВт або з довжиною осердя менше 1 м                               | 50 <sup>1</sup>                                                                                                                                          | 65 <sup>1</sup> | 70 <sup>2</sup> | 85 <sup>2</sup> | 105 <sup>3</sup> | Термометра або опору. Дані вказані для методу термометра      |
| Стрижневі обмотки роторів асинхронних двигунів                                                 | 65                                                                                                                                                       | 80              | 90              | 110             | 135              | Термометра або опору                                          |
| Контактні кільця                                                                               | 60                                                                                                                                                       | 70              | 80              | 90              | 110              | Термометра або температурних індикаторів, які вкладені в пази |
| Осердя та інші сталі частини, що дотикаються до обмоток                                        | 60                                                                                                                                                       | 75              | 80              | 110             | 125              | Термометра                                                    |
| Теж, але без дотику з обмотками                                                                | Перевищення температури цих частин не повинне бути більшим за значення, які створювали б небезпеку пошкодження ізоляційних або інших суміжних матеріалів |                 |                 |                 |                  |                                                               |

Примітки. 1. При вимірюванні методом опору допустима температура збільшується на 10°С.

2. Те ж на 15°С.

3. Те ж на 20°С.

Як видно з табл. 5.2, для визначення температури передбачені різні методи, застосування яких залежить від конкретних умов і частин машин, в яких необхідно проводити вимірювання.

### **Метод термометра**

При застосуванні цього методу визначається температура поверхні в точці прикладання (поверхня корпусу, підшипників, лобових частин обмотки), температура охолоджуючого середовища та повітря, що поступає в двигун і виходить з нього. Застосовують ртутні та спиртові термометри. Поблизу потужних змінних полів слід застосовувати тільки спиртові термометри, оскільки в ртуті виникають вихрові струми, які спотворюють результати вимірювань.

Для кращої передачі теплоти від вузла до термометра його резервуар обгортають фольгою, а потім притискають до нагрітої частини двигуна. Для теплоізоляції термометра поверх фольги накладають шар вати або повсті, але так щоб останній не потрапив у простір між термометром і нагрітою частиною двигуна. При вимірюванні температури охолоджуючого середовища термометр слід розташовувати в металевій склянці, яка заповнена олією. Це дозволить захистити термометр від променистого тепла, яке випускається зовнішніми тепловими джерелами, дослідною машиною, а також випадковими потоками повітря.

При вимірюванні температури зовнішнього охолоджуючого середовища декілька термометрів розташовують в різних точках навколо дослідної машини, і на відстані 1..2 м від неї. В якості температури охолоджуючого середовища приймають середнє арифметичне значення показів цих термометрів.

### **Метод термопар**

Даний метод дуже часто застосовується для вимірювання температури, в основному, в машинах змінного струму. Термопари закладають в пази між шарами обмоток і на дно паза, а також в інші важкодоступні місця. Термопару утворюють два ізольованих один від одного провідники з різних матеріалів. Матеріали вибирають залежно від значень температури, що вимірюється.

Для вимірювання температур в електричних машинах зазвичай застосовують мідно-константанові термопари, які складаються з мідної та константанової дротин діаметром близько 0,5 мм. Одна пара кінців термопари спаяна між собою. Місця спаїв розташовують в контрольних точках, де вимірюється температура («гарячий спай»), а іншу пару кінців під'єднують або безпосередньо до затискачів чутливого мілівольтметра з великим внутрішнім опором, або до перехідної збірки затискачів, від якої відходять мідні провідники до вимірювального приладу. В тому місці, де не нагрітий кінець константанового провідника з'єднується з мідним провідником (на клемі вимірювального приладу або на передній клемі), утворюється так званий «холодний» спай термопар. На поверхні контакту двох металів (константану та міді) виникає ЕРС, що пропорційна температурі в місці контакту, причому на

константані утворюється «мінус»(-), а на міді «плюс» (+). ЕРС виникає як на «гарячому» так і на «холодному» спаї термопар. Проте, оскільки температури спаїв різні, то і значення ЕРС будуть відрізнятися. Враховуючи те, що вони спрямовані зустрічно, мілівольтметр завжди буде вимірювати різницю ЕРС «гарячого» та «холодного» спаїв, яка відповідає різниці температур.

Дослідами встановлено, що ЕРС мідно-константанової термопар складає 0,0416 мВ на 1 °С різниці температур «гарячого» та «холодного» спаїв. Враховуючи цей факт, можна проградувати шкалу мілівольтметра в градусах Цельсія. Оскільки термопара фіксує тільки різницю температур, то для визначення абсолютної температури «гарячого» спаю слід до показів термопар додати температуру «холодного» спаю, виміряну термометром.

### Метод опору

Метод ґрунтується на відомій властивості металів змінювати свій опір залежно від температури.

Для визначення перевищення температури виконують вимірювання опору обмотки (за допомогою омметра) в холодному та нагрітому станах і визначають перевищення температури за формулами:

для міді:

$$\Delta T = \frac{R_{\text{гар}} - R_{\text{хол}}}{R_{\text{хол}}} \cdot (235 + T_{\text{хол}}) + (T_{\text{хол}} - T_0), \quad (5.1)$$

для алюмінію:

$$\Delta T = \frac{R_{\text{гар}} - R_{\text{хол}}}{R_{\text{хол}}} \cdot (245 + T_{\text{хол}}) + (T_{\text{хол}} - T_0), \quad (5.2)$$

де  $\Delta T$  – перевищення температури обмотки, °С;

$R_{\text{хол}}$  – опір обмотки в холодному стані, Ом;

$R_{\text{гар}}$  – опір обмотки в гарячому стані, Ом;

$T_{\text{хол}}$  – температура обмотки в холодному стані, °С;

$T_0$  – температура охолоджуючого середовища, °С.

Слід враховувати, що від моменту вимкнення до початку вимірювань проходить деякий час, протягом якого обмотка встигає охолонути. Тому для вірного визначення температури обмоток у момент вимкнення, тобто в робочому стані двигуна, діють таким чином: після вимкнення машини по можливості через рівні проміжки часу (за секундоміром) виконують декілька вимірювань. Цей проміжок не повинен перевищувати часу від моменту вимкнення до першого вимірювання. Потім виконують екстраполяцію вимірювань, будуючи графік  $R = f(t)$ .

### Метод амперметра-вольтметра

За показами вольтметра та амперметра визначають опір. Перше вимірювання опору обмотки проводять не пізніше ніж через 1 хв після моменту

вимкнення для машин потужністю до 10 кВт, через 1,5 хв – для машин потужністю 10..100 кВт і через 2 хв – для машин потужністю 100 кВт.

Якщо перше вимірювання опору виконане не більше ніж через 15..20 сек після моменту вимкнення, то в якості дійсного опору приймають найбільше з перших трьох вимірювань. Якщо перше вимірювання виконане пізніше ніж через 20 сек. після вимкнення машини, то вносять поправку на охолодження. Для цього виконують 6...8 вимірювань опору і будують графік зміни опору при охолодженні  $R = f(t)$ . (рис. 5.1).

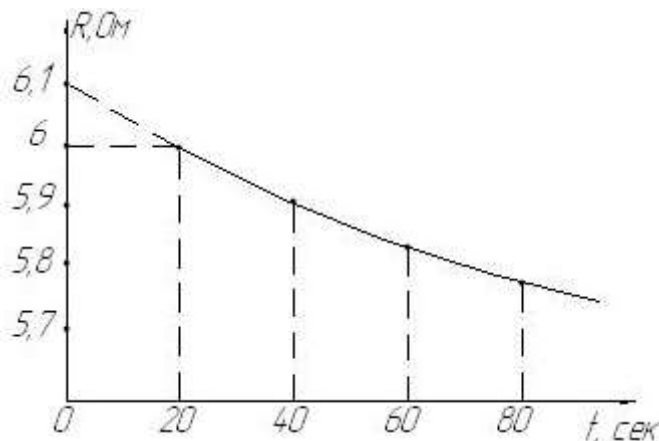


Рисунок 5.1 – Графік зміни опору обмоток при охолодженні

По осі ординат відкладають відповідні виміряні опори, а по осі абсцис – час (точно в масштабі), який пройшов від моменту вимкнення електродвигуна до першого вимірювання і проміжки між вимірюваннями (сек.). В результаті цього отримують криву, що зображена на графіку суцільною лінією. Після цього продовжують криву вліво, зберігаючи характер її зміни, до перетину з віссю ординат (зображена пунктирною лінією). Відрізок на осі ординат від початку координат до перетину з пунктирною лінією достатньо точно визначить шуканий опір обмотки двигуна в гарячому стані.

### Вимірювання опору обвиток

Основна номенклатура двигунів, які встановлюються на промислових підприємствах, включає в себе ізоляційні матеріали класів А і Б. Наприклад, якщо для пазової ізоляції застосовується матеріал на основі слюди класу В, а для обмотки провід ПБД з бавовняною ізоляцією класу А, то двигун за рівнем стійкості до нагрівання відноситься до класу А. Якщо температура охолоджуючого середовища нижча 40 °С (норми для якої подані в табл. 5.2), то для всіх класів ізоляції допустимі перевищення температури можуть бути збільшені на стільки градусів, на скільки температура охолоджуючого середовища нижча 40 °С, але не більше ніж 10 °С.

Якщо температура охолоджуючого середовища 40..45 °С, то гранично допустимі перевищення температури, вказані в таблиці 5.2, знижуються для всіх класів ізоляційних матеріалів на 5 °С, а при температурах охолоджуючого середовища 45..50 °С – на 10 °С. В якості температури охолоджуючого середовища приймають температуру довкілля.

Для закритих машин на напругу не більше 1500 В гранично допустимі перевищення температури обмоток статорів електродвигунів потужністю менше 5000 кВт або з довжиною осердя менше 1 м, а також стрижневих обмоток роторів при вимірюванні температур методом опору можна підвищувати на 5 °С.

При вимірюванні температури обмоток за способом визначення їх опору отримується середня температура обмоток. Насправді при роботі двигуна окремі зони обмоток, як правило мають різну температуру. Тому максимальна температура обмоток, яка визначає довговічність ізоляції, завжди дещо перевищує середнє значення.

При визначенні температур обмоток методом опору для електродвигунів з фазним ротором побудова екстраполяційних кривих проводиться двічі: один раз для обмотки статора, другий раз для обмотки ротора. Для цього двигун, після побудови кривої охолодження обмотки статора, повторно запускають з таким же навантаженням до встановлення попереднього значення температури і вимикають.

Ввімкнення двигуна на вимірювальну схему слід проводити тільки після повної зупинки ротора, в протилежному випадку вимірювальні прилади можуть бути пошкоджені індукційними струмами.

Для отримання вірного результату вимірювань необхідно користуватися одними й тими ж приладами, як при вимірюванні обмотки в холодному стані (перед пуском двигуна), так і в нагрітому стані обмотки (після зупинки двигуна).

Вимірювання опорів багатofазних обмоток при наявності виводів початків і кінців фаз слід виконувати пофазно. Якщо фази обмотки статора з'єднані в зірку і не мають виводу нульової точки, а також якщо фази обмотки з'єднані в трикутник, то вимірювання проводять за схемами, які подані на рис. 5.2 і 5.3.



Рисунок 5.2 – Схема для вимірювання опору обмотки при з'єднанні фаз в зірку

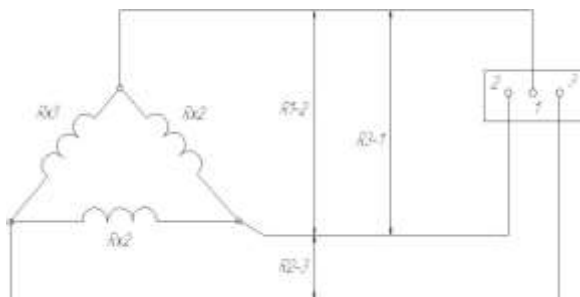


Рисунок 5.3 – Схема для вимірювання опору обмоток при з'єднанні фаз в трикутник

Використовуючи ці схеми, проводять три вимірювання між кожною парою вивідних кінців ( $R_{1-2}, R_{2-3}, R_{3-1}$ ). Якщо ці опори рівні, то опори кожної фази ( $R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}$ ) становлять:

при з'єднанні в зірку (рис. 5.2):

$$R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = 0,5 \cdot R_{1-2} = 0,5 \cdot R_{2-3} = 0,5 \cdot R_{3-1}; \quad (5.3)$$

при з'єднанні в трикутник (рис. 5.3)

$$R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = 1,5 \cdot R_{1-2} = 1,5 \cdot R_{2-3} = 1,5 \cdot R_{3-1} \quad (5.4)$$

Якщо виміряні опори на виводах відрізняються між собою, то опір кожної фази складатиме:

при з'єднанні в зірку

$$\begin{aligned} R_{x1} &= 0,5 \cdot (R_{1-2} + R_{3-1} - R_{2-3}), \\ R_{x2} &= 0,5 \cdot (R_{1-2} + R_{2-3} - R_{3-1}), \\ R_{x3} &= 0,5 \cdot (R_{3-1} + R_{2-3} - R_{1-2}), \end{aligned} \quad (5.5)$$

при з'єднанні в трикутник

$$\begin{aligned} R_{x1} &= \frac{2 \cdot R_{2-3} \cdot R_{3-1}}{R_{2-3} + R_{3-1} - R_{1-2}} - 0,5 \cdot (R_{2-3} + R_{3-1} - R_{1-2}), \\ R_{x2} &= \frac{2 \cdot R_{3-1} \cdot R_{1-2}}{R_{3-1} + R_{1-2} - R_{2-3}} - 0,5 \cdot (R_{3-1} + R_{1-2} - R_{2-3}), \\ R_{x3} &= \frac{2 \cdot R_{1-2} \cdot R_{2-3}}{R_{1-2} + R_{2-3} - R_{3-1}} - 0,5 \cdot (R_{1-2} + R_{2-3} - R_{3-1}), \end{aligned} \quad (5.6)$$

Якщо обмотки статора мають відкрите з'єднання, тобто виведені всі початки та кінці, то вимірювання потрібно проводити для кожної фази окремо. Можна також з'єднати фазні обмотки послідовно і визначити їх сумарний омичний опір  $R_{x\Sigma}$ . При застосуванні методу вольтметра-амперметра це значно спростить дослідну схему. Якщо припустити, що опори обмоток кожної фази не відрізняються, то:

$$R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = \frac{R_{x\Sigma}}{3}. \quad (5.7)$$

### Порядок виконання роботи

Перед проведенням дослідів і виконанням розрахунків потрібно детально ознайомитися з теоретичними відомостями, методичними вказівками до виконання роботи, безпечними умовами її проведення. Вимірювання здійснюються методом амперметра-вольтметра.

Послідовність виконання роботи подана нижче.

1. Ознайомитися з характеристиками дослідного двигуна та подати його технічні параметри в табличній формі за зразком табл. 5.3.

2. Підготувати асинхронний двигун, вимірювальні прилади, автоматичні

вимикачі, з'єднувальні провідники, інструменти.

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики дослідного двигуна

| Тип | $P_{ном}, кВт$ | $n_{ном}, об/хв$ | $I_{ном}, А$ | $\eta_{ном}, \%$ | $\cos\varphi_{ном}$ |
|-----|----------------|------------------|--------------|------------------|---------------------|
|     |                |                  |              |                  |                     |

3. Виміряти температуру навколишнього середовища  $T_0$  та електродвигуна в холодному стані  $T_{хол}$  за допомогою спиртового термометра (керуючись рекомендаціями, які подані в стислих теоретичних відомостях).

4. Скласти дослідну схему відповідно до рис. 4, впевнившись, що ручка ЛАТРа TV виведена до упору (напруга на вході випрямляча VD рівна нулю).

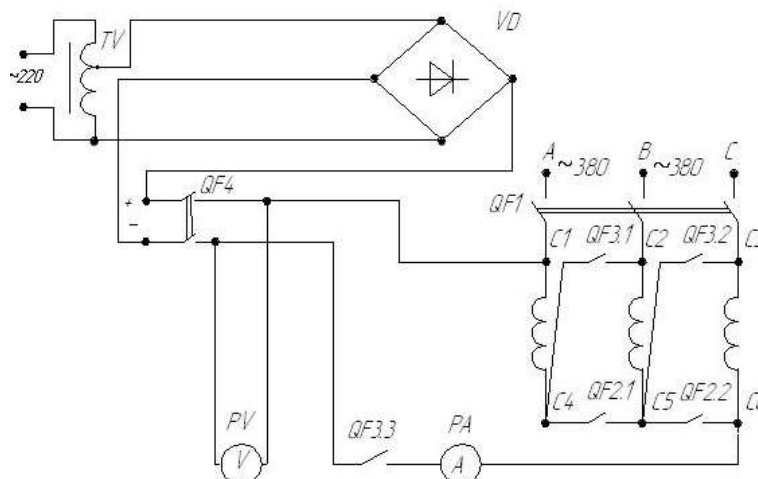


Рисунок 5.4 – Дослідна схема

5. З'єднати обмотки статора електродвигуна послідовно, шляхом ввімкнення автоматичного вимикача QF3. **Автоматичні вимикачі QF1 та QF2 повинні бути розімкненими!**

6. Увімкнути автоматичний вимикач QF4 і за допомогою ручки ЛАТРа TV встановити на вольтметрі PV напругу, при якій покази амперметра PA не будуть перевищувати 20 % номінального струму двигуна. Записати покази вольтметра  $U_{хол}$  та амперметра  $I_{хол}$ .

7. Визначити сумарний омичний опір обмоток електродвигуна та опір кожної фази в холодному стані за формулами:

$$R_{хол\Sigma} = \frac{U_{хол}}{I_{хол}}; R_{хол.ф} = \frac{R_{хол\Sigma}}{3}. \quad (5.8)$$

8. **Відключити автоматичні вимикачі QF3 та QF4!** З'єднати обмотки статора електродвигуна в зірку шляхом ввімкнення автоматичного вимикача QF2.

9. Здійснити запуск електродвигуна, ввімкнувши QF1. Навантажений двигун повинен деякий час працювати для того, щоб температура обмоток підвищилась.

10. Підготуватись до вимірювань. **Швидко вимкнути QF1 та QF2.** Натомість увімкнути QF3 та QF4. Перше вимірювання струму та напруги

провести не пізніше 20 с від моменту вимкнення електродвигуна. Виконати 6..8 вимірювань через рівні проміжки часу (за основу слід взяти час, що минув від моменту вимкнення електродвигуна до першого вимірювання).

11. Для кожного вимірювання визначити сумарний опір обмоток електродвигуна та опір кожної фази в гарячому стані:

$$R_{\text{гар.}\phi} = \frac{R_{\text{гар}\Sigma}}{3}; R_{\text{гар}\Sigma} = \frac{U_{\text{гар}}}{I_{\text{гар}}}. \quad (5.9)$$

Результати вимірювань та розрахунків подати в табличній формі за зразком табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати вимірювань і розрахунків

| № вимірювання | $U_{\text{гар}}, B$ | $I_{\text{гар}}, A$ | $R_{\text{гар}\Sigma}, Ом$ | $R_{\text{гар.}\phi}, Ом$ |
|---------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|
|               |                     |                     |                            |                           |

12. Використовуючи дані табл. 5.4, побудувати залежність  $R_{\text{гар.}\phi} = f(t)$ . Провести екстраполяцію графіка (зберігаючи його характер, продовжити до перетину з віссю ординат). Визначити опір обмоток в момент вимкнення двигуна з мережі (при  $t=0$ )  $R_{\text{гар.}\phi}^0$ .

13. Визначити перевищення температури обмоток над температурою довкілля:

$$\Delta T = \frac{R_{\text{гар.}\phi}^0 - R_{\text{хол.}\phi}}{R_{\text{хол.}\phi}} \cdot (235 + T_{\text{хол}}) + (T_{\text{хол}} - T_0). \quad (5.10)$$

14. Визначити абсолютну температуру обмоток за формулою:

$$T_{\text{абс}} = \Delta T + T_0 \quad (5.11)$$

15. Використовуючи інформацію, яка подана в табл. 5.2, зробити відповідні висновки про тепловий режим при роботі двигуна та його вплив на стан ізоляції машини.

**Увага! Подавати напругу в схему й проводити вимірювання дозволяється лише після перевірки викладачем правильності з'єднань.**

### Зміст звіту

Звіт повинен містити теоретичні відомості у короткому викладенні про зміст випробувань електричних машин на нагрівання, методи вимірювання температури обмоток електродвигунів змінного струму.

Окремим пунктом подається послідовність виконання роботи, результати вимірювань та розрахунків. Обов'язковим є детальне відображення всіх розрахунків, що виконувались на основі дослідних даних.

При оформленні звіту можна дотримуватися такої послідовності подання матеріалів лабораторного заняття:

- мета роботи;
- характеристика методів вимірювання температури обмоток електричних машин змінного струму;
- технічні параметри дослідного двигуна;
- дослідна схема;
- результати вимірювань і розрахунків;
- висновки.

При викладенні теоретичного матеріалу в звіті доцільно подавати пояснювальні рисунки.

### Контрольні запитання

1. Вкажіть мету випробувань обмоток електродвигунів на нагрівання.
2. Що таке стійкість до нагрівання? Які класи ізоляції з стійкістю до нагрівання найчастіше застосовуються для виконання обмоток електродвигунів?
3. Як зміниться термін служби ізоляції, якщо її робоча температура постійно перевищуватиме гранично допустиму для даного класу на  $8^{\circ}\text{C}$ ?
4. Чи змінюються гранично допустимі перевищення температури для класів ізоляції, якщо температура охолоджуючого середовища становить  $50^{\circ}\text{C}$ ?
5. В чому суть методу термометра?
6. Поясніть суть методу термопар.
7. В чому суть методу опору?
8. Які методи визначення температури обмоток рекомендовані для електричних машин змінного струму потужністю до 5000 кВт?
9. Яким чином проводиться вимірювання температури охолоджуючого середовища?
10. Яким значенням обмежується струм, що пропускається обмотками двигуна при випробуванні на нагрівання?
11. З якою метою при визначенні температури обмоток електродвигуна будується графік залежності  $R_{\text{зар.ф}} = f(t)$ , і проводиться його екстраполяція?
12. Яким чином проводять вимірювання опору обмоток, коли вони з'єднані в зірку без виведеної нейтральної точки або в трикутник?
13. Запишіть формули для визначення опору обмоток кожної фази статора двигуна, які з'єднані в зірку без виведеної нейтральної точки, за умови, що результати вимірювань для кожної пари виводів машини відрізняються між собою.
14. Запишіть формули для визначення опору обмоток кожної фази статора двигуна, які з'єднані в трикутник, за умови, що результати вимірювань для кожної пари виводів машини відрізняються між собою.
15. Чому проводити вимірювання в дослідній схемі допускається лише після повної зупинки ротора електродвигуна?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### «Дослідження зміни фізико–механічних властивостей гумових сумішей при довготривалій дії підвищених температур»

#### Мета роботи:

- дослідити і оцінити зміну фізико–механічних показників гумових сумішей марок ИРП-1346У та ИРП-1265У в процесі теплового старіння;
- навчитись проводити заміри твердості за допомогою твердоміра типу 2033 ТИР;
- навчитись визначати на зразках вулканізованих гумових сумішей механічні показники за допомогою розривної машини типу РМУ–005;
- освоїти методику оцінювання класу нагрівостійкості зразків гумових сумішей на основі отриманих експериментальних механічних показників.

#### Стислі теоретичні відомості

##### Нагрівостійкість. Загальні положення

Надійність електричних пристроїв визначається здатністю електроізоляційного матеріалу без пошкодження та істотної зміни практично властивостей витримувати дію робочих температур протягом терміну експлуатації ізоляції. Ця здатність називається нагрівостійкістю матеріалу до тривалої дії температур.

Критерієм роботоздатності електроізоляційного матеріалу можуть бути різноманітні фізико-механічні та теплоізоляційні показники, рівень яких є достатній для отримання виробу у робочому стані. Вибір показників залежить від конкретних умов роботи матеріалу. Так, у багатьох випадках нагрівостійкість оцінюють температурою та часом, при яких матеріал зберігає до 50% вихідної механічної міцності та відносного видовження, певну еластичність (плівок та лакових покриттів), пробивну напругу до встановленого значення (при випробуванні проводу та ін. електроізоляційних матеріалів).

Теплова стійкість полімерних матеріалів при тривалій експлуатації (до дії граничних робочих температур) визначається їх складом та хімічною будовою макромолекул, стійкістю проти деструктурної дії теплової енергії та кисню повітря. Так як первинний акт термічного або термоокислювального розкладу полімеру – це розрив зв'язків, їх міцність, яка оцінюється енергією зв'язку, найбільш суттєво впливає на стійкість полімерних молекул до деструктуючих дій. Міцність макромолекул визначається міцністю найбільш слабких ланок, тому не всі зв'язки рвуться одночасно.

Опір ланок розриву залежить від взаємного впливу атомів та груп, від екрануючої дії атомів, розміщених поблизу менше міцних зв'язків. Ланцюгова реакція розкладу полімерів, яка йде слідом після розриву ланки (ініціювання), відбувається з швидкістю, залежною від хімічної будови макромолекул, каталітичного або інгібітуючого впливу продуктів розкладу.

Так, наслідком полярності С- $F$ - зв'язку між ланками політетрафторетилену є сильне міжмолекулярне тяжіння, яке у поєднанні з малим радіусом фтору забезпечує щільну упаковку ланок та захист менш міцних С - С – зв'язків. Будь-яке порушення

однорідності та щільності оболонки навколо вуглецю викликає розрихлення структури макромолекули, збільшує пошкоджуваність вуглецевих зв'язків і, як наслідок, знижує нагрівостійкість фтормістких полімерів.

Іншим класом полімерів з високою нагрівостійкістю є циклоланкові полімери (поліетилентерефталат, полікарбонат, поліаміди та ін.), ланки молекул яких побудовані в основному з ароматичних кілець та гетероциклів. Особливість їх молекул полягає в тому, що кожний атом вуглецю зв'язаний електронами ( $\pi$ -електрони), які утворюють стійку замкнену систему у вигляді єдиної кільцевої хмарини. Крім того, умовою ароматичності є також спареність всіх  $\pi$  - електронів. Якщо число  $\pi$ -електронів непарне, два електрони не притягуються, а відштовхуються (через подібність спінів), і система стає нестійкою.

Ланцюгова реакція термічного або термоокислювального розкладу полімерів супроводжується деструкцією ланок, утворенням розгалужених просторових структур, виділенням летких міжмолекулярних сполук.

Кінцевий результат зміна властивостей електроізоляційних матеріалів може бути досягнутий в результаті тривалого повільного старіння при низьких температурах, або під дією більш високих температур, але за менший час. Тому, з метою знаходження якнайбільш повної характеристики стійкості електроізоляційного матеріалу до теплового старіння, визначають зміну властивостей при різних термінах витримки та температурах. Згідно отриманих даних будують криву залежності максимально допустимої температури (при якій матеріал зберігає умовно встановлені властивості) від тривалості теплової дії.

На рис. 6.1 подана крива старіння у повітряному середовищі поліефірної ізоляції емальпроводів (W165), для яких за критерій роботоздатності прийнятий збереження напруги пробною ізоляції при випробуванні зразків на рівні  $U_{пр} = (500 \div 1100)B$  в залежності від товщини ізоляції.

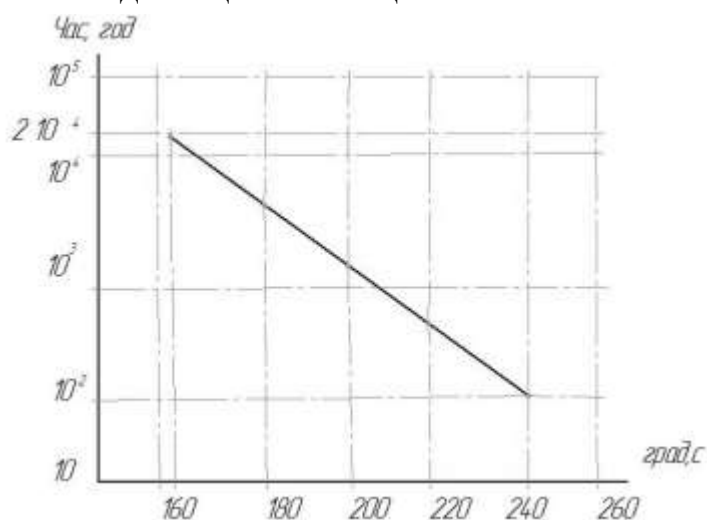


Рисунок 6.1 – Крива старіння ізоляції емаль проводу з температурним індексом 165

Якщо один з факторів, наприклад, час, буде умовно прийнятний однаковим, по температурі, відповідній цьому часу, може бути співставленим нагрівостійкість різних матеріалів. Як правило, за такий час приймається 20000 год. і температуру, яка відповідає цьому часу, визначають екстраполяцією.

Знайдена таким чином температура близька до температури, максимально допустимої для використання матеріалів в електричних машинах (апаратах, які працюють тривалий час (ряд років) у звичайних умовах.

Цей принцип покладено в основу методики визначення нагрівостійкості емальпроводів, рекомендованої стандартом Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК 216 - 1,2,3,4) та рядом національних стандартів зарубіжних країн (DIN 464532.2 (Німеччина), JIS с 3003 р.22 (Японія).

### **3.2 Методика прискорених випробувань для оцінки нагрівостійкості**

#### **Призначення**

Методи оцінки нагрівостійкості призначені для визначення зміни властивостей матеріалів в процесі тривалої дії підвищеної температури протягом всього строку служби електрообладнання.

Випробування на нагрівостійкість дозволяє встановити незворотні зміни основних властивостей електроізоляційних матеріалів в залежності від температури та часу теплового старіння.

Рекомендована методика оцінки нагрівостійкості містить:

- вибір методу та зразків для випробування;
- вибір кінцевих точок;

проведення старіння груп зразків, щонайменше, при трьох підвищених температурах, або неперервно, або періодично – циклами, з охолодженням зразків до кімнатної температури в періодах між циклами;

- випробування зразків дією електричного поля, механічних або інших навантажень з метою встановлень рівня тих чи інших властивостей;
- графічне зображення результатів випробувань у вигляді залежності часу до виходу зразків з ладу від температури;
- визначення діапазону нагрівостійкості або температурного індексу.

#### **Вибір методу випробувань та зразків**

Метод випробування повинен забезпечувати визначення рівня тієї властивості, яка має суттєві значення в умовах експлуатації виробу.

Тип досліджуваних зразків повинні відображати специфіку умов застосування матеріалів в реальних виробках. Найчастіше для цього використовують зразки, які застосовують при стандартних випробуваннях.

Умова випробувань, наскільки це можливо, повинні імітувати роботу матеріалу в реальних умовах. При цьому, контрольована властивість співставляється з вимогами до цієї властивості в умовах експлуатації.

Метод випробувань та кінцева точка вибираються такими щоб виявити процес руйнування електроізоляційного матеріалу з врахуванням реальних умов.

#### **Вибір кінцевих точок**

Кінцева точка характеризується такою ступінь руйнування матеріалу, при якій його здатність витримувати навантаження в реальних умовах експлуатації систем ізоляції стає неможливою. При цьому ступінь руйнування яка визначається кінцевою точкою, узгоджується з допустимим в умовах

експлуатації рівнем контрольованої характеристики.

Існують два однаково прийняті способи визначення кінцевої точки:

а) відсоткове підвищення або пониження параметру, що замірюється, по відношенню до вихідного рівня. За вихідне значення параметру приймається (якщо інше не обумовлене) середнє арифметичне результатів випробувань температурою не менше 10 зразків, підданих термообробці найменшою температурою протягом 48 год.

б) фіксоване значення параметру. Ця величина вибирається, керуючись вимогами умов експлуатації.

#### Вибір кількості та підготовка досліджуваних зразків

Точність результатів випробувань у значній мірі залежить від кількості досліджуваних зразків, які піддаються старінню при кожній температурі. Щоб добитися необхідної точності при значному розгляді результатів випробувань, необхідно збільшувати кількість досліджуваних зразків при кожній температурі. Оптимальна кількість зразків встановлюється в процесі досвіду випробувань.

#### Вибір випробувальних температур та тривалості старіння

Мінімальна температура випробування на старіння матеріалу вибирається з умови забезпечення середнього заміряного строку служби не менше 50000 год. Температура, при якій строк служби складає менше 100 год. є надто високою. Випробувальні температури, переважно, вибираються з ряду через 20°C. Екстраполяція для визначення діапазону нагрівостійкості або температурного індексу не повинно перевищувати 25 °C.

При цьому найвища температура не повинна перевищувати точку плавлення або розм'якшення матеріалу.

Перевірка рівнів контрольованих показників електроізоляційних матеріалів проводиться при кімнатній температурі з руйнуванням або без руйнування зразка. Термоудари, пов'язані з переміщенням зразків у термостат та вийманням з нього, зумовлюють термохімічні напруги в зразках. В цьому випадку кількість випробувальних циклів може справити суттєвий вплив на результати випробувань.

#### Циклічне старіння

Тривалість старіння при кожній температурі вибирається таким чином, щоб зразок піддавався тепловій дії протягом не менш, ніж десяти циклів старіння. В цьому випадку досліджувані зразки піддаються майже рівній кількості теплових та випробувальних дій при кожній температурі старіння.

Температури старіння, яким надаються переваги та відносні їм тривалості теплових циклів наведені в табл. 6.1.

#### Неперервне старіння

При неперервному старінні випробувальні температури також знаходять у відповідному стовбці табл. 6.1. При цьому з термошафи виймають тільки ті зразки, які піддаються випробуванням на даній стадії теплового старіння і охолоджують до температури випробування. Таким чином, в процесі старіння

зразки не піддаються побічним діям та термоударам.

При випробуванні невідомого матеріалу в термошафу завантажують тільки половину підготовлених зразків, а проводять випробування з розрахунку другого, третього та наступних періодів старіння.

Після проведення випробувань декількох періодів старіння, в термошафу завантажують залишок зразків для визначення додаткових точок на кривій старіння. Такою процедурою вдається уникнути помилок у виборі тривалості першого періоду старіння та скоротити кількість досліджуваних зразків.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані температури та тривалості циклів теплового старіння

| Інтервал температур, який відповідає терміну служби 20000 год. |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Тривалість циклу, діб |
|----------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
|                                                                | 100-109 | 110-119 | 120-129 | 130-139 | 140-149 | 150-159 | 160-169 | 170-179 | 180-189 | 190-199 | 200-209 | 210-219 | 220-229 | 230-239 |                       |
| Температура старіння                                           | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 250     | 260     | 270     | 280     | 290     | 300     | 1                     |
|                                                                | 160     | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 250     | 260     | 270     | 280     | 290     | 2                     |
|                                                                | 150     | 160     | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 250     | 260     | 270     | 280     | 4                     |
|                                                                | 140     | 150     | 160     | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 250     | 260     | 270     | 7                     |
|                                                                | 130     | 140     | 150     | 160     | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 250     | 260     | 14                    |
|                                                                | 120     | 130     | 140     | 150     | 160     | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 250     | 28                    |
|                                                                | 110     | 120     | 130     | 140     | 150     | 160     | 170     | 180     | 190     | 200     | 210     | 220     | 230     | 240     | 49                    |
|                                                                | A       |         | E       | B       |         | F       |         |         | H       |         |         |         | C       |         | Клас нагрівостійкості |

#### Вимоги до приладів теплового старіння (термошафа)

В процесі старіння в термошафі необхідно забезпечити середню температуру зразків з похибкою не більше  $\pm 2$  °C при температурі нижчій або рівній 180 °C та  $\pm 3$  °C – при температурі вищій 180 °C. Незалежно від числа зразків максимальні коливання температури протягом всього часу старіння не повинні перевищувати  $\pm 5$  °C від середнього значення.

Слід відзначити, що температура зразка – це температура в термошафі як рівні зразка, заміряна у безпосередній близькості від нього в режимі теплової рівноваги.

Щоб звести до мінімуму вплив нерівномірності температури в термошафі в залежності від місця розташування зразка, їх слід періодично міняти. Корисно також фіксувати положення кожного випробовуваного зразка, а їх перестановку здійснювати на початку кожного циклу.

#### Аналіз результатів випробувань та визначення температурного індекса і діапазону нагрівостійкості

Аналіз результатів випробувань складається з трьох операцій:

- визначення часу досягнення кінцевої точки при кожній температурі методом перевірки стійкості до заданого випробувального навантаження (випробувальне значення міцності або деформації) або по зміні вибраної властивості в часі;

- побудова графіка нагрівостійкості;

- визначення температурного індексу або діапазону нагрівостійкості.

### Визначення часу досягнення кінцевої точки при кожній температурі

При неруйнівному методі випробувань час до виходу з ладу даного зразка рівний тривалості старіння до моменту, коли зразок перестав витримувати випробування, за вирахуванням половини тривалості останнього перед руйнуванням періоду старіння. При визначенні індексу нагрівостійкості час до виходу з ладу групи зразків при кожній температурі визначається як медіанне значення часу до руйнування окремих зразків. Якщо число зразків у групі дорівнює  $n$ , час виходу з ладу групи дорівнює:

- часу до руйнування зразка номер  $(n+1)/2$ , якщо  $n$  – непарне;
- середньому арифметичному значенню часу до руйнування зразків номер  $n/2$  та  $(n+1)/2$ , якщо  $n$  – парне.

Згідно цієї методики старіння припиняється, якщо при даній температурі приблизно половина зразків вийшли з ладу.

При встановленому діапазоні нагрівостійкості визначають логарифми часу до руйнування зразка і в розрахунках використовують їх середнє арифметичне значення при кожній температурі.

Якщо заміряється в процесі старіння даний вибраний параметр електроізоляційного матеріалу, підлягає побудові графік залежності цього параметру від часу теплового старіння згідно даних випробувань наприкінці кожного циклу(рис. 6.2).

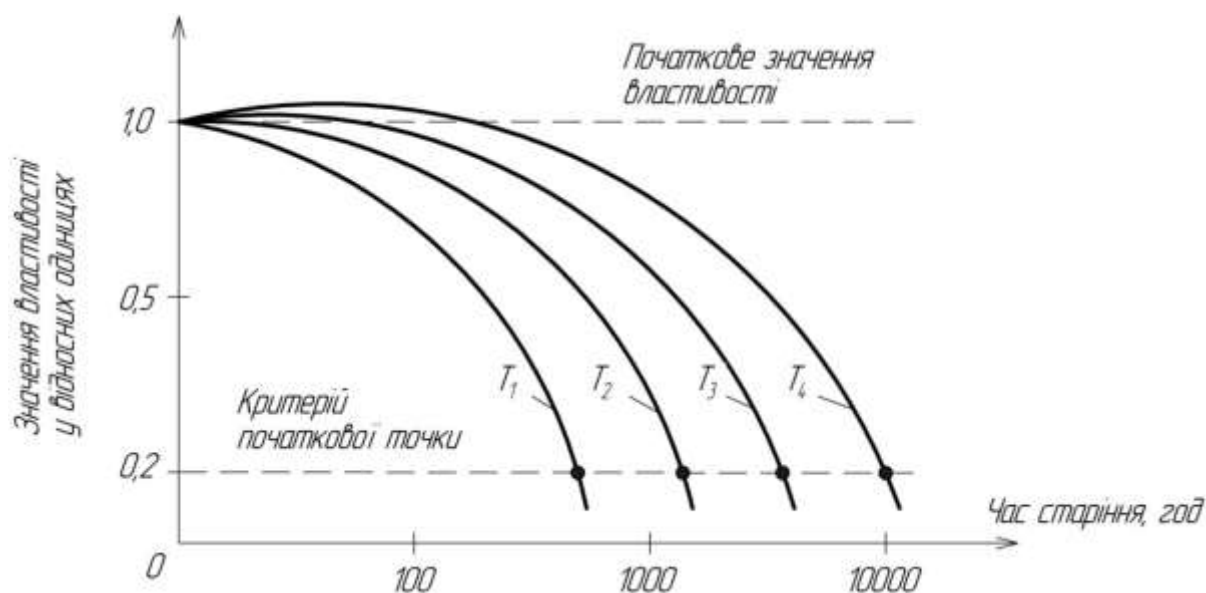


Рисунок 6.2 – Графік зміни параметру матеріалу для визначення «початкової точки»

На цьому графіку проводять горизонтальну пряму, яка відображає границю допустимої зміни контрольованого параметру, яка може виражатися у частці від вихідної величини або певною фіксованою величиною.

При визначеній температурі ( $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ). Зміна температурного індексу точка перетину кривої зміни деякої властивості(параметру) з прямою лінією, яка відповідає критерію кінцевої точки, визначає час до руйнування при кожній температурі старіння.

При визначенні діапазону нагрівостійкості слід оцінити розкид строків служби окремих зразків при кожній випробувальній температурі, щоб обчислити границі повільного старіння, по температурі якого визначають діапазон нагрівостійкості.

#### Побудова графіка нагрівостійкості

Згідно даних випробувань будують графік залежності логарифму часу досягнення кінцевої точки (вісь ординат) від величини зворотної до абсолютної температури (вісь абсцис).

Зазвичай цю залежність будують графічно. Однак, відхилення експериментальних точок від прямої лінії не завжди дозволяє здійснити екстраполяцію – продовження графіка в бік збільшення строку служби до рівня 20000 годин.

Тому, у всіх сумнівних випадках графік нагрівостійкості слід будувати за допомогою методу найменших квадратів.

#### Визначення температурного індексу

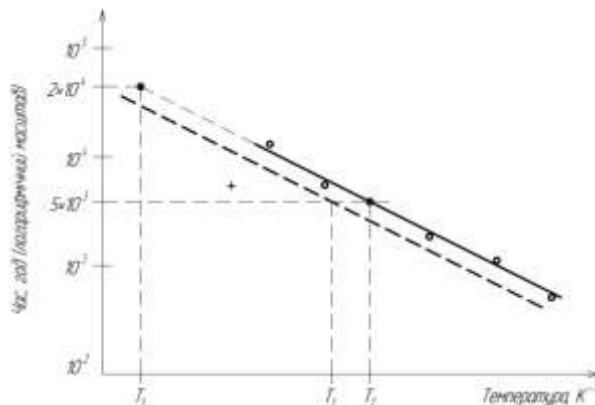
Температурний індекс – це число, яке відповідає температурі в градусах Цельсія, взятій з графіка нагрівостійкості, при якій строк служби електроізоляційного матеріалу рівний 20000 годин.

Пряму лінію на графіку нагрівостійкості екстраполують до строку служби, згідно цього визначається температурний індекс, зазвичай це 20000 годин. Точка їх перетину на вісі абсцис визначає температуру, прийняту за температурний індекс даного матеріалу.

#### Визначення діапазону нагрівостійкості

Для визначення діапазону нагрівостійкості необхідно знати границі довільного інтервалу температур, які його визначають. Графічною побудовою така можливість виключається.

Тому залежність часу старіння від температури розраховують методом лінійного регресивного аналізу. Далі обчислюють границі довільного інтервалу для середнього значення логарифму часу старіння при кожній температурі та визначають границі довіреного інтервалу температури. Лінію регресії та границі довільного інтервалу викреслюють в системі координат: величина, зворотня до абсолютної температури (вісь абсцис), – час старіння в логарифмічному масштабі ( вісь ординат) (рис. 6.3).



— розрахункова лінія регресії; - - - нижня границя 95% - вого довірчого інтервалу для середнього часу; °°° експериментальні дані; •• діапазон нагрівостійкості; + нижня границя 95 %-вого довірчого інтервалу температури для строку служби 5000 год.

Рисунок 6.3 – Графік нагрівостійкості та діапазону нагрівостійкості ( $T_1$ -( $T_3$ ) $T_2$ )

При визначенні діапазону нагрівостійкості необхідно перевірити статистичну однорідність результатів за допомогою коефіцієнта варіації (KB), який розраховують для часу 5000 годин на лінійній ділянці лінії регресії згідно наступного виразу :

$$K_B = \frac{S_y}{lg5000} = \frac{S_y}{3,7} \leq 0,015,$$

де  $S_y^2$  – дисперсія логарифму часу, яка відповідає на лінії регресії температурі зі строком служби 5000 год.

### Методика відбору зразків

1. Зразок для випробування являє собою пластинку або шайбу з паралельними площинами. При вимірюванні відстані між точками вимірів повинно бути не менше 5 мм, а відстань від будь-якої точки вимірювання до краю зразка не менше 13 мм.

2. При випробуванні виробів і зразків з них допускається інша відстань від точки виміру до краю, яка повинна бути встановлена в нормативно-технічній документації на резинові вироби та методи їх випробування.

3. Товщина зразка повинна бути не менша 6 мм.

4. При випробуванні виробів і зразків з них допускається застосовувати зразки, що складаються з декількох шарів однієї і тієї ж резини, але не більше трьох, товщина верхнього шару повинна бути не менше ніж 2 мм; товщину зразка вказують в нормативно-технічній документації на виріб.

5. Поверхня зразка повинна бути гладкою, без впадин, тріщин, бульбашок, пор, царапин, надривів, чужорідних включень та інших дефектів, які видно не озброєним оком.

6. Випробування проводять на одному зразку.

### Прилади та обладнання

1. Прилад для визначення твердості типу 2033 ТИР

Прилад повинен задовільняти наступним вимогам:

- індентор зі загартованої сталі (креслення);
- наявність пружини для прикладення навантаження до індентора;
- наявність шкали одиниць твердості від 0 до 100, при цьому 0 повинен відповідати максимальному проникненню індентора (2,54 мм) (рис. 6.4), а 100 – нульовому проникненню;

- відстань між поділками шкали повинно бути не менше 1 мм, ціна поділки повинна відповідати одній одиниці.

- прилад повинен мати залежність між твердістю по Шору А і

навантаженням у відповідності з табл. 6.2.

- площа поверхні опорної площадки повинна бути не менше 100 мм<sup>2</sup>.
- прилад для випробування повинен забезпечувати попереднє навантаження на індентор 0,55 Н (56 гс) для встановлення його у вихідне положення, що відповідає нульовому положенню шкали;

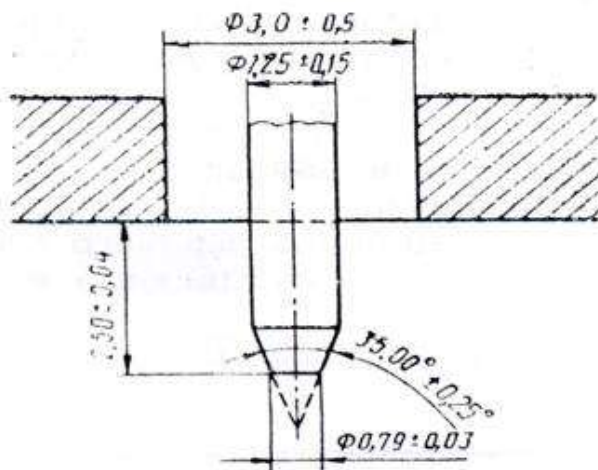


Рисунок 6.4 – Геометричні відстані індентора приладу 2033 ТИР

Таблиця 6.2 – Метрологічна характеристика приладу 2033 ТИР

| Твердість по Шору А | Навантаження, Н (гс)<br>(гран. відхил. $\pm 0,08$ ( $\pm 8$ )) | Твердість по Шору Л | Навантаження, Н (гс)<br>(гран. відхил. $\pm 0,08$ ( $\pm 8$ )) |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------|
| 0                   | 0,55(56,0)                                                     | 60                  | 5,06(515,5)                                                    |
| 10                  | 1,30(132,5)                                                    | 70                  | 5,81(592,0)                                                    |
| 20                  | 2,05(209,0)                                                    | 80                  | 6,56(669,0)                                                    |
| 30                  | 2,80(286,0)                                                    | 90                  | 7,31(745,5)                                                    |
| 40                  | 3,56(362,5)                                                    | 100                 | 8,06(822,0)                                                    |
| 50                  | 4,31(439,0)                                                    |                     |                                                                |

- перевірка показів твердоміра виконується по максимальній твердості при встановленні на скляну чи гладку металеву поверхню;

- при натисканні на головку приладу стрілка повинна стояти навпроти позначки  $100 \pm 1$  на шкалі;

- занурення індентора в гуму має здійснюватись перпендикулярно до зразка.

- повірка приладу проводиться не рідше одного разу на шість місяців по методиці, що вказана в нормативно-технічній документації на прилад. Після ремонту повірку повторюють.

2. Товщиномір типу ТР10–60 з межами вимірів від 0 до 10 мм, ціною поділки 0,01 мм, допустимою похибкою вимірювання  $\pm 0,018$  мм.

3. Секундомір СОПр-36-3–121.

4. Годинник електричний вторинний показовий з похибкою ходу  $\pm 60$  с за 24 год.

5. Термометр скляний з межею вимірювання від мінус 50 до плюс 100 °С,

ціною поділки ГС, допустима похибка вимірювання  $\pm 1$  °С.

Допускається застосовувати інші засоби вимірювання, які забезпечують точність вимірювання у відповідності з вимогами теперішнього стандарту.

### **Підготовка до лабораторної роботи**

При підготовці до лабораторної роботи виконати наступне:

1. Ознайомитись з метою експерименту.
2. Ознайомитись з стислими теоретичними відомостями та методикою прискорених випробувань для оцінки нагрівостійкості.
3. Засвоїти правила користування вимірювальною апаратурою, котра застосовується в роботі.
4. Ознайомитись з приладами.
5. Підготуватись до контрольних питань.
6. Оформити звіт до лабораторної роботи.
7. В заготовці «звіт по лабораторній роботі»:
  - вказати тему, мету роботи;
  - описати стисло короткі теоретичні відомості;
  - описати принцип дії та фізичні закономірності приладів, які використовуються в даній лабораторній роботі;
  - описати принцип заміру фізичних величин;
  - визначити: здатність до вальцювання та шприцювання, режим вулканізації стандартних зразків, зовнішній вигляд вулканізованих стандартних зразків, механічні показники: міцність при розриві, відносне видовження, твердість;
  - Підвести підсумок виконання лабораторної роботи.

### **Проведення дослідження**

1. Перед випробуванням зразки кондиціонують при температурі  $(23 \pm 2)$  °С не менше 1 год., при цьому вони повинні бути захищені від впливу прямого сонячного проміння.

2. Температура випробування повинна бути рівна  $(23 \pm 2)$  °С. Вимірюють товщину зразка, округлюючи результат до цілого числа.

3. Випробовуваний зразок поміщають на гладку горизонтальну поверхню. Твердомір встановлюють на зразок без поштовхів та ударів у перпендикулярному положенні так, щоб опорна поверхня площадки доторкалась зі зразком.

Спосіб встановлення виробів і зразків з них, місце вимірювання твердості та інші необхідні дані повинні бути приведені в нормативно-технічній документації на резинові вироби та методи їх випробування.

Твердомір встановлюють в спеціальному пристосуванні, що дозволяє створювати прижимне зусилля від 10,0 до 12,5 Н, або на нього монтують центроване по осі індентора навантаження масою від 1,00 до 1,25 кг.

Допускається твердомір навантажувати вручну.

4. Відлік значення твердості проводять по шкалі приладу по закінченні

$(3_{-0}^{+1})$  с з моменту приживання приладу до зразка.

5. Для зразків, у яких спостерігається подальше чітке занурення індентора, показник відраховують по закінченню  $(15 \pm 1)$  с, про що говорять в нормативно-технічній документації на резин, резинові вироби та методи їх випробовування.

6. Твердість вимірюють не менше ніж в трьох точках в різних місцях зразка.

### **Опрацювання результатів**

1. За результат випробування приймають середнє арифметичне всіх випробувань, яке округлене до цілого числа.

Допустиме відхилення кожного вимірювання від середнього арифметичного значення не повинно перевищувати  $\pm 3$  одиниці.

2. Неспівставними є результати, отримані при випробуванні:

- зразків, які виготовлені різними способами;
- зразків різної товщини;
- зразків, що складають з різного числа шарів;
- зразків та виробів при підрахунку показників через 3 та 15 с.

2. Результати досліджень оформляють протоколом, у якому вказують:

- позначення резини чи резинового виробу;
- товщину зразка, спосіб виготовлення зразка;
- результати кожного виміру твердості в одиницях Шору А, їх середнє арифметичне значення, дату випробування;
- позначення стандарту.

### **Контрольні питання**

1. Що таке нагрівостійкість?
2. Для чого призначені методи оцінки нагрівостійкості?
3. Назвіть способи визначення кінцевої точки.
4. В чому полягає методика вибору випробувальних температур та тривалості старіння?
5. Як визначають час досягнення кінцевої точки при кожній температурі?
6. Що таке температурний індекс і як його визначають?
7. Методика визначення діапазону нагрівостійкості.
8. Чи можна використати для визначення нагрівостійкості гумових сумішей один з їх механічних показників - твердість?
9. Яка прогнозована залежність твердості гумової суміші від довготривалої дії температури?
10. Опишіть методику визначення твердості гумових сумішей. Дайте одиниці вимірювань.

Кафедра електричної інженерії

Дисципліна:  
Стійкість конструкції ізоляції та  
енергоефективність систем  
електропостачання

ПРОТОКОЛ № ЕК/СКЕСЕ-03-14

Дата \_\_\_\_\_

Гумова суміш ИРП-1346 ТУУ 600 152 135.040-96-проба.

| № з/п | Назва показника                                     | Одиниця виміру         | Вимога ТУУ600 152 135.040-96    | Результат випробувань |
|-------|-----------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1.    | Здатність до вальцювання та шприцювання             | —                      | —                               |                       |
| 2.    | Режим вулканізації стандартних зразків              | —                      | —температура,<br>—витримка, хв. |                       |
| 3.    | Зовнішній вигляд вулканізованих стандартних зразків | —                      | —                               |                       |
| 4.    | Механічні показники:                                |                        |                                 |                       |
| 4.1   | міцність при розриві                                | МПа                    | не менше 15,7                   |                       |
| 4.2   | відносне видовження                                 | %                      | не менше 600                    |                       |
| 4.3   | твердість                                           | од. Шору А<br>од. IRHD | 40-50<br>—                      |                       |

Рекомендація: \_\_\_\_\_

Заключення:

Випробування провели:

Керівник роботи:

О. Вакуленко

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

Кафедра електричної інженерії

Дисципліна:  
Стійкість конструкції ізоляції та  
енергоефективність систем  
електропостачання

ПРОТОКОЛ № ЕК/СКЕСЕ-04-14

Дата \_\_\_\_\_

Гумова суміш ИРП-1265 УТУ 38-103.321-76-проба.

| № з/п | Назва показника                                     | Одиниця виміру         | Вимога ТУ 38-103.321-76                                                                                         | Результат випробувань |
|-------|-----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1.    | Здатність до вальцювання та шприцювання             | —                      | —                                                                                                               |                       |
| 2.    | Режим вулканізації стандартних зразків              | —                      | <u>1-а стадія:</u><br>—температура,<br>—витримка, хв.<br><u>2-а стадія:</u><br>—температура,<br>—витримка, год. |                       |
| 3.    | Зовнішній вигляд вулканізованих стандартних зразків | —                      | —                                                                                                               |                       |
| 4.    | Механічні показники:                                |                        |                                                                                                                 |                       |
| 4.1   | міцність при розриві                                | МПа                    | не менше 2,45                                                                                                   |                       |
| 4.2   | відносне видовження                                 | %                      | не менше 200                                                                                                    |                       |
| 4.3   | твердість                                           | од. Шору А<br>од. IRHD | 35-55<br>—                                                                                                      |                       |

Рекомендація: \_\_\_\_\_

Заключення:

Випробування провели:

Керівник роботи:

О. Вакуленко

## Рекомендована література

1. Безпрозваних Г. В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин : монографія / Г. В. Безпрозваних, О. В. Рогинський. - Харків : Друкарня Мадрид, 2023. 137 с.
2. Фізико-хімія полімерів : підруч. / Л. Д. Масленнікова, Ф. Г. Фабуляк, 3. В. Грушак. - К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. - 312 с.
3. Вакуленко О. Застосування полімерних ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі / О. Вакуленко, П. Теравський, М. Невідомський // Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання : матеріали VI МсНТК (27–28 квітня 2023 р., Тернопіль) : Зб. тез доп. – Тернопіль, 2023. – С. 101–102.
4. Електротехнічні матеріали. Частина 1. Діелектричні матеріали : курс лекцій; навч. посіб. для студентів спеціальності 141 / уклад.: В. М. Кириленко, К. В. Кириленко, В. М. Головка. – К : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.
5. Євтух П. С. Метрологічний аспект при дослідженні електричної міцності емальованого покриття обвиткових проводів / П. С. Євтух, О. О. Вакуленко // Енергетика і автоматика : техн. науки ; ел. наукове видання. – 2013. – №3. – С. 93–102.
6. Малюшевська А. Вивчення деяких закономірностей руйнування полімерних плівкових діелектриків під впливом електричного поля в умовах обмеження часткових розрядів / А. Малюшевська, С. Топоров, О. Дмитрішин // Вісник нац. техн.ун-ту «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. - 2019. - №5. - С. 210–215.
7. Ізоляція електротехнічного обладнання: курс лекцій; навч. посіб. для студ. спец. 141 / уклад.: О. Р. Проценко. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 133 с.

[illegible]