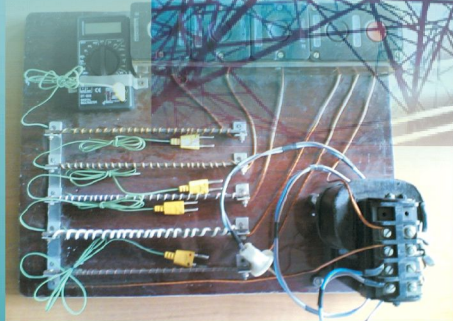
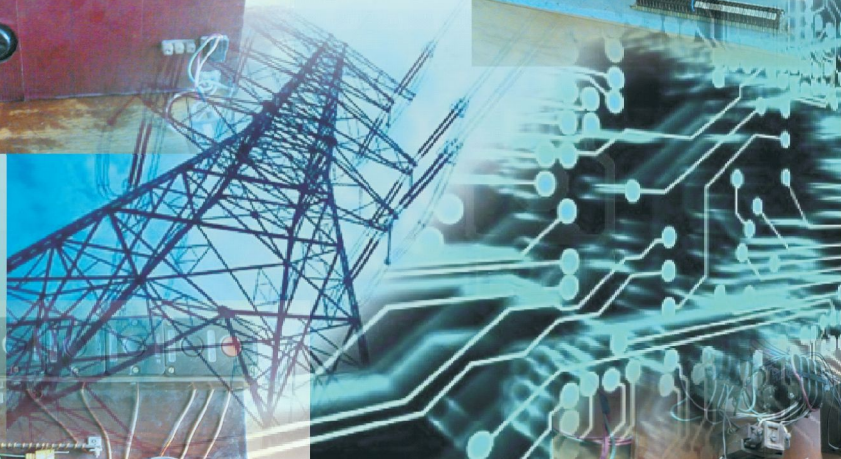


# *Електричні* **Апарати**

*Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни  
для студентів спеціальності  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*



Хмельницький національний університет

# **ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ**

*Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни  
для студентів спеціальності  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

*Затверджено на засіданні  
кафедри машин та апаратів.  
Протокол № 1 від 28.08.2019*

Хмельницький 2019

Електричні апарати : методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 61 с.

Укладачі: Горященко С. Л., канд. техн. наук, доц.;  
Синюк О. М., д-р техн. наук, проф.;  
Онофрійчук В. І., канд. техн. наук, доц.;  
Поліщук О. С., канд. техн. наук, доц.;  
Тимощук О. Г., канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск: Поліщук О. С., канд. техн. наук, доц.

Редактор-коректор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. 25.09.2019. Зам. № 55є/19, електронне видання, 2019.

© ХНУ, 2019

## Вступ

---

Методичні вказівки до лабораторних робіт є частиною практичної підготовки студентів за програмою дисципліни «Електричні апарати». Для їх успішного виконання необхідно ознайомитись з програмою, вивчити теоретичні матеріали, що відносяться до роботи, підготувати звіт з неї і протоколи випробувань. Лабораторні установки є реальним зразками обладнання, яке знаходиться в експлуатації, що сприяє отриманню студентами практичних навичок у контролі і випробуванні пристроїв релейного захисту та автоматики в умовах роботи інженера-електромеханіка чи інженера-електроенергетика.

**Мета:** навчити студентів методам експериментального дослідження характеристик електричних апаратів; ознайомити з методами налаштування систем захисту; вмикання/вимикання електромереж; технічного обслуговування електромеханічних систем, електроустаткування електростанцій, підстанцій та мереж. Це дозволяє проводити випробування перетворювальних агрегатів із системами автоматичного керування та регулювання параметрів, релейного захисту для вирішення задач оптимізації в електроенергетиці, електротехніці, електромеханіці.

Кожна робота розрахована на чотири академічні години. В процесі її виконання студенти мають виконувати вказівки викладача та дотримуватися правил техніки безпеки. Перш ніж приступити до виконання робіт, необхідно пройти спеціальний інструктаж із забезпечення безпеки і протипожежних заходів. При проведенні робіт студенти повинні дотримуватися таких правил:

- уважно проробити завдання на лабораторну роботу, ознайомитись з вимірювальними і випробувальними схемами, з'ясувати послідовність операцій, що проводяться;

- оглянути встановлене на робочому місці обладнання і прилади, пересвідчитися в їх справності. При наявності незнайомих приладів – вивчити їх конструкцію, характеристики і правила користування;

- перед початком складання схем встановити, якими пристроями в схему подається напруга, якої вона величини і якого виду. Пересвідчитися, що вони відключені;

- збирання схем потрібно проводити так, щоб вона вийшла більш наочною, не треба застосовувати надто довгі або дуже короткі провідники (в натяг). Приєднувати під один затискач більше двох провідників не рекомендується. Застосовування провідників без наконечників або з порушеною ізоляцією забороняється;

- при збиранні схем необхідно дотримуватись відповідності технічних характеристик вимірювальної і регулювальної апаратури параметрам пристроїв захисту, що підлягають випробуванням;

– якщо вимірювальні прилади розраховані на декілька меж вимірювання, а апарати допускають ввімкнення на різну напругу, то перед збиранням схеми прилади і апарати потрібно узгоджувати;

– всі прилади повинні бути налаштовані на максимальну межу вимірювання, рухомі частини регулювальних трансформаторів повинні знаходитися в положенні, що забезпечує мінімальну напругу на виході, а реостатів – в положенні, що забезпечує максимальний опір;

– під'єднання вимірювальних і випробувальних схем до напруги можна здійснювати тільки після перевірки правильності складання викладачем. Після під'єднання схеми до напруги необхідно провести частину випробувань без запису показань вимірювальних приладів, і тільки пересвідчившись в правильності роботи схеми, приступити до виконання програми випробувань;

– при виконанні вимірювальних операцій межі вимірювальної апаратури потрібно вибирати таким чином, щоб відлік проводився за показанням у другій половині шкали, однак не можна допускати виходу показника за межі шкали;

– після завершення роботи відключити напругу, пересвідчитися у відповідності отриманих результатів та сповістити про це викладача;

– розбирати схему і переходити до чергового пункту програми роботи, слід тільки з дозволу викладача;

– після завершення роботи необхідно прибрати робоче місце, здати прилади та інструменти, оформити протоколи і звіт з роботи.

Всі роботи мають проводитись відповідно до вимог правил і заходів безпеки в установках напругою до 1000 В. Перед ввімкненням випробувальних схем або самих пристроїв захисту під напругу, необхідно обов'язково попередити оточуючих студентів.

Проводити які-небудь зміни в схемах, що знаходяться під напругою, або торкатися до оголених місць струмоведучих частин пристрою категорично забороняється. До проведення робіт, студенти самостійно знайомляться з теоретичною частиною того розділу дисципліни, з якого проводиться робота, а також підготувати чорновий звіт з програмою випробувань, схемами, таблицями та розрахунками.

Згідно з програмою лабораторної роботи студенти виконують всі необхідні вимірювання і записують покази приладів ручкою в чернетку, яку після перевірки підписує викладач.

Після закінчення роботи бригада впорядковує своє робоче місце.

До наступного заняття студенти повинні підготувати звіт з виконаної роботи. При цьому намалювати графіки, в кінці роботи подати висновки про відповідність експериментальних даних за теоретичними та розрахунковими кривими. Студенти, що не підготувалися до роботи, не допускаються до її виконання.

## *Лабораторна робота 1.* **Визначення динамічної стійкості шин**

---

**Мета:** ознайомлення з методикою виконання розрахунків динамічної стійкості електричних апаратів на прикладі визначення механічних напружень в шинах ізолятора двофазної шинної конструкції.

### **Теоретичні відомості**

**Електродинамічна стійкість апаратів.** Механічна стійкість елементів конструкції електричних апаратів залежить від значення електродинамічного зусилля (ЕДЗ), його напрямку, тривалості впливу і крутості наростання. Дотепер особливості роботи провідників та ізоляційних матеріалів у динамічному режимі вивчені недостатньо. Тому розрахунки стійкості конструкцій ведуться за максимальним значенням ЕДЗ, хоча діє воно короткочасно.

У однофазних установках, розрахунок ЕДЗ ведеться за ударним струмом короткого замикання (КЗ). Якщо КЗ відбулося поблизу генератора, то за розрахункове значення береться амплітуда ударного струму генератора в перехідному режимі.

Для трифазного апарата за розрахунковий струм визначається:

$$i_{y0} = k_{y0} I_{m3}, \quad (1.1)$$

де  $I_{m3}$  – амплітуда періодичної складової струму трифазного КЗ.

Розрахунок електродинамічної стійкості проводиться для провідників середньої фази, на які діють найбільші значення ЕДЗ. Механічні напруження в провідниках матеріалах не повинні перевищувати 140 МПа для міді марки МТ і 70 МПа для алюмінію марки АТ.

Ізоляція електричних апаратів відкритого виконання (ІР00) піддається впливу як ЕДЗ, так і додаткових навантажень – вітру, ожеледі, вологи, натягання провідників, що підводять і т.д. Ізоляція електричних апаратів герметичного виконання (ІР67) піддається тільки дії ЕДЗ. Тому у першому випадку результуюче навантаження на ізолятори та ізоляційні деталі беруться у три рази меншими руйнуючої сили, у другому випадку – в 1,5–1,7 раз.

**Механічний резонанс.** При розрахунку електродинамічної стійкості апарата, необхідно враховувати можливе появлення резонансу між гармонійно-змінним ЕДЗ і власними механічними коливаннями струмонесучих деталей.

У випадку, коли частота перемінної складової ЕДЗ близька до власної частоти механічних коливань, навіть при порівняно невеликих

зусиллях можлива руйнація апарата внаслідок явищ резонансу. Розглянемо явища резонансу в струмоведучих шинях електричного апарата.

Шини під впливом ЕДЗ роблять змушені коливання у вигляді стоячих хвиль. Частота вільних коливань шин виражається формулою:

$$f_k = \frac{r_k^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (1.2)$$

де  $r_k$  – корені характеристичного рівняння вільних коливань шини;  $l$  – довжина вільного прольоту шини, м;  $E$  – модуль пружності, Па;  $J$  – момент інерції перетину відносно осі вигину, м<sup>4</sup>;  $m$  – маса одиниці довжини шини, кг/м.

Колівання шини мають тільки непарні гармоніки, які мають значення 1, 3, 5... Коефіцієнти  $r_k$  є коренями характеристичного рівняння коливань і приймають значення  $r_1 = 4,79$ ;  $r_3 = 10,996$ ;  $r_k = (2k + 1)\pi/2$  при  $r_k \geq 5$ . Якщо частота вільних коливань більше 200 Гц, то розрахунок зусиль, що діють на шини ізоляторів, виконуються для статичного режиму без обліку резонансу. На рис. 1.19, а зображені ізолятори 1, 2 та жорстко закріплена на них струмоведуча шина 3.

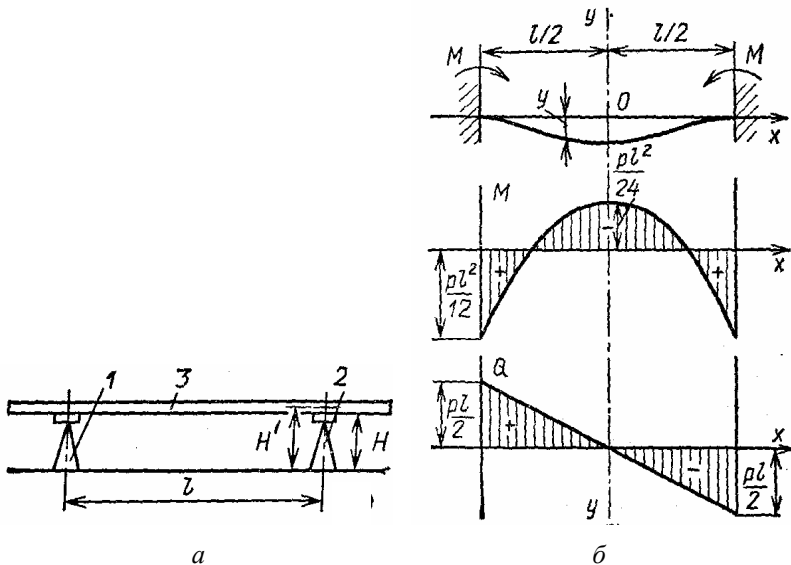


Рис. 1.1 – До розрахунку електродинамічної стійкості шин:  
а – розрахункова схема; б – розподілення моменту  $M$  і поперечної сили  $Q$  у шині

Відстань між ізоляторами  $l$  називається *вільним прольотом*. На шину діє рівномірно розподілене ЕДЗ. Зусилля на одиницю довжини шини одержують розподілом повного ЕДЗ на довжину прольоту  $l$ . До шини (балки) закріпленої на кінцях, прикладаються максимальні розрахункові зусилля, де знаходяться механічні навантаження і зусилля, що діють на ізолятори (див. рис. 1.1). Максимальне механічне напруження у шині, Па:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{p_{\phi\max} l^2}{12W}, \quad (1.3)$$

де  $M$  – максимальний згинальний момент, Нм;  $W$  – момент опору, м<sup>3</sup>;  $p_{\phi\max}$  – найбільше значення питомої електродинамічного навантаження від сусідньої фази, Н/м;  $l$  – довжина вільного прольоту шини, м.

Навантаження на ізолятор:  $P_{iz} = p_{\phi\max} l$ .

Стійкість ізолятора перевіряється нерівністю:

$$P_{iz} \leq \frac{0,6P_{роз}H}{H'}$$

де  $P_{роз}$  – мінімальне руйнівне зусилля, допустиме для ізолятора,  $H$  (береться з каталогу);  $H$  – висота ізолятора, м;  $H'$  – відстань від основи ізолятора до центра ваги поперечного перетину шини, м.

Якщо частота вільних коливань шини  $f < 200$  Гц, то власна частота коливань наближається до частоти ЕДЗ (50–100 Гц). При цьому значення ЕДЗ, що діє на провідники, збільшується в десятки раз.

При гнучкому кріпленні шини власна частота механічних коливань знижується. Енергія ЕДЗ частково витрачається на деформацію струмоведучих частин, частково на переміщення їх і зв'язаних із ними гнучких кріплень. При цьому механічні напруги в матеріалі шин зменшуються.

### Завдання

**Дано:** струм КЗ складає 2 кА; постійна часу аперіодичної складової струму – 0,05 с. Шини розташовані горизонтально, відстань між фазами – 0,6 м. Відстань між ізоляторами  $l$ , м. Шини алюмінієві, трубчасті  $D/d$ . Опорні ізолятори з мінімальним руйнуючим навантаженням  $P_{роз}$  і висотою  $H$ , м. Номінальна напруга – 3,5 кВ. Розрахункова схема (див. рис. 1.1, а). Приймаємо, що шини мають жорстке кріплення в ізоляторах.



Потрібно визначити динамічну стійкість шин. Дані для розрахунку взяті з таблиці 1.1

**Таблиця 1.1 – Дані для розрахунку стійкості шин**

Параметр	$l$ , м	$P_{роз}$ , Н	$D/d$ , мм /мм	$H$ , м
Приклад	1,3	3675	70/64	0,372
Розрахунковий	$\frac{1+ОЦ}{ПЦ+ОЦ}$	ОЦ · ПЦ	$\frac{ОЦ \cdot 1}{ОЦ \cdot 0,8}$	$\frac{ОЦ}{ПЦ+ОЦ}$

### Хід виконання

Для такої задачі максимальний згинальний момент у місці кріплення визначається за формулою:

$$M = \frac{pl^2}{12}.$$

де  $p$  – навантаження на одиницю довжини шини, Н/м;  $l$  – довжина прольоту.

$$\text{Максимальна напруга в матеріалі шини: } \sigma_{\max} = \frac{pl^2}{12W},$$

$$\text{де } W \text{ – момент опору згину, м}^2, W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \text{ м}^3.$$

Навантаження, що діє на ізолятори:

$$P_{iz} = pl.$$

Умови механічної міцності шин та ізоляторів:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\max \text{ дод.}} = 0,7\sigma_{роз}.$$

Для алюмінію марки АТ  $\sigma_{роз} = 117 \cdot 10^6$  Па.

$$\text{Для ізолятора } P_{iz} \leq \frac{0,6P_{роз}H}{H'}.$$

Частота коливань першої гармоніки:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Підставивши значення, що подані у таблиці як приклад, отримаємо:  $r_1 = 4,73$ ,  $l = 1,3$  м,  $E = 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $m = 1,7$  кг/м – маса шини на

одиницю довжини;  $S = 6,31 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  – січення шини,  $\delta = 2700 \text{ кг/м}^3$  – щільність;  $J$  – момент інерції круглої шини,  $J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = 3 \cdot 10^{-7}$ .

Далі визначаємо частоту:  $f_1 = \frac{4,73}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,3^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 3 \cdot 10^{-7}}{1,7}} = 234 \text{ Гц}$ .

Оскільки отримане значення  $f_1 > 100 \text{ Гц}$ , явища резонансу можна не враховувати:

$$p = 1,02kk_{\phi} \frac{i_{y\phi}^2}{l} 10^{-7}.$$

Оскільки  $l \gg d$ , можна прийняти  $k = \frac{2l}{d}$ .

Для круглих провідників –  $k_{\phi} = 1$ .

Ударний струм –  $i_{y\phi} = 1,8\sqrt{2}20 \cdot 10^3 = 50,8 \text{ кА}$ ;

$$p = \frac{1,02 \cdot 10^{-7} \cdot 2(50,8 \cdot 10^3)^2}{0,6} = 880 \text{ Н/м};$$

$$\sigma_{кз} = \frac{pl^2}{12W} = \frac{880 \cdot 13^2}{12 \cdot 0,85 \cdot 10^{-5}} = 145,5 \cdot 10^5 < 117 \cdot 10^6.$$

$$P_{кз} = pl = 880 \cdot 1,3 = 1142 \text{ Н} < \frac{0,6 \cdot 3675 \cdot 0,372}{0,407} = 2010 \text{ Н}.$$

Висновок: конструкція шин виконана з запасом за механічною стійкістю.

### Протокол роботи

Протокол роботи включає в себе теоретичні відомості, рисунки, дані та формули для розрахунків, висновок.

### Контрольні питання

1. Дайте визначення електродинамічної стійкості шини.
2. Що таке механічний резонанс?
3. Як виникає електродинамічне зусилля?
4. Як розраховується ударний струм?
5. Як розраховується частота?

## *Лабораторна робота 2.* **Тепловий розрахунок елементів апаратів**

---

**Мета:** ознайомлення з конструкцією контактів, методикою визначення температури контакту електричних апаратів.

### **Теоретичні відомості**

У струмоведучих, ізолюючих і конструктивних деталях електроапаратів є втрати електричної енергії у вигляді тепла. У загальному випадку тепла енергія частково витрачається на підвищення температури апарата і частково розсіюється в навколишньому середовищі.

При підвищенні температури відбувається прискорене старіння ізоляції провідників і зменшення їхньої механічної стійкості. Наприклад, термін служби ізоляції при зростанні тривалої температури усього лише на 8 °С більше номінальної скорочується в два рази.

При збільшенні температури від 100 до 250 °С механічна стійкість міді знижується на 40 %. При КЗ, коли температура може досягати 200–300 °С, на струмоведучих деталях виникають значні електродинамічні зусилля. Стійка робота контактних з'єднань, також залежить від температури нагріву струмоведучих частин і ізоляції апарата, що в значній ступені визначає його надійність. Тому у всіх можливих режимах роботи, їх температура не повинна перевершувати таких значень, при яких забезпечується задана тривалість роботи апарата.

**Втрати в струмоведучих частинах.** У апаратах постійного струму, відбувається нагрів тільки, за рахунок втрат в активному опорі струмоведучого ланцюга.

Енергія, що виділяється в провіднику розраховується за формулою:

$$W = \int_0^t i^2 R dt,$$

де  $i$  – струм у ланцюзі, А;  $R$  – активний опір провідника, Ом;  $t$  – тривалість протікання струму, с.

При постійному струмі опір провідника  $R$  легко знайти, знаючи його матеріал, довжину, перетин і питомий опір  $\rho$ . Активний опір провідника різний при постійному і змінному струмах через поверхневий ефект і ефект близькості. При змінному струмі:

$$R = Rk_d, \quad (2.1)$$

де  $R$  – опір при постійному струмі;  $k_d$  – коефіцієнт додаткових втрат, викликаних поверхневим ефектом і ефектом близькості.

**Поверхневий ефект.** Перемінний струм, що тече по провіднику, утворює змінне магнітне поле, що, перетинаючи тіло провідника, наводить у ньому ЕДЗ. Це ЕДЗ створює вихрові струми, що геометрично додаються з основним змінним струмом. У результаті найбільша щільність струму спостерігається на поверхні провідника. По мірі переміщення до центра, щільність струму швидко спадає. Коефіцієнт додаткових втрат, обумовлених поверхневим ефектом, позначається як  $k_B$ .

Чим більше частота струму і менше питомий опір провідника, тим сильніше виявляється поверхневий ефект і більше  $k_B$ .

Суттєву роль при цьому грають форма і розміри провідника – чим більше його діаметр, тим більше поверхневий ефект,

**Допустимі температури.** Якщо  $\Theta_0 < 35$  °С, то струмові навантаження апарата може бути збільшено і розраховані за формулою:

$$I_{np} = I \sqrt{\frac{\Theta_{np} - \Theta_0}{\Theta_{np} - 35}}. \quad (2.2)$$

Тривалість і частота появ КЗ досить малі, тому допустимі температури при КЗ у два–чотири рази більші, чим при тривалому режимі. Відповідно до існуючих норм граничні значення температури при КЗ не повинні перевищувати 200 °С для алюмінієвих провідників, 250 °С для провідників із міді і її сплавів, що контактують з органічною ізоляцією або мастилом, і 300 °С для провідників із міді і її сплавів, що не контактують з органічною ізоляцією або мастилом. Спроможність апарата витримувати короточасну теплову дію струму КЗ без ушкоджень, що перешкоджають подальшій справній роботі, називається **термічною стійкістю**.

Струмоведучі елементи апарата, що розраховані для тривалого режиму, повинні бути перевірені на термічну стійкість при КЗ за допомогою формули:

$$\frac{I_k^2}{q^2} t_k = J_k^2 t_k = A_{\Theta_k} - A_{\Theta_{ном}}. \quad (2.3)$$

При розрахунку береться найбільш складний випадок, коли до моменту початку КЗ елемент нагрітий тривалим струмом від гранично-допустимої температури номінального режиму. Оскільки струм термічної стійкості залежить від тривалості його протікання, то термічна стійкість відноситься до визначеного часу.

### **Перевірка струмоведучих частин на термічну стійкість.**

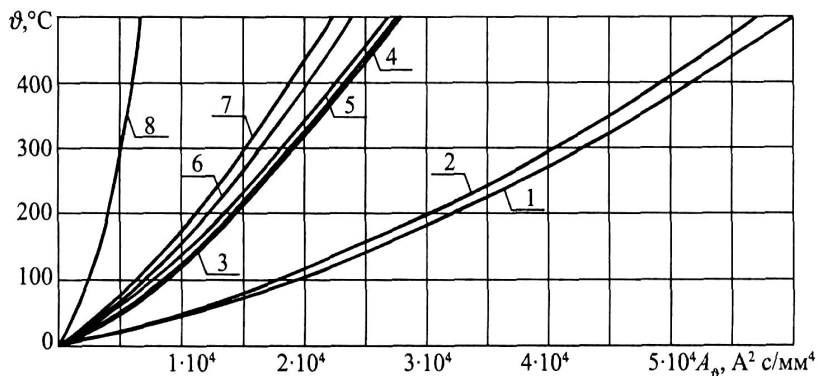
При протіканні струму КЗ провідник додатково нагрівається до температури, яка перевищує номінальну робочу температуру. Тривалість протікання струму КЗ зазвичай невелика, тому вважається, що практично все тепло йде на нагрівання провідника, яке не встигає передаватися в навколишнє середовище. Проте, в силу того, що струми КЗ набагато перевищують номінальні струми, провідник може нагрітися до неприпустимої температури за досить короткий проміжок часу. У зв'язку з цим при виборі струмоведучих частин необхідно перевіряти їх термічну стійкість.

Критерієм термічної стійкості провідника є допустима температура нагрівання:

$$\Theta_{КЗ} \leq \Theta_{доп.}$$

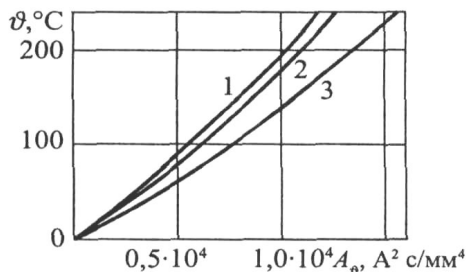
де  $\Theta_{КЗ}$  – температура нагрівання провідника струмом КЗ в момент вимкнення противарійної автоматики;  $\Theta_{доп.}$  – максимальна допустима температура нагрівання струмоведучих частин електроустановки.

Температура нагріву провідника в момент вимкнення КЗ визначається по спеціальним залежностям нагріву провідника  $\Theta$  від величини питомого теплового імпульсу  $A_0$ . Такі залежності для жорстких шин, кабелів та провідників деяких марок наведені на рис. 2.1, а, для провідників інших марок – на рис. 5.2.



**Рис. 2.1 – Криві для визначення температури нагріву провідників із різних матеріалів при КЗ.**

**Матеріали провідників: 1 – ММ; 2 – МТ; 3 – АМ; 4 – АТ;  
5 – АДО; АСТ; 6 – АДЗІТ1; 7 – АДЗІТ; 8 – Ст. 3**



**Рис. 2.2 – Криві для визначення температури нагріву провідників при КЗ.**  
**Матеріали провідників: 1 – сплави АЖ і АЖКП; 2 – сплави АН і АНКП;**  
**3 – алюміній марок А, АКП, АпКП і сталюалюміній марок:**  
**АС; АСКП; АСКС; АСК; АпС; АпСКС; АпСК**

Для визначення температури нагрівання провідника струмом КЗ необхідно: знаючи початкову температуру нагрівання провідника до КЗ  $\Theta_n$ , за відповідною кривою (див. рис. 2.1 або рис. 2.2) визначити початкове значення питомого теплового імпульсу  $A_n$ ; визначити значення інтеграла Джоуля  $B_\kappa$  при розрахункових умовах КЗ:

$$B_\kappa = I_{\Pi}^2 \cdot (t_{\text{від}} + T_a),$$

де  $I_{\Pi}$  – величина періодичної складової струму КЗ;  $t_{\text{від}}$  – час вимкнення КЗ.

$$t_{\text{від}} = t_{\text{pz}} + t_\theta,$$

де  $t_{\text{pz}}$  – час спрацювання релейного захисту;  $t_\theta$  – повний час вимкнення вимикача КЗ.

Визначити величину питомого теплового імпульсу, що відповідає кінцевій температурі нагрівання:

$$A_\kappa = A_n + \frac{B_\kappa}{S^2},$$

де  $S$  – переріз провідника (для сталюалюмінієвих провідників – переріз алюмінієвої частини).

За величиною  $A_\kappa$ , використовуючи відповідну криву, визначити кінцеву температуру нагрівання провідника  $\Theta_\kappa$ .

Максимально допустимі температури нагріву різних провідників приведені у таблиці 2.1.

**Таблиця 2.1 – Граничнодопустимі температури нагріву провідників при КЗ**

Вид провідника	$\Theta_{\text{доп.}}, ^\circ\text{C}$
Шини алюмінієві	200
Шини мідні	300
Шині сталені, що не мають безпосереднього з'єднання з апаратами	400
Шині сталені при безпосередньому з'єднанні з апаратами	300
Кабелі з ізоляцією із просоченого паперу на напругу, кВ:	250
– 6–10;	200
– 20–35;	130
– 110–220	125
Кабелі та ізольовані провідники з мідними та алюмінієвими жилами з ізоляцією із:	
– полівінілхлоридного пластику;	160
– резини;	160
– поліетилену (до 35 кВ);	130
– вулканізованого (зшитого) поліетилену (до 35 кВ)	250
Мідні неізольовані провідники при тяжіннях, Н/мм <sup>2</sup> :	
– менше 20;	250
– 20 та більше	200
Алюмінієві неізольовані провідники при тяжіннях, Н/мм <sup>2</sup> :	
– менше 10;	200
– 10 та більше	160
Алюмінієва частина сталюалюмінієвих провідників	200

Якщо при виборі перерізу провідника визначальною умовою є його термічна стійкість при КЗ, то в даному випадку слід вибрати мінімальний переріз провідника, при якому його температура нагріву до моменту вимкнення КЗ виявляється менше граничнодопустимої температури або дорівнює їй. Для визначення  $S_{\text{min}}$  необхідно: визначити інтеграл Джоуля  $B_k$ , знаючи початкову температуру  $\Theta_n$  та граничнодопустиму температуру при КЗ  $\Theta_{\text{доп.}}$  (табл. 2.1) за відповідною кривою (див. рис. 2.1 або рис. 5.2) визначаються величини  $A_n$  та  $A_{k,\text{доп.}}$  та розраховується величина  $S_{\text{min}}$ :

$$S_{\text{min}} = \sqrt{\frac{B_k}{A_{k,\text{доп.}} - A_n}};$$

Використовуючи шкалу стандартних перерізів провідників шин або жил кабелів вибирають переріз провідника, що відповідає умові:

$$S \geq S_{\text{min}}.$$

У випадках, коли навантаження провідника до КЗ наближається до граничнодопустимого, мінімальний переріз, що відповідає умові термічної стійкості слід визначати наступним чином:

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_m};$$

$$C_m = \sqrt{A_{к.доп.} - A_{ном.}}$$

де  $A_{ном}$  – величина питомого теплового імпульсу при номінальній температурі нагрівання провідника в нормальному режимі.

Значення параметра  $C_m$  для жорстких шин наведені у таблиці 2.2, для кабелів – в таблиці 2.3, для проводів – в таблиці 2.4.

**Таблиця 2.2 – Значення параметра  $C_m$  для жорстких шин**

Матеріал проводу або марка сплаву	$C_m, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$ , за початкової температури, °С		
	70	90	120
Мідь	170	–	–
АДО	90	81	68
АДІН	91	82	69
АДОМ, АДІМ	92	83	70
АДЗІТІ	85	77	64
АДЗІТ	82	74	62
АДЗЗТІ	77	71	59
АДЗЗТ	74	67	57
АВТІ	73	66	55
АВТ	71	63	53
1911	71	63	53
1915,1915Т	66	60	51
АМг5	63	57	48
Сталь при $\theta_{доп.} = 400 \text{ }^\circ\text{С}$	70	–	–
Сталь при $\theta_{доп.} = 300 \text{ }^\circ\text{С}$	60	–	–

**Таблиця 2.3 – Значення параметра  $C_m$  для кабелів**

Характеристика кабелю	$C_m, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$
Кабелі до 10 кВ з жилами: – мідними; – алюмінієвими	140 90
Кабелі 20–30 кВ з жилами: – мідними; – алюмінієвими	105 70



### Продовження таблиці 2.3

Характеристика кабелю	$C_m, \text{A} \cdot \text{c}^{1/2} / \text{мм}^2$
Кабелі та ізольовані провідники з полівінілхлоридною або резиновою ізоляцією і з жилами: – мідними; – алюмінієвими	120 75
Кабелі та ізольовані провідники з полівінілхлоридною ізоляцією і з жилами: – мідними; – алюмінієвими	103 65

**Таблиця 2.4 – Значення параметра  $C_m$  для проводів**

Матеріал проводу	Марка проводу	$C_m, \text{A} \cdot \text{c}^{1/2} / \text{мм}^2$ , при допустимих температурах нагрівання при КЗ, °С		
		160	200	250
Мідь	М	–	142	162
Алюміній	А, АКП, Ап, АпКП	76	90	–
Алюмінієвий сплав	АН, АНКП, АЖ, АЖКП	69	81	–
		66	77	–
Алюміній-сталь	АСК, АпС, АСКС, АпСКС, АпСК, АС, АСКП	76	90	–

### Проведення лабораторної роботи

Лабораторний стенд (рис. 2.3) складається з п'яти струмоведучих частин, оснащених термопарою, мультиметром та кнопками вмикання кожного дроту.



**Рис. 2.3 – Загальний вигляд стенда для дослідження нагрівання провідників**

Вимірювання відбуваються наступним чином. Після підключення терморпарі до мультиметра, вмикають відповідну кнопку та паралельно фіксують процес нагрівання, відмічаючи його час. Нагрівання можливе до 127 °С. Дані заносять до таблиці 2.1.

**Завдання.** Підключити стенд. Провести вимірювання п'яти струмоведучих елементів за часом нагрівання. Дані завести у таблицю 2.5.

**Таблиця 2.5**

Номер матеріалу	Значення температури	Час нагрівання	Примітка

Розрахувати значення струму та визначити нагрів.

Визначити тривалий струм через струмоведучий елемент у вигляді мідного стрижня  $d$ . Зовнішня ізоляція виконана з багат шарової бавовняної стрічки, просоченої гліфталевим лаком (клас ізоляції А). Товщина ізоляції  $H$ . Знайти допустимий струм КЗ при тривалості його протікання  $t$ , с. Частота струму 50 Гц. Варіанти завдань наведені у таблиці 2.6.

**Таблиця 2.6 – Дані для розрахунків**

Параметр	$d$ , м	$H$ , м	$t$ , с
Приклад	0,035	$10^{-3}$	5
Розрахункові величини	ОЦ-ПЦ-0,0001	ОЦ· $10^{-2}$	ПЦ

### Хід виконання

Температура на поверхні стрижня (провідника), відповідно до (2.2):

$$\Theta_{PP} = \Theta_0 + \frac{\Phi}{k_T \pi D l} + \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d};$$

$$\Phi = I^2 R k_D = (\Theta_{PP} - \Theta_0) \frac{2\pi k_T D l \lambda}{2\lambda + k_T D \ln \frac{D}{d}} = (\Theta_{PP} - \Theta_0) \frac{1}{R_{T,P}}.$$

Розрахунок проведемо для одиниці довжини стрижня:

$$l = \frac{(\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_0) 2\pi k_T D \lambda}{\sqrt{k_D R \left( 2\lambda + k_T D \ln \frac{D}{d} \right)}}$$

Оскільки ізоляція відноситься до класу А, то температура проводу на поверхні  $\Theta_{\text{ПР}} = 105^\circ\text{C}$ . Найбільше значення  $\Theta_0 = 40^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт теплообміну  $k_T = 11 - 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Питома теплопровідність бавовняної ізоляції  $\lambda = 0,114 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ; Коефіцієнт додаткових втрат  $k_B$  визначимо за допомогою (див. рис. 2.1).

Питомий опір  $\rho$  при температурі  $105^\circ\text{C}$  визначається за:

$$\rho = \rho_0(1 + a_R \Theta) = 1,55 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 105) = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Аргумент  $\sqrt{\frac{8\pi f}{R \cdot 10^7}} = 2,36$ , тоді  $k_B = 1,118$ .

Опір одиниці довжини стрижня на постійному струмі:

$$R = \frac{\rho \cdot 2,2 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{q \pi (3,5)^2 \cdot 10^{-4}} = 0,23 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$I = \sqrt{\frac{(105 - 40) \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 12(0,035 + 0,002) \cdot 0,114}{1,118 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4} \left( 0,114 \cdot 2 + 12 \cdot 0,037 \ln \frac{0,037}{0,035} \right)}} = 1690 \text{ А}.$$

При відсутності ізоляції  $D = d$  і допустимий струм дорівнює 1760 А. У цьому випадку віддача теплоти з зовнішньої поверхні відбувається в основному за рахунок випромінювання і конвекції. Уточнимо значення допустимого струму для неізолизованого проводу, з урахуванням тепловіддачі.

Тепло, що віддається випромінюванням по довжині, 1 м:

$$T_2 = 105 + 273 = 378 \text{ К}; T_1 = 40 + 273 = 317 \text{ К};$$

$$c_0 = 5,7 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}); \epsilon = 0,78 \text{ (для міді)};$$

$$S = \pi D l = \pi \cdot 0,035 \cdot 1 = 0,11 \text{ м}^2;$$

$$\Phi_{\text{КЗ}} = 5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,78 \left[ \left( \frac{378^4}{1000} \right) - \left( \frac{317^4}{1000} \right) \right] 0,11 = 49 \text{ Вт}/\text{м};$$

$$\Phi_K = 3,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{d} \right)^{0,25} (\Theta_{PP} - \Theta_0)^{1,25} S =$$

$$= 3,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{3,5} \right)^{0,25} (105 - 40)^{1,25} 1100 = 46,3 \text{ Вт/м.}$$

Повна потужність, що віддається з одиниці довжини стрижня:

$$l^2 k_D R = \Phi_{K3} + \Phi_K = 49 + 46,3 = 95,3 \text{ Вт/м;}$$

$$I = \sqrt{\frac{\Phi_{K3} + \Phi_K}{k_D R}} = \sqrt{\frac{95,3}{1,18 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4}}} = 1860 \text{ А.}$$

Таким чином, розрахунок за формулою Ньютона дає результат 1690 А, що на 5,4 % менше результату за більш точними формулами – 1860 А.

Визначення допустимого струму КЗ:

$$k_D \frac{I^2}{q^2} t = A_{\Theta_K} - A_{\Theta_H}; \quad \Theta_K = 250 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Theta_H = 105 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Використовуючи (див. рис. 2.2), отримаємо:

$$A_{\Theta_K} = 3,65 \cdot 10^4, \quad A_{\Theta_H} = 3,65 \cdot 10^4; \quad \Theta_{CP} = \frac{\Theta_H - \Theta_K}{2} = 177,5 \text{ }^\circ\text{C при}$$

$$\Theta_{CP} = 177,5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad k_D = 1,1.$$

$$I = \sqrt{\frac{(A_{\Theta_K} - A_{\Theta_H}) q^2}{k_D t}} = \sqrt{\frac{(3,65 - 2) 10^4 \cdot 960^2}{1,1 \cdot 5}} = 51500 \text{ А.}$$

### Протокол роботи

Протокол роботи включає в себе теоретичні відомості, рисунки, данні та формули для розрахунків, висновок.

### Контрольні питання

1. Від чого залежить теплове випромінювання провідника?
2. Вплив ізоляції та матеріалу на випромінювання тепла провідником.
3. Як розраховується нагрівання провідника?
4. Які граничні значення температури передбачені стандартом?

**Лабораторна робота 3.**  
**Вивчення конструкції, принципу дії та методів**  
**розрахунку контактів електричних апаратів**

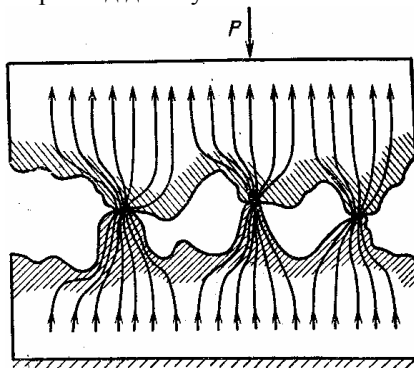
---

**Мета:** ознайомлення з конструкцією контактів, методикою визначення температури контакту електричних апаратів.

**Теоретичні відомості**

**Електричним контактом** називається з'єднання двох провідників, що дозволять проводити струм між ними. Дотичні провідники називаються **контактами** або **контакт-деталлями**.

Якщо поверхні контактів оброблені не якісно, електричний струм проходить між ними тільки в окремих точках, у котрих ці поверхні контактують, тому, що одержати абсолютно ідеальну поверхню практично неможливо. Приклад дотику контактів показано на рис. 3.1.



**Рис. 3.1 – Схема контакту поверхонь**

Завдяки натисканню  $P$  одного контакту на інший, вершини виступів деформуються й утворюються площадки дійсного дотику контактів. Розглянемо процес переходу струму з одного контакту на інший при дотику двох циліндричних контактів на торцях. Якщо є тільки одна площадка дотику, що має форму кола з радіусом  $a$  (див. рис. 3.2,  $a$ ). Радіус  $a$  при пластичній деформації можна розрахувати за формулою:

$$\pi a^2 = \frac{P_{\text{конт}}}{\sigma}, \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{конт}}$  – сила контактного натискання, Н;  $\sigma$  – тимчасовий опір на зминання матеріалу контактів, Н/м<sup>2</sup>.

У результаті стягування ліній струму до площадки дотику, їхня довжина збільшується, а перетин провідника, через який фактично проходить струм, зменшується, що викликає збільшення опору. Опір в області площадки дотику, який обумовлено явищами стягування ліній струму, називається *перехідним опором стягування контакту*  $R_{cm}$ .

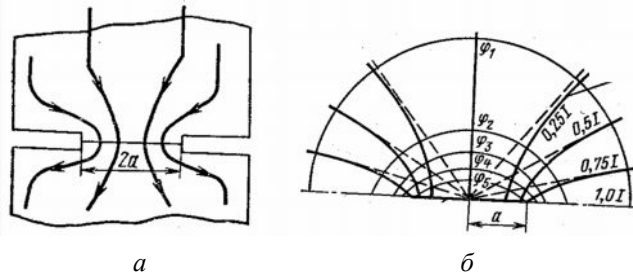


Рис. 3.2 – Ідеалізована картина розтікання струму в точковому контакті

З огляду на те, що область стягування ліній струму мала в порівнянні з розмірами контакту, реальні контакти можна замінити тілами з питомим опором  $\rho$ . Для двох тіл, що контактують по одній круглій площадці дотику, картина ліній струму і електричних потенціалів  $\phi$  показана на рис. 3.2, б.

Еквіпотенціальні поверхні є півеліпсоїдами обертання, лінії струму – гіперболами із загальним фокусом. Для такої ідеалізованої картини перехідний опір визначається за формулою:

$$R_{3M} = \frac{\rho}{2a}. \quad (3.2)$$

З точністю до 5 % ця формула справедлива, якщо діаметр контакту перевершує в 15 і більше разів діаметр площадки дотику. У більшості практичних випадків остання умова дотримується, тому що розміри площадки дотику звичайно не перевершують частки міліметра.

$$R_{3M} = \frac{\rho\sqrt{\pi\sigma}}{2\sqrt{P_{\text{конт}}}} = \frac{k_1}{P_{\text{конт}}^{1/2}}. \quad (3.3)$$

Таким чином, перехідний опір, обумовлений стягуванням ліній струму, пропорційний питомому опору матеріалу контакту, кореню квадратному з тимчасового опору на змінання цього матеріалу  $\sigma$  і обернено пропорційний кореню квадратному із сили контактного на-

тискання  $P_{\text{конт}}$ . Зі зростанням контактного натискання, перехідний опір зменшується (крива 1 на рис. 3.3). Слід зазначити, що при зменшенні натискання (крива 2) залежність  $P_{\text{ст}}(P_{\text{конт}})$  проходить нижче через наявність залишкових деформацій виступів, що контактують. При багаторазовому замиканні і розмиканні контактів криві 1 і 2 не повторюють одна одну, тому, що в кожному випадку відбувається зіткнення в різних точках. Замість кривих 1 і 2 утворюється обмежена ними область.



Рис. 3.3 – Залежність перехідного опору від контактного натискання

При пружній деформації виступів, що контактують, показник ступеня  $P_{\text{кон}}$  у (3.3) дорівнює  $1/3$ . У таблиці 3.1 наводяться отримані експериментально значення коефіцієнта  $k_1$  для одноточкових заново зачищених контактів.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта  $k_1$

Матеріал контактів	Для сильнострумівих контактів, $10^{-4} \text{ Н}^{1/2}$ , Ом	Для слабкострумівих контактів (реле) $\text{Н}^{1/2}$ , Ом
Мідь	3,16	0,014–0,0175
Срібло	1,58	0,006
Олово	15,8	–
Латунь	21,2	–
Сталь	24	–
Алюміній	5,05	–

Одноточковий контакт застосовується в основному тільки при малих струмах (до 20 А). При великих струмах (100 А і більше) застосовується багатоточковий контакт. У багатоточковому контакті струм проходить через декілька контактних переходів, з'єднаних паралельно.

Тому його перехідний опір при незмінному натисканні менше, ніж в одноточковому контакті. Однак натискання в кожній контактній площадці зменшується. Кількість контактних переходів збільшується із зростанням натискання за складним законом. Перехідний опір у багатоточковому контакті описують експериментальним рівнянням:

$$R_{3M} = \frac{k}{P_{\text{конт}}^m}, \quad (3.4)$$

де  $m = 0,7-1$ ;  $k$  – постійна, що залежить від конструкції контакту.

Опір  $R_{3M}$  залежить і від обробки поверхні. При шліфуванні поверхня виступів більш положиста з великою площею. Змінання таких виступів можливо тільки при великих силах натискання. Тому опір шліфованих контактів вище, чим контактів із більш грубою обробкою.

Перехідний опір контактів обумовлено не тільки явищем стягування ліній струму. Контактні поверхні покриті адсорбованими молекулами газу, у якому розміщені контакти до їхнього замикання. Часто молекули газу вступають у хімічну реакцію з матеріалом контактів, у результаті чого, на їх поверхні виникає плівка з високим питомим опором (до  $10^4$  Ом·м). Отже, результуючий перехідний опір контактів  $R_{\text{конт}}$  можна подати як суму опорів  $R_{3M}$  та опору плівок  $R_{\text{пл}}$ :

$$R_{\text{конт}} = R_{3M} + R_{\text{пл}}. \quad (3.5)$$

Вплив плівок у значній мірі залежить від радіуса площадки  $a$ . При  $a > 10^{-3}$  см, впливом плівок можна зневажити. При  $a = 10^{-4}$  см опір плівок у 10 разів може перевищувати опір  $R_{3M}$ . При  $a = 10^{-4}-10^{-3}$  см розміри  $R_{3M}$  і  $R_{\text{пл}}$  порівнянні. Тому плівки особливо небезпечні для контактів на малі струми, коли сили натискання і розмір плями  $a$  малі. Процес утворення плівки починається відразу після дотику зачищеної поверхні контактів із навколишнім повітрям. Перехідний опір при цьому може зрости в десятки тисяч разів. У зв'язку з цим контакти на малі струми (малі натискання) виготовляються з дорогоцінних металів, що не піддаються окислюванню (золото, платина й ін.). Звичайно експериментальні дослідження і розрахунок перехідного опору ведуться для заново очищених контактів.

У багатоточкових контактах плівка руйнується або завдяки великим натисканням, або за рахунок проковзування одного контакту щодо іншого.

У процесі роботи перехідний опір контактів не залишається постійним. Під впливом кисню, інших агресивних газів, підвищеної



температури інтенсивність утворення плівки зростає. При цьому перехідний опір контакту падіння напруги на ньому і його температура зростає. При визначених значеннях напруг і температури відбувається електричний пробій плівки, після чого опір контакту падає. Це явище називається **фриттингом**.

Для захисту контактів від впливу навколишнього середовища, вони можуть бути розміщені в герметичному балоні з інертним газом. Ці контакти одержали назву **герконів**.

При проходженні струму через область стягування його ліній контакт нагрівається. Температура контакту не повинна досягати температури розм'якшення матеріалу.

При проходженні струму через область стягування його ліній контакт нагрівається. Приблизне перевищення температури в області стягування  $\tau_{\text{конт}}$ , може бути знайдене за формулою:

$$\Delta\tau_{\text{конт}} = \frac{U_{\text{конт}}^2}{8\lambda\rho}, \quad (3.6)$$

де  $U_{\text{конт}}$  – падіння напруги на перехідному опорі дорівнює  $IR_{\text{см}}$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C);  $\rho$  – питомий опір матеріалу контактів, Ом·м.

Найбільшу температуру має площадка догику. По мірі віддалення від неї, температура контакту швидко падає. Протяжність області стягування невелика і складає  $(5-6)a$ . Розглянемо процес нагрівання точкового торцевого контакту (рис. 3.4).

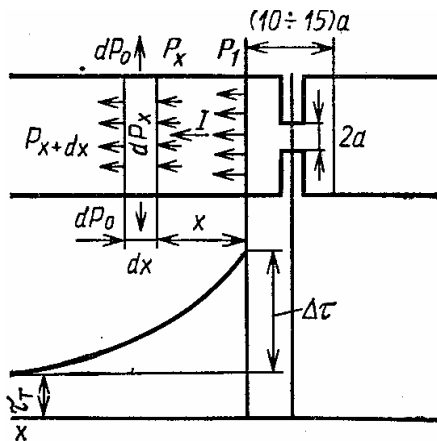


Рис. 3.4 – До розрахунку температури контактів

Позначимо через  $P$  потужність теплових втрат у різних точках контакту. Струм  $I$ , проходячи через контакт, його нагріває з теплою  $P_1 = (1/2)I^2 R_K$ , що входить у торець контакту. Одночасно через бічну поверхню тепло відводиться в навколишній простір. За сталого режиму тепло, що входить в елемент товщиною  $dx$ , відповідає теплу, що із нього виходить:

$$P_x + dP_x = dP_0 + P_{x+dx}, \quad (3.7)$$

де  $P_x = -\lambda \frac{d\Theta}{dx} q$  – тепло, що підійшло до елемента праворуч;

$dP_x = I^2 \rho \frac{dx}{q}$  – тепло, що виділяється у цьому елементі;  $q$  – перетин

контакту;  $dP_0 = k_T p (\Theta - \Theta_0) dx$  – тепло, що віддається з бічної по

верхні;  $p$  – периметр перетину контакту;  $dP_{x+dx} = -\lambda \frac{d\Theta}{dx_{x+dx}} q$  – тепло,

що виходить з елемента у напрямі осі  $x$ .

Підставимо  $\tau = \Theta - \Theta_0$  в (3.7). Після перетворення отримаємо:

$$\frac{d^2 \tau}{dx^2} + \frac{k_T p}{\lambda q} + \frac{I^2 \rho}{q^2 \lambda} = 0.$$

Вирішуючи це рівняння з урахуванням початкових умов, одержуємо:

$$\tau = \frac{I^2 R_{кон}}{2} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T p q}} e^{-\sqrt{k_T p / \lambda q} x} + \frac{I^2 \rho}{k_T p q}.$$

Тоді температура контактної точки:

$$\begin{aligned} \Theta_{конт} &= \Theta_0 + \tau_T + \Delta\tau + \Delta\tau_{конт} = \\ \Theta_0 &+ \frac{I^2 \rho}{k_T p q} + \frac{I^2 R_{конт}}{2} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T p q}} + \frac{(IR_{см})^2}{8\lambda\rho}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де  $\tau_T$  – перевищення температури тіла контакту щодо навколишнього середовища;  $\Delta\tau$  – перевищення температури контакту на початку області стягування;

Із зростанням температури опір стягування змінюється через зростання питомого опору матеріалу.

## Завдання

Лабораторний стенд (рис. 3.5) складається із системи вмикання реле, магнітних пускачів, трансформатора, вольтметра, амперметра, реле часу.



Рис. 3.5 – Стенд для демонстрації роботи контакторів

Визначити перехідний опір однокерованих контактів та температуру перевищення та температуру контактної точки за умов, що сила струму  $I$ , напруга  $U = 220$  В, переріз контактів  $q$ , периметр перерізу контакту  $p$ , початкова температура  $\Theta_0$ . Сила контактного натискання складає 100 Н. Дані для розрахунку взяті з таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані для розрахунків

Параметр	Матеріал	$P$ , м	$I$ , А	$q$ , м <sup>2</sup>	$\Theta$ , °С
Приклад	мідь	0,03	1000	0,03	40
Розрахункові	З табл. 3.1 за ОЦ	0,01·ПЦ	ОЦ·ПЦ·100	0,01·ПЦ·ОЦ	ОЦПЦ

## Хід виконання

Відповідно до (3.3) визначимо перехідний опір:

$$R_{3M} = \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{100}} = 3,16 \cdot 10^{-5}, \text{ Ом.}$$

Відповідно, щоб розрахувати  $R_{конт}$  потрібно визначити радіус площадки  $a$ .

Перевищення температури може бути знайдено за (3.6):

$$\Delta\tau_{\text{конт}} = \frac{220^2}{8 \cdot 401 \cdot 10^{-4}}.$$

Температура контактної точки знайдемо за (3.8):

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{конт}} &= \Theta_0 + \tau_T + \Delta\tau + \Delta\tau_{\text{конт}} = \\ &= \Theta_0 + \frac{1000^2 \cdot 3,16 \cdot 10^{-4}}{0,014 \cdot 1000 \cdot 0,03} + \frac{1000^2 R_{\text{конт}}}{2} \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{401 \cdot 0,014 \cdot 3,16 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03}} + \frac{(1000 \cdot 10^{-4})^2}{8 \cdot 401 \cdot 3,16 \cdot 10^{-4}}. \end{aligned}$$

### **Протокол роботи**

Протокол роботи включає в себе теоретичні відомості, рисунки, данні та формули для розрахунків, висновок.

### **Контрольні питання**

1. Які типи контактів бувають?
2. Від чого залежать перехідні опори контактів?
3. Як розраховуються опір контактів?
4. Як визначається температура нагріву контактів.

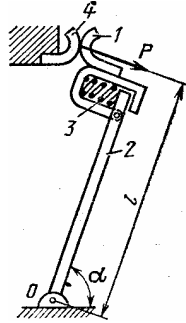
**Лабораторна робота 4.**  
**Вивчення режимів роботи контактів**  
**електричних апаратів та методів їх розрахунку**

---

**Мета:** ознайомлення з режимами роботи контакторів електричних апаратів, методикою виконання розрахунків їх роботи.

**Теоретичні відомості**

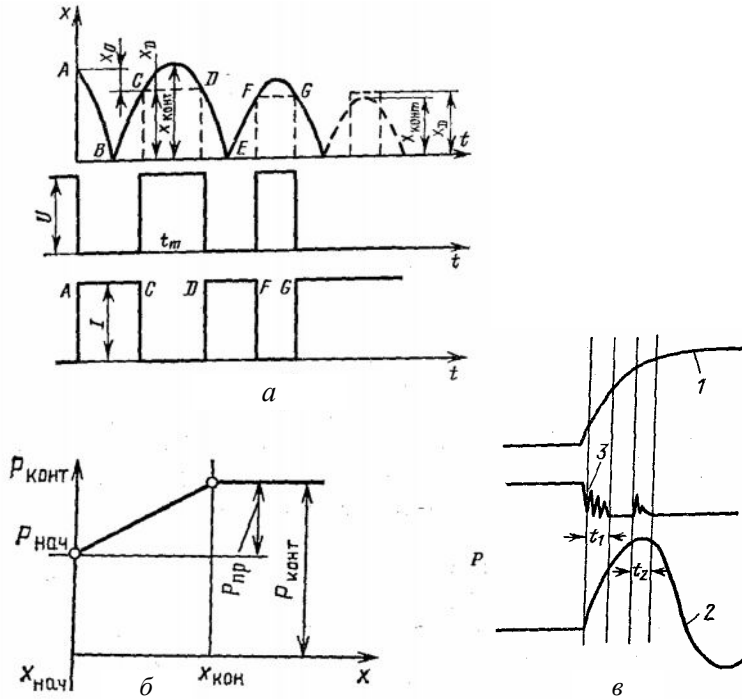
**Вмикання ланцюга.** При вмиканні електричних апаратів у їхніх контактних системах можуть мати місце наступні процеси: 1) вібрація контактів; 2) ерозія на поверхні контактів у результаті утворення електричного розряду між ними.



**Рис. 4.1 – Схема контакторів: 1 – рухомий контакт;  
2 – контактний важіль; 3 – контактна пружина; 4 – нерухомий контакт**

При вмиканні контактора його електромагніт діє на важіль 2, переміщення якого призводить до дотику контактів 1 і 4. В момент дотику контактів відбувається удар, в результаті якого з'являється деформація зминання контактів і відкидання контакту 1 вправо. Між контактами утворюється зазор, під дією прикладеної до них напруги загоряється електрична дуга. Рух контакту 1 вправо зупиниться тоді, коли енергія, що отримана ним при дотику, перейде в енергію стискування пружини 3. Після цього контакт 1 під дією пружини 3 почне рухатись вліво. Відбудеться новий дотик та нове відбивання контакту.

При вібрації контактів (див. рис. 4.2) відбувається багаторазове утворення електричної дуги, що приводить до їхнього сильного зносу через оплавлення і випаровування матеріалу контактів. У зв'язку зі зносом контактів зменшується зусилля їхнього натискання у включеному положенні, що приводить до підвищення перехідного опору. При великому числі вмикань і вимикань можливий швидкий вихід контактів із ладу.



**Рис. 4.2 – Вібрація контактів при замиканні ланцюга:**  
**а** – процес вібрації при вмиканні на активне навантаження;  
**б** – залежність контактного зусилля при переміщенні рухомого контакту  $x$ ;  
**в** – зміна струму в ланцюзі та напруги на контактах при вмиканні

Для зменшення вібрації створюється попередня деформація (натяг) контактної пружини при розімкнутих контактах. Іноді між контактним важелем і рухомих контактом вводиться протівібраційний вкладиш із пористого матеріалу, наприклад у виді губчатої гуми. Цей матеріал сприяє загасанню коливачь контакту і зменшенню його вібрації.

Із збільшенням тягового зусилля електромагніта або тягового моменту привода контактора провал контактів спочатку зменшується, потім зростає. Вібрація контактів підсилюється із зростанням їхнього моменту інерції, через це маса контактів повинна бути мінімальною.

На рис. 4.2, в показана зміна струму при вмиканні ланцюга постійного (крива 1) і змінного струму (крива 2). Крива 3 ілюструє зміну напруги на контактах при їхньому вмиканні. Час вібрації контактів від дотику між собою дорівнює  $t_1$ . Дотик якоря електромагніта, що пере-

міщує контакт, при нерухомому сердечнику викликає вібрацію рухомого контакту, що триває протягом часу  $t_s$ . До цього часу, струм через контакти близький до номінального, а їх вібрація особливо небезпечна. Для зниження сили дотику якоря по сердечнику тягова характеристика електромагніта не повинна значно перевищувати протидіючу. З метою зниження вібрацій від дотику якоря, магнітопровід електромагніта кріпиться на пружинах-амортизаторах. Як показали дослідження, у низьковольтних апаратах час вібрації контактів не перевищує 0,5–1 мс.

У процесі вмикання, в міру наближення рухомого контакту до нерухомого, зростає напруженість електричного поля між ними. При певній відстані між контактами відбудеться пробій міжконтактного зазору. У апаратах низької напруги пробій виникає при дуже малій відстані між контактами (соті частки міліметра). Електрична дуга при пробіі не виникає, тому що рухомий контакт продовжує рухатися і, замикаючи проміжок, припиняє розрядні процеси. Однак при пробіі електрони бомбардують контакт із позитивним потенціалом – анод, і його матеріал переходить на катод, відкладаючись на ньому у вигляді тонких голок. Знос контактів у результаті переносу матеріалу з одного контакту на інший і випаровування його у навколишній простір без зміни складу матеріалу, називається *фізичним зносом* або *ерозією*. Ерозія при замиканні контактів невелика, але при малих натисканнях і малих міжконтактних зазорах, вона може привести до їхнього зварювання.

У апаратах високої напруги при зближенні контактів пробій відбувається на великих відстанях. Виникаюча дуга горить відносно довго, при цьому можливо зварювання контактів, особливо при вмиканні на існуюче КЗ. За рахунок застосування великого числа послідовно з'єднаних розривів зменшується напруга, яка доводиться на розрив, що дає можливість знизити час попереднього пробію до 0,005 КЗ, і визнано безпечним для масляних вимикачів.

**Контакти у ввімкненому стані.** У цьому режимі варто розрізняти два випадки: через контакти проходить тривалий номінальний струм та струм КЗ.

У таблиці 4.1 наведені температури і падіння напруги в контакті для двох характерних точок – точки розм'якшення матеріалу  $\Theta_1$ ,  $U_{\text{конт}1}$  і точки плавлення матеріалу  $\Theta_2$ ,  $U_{\text{конт}2}$ . Для надійної роботи контактів необхідно, щоб при номінальному струмі  $I_{\text{ном}}$  падіння напруги на перехідному опорі  $R_{\text{конт}}$  було менше  $U_{\text{конт}1}$ :

$$I_{\text{ном}} R_{\text{конт}} = (0,5-0,8) U_{\text{конт}1}. \quad (4.1)$$

Ця формула використовується для розрахунку контактів на малі струми.

**Таблиця 4.1 – Температура та падіння напруги точок розм'якшення і плавлення матеріалу**

Матеріал	$\Theta_1, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{конт}1}, \text{В}$	$\Theta_2, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{конт}2}, \text{В}$
Алюміній	150	0,1	658	0,3
Сталь	500	0,21	1530	0,6
Нікель	520	0,22	1455	0,65
Мідь	190	0,12	1083	0,43
Срібло	150	0,09	960	0,35
Кадмій	–	–	321	0,15
Вольфрам	1000	0,4	3370	1,0
Олово	100	0,07	232	0,13
Платина	540	0,25	1773	0,7
Графіт	–	–	4700	5

Для одноточкових контактів на великі струми використовують формулу:

$$P_{\text{конт}} = I_{\text{ном}}^2 \frac{B_{\pi} HV}{16\lambda^2 (\arccos T_0 / T_k)^2}, \quad (4.2)$$

де  $P_{\text{конт}}$  – контактні зусилля, Н;  $I_{\text{ном}}$  – номінальний струм, А;  $B$  – число Лоренца;  $HV$  – твердість за Віккерсом, Н/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·°С);  $T_0$  – температура тіла контакту, К;  $T_k$  – температура точки дотику, К.

Для поширених матеріалів за температури 100 °С, число Лоренца змінюється у межах  $(2,33-2,49) \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{°С}^2$ . Твердість за Віккерсом близька до твердості за Брінеллем. Температуру можна розрахувати за формулою:

$$T_0 = \tau + \Theta_0 + 273 = \frac{I^2 \rho}{k_T pq} + \Theta_0 + 273, \quad (4.3)$$

де  $I$  – діюче значення струму, А;  $\rho$  – питомий опір матеріалу контактів, Ом·м;  $k_T$  – питомий коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $p$  – периметр перетину контакту, м;  $q$  – перетин контакту, м<sup>2</sup>;  $\Theta_0$  – температура навколишнього середовища, °С, звичайно  $\Theta_0 = 40$  °С.

При розрахунках електродинамічної стійкості контактів використовується експериментальна формула:

$$i \leq k_2 \sqrt{P_{\text{кон}}}, \quad (4.4)$$

де  $i$  – струм електродинамічної стійкості (амплітуда ударного струму), А;  $P_{\text{конт}}$  – контактне натискання, Н.



Значення коефіцієнта  $k_2$  наведені у таблиці 4.2.

**Таблиця 4.2 – Коефіцієнт  $k_2$  для розрахунку динамічної стійкості контактів**

Тип контакту	Матеріал	$k_2, A/H^{1/2}$
Щітковий	Мідь – латунь	950–1270
Пальцевий, що не самовстановлюється	Мідь – мідь	1300
	Латунь – мідь	1200
	Латунь – сталь	1520
	Латунь – латунь	1600
Пальцевий, що самовстановлюється	Мідь – латунь	1820
Розетковий (на один елемент розетки)	Мідь – латунь	1740
	Мідь – мідь	1900

**Вимкнення ланцюга.** У процесі розмикання контактів контактне натискання зменшується, перехідний опір зростає, і за рахунок цього зростає температура точок дотику. У момент роз'єднання контакти нагріваються до температури плавлення і між ними виникає місток із рідкого металу. При подальшому русі контактів місток обривається, і залежно від параметрів, що відключають ланцюг, виникає дуговий або гліючий розряд (табл. 4.3).

**Таблиця 4.3 – Мінімальні значення напруги і струму, необхідні для підтримки дугового розряду**

Матеріал контакту	$U_0, B$	$I_0, A$	Матеріал контакту	$U_0, B$	$I_0, A$
Платина	17	0,9	Вольфрам	17,0	0,9
Золото	15	0,38	Мідь	12,3	0,43
Срібло	12	0,4	Вугілля	18–22	0,03

Висока температура приводить до інтенсивного окиснювання і розпилення матеріалу контактів у навколишньому просторі, переносу матеріалу з одного електрода на інший і утворенню плівок. Все це тягне за собою знос контактів. Знос, пов'язаний з окиснюванням і утворенням на електродах плівок хімічних сполук матеріалу контактів із середовищем, називається **хімічним зносом** або **корозією**.

Перенос матеріалу з одного електрода на інший найбільш шкідливий при постійному струмі. Напрямок переносу у цьому випадку постійний, що веде до швидкого виходу з ладу контактів. Перенос матеріалу з анода на катод називається **позитивною ерозією**, перенос у зворотному напрямі – **негативною ерозією**. Мірою ерозії є втрата маси або об'єму контакту. Напрямок ерозії і форма зносу контактних поверхонь залежить від виду розряду і значення струму.

Для існування дугового розряду необхідно, щоб значення напруги і струму перевищували мінімальні значення  $U_0$  та  $I_0$ , наведені у

таблиці 4.3. Якщо  $I < I_0$ , то при нарузі ланцюга 270–330 В виникає гліючий розряд або іскра.

При  $I \leq 5$  А термін експлуатації контактів:

$$N = 0,6V_0\gamma(\gamma_{\text{конт}}q_0),$$

де  $N$  – число допустимих відключень, що може витримати контакт;  $V_0$  – об'єму контакту, призначений на знос, м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{\text{конт}}$  – емпіричний коефіцієнт зносу, кг/Кл;  $q_0$  – кількість струму, що протікає через міжконтактний проміжок за одне вимкнення, Кл.

Значення коефіцієнта  $\gamma_{\text{конт}}$ , 10<sup>-9</sup> кг/Кл, наведені у таблиці 4.4.

**Таблиця 4.4**

Срібло	3,6–10	Мідь	6
Золото	15	Срібло – нікель	20
Вольфрам	1,5	Срібло – золото	15
Платина	5,5	Платина – іридій	9

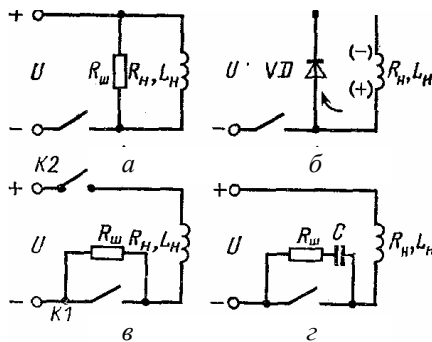
Для боротьби з ерозією контактів на струми від 1 до 600 А:

а) скорочується тривалість горіння дуги за допомогою дугогасних пристроїв;

б) усуваються вібрації контактів при вмиканні;

в) застосовуються дугостійкі матеріали контактів.

Для контактів, на струм від частки ампера до декількох ампер, застосовуються схемні методи зменшення ерозії, приклади яких наведені на рис. 4.3.



**Рис. 4.3 – Схеми для зменшення зносу контактів**

У схемі (див. рис.4.3, а) навантаження  $R_H$ ,  $L_H$  шунтовані резистором  $R_{III}$ . Нехай вимкнення відбувся миттєво і струм у навантаженні  $I_H$  не змінився після цього. Тоді цей струм протікає через резистор  $R_{III}$  і вся електромагнітна енергія  $LI_H^2/2$  переходить у теплову, що виділяється в опорі навантаження  $R_H$  і резисторі  $R_{III}$ . Залежно від опору резистора  $R_{III}$  розряд між контактами може бути тліючим або дуговим. Тліючий розряд відсутній при  $R_{III} \leq \left(\frac{300}{U} - 1\right)R_H$  :

$$R_{III} = \frac{U - U_0}{I_0 - \frac{U}{R}}$$

де  $U_0$  і  $I_0$  беруться з таблиці 4.3.

Наявність резистора  $R_{III}$  збільшує струмове навантаження контактів, що є недоліком схеми. Схема на рис. 4.3, б позбавлена цього недоліку. У цій схемі контакти навантажуються тільки струмом  $U/R_H$  і зворотним струмом діода  $VD$ . При вмиканні ланцюга через діод  $VD$  протікає тільки невеликий зворотний струм. При вимиканні потік у магнітного ланцюга навантаження починає спадати і на ній з'являється

ЕДЗ самоіндукції  $e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}$ . Для цієї полярності діод  $VD$  відкритий і замикає навантаження. Вся електромагнітна енергія навантаження виділяється в опорі  $R_H$  і прямому опорі діода.

У схемі (див. рис. 4.3, в) контактний проміжок шунтується резистором  $R_{III}$ , що полегшує гасіння дуги і зменшує знос контактів. У цій схемі для повного вимкнення ланцюга необхідний додатковий контакт  $K2$ , що розриває ланцюг після вимкнення контакту  $K1$ . Чим менший опір резистора  $R_{III}$ , тим швидше гасне дуга, при цьому контакт  $K2$  навантажуються великим струмом.

У схемі (див. рис. 4.3, д) контакт шунтований ланцюгом  $R_{III}C$ . Нехай спочатку  $R_{III} = 0$ . Наявність конденсатора  $C$  зменшує струм, що пропікає через контактний проміжок. Струм у конденсаторі  $i_c = Cdu/dt$ , де  $u$  – напруга на контактах. Наявність конденсатора також знижує швидкість наростання напруги на контактах. Все це полегшує процес вимкнення.

При замиканні ланцюга можлива сильна ерозія за рахунок енергії розряду конденсатора. Для обмеження струму розряду слугує резистор  $R_{III}$ . Полегшення режиму роботи контактів здійснюється їх

шунтуванням ланцюгом  $RC$ . Вибір параметрів ланцюга робиться за допомогою номограми (рис. 4.4).

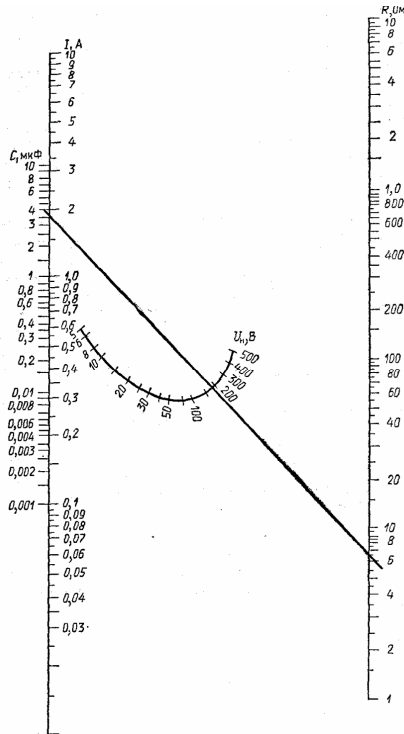


Рис. 4.4 – До розрахунку конденсатора та резистора, що шунтують контакти

За струмом і напругою на навантаженні  $I$  і  $U_H$  знаходимо ємність конденсатора, що шунтує  $C$ , провівши пряму через точки з координатами  $I$  та  $U_H$ . Ця пряма на осі  $R$  показує опір резистора.

Приклад розрахунку: при  $V = 200$  В;  $I = 2$  А. Знаходимо  $R = 6,5$  Ом та  $C = 3,5$  мкФ.

### Завдання

Контакти утворені двома торцями мідних циліндрів із діаметром  $d = 0,03$  м. Визначити контактне натискання при тривалому струмі  $I_{НОМ}$  та струмі КЗ. Температура навколишнього середовища  $\Theta_0$ .

Визначити час спрацювання на стенді (рис. 4.5).



Рис. 4.5 – Стенд для демонстрації роботи реле

Дані для розрахунку взяти з таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Дані для розрахунку стійкості шин

Параметр	Матеріал	$D$ , м	$I_{ном}$ , А	КЗ, $10^3$ А	$\Theta_0$ , °С
Приклад	Мідь	0,03	1000	30	40
Розрахункові	З табл. 4.1 за ОЦ	0,01·ПОЦ	ОЦ·ПОЦ·100	ПЦ·ОЦ	ОЦПЦ

#### Хід виконання

Необхідне контактне натискання,  $H$ , якщо виходити з тривалого режиму роботи, за (4.2) становить:

$$P_{кон} = I_{ном}^2 \frac{B_{\pi} HV}{16\lambda^2 \left( \arccos \frac{T_0}{T_k} \right)^2},$$

де  $I_{ном} = 1000$  А; теплопровідність міді  $\lambda = 3,9 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·°С);  
 $B = 2,42 \cdot 10^{-8}$  (В/°С)<sup>2</sup>;  $HV$  – твердість за Віккерсом ( $37 \cdot 10^7$  Па);  
 $k_T = 12$  Вт/м<sup>2</sup>·°С.

Температуру тіла контакту знайдемо за формулою:

$$T_0 = \tau + \Theta_0 + 273 = \frac{I^2 \rho}{k_T pq} + \Theta_0 + 273;$$

$$\rho = \rho_0(1 + a\Theta_T) = 1,55 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 70) = 1,99 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$p = \pi d = 3,14 \cdot 0,03 = 9,45 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$T_0 = \frac{1000^2 \cdot 1,99 \cdot 10^{-8}}{12 \cdot 3,45 \cdot 7,07 \cdot 10^{-6}} + 40 + 273 = 338 \text{ К.}$$

Так як  $T_K - T_0 = 5 - 10 \text{ К.}$

$$P = \frac{1000^2 \cdot 2,42 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 37 \cdot 10^7}{16 \cdot 3,9^2 \cdot 10^4 \left( \arccos \frac{338}{348} \right)^2} = 382 \text{ Н.}$$

Необхідне контактне натискання з урахуванням струму КЗ відпо-  
відно до (4.4)  $P \geq i_{II}^2 / k_2^2$ ,  $i_{II} = 1,8\sqrt{2} \cdot 30 \cdot 10^3 = 76,5 \cdot 10^3 \text{ А.}$

Торцевий контакт, утворений дотиком торців двох стрижнів,  
може розглядатися як пальцевий контакт, що не самовстановлюється.

Відповідно до таблиці 4.2,  $k_2 = 1300$ , отже,

$$P \geq \frac{5820 \cdot 10^6}{169 \cdot 10^4} = 3340 \text{ Н.}$$

Таким чином, ця система при контактному натисканні  
 $382 < 3340 \text{ Н}$  нестійка при КЗ. Якщо за конструктивними розуміннями  
контактне натискання не можна збільшити до  $3440 \text{ Н}$ , те треба або пе-  
реходити на розеткову або багатопальцеву контактну систему, або за-  
мінити мідь на металокераміку. Так, при використанні металокераміки  
КМК-Б21 зусилля  $510 \text{ Н}$  досить при ударному струмі  $76,6 \text{ кА.}$

### **Протокол роботи**

Протокол роботи включає в себе теоретичні відомості, рисун-  
ки, данні та формули для розрахунків, висновок.

### **Контрольні питання**

1. Що таке ерозія?
2. Що таке провал контактів?
3. Як впливає вібрація на роботу контактів?
4. Які засоби боротьби з вібрацією є?
5. Як впливає контактне натискання на роботу контактів?

## *Лабораторна робота 5.* **Дослідження роботи реле часу**

---

**Мета:** ознайомлення з структурою та принципом діє реле часу.

### **Теоретичні відомості**

У схемах захисту та автоматики часто необхідна витримка часу між спрацюваннями двох, або декількох апаратів. При автоматизації технологічних процесів також може виникнути необхідність в часовій затримці. Для цього вокиростовують реле часу.

Загальними вимогами до реле часу є: 1) стабільність витримки часу при коливаннях напруги, частоти живлення, температури навколишнього середовища, тощо; 2) малі потужність, вага, габарити.

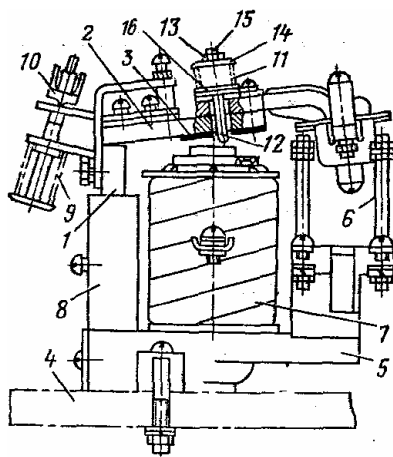
Повертання реле у початкове положення як правило відбувається при його обезструмуванні.

Для реле, що призначені для керування електроприводом зносостійкість складає  $(5-10) \cdot 10^6$  спрацювань, витримка часу в межах 0,25–10 с.

Для реле, що призначені для захисту енергосистем зносостійкість складає до  $(5-10) \cdot 10^3$  спрацювань, витримка часу в межах 0,1–20 с.

Для реле, що призначені для автоматизації техпроцесів витримка часу в межах від кількох хвилин до декількох годин.

**Реле часу з електромагнітним уповільненням.** Пристрій дії реле і вплив різних чинників на його роботу. Конструкція реле з таким уповільненням типу РЕВ-800 зображена на рис. 5.1.



**Рис. 5.1** – Реле часу з електромагнітним уповільненням

Ця конструкція містить П-образний магнітопровід 1 і яркір 2 із немагнітною прокладкою 3. Магнітопровід розміщується на плиті 4 за допомогою литого алюмінієвого цоколя 5, на якому встановлюється контактна система 6.

На магнітопроводі встановлена намагнічувальна обмотка 7 і короткозамкнена обмотка у вигляді овальної гільзи 8. Зусилля поворотної пружини 9 змінюється за допомогою регулювальної гайки 10, що фіксується шплінтом.

Для одержання великої витримки часу при відпусканні, необхідна висока магнітна провідність робочого і зайвого зазорів у замкнутому стані магнітної системи. З цією ціллю всі дотичні деталі магнітопровода і яроря ретельно шліфуються. Литий алюмінієвий цоколь створює додатковий короткозамкнений виток, що збільшує витримку часу.

У реальних магнітних матеріалів після вимкнення обмотки, що намагнічує, потік спадає до  $\Phi_{eio}$ , що визначається властивостями матеріалу магнітопроводу, геометричними розмірами магнітного ланцюга і магнітної провідності робочого зазору. Чим менше коерцитивна сила магнітного матеріалу при заданих розмірах магнітного ланцюга і магнітної провідності робочого зазору, тим нижче залишкова індукція, а отже, і залишковий потік. При цьому зростає найбільша витримка часу, що може бути отримана від реле. Застосування сталі з низьким значенням  $H_c$  дозволяє збільшити витримку часу.

Витримка часу при відпусканні для насиченої магнітної системи з короткозамкненим витком або обмоткою може бути знайдена за допомогою формули:

$$t = -\frac{\omega^2}{R} \int_{\Phi_0}^{\Phi_{eio}} \frac{d\Phi}{i\omega} = \frac{\omega^2}{R} \int_{\Phi_{eio}}^{\Phi_0} \frac{d\Phi}{i\omega} \quad \text{або} \quad t = \frac{\omega^2}{R} \int_{\Phi_{eio}}^{\Phi_0} \frac{d\Phi}{i\omega}, \quad (5.1)$$

де  $\omega$  – число витків короткозамкненої обмотки;  $R$  – її опір;  $\Phi_{eio}$  – значення магнітного потоку, при якому відбувається відпускання яроря;  $\Phi_0$  – значення магнітного потоку, що встановились, у магнітопроводі при включеній намагнічувальній обмотці;  $i$  – струм у короткозамкненій обмотці;  $i\omega$  – магнітно-динамічне зусилля (МДЗ) первинної обмотки.

Можна сказати, що для одержання великої витримки часу, матеріал магнітопроводу повинний мати високу магнітну проникність на його ненасиченому участку кривої намагнічування.

**Схеми вмикання реле.** Час спрацьовування реле з електромагнітним уповільненням дуже малий, тому, що постійна часу мала через великий початковий робочий зазор, і зрушення реле відбувається при



малому значенні МДЗ обмотки. МДЗ зрушення значно менше при  $I$  яке має сталі значення. Цей час складає 0,05–0,2 с при наявності короткозамкненого витка і 0,02–0,05 с при його відсутності. Таким чином, можливості електромагнітного уповільнення при спрацьовуванні дуже обмежані. Тому використовуються спеціальні схеми включення електромагнітних реле (рис. 5.2).

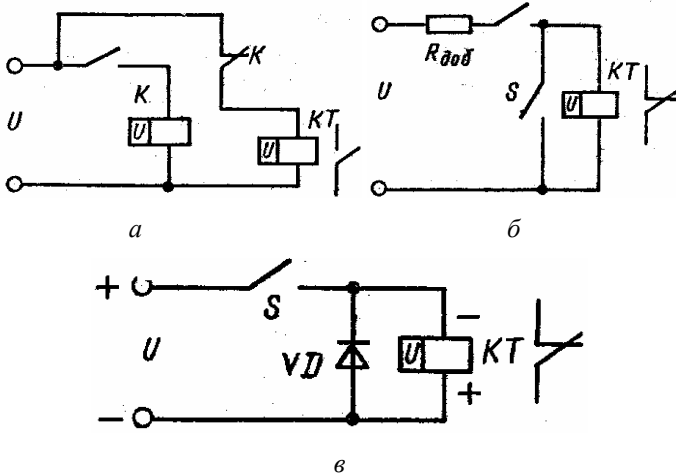


Рис. 5.2 – Схеми вмикання реле з витримкою часу

Якщо необхідна велика витримка часу при замиканні контактів, то доцільна схема з проміжним реле  $K$  (рис. 5.2, а). Обмотка реле часу  $KT$  увесь час підключена до напруги через контакт, що розмикає, реле  $K$ . При подачі напруги на обмотку  $K$ , останнє розмикає свій контакт і знеструмлює реле  $KT$ . Якір  $KT$  відходить, і його контакти, що розмикають, спрацьовують із необхідною витримкою часу, який має обумовлений час спрацьовування реле  $K$  і час відпускання реле  $KT$ . У схемі рис. 5.2, б роль короткозамкненого витка відіграє сама намагнічувана обмотка, що живиться через резистор  $R_{об}$ . Напруга, прикладена до обмотки, повинна бути достатньою для насичення магнітного ланцюга при притягнутому якорі. При замиканні керуючого контакту  $S$  обмотка реле закорочується і забезпечується повільний спад потоку в магнітному ланцюзі. Відсутність спеціальної короткозамкненої обмотки, дозволяє весь магнітопровід зайняти намагнічуваною обмоткою і створити великий запас з МДЗ. При цьому витримка часу незмінна при зниженні напруги, що живить обмотку до  $0,5 U_{ном}$ . Така схема широко застосовується в електроприводі. Об-

мотка реле вмикається паралельно до пускового реостата в ланцюзі якоря. При закорочуванні, обмотка реле замикається, а її контакти з витримкою часу вмикають контактор, що шунтує наступний рівень пускового реостата.

Застосування напівпровідникового вентиля також дозволяє використовувати реле без короткозамкненого витка (див. рис. 5.2, в). При вмиканні обмотки струм дорівнює нулю. При відключенні керуючого контакту  $S$ , потік у магнітному ланцюзі спадає, а в обмотці наводиться ЕДЗ із полярністю, зазначеною на рис. 5.2, в. При цьому через вентиль протікає струм, обумовлений цим ЕДЗ, активним опором обмотки і вентиля з індуктивністю обмотки.

Для того щоб прямий опір вентиля не приводив до зменшення витримки часу (зростає активний опір короткозамкненого ланцюга), він повинен бути на один-два порядки нижче опору обмотки.

При будь-яких схемах обмотки реле живляться від джерела постійного або змінного струму з мостовою схемою випрямлення.

**Регулювання витримки часу.** Час спрацювання реле можна плавно регулювати за допомогою пружини 9 (див. рис. 5.1). З збільшенням стиску цієї пружини збільшується електромагнітне зусилля, необхідне для зрушення якоря та обумовлене потоком у магнітному ланцюзі. При більшому стиску пружини потік зрушення зростає. Отже, зростає час зрушення. При розімкнутому магнітному ланцюзі постійна часу обмотки мала і максимальна витримка часу також незначна (біля 0,2 с). Витримка часу значно збільшується, якщо потік зрушення близький до значення, що встановились. Однак у цьому випадку реле працює на пологій частині кривої  $\Phi$ , що викликає великі похибки часу спрацювання.

Для одержання більшої витримки часу, необхідно використовувати відпускання якоря. Регулювання витримки реле при відпусканні можуть виконуватись плавно і ступінчато (грубо).

Плавне регулювання витримки часу виконується зміною зусилля пружини 11 (див. рис. 5.1). Ця пружина верхнім кінцем упирається в шайбу 14, що утримується шпилькою 15, укрученої в якір реле. Нижній кінець пружини за допомогою спеціальної пластини 16 передає силу через два латунних штифти 12, що можуть вільно переміщатися в отворах якоря. Осі латунних штифтів 12 зміщені щодо осі пружини. У притягнутому положенні якір 2 штифти 12 переміщуються нагору і пружина 11 додатково стискується. Пружина 11 створює основну силу, що відриває якір від сердечника. Початковий стиск пружини змінюється за допомогою гайки 13. З збільшенням сили пружини 11 електромагнітне зусилля, при якому відбувається відрив якоря, збільшується і зростає потік відпускання  $\Phi_{від}$ . При цьому час відпускання зменшу-

ється (рис. 5.3). Чим менше сила пружини, тим більше витримка часу. Слід зазначити, що при  $\Phi_{від}$ , близькому до  $\Phi_{кр}$ , якір реле взагалі може не відпадати від сердечника.

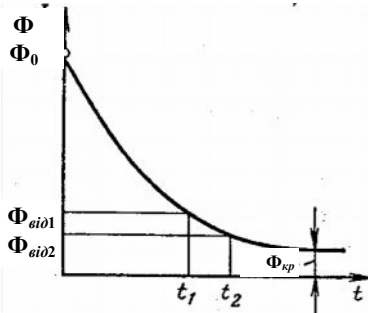


Рис. 5.3 – Регулювання часу відпускання за допомогою пружини

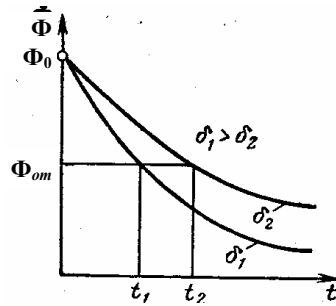


Рис. 5.4 - Регулювання часу відпускання зміною немагнітного зазору

Поворотна пружина 9 регулюється так, щоб забезпечити необхідне натискання контактів, які розмикають реле і забезпечує чітке повернення якоря в положення після того як він відірветься від сердечника (див. рис. 5.1). Грубе регулювання витримки часу здійснюється зміною товщини немагнітної прокладки 6. Оскільки при притягнутому якорі магнітний ланцюг насичений, товщина немагнітної прокладки не впливає на сталий потік. Із зменшенням товщини прокладки  $\delta_2 < \delta_1$  зростає індуктивність котушки при ненасиченому магнітопроводі та зменшується швидкість спадання магнітного потоку. У результаті при незмінному зусиллі пружини 11 (див. рис. 5.1) витримка часу збільшується (рис. 5.4). Товщину немагнітної прокладки не рекомендується брати менше 0,1 мм. У зворотному випадку при повторно-короткочасному режимі роботи, якір розклепує немагнітну прокладку і товщина її зменшується, що веде до зміни витримки часу. При товщині прокладки  $\delta \geq 0,1$  мм, цим явищем можна зневажити.

Слід зазначити, що електромеханічні реле часу досить прості за конструкцією і володіють великою удар-, вібро- і зносостійкістю. Допустиме число вмикань досягає 600 у годину. Вони можуть використовуватися в схемах автоматики та електроприводах як реле струму, напруги і проміжні. Коефіцієнт повернення їх низький і складає 0,1–0,3. Короткозамкнені витки створюють електромагнітне уповільнення як при сисканні, так і при відпусканні якоря. Тому струмові реле з короткозамкненим витком не реагують на короткочасні перевантаження. При короткочасних перевантаженнях МДС обмотки пропорційна цим перевантаженням.

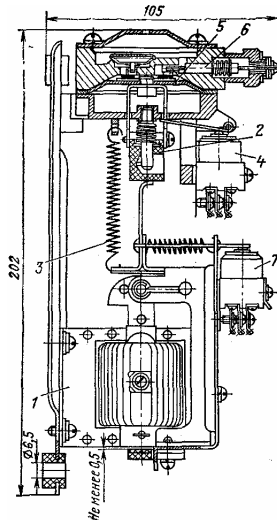
Потік у магнітопроводі наростає з постійною часу  $T_k$ , обумовленою параметрами короткозамкненого витка  $L_k/R_k$ . Якщо перевантаження краткочасне і його тривалість  $t_{пер} < t_{сер}$ , то потік до моменту  $t_{пер}$  не досягає значення потоку спрацювання (якір залишається нерухомим). Якщо  $t_{пер} > t_{сер}$ , то реле спрацює. Таким чином, запобігається вимкнення навантаження (двигуна) при великих, але короткочасних струмових перевантаженнях, які небезпечні для двигуна.

Промисловістю випускаються численні модифікації реле з електромагнітним уповільненням і витримкою часу при відпусканні 0,3–5 с. Сучасні реле мають один або два уніфіковані контактні вузли. Кожний вузол має один замикаючий і один розмикаючий контакти з загальною точкою. Постійний струм умикання контактів складає 10 А при напрузі 110 В і 5 А при – 220 В. Струм вимкнення для індуктивного навантаження (катушка реле, контакторів) складає 0,2 а для активного – 0,5 А.

***Реле з пневматичним уповільненням і анкерним механізмом.***

У таких реле електромагніт постійного або перемінного струму впливає на контактну систему через пристрій, що сповільнює, у вигляді пневматичного демпфера або годинникового (анкерного) механізму. Витримка часу змінюється при регулюванні цього пристрою. Перевагою такого реле є можливість живлення як перемінним, так і постійним струмом і незалежність від напруги і частоти живлення, температури.

Пневматичне реле РЧП, показано на рис. 5.5.



**Рис. 5.5 – Реле часу з пневматичним уповільненням**

При спрацьовуванні електромагніта 1, стрижень 2 під дією пружини опускається і впливає на мікроперемикач 4. Стрижень 2 пов'язаний з гумовою діафрагмою 5 пневматичного уповільнювача. Швидкість руху стрижня визначається перетином отвору, через який засмоктується повітря у верхню порожнину уповільнювача. Витримка часу регулюється голкою 6, що змінює перетин цього отвору. Контактна система 7 спрацьовує без витримки часу.

Реле з пневматичним уповільненням дозволяє регулювати витримку часу в діапазоні від 0,4 до 180 с, із точністю  $\pm 10\%$ . Контактна система мікроперемикача допускає тривалий струм – 3 А, струм вимкнення – 0,21 А при змінній напрузі – 380 В.

В уповільнювачах у вигляді анкерного механізму, є пружина, що приводиться у дію електромагнітом. Контакти реле починають рухатися лише після того, як пов'язаний із ними анкерний механізм відрухає визначений час.

Витримка часу у цих реле регулюється в межах від 7 до 17 с із точністю  $\pm 10\%$ . У реле є нерегульовані контакти, що пов'язані з якорем електромагніта і використовуються в ланцюгах, що не вимагають витримки часу. Реле надійно працюють при напрузі живлення до  $0,85U_{ном}$ , тому, що зносостійкість анкерного механізму складає усього 15000 спрацювань. Такі реле не застосовуються при частих вмиканнях.

**Моторні реле.** Для створення витримки часу 20–30 хв використовуються так називані моторні реле часу, до складу яких входить електродвигун із заданою частотою обертання. Промисловістю випускаються великі серії цих реле на витримки часу від 1 с до 26 хв, та з різним виконанням контактів. На рис. 5.6 показано конструкцію моторного реле.

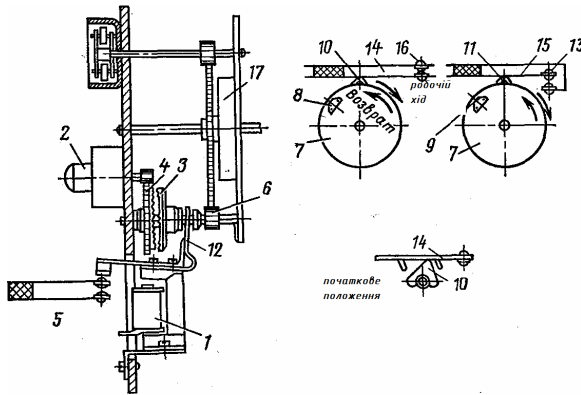


Рис. 5.6 – Моторне реле часу

Для пуску реле подається напруга на електромагніт 1 і двигун 2. За допомогою важеля 12 електромагніт без витримки часу вмикає муфти 3, 4 і замикає вихідний контакт 5. Через муфту і зубчасту передачу 6 двигун починає обертати диски 7 із кулачками 8 і 9, що впливають на проміжні кулачки 10 та 11 і вихідні контакти 16 і 13. При контакті кулачків 8 і 10 останній повертається проти годинникової стрілки і дає можливість контактній пластині 14 опуститися вниз під дією сили пружності. При цьому контакт 16 розмикається. При контакті кулачків 9 і 11 останній повертається і звільняє пластину 15, що викликає замикання контакту 13. Витримка часу роботи контактів 16 і 13 регулюється шляхом зміни початкового положення дисків 7. При знятті напруги з реле диски 7 повертаються в початкове положення за допомогою спіральної поворотної пружини 17.

Точність роботи реле  $\pm 5$  с. Реле дозволяє встановлювати різну витримку часу в п'ятьох незалежних ланцюгах. Вихідні контакти реле допускають струм – 10 А і при змінному струмі можуть відключати навантаження потужністю – 800 Вт. А при тому ж індуктивному навантаженні та постійному струмі і напрузі – 220 В відключають – 100 Вт. Допустимі коливання напруги складають 0,9–1,12 В, зносостійкість не менше 1000 циклів, час повернення не більше 1 с.

### Завдання

Провести методику оцінювання реле на стенді (рис. 5.7).



Рис. 5.7 – Загальний вигляд стенда з електромагнітними реле часу

Як при новому ввімкненні, так і при планових перевірках контроль технічного стану реле здійснюється в наступному обсязі:

- зовнішній огляд;
- перевірка і регулювання механічної частини і контактів реле;
- перевірка стану ізоляції реле;
- перевірка і регулювання електричних характеристик реле.

1. Зовнішній огляд проводиться перед розпакуванням реле.

При цьому перевіряють справність кожуха реле, а також надійність ущільнень, що забезпечують пило- і вологонепроникність. Всі контактні виводи не повинні мати ознак окиснення, наконечники проводів повинні бути надійно пропаяні, а гайки туго затягнуті.

2. Перевірка механічної частини реле:

а) контролюється щільність шихтування сталі магнітопроводів і стан поверхні полюсів електромагніта. Зазор між полюсами і диском не повинен перевищувати 0,3 мм з кожної сторони і має залишатися незмінним при повороті диска на повний оберт;

б) визначається стан обмотки реле і всіх струсопідводів. Ізоляція їх не повинна мати механічних пошкоджень, слідів нагару і т.п.;

в) перевіряється правильність кріплення постійного магніту.

При правильному його положенні край диска не повинен виступати з-під зовнішньої грані його полюса;

г) перевіряється наявність і величини люфту осей. Вільний хід у вертикальному напрямі рамки не повинен перевищувати 1 мм і 0,5 мм у диска. Вільний хід в осьовому напрямі у якоря повинен бути в межах 0,1–0,2 мм, а у сектора не більше за 0,5 мм. При повороті рамки від руки, сектор повинен входити в зачеплення з черв'яком при будь-якому положенні покажчика витримки часу. Якір відсікання повинен повертатися без тертя і мати осьовий люфт 0,1–0,2 мм;

д) перевіряється стан регулювальних гвинтів. Гвинти повинні вільно і без перекосу обертатися у своїх гніздах.

### **Хід виконання**

1. Вивчити принцип дії, конструкцію і технічні характеристики реле, зафіксувати паспортні дані.

2. Зробити зовнішній огляд реле.

3. Перевірити і відрегулювати механічну частину реле і контакти, перевірити величину струму початку обертання диска.

4. Зібравши відповідні випробувальні схеми, перевірити:

– електричні характеристики реле;

– струм спрацювання електромагнітного елемента при десятикратному струмі;

– струм спрацювання і повернення індукційного елемента;  
– коефіцієнт повернення індукційного елемента;  
– струмочасову характеристику індукційного елемента і реле загалом.

5. Випробувати роботу реле на стенді.
6. Скласти протокол перевірки технічних характеристик реле.
7. Оформити звіт з лабораторної роботи.

### **Протокол роботи**

Протокол роботи включає в себе теоретичні відомості, рисунки, данні та формули для розрахунків, висновок.

### **Контрольні питання**

1. Мета короткозамкнених витків на полюсах магнітної системи.
2. Наведіть формулу обертального моменту для реле типу РТ-80.
3. Чим забезпечується сталість швидкості обертання диска при незмінній величині струму в обмотці?
4. За рахунок чого в реле РТ-80 забезпечується зсув магнітних потоків у просторі?
5. Яку величину називають струмом спрацювання індукційного елемента?
6. За допомогою якого елемента і за рахунок чого можна регулювати струм відсікання?
7. Чому для забезпечення роботи індукційного елемента необхідно не менше двох магнітних потоків, які зсунуті у просторі?
8. Для чого в конструкції реле застосовано постійний магніт?
9. Які елементи конструкції реле впливають на величину коефіцієнта повернення індукційної частини?
10. Наведіть перелік операцій з контролю технічного стану реле РТ-80.
11. Яку величину називають коефіцієнтом повернення реле РТ-80?

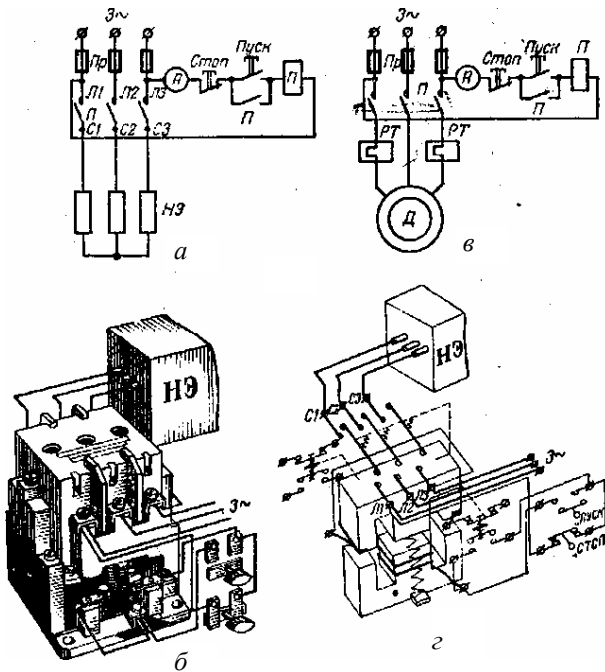


## Лабораторна робота 6. Дослідження структури магнітних пускачів та схеми їх вмикання

**Мета:** ознайомитися з конструкціями магнітних пускачів, вивчити схеми вмикання різних електричних апаратів.

### Теоретичні відомості

На рис. 6.1, зображена схема вмикання нагрівальних елементів електротеплового апарата магнітним пускачем.



**Рис. 6.1 – Схема вмикання магнітним пускачем нагрівальних елементів (а, в, з) та двигуна (б)**

Проводи від клем запобіжників лабораторного щита підведені до клем Л1, Л2, Л3 магнітного пускача. Від клем С1, С2, С3 пускача проводи відведені до нагрівальних елементів, що можуть бути включені у «трикутник» або «зірку» залежно від напруги мережі. Так, при напрузі мережі 220 В вони включаються у «трикутник», 380 В – у «зірку».

Якщо електротепловий апарат має дві секції, то вони включаються паралельно, послідовно або у відкритий «трикутник». При відкритому «трикутнику» два проводи від пускача приєднуються до початків двох секцій, третій – до їхніх кінців.

Струм нагрівальними елементами може проходити тільки при замкнених головних контактах *П*. Щоб контакти замкнулися, потрібно включити обмотку магнітного пускача. Обмотку приєднують до однієї з клем *Л* (*Л1*) і до клемі допоміжного (блокувального) замикаючого контакту *П*. До іншої клемі *Л* (*Л3*) приєднують кнопки «Стоп» і «Пуск», з'єднані послідовно. З'єднують їх також і з клемою допоміжного контакту, до якої приєднана обмотка *П*. При натисканні кнопки «Пуск» ланцюг обмотки магнітного пускача замикається, але після відпускання кнопки знову розривається. Щоб ланцюг залишився замкнутим, потрібно з'єднати проводом другу клему допоміжного контакту *П* із клемою кнопки «Пуск», що з'єднана з клемою кнопки «Стоп». Після натискання на кнопку «Пуск» замикається ланцюг обмотки *П*, якір підтягується і контакти (головні і допоміжні) замикаються. Струм обмоткою пускача проходить через контакт кнопки «Пуск» або через допоміжний контакт. Після розмикання контакту кнопки «Пуск» струм проходить через допоміжний контакт, вимикання виконується натисканням на кнопку «Стоп».

Амперметр, що знаходиться в ланцюзі керування, призначений для вимірювання струму обмотки.

На рис. 6.1, б зображена схема вмикання електродвигуна магнітним пускачем. Від попередньої вона відрізняється типом електричного приймача і наявністю теплового реле захисту *РТ*. Нагрівальні елементи теплового реле включені послідовно і реагують на зміну величини струму двигуна. При збільшенні струму двигуна в нагрівальному елементі реле виділяє значну кількість тепла і біметалічна пластина нагрівшись до великої температури, діє на контакти *РТ*. При перевантаженнях двигуна й обриву одного з проводів, контакт теплового реле розмикається. Час спрацьовування реле залежить від ступеня перевантаження. Контакт теплового реле *РТ* увімкнений у ланцюг обмотки *П*. При цьому спрацьовуванні реле його контакт вимикає обмотку *П*. Контакти пускача розмикаються і вимикають двигун.

### Хід роботи

Ознайомтеся з маркуванням магнітного пускача. Розшифруйте маркування і прочитайте схему його підключення (див. рис. 6.2). Подайте навантаження на вал двигуна і зніміть вольт-амперні характеристики на стенді (див. рис. 6.3).

Навантаження 1, 3 і 5 кг.

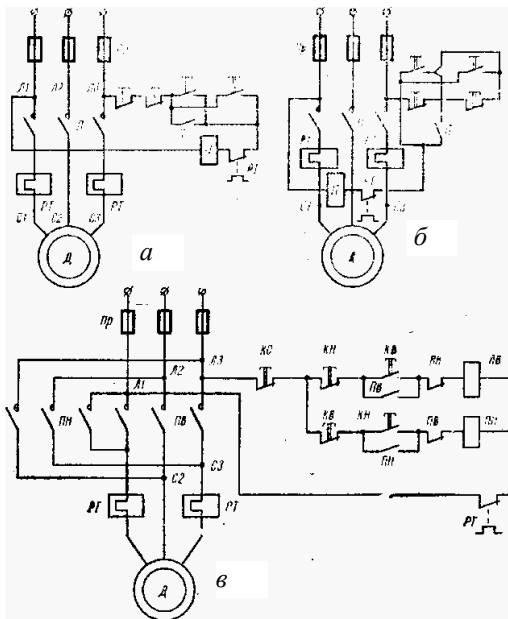


Рис. 6.2 – Схема вмикання двигуна: а, б – магнітним пускачем з двох місць; в – реверсивним магнітним пускачем



Рис. 6.3 – Схема навантаження та положення стенда при дослідженнях

## Оформлення звіту

Звіт повинний містити: ціль роботи; схеми зображені на рис. 6.1 та 6.2 з їх описом; схему навантаження електродвигуна та результати його досліджень. Висновки.

## Контрольні питання

1. Чи можна включити електроприлад пускачем з обмоткою при напрузі мережі – 380 В?
2. Чи можна кнопку станцію (кнопки «Пуск» і «Стоп») замінити однополюсним вимикачем або штепсельним розніманням? Чому застосування кнопки «Пуск» і «Стоп» у механічному устаткуванні обов'язково, а в тепловому – ні?
3. Що відбудеться, якщо поміняти місцями проводи, що з'єднують кнопки «Пуск» із клемми блокувального контакту?
4. Чому в схемі вмикання двигуна застосовуються і теплові реле захисту і плавкі запобіжники?
5. На чому відобразиться розрив короткозамкненого витка в магнітопроводу електромагніта змінного струму?
6. Де шукати несправності, якщо при натисканні на кнопку «Пуск» пускач не спрацьовує?
7. Чим досягається зменшення обгорання контактів?
8. У чому несправність, якщо при натисканні на кнопку «Пуск» двигун вмикається, а після припинення натискання – вимикається?
9. Від чого залежить перегрів обмотки магнітного пускача?
10. Чи залежить нагрів обмотки реле та пускача постійного струму від наявності магнітопроводу?

## *Лабораторна робота 7.* **Дослідження конструкції низьковольтних контактних комутаційних апаратів**

---

**Мета:** вивчити принцип дії та елементи конструкції найбільш розповсюджених контактних комутаційних апаратів та електричні схеми їх увімкнення.

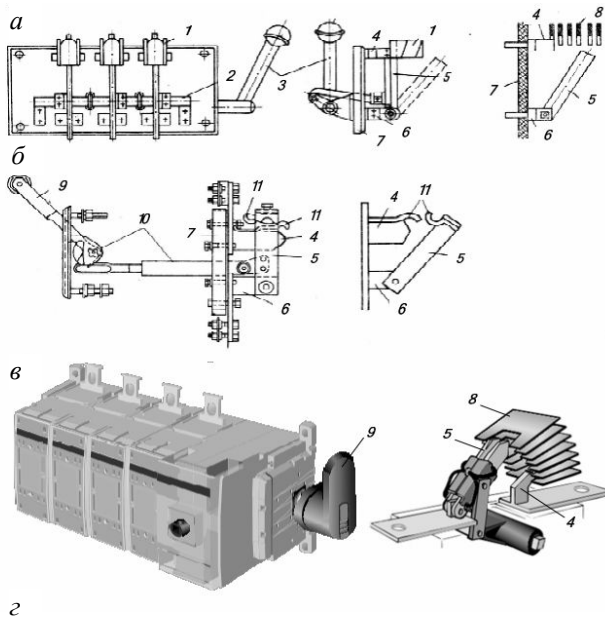
### **Теоретичні відомості**

Комутаційна апаратура є невід'ємною частиною у всіх електричних силових ланцюгах і ланцюгах керування різних систем та пристроїв. Для комутації силових ланцюгів напругою до 1000 В широко використовуються рубильники, пакетні вимикачі (перемикачі), автоматичні вимикачі, контактори, силові контролери і т.д. Комутація ланцюгів керування для вмикання й вимикання релейно-контакторної апаратури здійснюється кнопками керування, кінцевими вимикачами. У ланцюгах автоматики та захисту застосовуються різні електромагнітні й інші реле, а також безконтактні електричні апарати.

Розглянемо принцип дії та будову деяких силових комутаційних і контактних апаратів, ланцюгів керування й автоматики.

**Рубильники** призначені для ручного вмикання та вимикання електричних ланцюгів з постійною та змінною напругою. Вони розраховані на вимикання незначних струмів і за наявності відповідних дугогасильних пристроїв допускають вимикання струму до  $1-1,25 I_{ном}$ . Рубильники (див. рис. 7.1) виконуються одно- і багатополусними. Основними елементами їх є: нерухомі контакти 4, рухомі контакти 5, закріплені шарнірно в інших нерухомих контактах 6, дугогасильний пристрій і привод. Монтуються рубильники на ізоляційних плитах 7. Привод може здійснюватися за допомогою центральної або бокової рукояток 9 та 3 через вал 2 і систему важелів 10. Головною частиною рубильника є контакти. Майже виняткове застосування в цих апаратах знаходять контакти. У рубильниках, на малі струми, контактне натискання забезпечується за рахунок пружних властивостей матеріалу губок, а на струми від 100 А і більше – сталевими пружинами чи іншими додатковими елементами. Зі збільшенням натискання зменшується перехідний опір, але збільшується зношення контактів шляхом тертя. Гасіння дуги постійного струму при малих струмах (до 75 А) здійснюється за рахунок її механічного розтягування ножами, що розходяться. При великих струмах гасіння здійснюється в основному за рахунок переміщення дуги під дією електродинамічних сил контуру струму. Гасіння електричної дуги змінного струму здійснюється в основному за рахунок білякатод-

них явищ, що мають місце при проходженні струму через нуль. Уже при відстані близько 2 мм між контактами при напрузі – 380 В дуга надійно гаситься. Довжину ножа в рубильниках змінного струму, варто вибирати не за умов гасіння дуги, а за механічних умов. При монтажу рубильників у розподільних пристроях малого обсягу дуже актуальним стає питання обмеження розмірів дуги. Необхідно, щоб іонізовані гази, які залишилися після згасання дуги, не викликали пробій на корпус або між струмоведучими частинами. Для цього рубильники оснащують дугогасильними камерами 1. Ефективною є камера з дугогасильною решіткою 8.



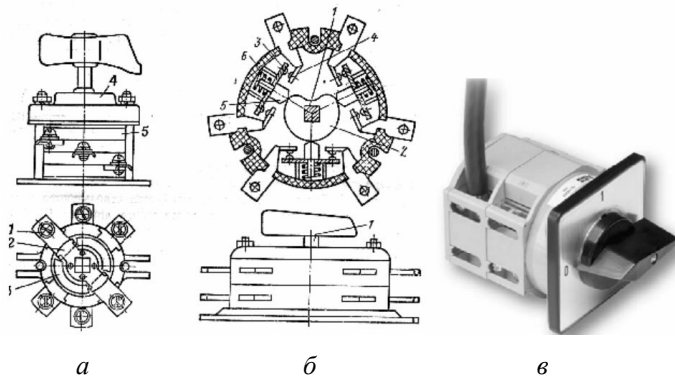
**Рис. 7.1 – Рубильники:**

**а, в – з боковою рукояткою та дугогасильними камерами;  
 б, г – з центральним важільним приводом і дугогасильними контактами**

Дугогасильні контакти 11 можуть застосовуватися в рубильниках постійного струму при струмах понад 100 А і у всіх рубильниках змінного струму, де швидкість руху контактів та їх зазор не впливають помітно на умови гасіння дуги. Дугогасильні контакти, які вмикаються останніми, призначені для захисту головних ножів від обгорання. На великі струми, рубильники виконуються з декількома рівнобіжними ножами.

**Пакетні вимикачі** та перемикачі є найбільш простими комутаційними апаратами та призначені для вмикання та вимикання окремих струмоприймачів та ділянок ланцюгів у нормальних режимах, а також для від'єднання під час виконання ремонтних робіт.

У пакетному вимикачі чи перемикачі кожен полюс, що комутується, конструктивно оформлений у вигляді окремого елемента – пакета. Число пакетів у вимикачі, наприклад серії ПКВ, може досягати восьми. Пакетний вимикач ПВМ (рис. 7.2, *а*) складається з окремих, з'єднаних разом пакетів 5 та приводного механізму 4. Кожен полюс має два розриви.



**Рис. 7.2 – Пакетні вимикачі:**  
*а*) серії ПВМ; *б*) кулачковий, серії ПКВ;  
*в*) кулачковий, серії ОМ виробництва фірми «АВВ»

Нерухомі контакти 1 виконані у вигляді масивних пластин із латуні. Рухомий контакт 2 насаджений на квадратний ізольований вал вимикача і має обертальний рух. Натискання контактів створюється за рахунок пружних властивостей губок рухомого контакту 2. До рухомого контакту прикріплені дві щічки 3 із фібрових пластин. Відстань між щічками трохи більша за товщину нерухомого контакту, що дозволяє рухомому контакту вільно обертатися всередині пакета. Рухомий контакт переміщується за допомогою приводного механізму. Під час обертання рукоятки спочатку заводиться пружина, а потім ця пружина надає необхідної швидкості контакту. При розходженні контактів дуга загоряється у двох розривах, що забезпечує надійне гасіння дуги змінного струму за рахунок біякатодної електричної міцності. Дуга гасне при першому проходженні змінного струму через нуль.

Гасіння дуги постійного струму забезпечується за рахунок її горіння в просторі між фібровими щічками. При контакті дуги з фібро-

вими стінками з них виділяється газ. Оскільки внутрішня порожнина пакета досить герметична, усередині пакета підвищується тиск. Це веде до підйому вольт-амперної характеристики та гасіння дуги. Однофазні ланцюги повинні вимикатися двополюсним вимикачем.

Недоліками вимикача ПВМ є невисока зносостійкість (до  $20 \cdot 10^3$  циклів) і недостатня надійність механізму приводу. Більш досконалий пакетний кулачковий вимикач серії ПКВ (див. рис. 7.2, б). На валу 1 закріплені кулачки 2 (по одному на пакет). Кожен ланцюг має два розриви, утворені містками 3 і контактами 4. Під час обертання вала, кулачок повертається, тоді у його заглиблення потрапляє шток 5. При цьому ланцюг замикається. Натискання контактів створюється сталеву пружиною 6. Для підвищення зносостійкості використовуються металокерамічні контакти. Електрична зносостійкість досягає  $2 \cdot 10^5$  циклів. Усі пакетні вимикачі використовуються для комутації номінальних струмів.

Пакетні вимикачі та перемикачі порівняно з рубильниками мають менші габарити, зручніші в монтажі. Дуга гаситься в замкненому просторі, без викиду полум'я та газів. Контактна система дозволяє керувати одночасно великою кількістю ланцюгів. Ці вимикачі комутують номінальні струми, мають високу вібро- та ударостійкість.

**Кнопки керування** – апарати, рухомі контакти яких переміщуються й спрацьовують під час натискання на штовхач кнопки. Вони застосовуються, головним чином, для дистанційного керування електромагнітними апаратами постійного та змінного струму. Комплект кнопок, змонтованих на загальній панелі (чи в блоці), є кнопковою станцією (пультом).

Усі кнопки керування, що використовуються в схемах автоматики, розрізняють за кількістю та типом контактів (від одного до кількох, що замикаються й розмикаються), формою штовхача (циліндричний, прямокутний, грибоподібний), написом та кольором штовхача, а також за способом захисту від впливів навколишнього середовища (відкриті, закриті, герметичні й т.д.). Зовнішній вигляд кнопок та кнопкових станцій різного виконання наведено на рис. 7.3–7.5.



Рис. 7.3 – Кнопки різного виконання





Рис. 7.4 – Кнопкові станції

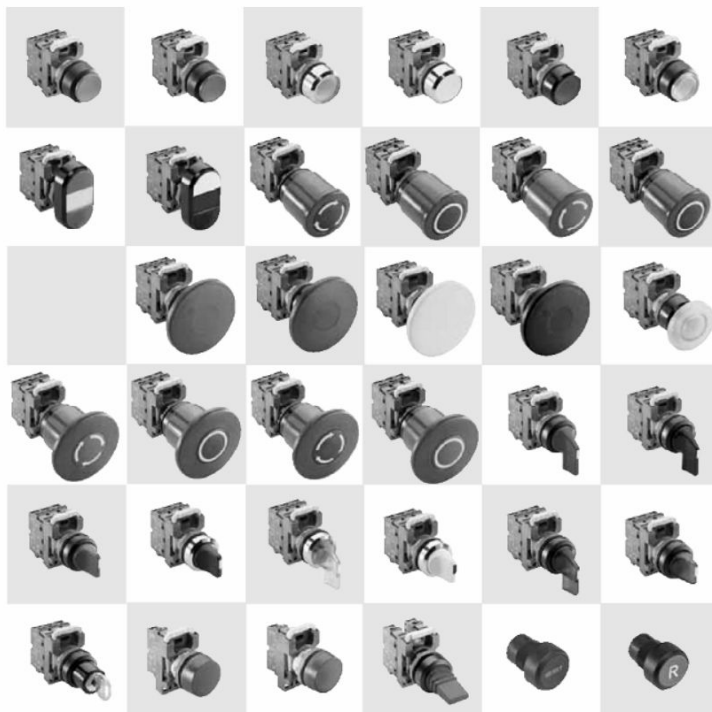


Рис. 7.5 – Кнопки з каталогу фірми «ABB»

***Шляхові (позиційні) вимикачі (перемикачі) та мікрОВИМКАЧІ.***

Шляховий вимикач призначений для замикання чи розмикання слабкострумних сигнальних ланцюгів залежно від просторового положення (позиції) робочого органа керованого електропривода. Одним із різновидів шляхових є кінцеві вимикачі, що забезпечують комутацію сигнальних ланцюгів тільки в крайніх положеннях ходу робочого органа. Контактні шляхові вимикачі можна розділити на кнопкові та важільні. У кнопковому шляховому вимикачі контрольований робочий

орган впливає на шток кнопкового елемента контактів (див. рис. 7.6). Розмикання й замикання контактів відбувається зі швидкістю переміщення контрольованого органа. При швидкості стрижня понад 0,4 м/хв необхідно застосовувати вимикачі з підвищеною швидкодією, що забезпечують необхідну швидкість розмикання.

При великих ходах робочого органа і великих струмах застосовуються важільні шляхові перемикачі. Контрольований робочий орган привода діє на ролик, укріплений на кінці важеля (рис. 7.6). Завдяки наявності пружин, замикання і розмикання контактів відбувається з великою швидкістю, що не залежить від швидкості руху ролика. Це дає можливість вимикати струми до 6 А при напрузі до 220 В постійного струму. Повернення у вихідне положення після припинення дії на ролик відбувається за допомогою пружини.



Рис. 7.6 – Шляхові та концеві вимикачі

Якщо потрібно зупинити робочий орган привода при його наближенні до певної зони, необхідно виконати відповідні переключення з високою точністю  $(0,3-0,7) \cdot 10^{-3}$  м, для цього застосовуються шляхові (кінцеві) мікроперемикачі. На рис. 7.7 показано мікроперемикач з одним перемикаючим контактом.

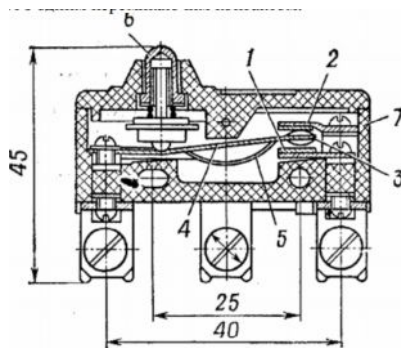


Рис. 7.7 – Мікроперемикач ВМК

Нерухомі контакти 1 і 2 укріплені в пластмасовому корпусі 7. Рухомий контакт 3 укріплений на кінці спеціальної пружини, що складається з плоскої 4 та фігурної 5 частин. У зображеному на рисунку положенні пружина створює тиск на контакт 2. Під час натискання робочого органа на головку 6 відбуваються деформація пружини та перекидання контакту 3 у нижнє положення за час 0,01–0,02 с, що забезпечує надійне вимикання ланцюга. Хід головки 6 складає десяти частки міліметра. Наприклад, мікроперемикач ВМК-ВЗГ вимикають струм 2,5 А при постійній напрузі 220 В та змінній 380 В.

### **Зміст звіту**

1. Короткий опис і схематичне зображення основних типів електричних апаратів згідно з порядком виконання роботи.
2. Висновки за роботою.

### **Контрольні питання**

1. Роз'ясніть особливості застосування рубильників різних типів.
2. Яке призначення ізоляційних (фібрових) прокладок у пакетному вимикачі?
3. Які переваги мають кулачкові пакетні вимикачі над іншими?
4. За якими параметрами вибираються пакетні вимикачі?
5. За якими параметрами розрізняються кнопки керування?
6. У яких умовах застосовують кнопкові та важільні шляхові вимикачі?
7. Де і чому застосовують мікровимикачі?

## Література

---

1. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория / И. С. Таев. – М. : Энергия, 1977. – 272 с.
2. Основы теории электрических аппаратов : учеб. для вузов / под ред. И. С. Таева. – М. : Высшая школа, 1987. – 496 с.
3. Новиков Ю. Н. Теория и расчет электрических аппаратов / Ю. Н. Новиков. – Л. : Энергия, 1970. – 328 с.
4. Теория электрических аппаратов / под. ред. проф. Г. Н. Александрова. – М. : Высшая школа, 1985. – 354 с.
5. Буткевич Г. В. Задачник по электрическим аппаратам / Г. В. Буткевич, В. Г. Дегтярь, А. Г. Сливинская. – М. : Высшая школа, 1987. – 232 с.
6. Основы теории электрических аппаратов / под ред. Г. В. Буткевича. – М. : Высшая школа, 1970. – 600 с.
7. Теория электрических аппаратов : учеб. для вузов / под ред. проф. Г. Н. Александрова ; 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во СПбТУ, 2000. – 540 с.
8. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту загальний курс / Б. В. Клименко. – Харків : Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
9. Гордон А. В. Поляризованные электромагниты / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М. : Энергия, 1965. – 160 с.
10. Гордон А. В. Электромагниты переменного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М. : Энергия, 1968. – 138 с.
11. Гордон А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М. : ГЭИ, 1969. – 370 с.
12. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты : учеб. пособ. / А. Г. Сливинская. – М. : Энергия, 1972. – 248 с.
13. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М. А. Любчик. – М. : Энергия, 1974. – 392 с.
14. Шопен Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики : учеб. для вузов / Л. В. Шопен. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
15. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Т. Бишард. – М. : Высшая школа, 1986. – 352 с.
16. Холявский Г. Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах / Г. Б. Холявский. – Л. : Энергия, 1971. – 156 с.
17. Справочник по расчету и конструированию контактных частей высоковольтных электрических аппаратов / под ред. В. В. Афанасьева. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 384 с.

18. Никитенко А. Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов / А. Г. Никитенко. – М. : Высшая школа, 1983. – 192 с.
19. Залесский А. М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А. М. Залесский, Г. А. Кукеков. – Л. : Энергия, 1967. – 380 с.
20. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах : учеб. пособ. для вузов / И. Ф. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
21. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. – М. : Высшая школа, 1984. – 247 с.
22. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
23. Брон О. Б. Электрическая дуга в аппаратах управления / О. Б. Брон. – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 532 с.
24. Брон О. Б. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов / О. Б. Брон, Л. К. Сушков. – Л. : Энергия, 1975. – 212 с.
25. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Буткевич Г. В. – М. : Энергия, 1973. – 263 с.
26. Таев И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М. : Энергия, 1973. – 424 с.

## Зміст

---

<b>Вступ</b> .....	3
<i><b>Лабораторна робота 1</b></i>	
Визначення динамічної стійкості шин.....	5
<i><b>Лабораторна робота 2</b></i>	
Тепловий розрахунок елементів апаратів.....	10
<i><b>Лабораторна робота 3</b></i>	
Вивчення конструкції, принципу дії та методів розрахунку контактів електричних апаратів.....	20
<i><b>Лабораторна робота 4</b></i>	
Вивчення режимів роботи контактів електричних апаратів та методів їх розрахунку .....	28
<i><b>Лабораторна робота 5</b></i>	
Дослідження роботи реле часу.....	38
<i><b>Лабораторна робота 6</b></i>	
Дослідження структури магнітних пускачів та схеми їх вмикання ....	48
<i><b>Лабораторна робота 7</b></i>	
Дослідження конструкції низьковольтних контактних комутаційних апаратів.....	52
<b>Література</b> .....	59