

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсових та дипломних проектів на тему:

«РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ГІБРИДНИХ КОНТАКТОРІВ ЗМІННОГО СТРУМУ»

Для студентів всіх форм навчання за напрямом 6.050702 спеціальності 7(8).05070201 "Електричні машини і апарати"

Методичні вказівки до виконання курсових та дипломних проектів на тему "Розрахунок та проектування гібридних контакторів змінного струму" для студентів всіх форм навчання за напрямом 6.050702 спеціальності 7(8).05070201 "Електричні машини і апарати". / Укл.: Стаценко О.Г., Василевський В.В. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 - 50 с.

Укладачі: Стаценко О.Г., доцент, канд. техн. наук
Василевський В.В., інженер кафедри Е та ЕА

Рецензент: Близняков О.В., доцент, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск: Мохнач Р.Е.

Затверджено
на засіданні НМК ЕТФ
протокол №7
від 16.04.2016
Затверджено
на засіданні кафедри
"ЕЕА", протокол
№8 від 28.03.2016

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Розрахунок елементів струмоведучого контуру головних контактів.....	6
1.1 Розрахунок перетину вивідних шин.....	7
1.2 Розрахунок контактних з'єднань.....	10
1.3 Розрахунок гнучкого контактного з'єднання.....	15
1.4 Розрахунок потужних комутуючих контактів.....	15
2 Проектування приводного механізму.....	21
2.1 Розрахунок характеристики протидіючих сил.....	21
2.2 Попередній розрахунок електромагніту постійного струму...	26
2.3 Попередній розрахунок електромагніту змінного струму.....	34
3 Проектування та розрахунок напівпровідникового блоку гібридного контактора змінного струму.....	40
3.1 Вибір силових напівпровідникових пристроїв.....	40
3.2 Розрахунок системи управління гібридного контактору з трансформатором струму.....	43
3.3 Конструктивна розробка напівпровідникового блоку.....	48

ВСТУП

Промисловістю випускається ряд серій електромагнітних контакторів змінного струму на напругу до 1000 В. Вони мають наступні категорії застосування:

АС-1 - комутація активного або малоіндуктивного навантаження (електропечей опору);

АС-2 - пуск і відключення електродвигунів (ЕД) з фазним ротором, гальмування противвімкненням;

АС-3 - пуск ЕД з короткозамкненим ротором, відключення обертювих ЕД при номінальному навантаженні;

АС-4 - пуск ЕД з короткозамкненим ротором. Відключення нерухомих або повільно обертювих двигунів. Гальмування противвімкненням.

Контактори найбільш важких категорій застосування АС-3 і АС-4 повинні в режимі нормальних комутацій включати струми до $6 I_{ном. р.}$ при номінальній робочій напрузі $U_{ном. р.}$ при $\cos \varphi = 0,35$, а в режимі рідкісних комутацій до $10 I_{ном. р.}$ при $1,1 U_{ном. р.}$ і $\cos \varphi = 0,35$. Номінальний робочий струм $I_{ном. р.}$ вибирається меншим за номінальну напругу $U_{ном. р.}$. Комутаційна зносостійкість цих категорій застосування, як правило, не перевищує 0,2 млн. циклів. Механічна зносостійкість досягає 10^7 циклів.

Основні недоліки контактних електромагнітних контакторів.

- необхідність частого обслуговування. Наприклад, контактори, що експлуатуються за категорією АС-4, вимагають регулювання провалу головних контактів не більше ніж через 10^5 циклів ввімкнення - вимкнення (ВО), заміни контактів і рогів через $2 \cdot 10^5$ циклів ВО і т. д. Внаслідок цього на промислових підприємствах міститься відносно велика кількість обслуговуючого персоналу і створені цеха з виготовлення запасних деталей. В результаті цього сумарна вартість на обслуговування в 2-4 рази перевищує оптові ціни контакторів;

- низька комутаційна зносостійкість;

- знижена надійність, обумовлена в основному наявністю електричної дуги при комутації при експлуатації в забрудненому повітрі з підвищеною вологістю і, внаслідок цього, підвищеною ймовірністю перекриття ізоляції між полюсами і перегрівом контактного з'єднання;

- виділення токсичних і хімічно активних речовин при горінні дуги;

- підвищений рівень акустичних шумів і радіоперешкод при комутації;
- розсіювання енергії дуги при комутації;
- підвищені витрати міді внаслідок частої зміни контакторів;

Прагнення поєднати в апаратах позитивні якості контактних апаратів (малі втрати потужності і габарити) і напівпровідникових (підвищена комутаційна зносостійкість, менші експлуатаційні витрати, бездугова комутація) призвело до створення гібридних або комбінованих апаратів, в яких струм у ввімкнутому стані апарату проходить через контакти, а комутація його виконується силовими напівпровідниковими приладами, ввімкненими паралельно контактам. Таке поєднання дозволило створити гібридні контактори з комутаційною зносостійкістю в 20-50 разів більшою, ніж в контактних. Гібридні апарати, що мають підвищені значення надійності і довговічності, забезпечують також істотну економію матеріалів, в першу чергу стали і міді, що істотно знижує собівартість і підвищує конкурентоспроможність.

У цих методичних вказівках розглянуті питання проектування і розрахунку гібридних контакторів змінного струму, які займають досить істотне місце серед інших гібридних апаратів, таких як гібридні контактори постійного струму, гібридні перемикачі живлення, гібридні швидкодіючі вмикачі.

Гібридні контактори змінного струму складаються з наступних основних вузлів: струмоведучого контуру головних контактів; електромагнітного приводу; силових напівпровідникових приладів, ввімкнених паралельно головним контактам; схеми керування; захисту силових напівпровідникових приладів (СНП) від перенапруг.

У першому розділі посібника розглядаються питання розрахунку струмоведучого контуру головних контактів. У другому розділі - питання розрахунку і вибору електромагнітного приводу, який може бути виконаний для роботи як на змінному струмі, так і для роботи на постійному струмі. У третьому розділі розглянуті питання вибору силових напівпровідникових приладів і схеми управління, а також питання захисту СНП від перенапруг та струмів короткого замикання.

1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОВЕДУЧОГО КОНТУРУ ГОЛОВНИХ КОНТАКТІВ

Вихідними даними при розрахунку і проектуванні струмоведучого контуру, як правило, є номінальна напруга U_n , номінальний струм I_n , максимальний струм відмикання $I_{\text{відмик}}$, максимальна частота відмикань на годину Z , режим роботи, комутаційна зносостійкість $N_{\text{ел}}$.

Завданням розрахунку є вибір матеріалу і розмірів перетинів елементів струмоведучого контуру, розрахунок контактних з'єднань, розрахунок термічної і динамічної стійкості елементів струмоведучого контуру, за умови що їх температура не перевищує допустимих значень, а сила натискання комутуючих контактів забезпечила б їх не-приварювання і виключила б їх самовільне розмикання під дією електродинамічних сил відкиду.

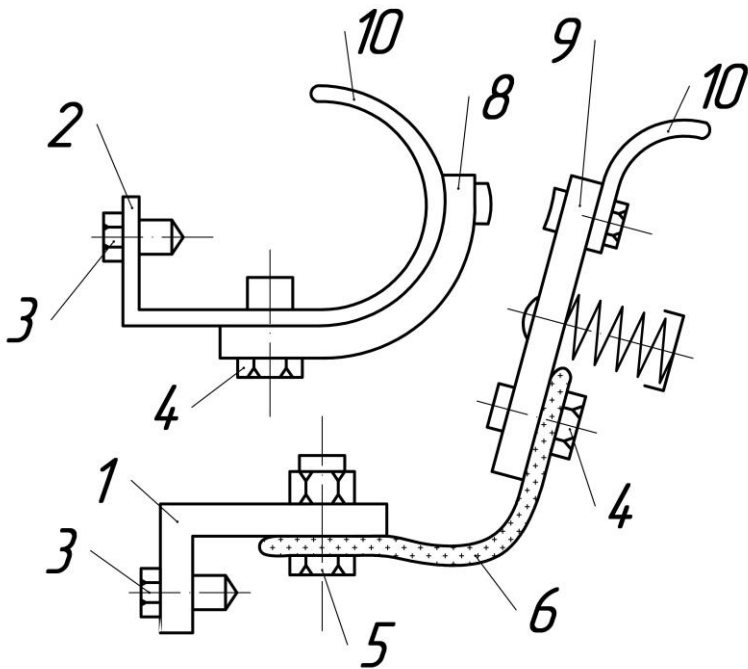


Рисунок 1.1 – Струмоведучий контур головних контактів

На рис. 1.1. зображений найбільш поширений струмоведучий контур загальнопромислового контактора змінного струму.

До елементів струмоведучого контуру, які необхідно розрахувати, відносяться наступні:

а) вивідні неізольовані або ізольовані шини (струмопроводи 1, 2);

б) контактні з'єднання (затискачі 3, 4, 5);

в) гнучкий зв'язок 6;

г) комутуючі контакти 8, 9;

д) дугогасильна скоба 10;

У пояснювальній записці необхідно привести ескіз струмоведучого контуру, який треба спроектувати, із зазначенням його елементів.

Розрахунок струмоведучого контуру проводять для двох режимів. Для режиму тривалого протікання номінального струму I_n і для режиму короткочасного протікання максимального відмикаємого струму $I_{відм}$.

В якості матеріалу вивідних неізольованих або частково ізольованих шин найбільш часто застосовують мідь, сплави на основі міді та рідше сталь.

1.1 Розрахунок перетину вивідних шин

Розміри вивідних шин при тривалому проходженні номінального струму визначають за формулою Ньютона [1,3]

$$p \cdot q = \frac{I_n^2 \cdot \rho_0 \cdot (a_c \cdot \Theta_{дон}) \cdot K_d}{K_T \cdot (\Theta_{дон} - \Theta_{окр})}, \quad (1.1)$$

де p – периметр поперечного перетину шини, яка бере участь у теплообміні з навколишнім середовищем;

q – поперечний перетин шини;

ρ_0 – питомий електричний опір матеріалу шини за 0°C , Ом·см;

a_c – температурний коефіцієнт опору шини $1/^\circ\text{C}$;

$\Theta_{дон}$ – тривало допустима температура нагріву шини, $^\circ\text{C}$;

$\Theta_{окр}$ – температура навколишнього середовища (зазвичай 40 °С);

K_{δ} – коефіцієнт додаткових втрат, обумовлений поверхневим ефектом і ефектом близькості;

K_T – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/см²·град.

Для неізолюваної шини прямокутного перерізу зі сторонами a і b з урахуванням позначення $m=a/b$, коли $p \cdot q = 2m \cdot (1 + m) \cdot b^3$:

$$b = \sqrt[3]{\frac{[I_n^2 \cdot \rho_0 \cdot K_{\delta} \cdot (1 + a_c \Theta_{\delta on})]}{[2m \cdot (m + 1) \cdot K_T \cdot (\Theta_{\delta on} - \Theta_{окр})]}}. \quad (1.2)$$

Для прямокутних шин, розташованих широкою стороною на товстому ізоляційному підставі через який відвід тепла ускладнений $p \cdot q = m \cdot (2m + 1) \cdot b^3$:

$$b = \sqrt[3]{\frac{[I_n^2 \cdot \rho_0 \cdot K_{\delta} \cdot (1 + a_c \cdot \Theta_{\delta on})]}{[m \cdot (2m + 1) \cdot K_T \cdot (\Theta_{\delta on} - \Theta_{окр})]}}. \quad (1.3)$$

Зазвичай величина m знаходиться в межах від 0.25 до 0.5. При постійному і змінному струмі частотою 50 Гц коефіцієнт K_{δ} можна прийняти рівним 1.

Коефіцієнт тепловіддачі K_T при природному повітряному охолодженні приймають згідно [1] рівним:

- для горизонтальних мідних шин $(6 \dots 9) \cdot 10^{-4}$ Вт/см²·град.
- для горизонтальних мідних стрижнів $(9 \dots 13) \cdot 10^{-4}$ Вт/см²·град.
- для горизонтальних сталевих поверхонь $(10 \dots 14) \cdot 10^{-4}$ Вт/см²·град.

Для більш точного розрахунку K_T користуються аналітичним виразом, знайденим на основі теорії теплової подібності [1]:

$$K_T = 1,33 \cdot 10^{-4} \left[\frac{(\Theta - \Theta_{окр})}{l} \right]^{\frac{1}{4}} + \quad (1.4)$$

$$+ 2,04 \cdot 10^{-11} \cdot \Theta_{окр}^3 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{2,08 \cdot (\Theta + 273)}{\Theta_{окр} + 273} - 1 \right),$$

де Θ – температура $^{\circ}\text{C}$;

l – визначальний розмір провідника, м;

ε – ступінь чорноти, для окисленої міді дорівнює 0,5...0,78.

Зазвичай розмір l береться в напрямку найбільш інтенсивного відводу теплоти. Для горизонтальних плоских шин за визначальний розмір можна прийняти висоту шини, для горизонтальних великих провідників – діаметр провідника.

За прийнятим значенням $m = \frac{a}{b}$ визначається товщина шини a .

За знайденим значенням a і b визначається площа перетину шини $q = a \cdot b$, обирається найближчий більший стандартний перетин шини і уточнюються розміри a і b .

Для прийнятих розмірів поперечного перерізу шини визначається її ustalена температура нагріву:

$$\Theta_{уст} = \Theta_{окр} + \frac{\rho_0 \cdot (1 + a_c \cdot \Theta_{дон}) \cdot I_n^2 \cdot K_{\partial}}{K_T \cdot q \cdot p}. \quad (1.5)$$

Отримане значення $\Theta_{уст}$ порівнюється з гранично допустимою температурою нагрівання провідника в тривалому режимі [1] і робляться висновки про правильність розрахунку. $\Theta_{уст}$ не повинна перевищувати $\Theta_{дон}$.

Знайдений поперечний переріз шини перевіряють на термічну стійкість в режимі короткочасного протікання граничного вимикаемого струму $I_{вим}$. Для цього визначається величина теплового імпульсу $I_{вим}^2 \cdot t_{к.з.}$ і оцінюється час термічної стійкості $t_{к.з.}$.

$$t_{к.з.} \cdot I_{в.м.}^2 = \frac{\gamma \cdot c \cdot q^2 \cdot \ln \frac{(1 + a_c \cdot \Theta_{к.з.})}{(1 + a_c \cdot \Theta_{дон})}}{\rho_0 \cdot K_\partial \cdot a_c}, \quad (1.6)$$

де γ, c – відповідно, щільність матеріалу шини, г/см³, і його питома теплоємність, Дж/г. град;

$\Theta_{к.з.}, \Theta_{дон}$ – припустимі температури нагріву струмоведучої шини, відповідно, в режимі короткого замикання і в тривалому режимі, °С

Отриманий час термічної стійкості не повинний бути меншим 5с для контакторів і пускачів і 1с для автоматів [1].

У зворотньому випадку необхідно збільшити розміри поперечного перетину шини. Перетин шини розраховується за висловом [1]:

$$q = \sqrt{\frac{I_{отк.}^2 \cdot \rho_0 \cdot a_c \cdot t_{к.з.}}{\gamma \cdot c \cdot \ln \left[\frac{1 + a_c \cdot \Theta_{к.з.}}{1 + a_c \cdot \Theta_{дон}} \right]}}, \quad (1.7)$$

де $t_{к.з.}$ приймається рівним 5 с.

Остаточні розміри поперечного перерізу струмоведучих шин вибирають за найбільшим значенням, отриманим при розрахунку струмоведучих частин в режимах тривалої роботи при номінальному струмі і в режимі короткочасного протікання граничного відключаємого струму $I_{отк.}$

1.2. Розрахунок контактних з'єднань

Контактні з'єднання у струмоведучому контурі апаратів керування поділяються на розбірні та нерозбірні. Нерозбірні виконуються за допомогою зварювання, пайки та клепок струмоведучих деталей. За раціонального вибору величини контактуючих поверхонь перехідний опір у таких з'єднаннях практично той же самий, що і на ділянці суцільного провідника.

Розбірні контактні з'єднання складаються з одного або більше струмоведучих частин, з'єднаних поміж собою болтами (гвинтами).

Контактне натискання у них реалізується силою затяжки болта (гвинта), гайки.

Найбільш поширені розбірні контактні з'єднання, що зустрічаються у струмоведучому контурі контакторів постійного та змінного струму, магнітних пускачах, автоматах, представлені на рис. 1.2.

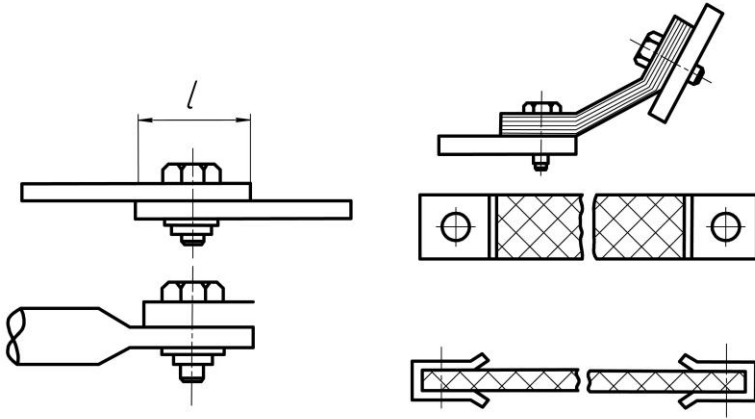


Рисунок 1.2 – Основні різновиди розбірних контактних з'єднань

Задача розрахунку полягає у визначенні довжини контактного з'єднання l , кількості та розмірів болтів для з'єднання (сила контактного натискання, що ними розвивається, повинна забезпечувати перегрів контактного з'єднання у порівнянні з температурою прилеглих до нього шин і деталей не більш ніж на кілька градусів[3]).

$$\theta_k - \theta_{уст} \leq 2...8^{\circ}C,$$

$$\theta_k = \theta_{окр} + \frac{I_n^2 \cdot R_{ко}}{K_T \cdot S_k}, \quad (1.8)$$

де θ_k – температура деталей у місці контактування;

$\theta_{уст}$ – усталена температура шини;

$R_{ко}$ – загальний опір контактного з'єднання;

S_k – площа повної зовнішньої поверхні контактного з'єднання.

Загальний опір контактного з'єднання $R_{ко}$ складається з перехідного опору контакту $R_к$ та омичного опору $R_{к1}$ матеріалу частин провідників, що утворюють контактне з'єднання:

$$R_{ко} = R_к = R_{к1} \quad . \quad (1.9)$$

Перехідний опір контакту:

$$R_к = \frac{\varepsilon}{m_1 \cdot P_k^{m_2}} \quad , \quad (1.10)$$

де ε – коефіцієнт, що залежить від матеріалу та стану поверхні контактів;

m_1 – кількість болтів у контактному з'єднанні;

$P_к$ – сила контактного натискання;

m_2 – коефіцієнт, що залежить від числа пунктів дотику та типів контактів (для поверхневого контакту $m_2=(0,7 \dots 1,0)$).

Рекомендовані значення ε , Ом·Н:

мідь – мідь	$0,24 \cdot 10^{-2}$
алюміній – алюміній	$0,3 \cdot 10^{-2}$
мідь – алюміній	$0,3 \cdot 10^{-2}$
латунь – латунь	$0,67 \cdot 10^{-2}$
латунь – мідь	$0,38 \cdot 10^{-2}$

Силу контактного натискання $P_к$ визначають за рекомендованими значеннями питомого контактного тиску $p_к$ та площі поверхні контактування S_1 :

$$P_к = p_к \cdot S_1 \quad . \quad (1.11)$$

Питомі тиски $p_к$ Н/см², в контактуючих частинах, з'єднаних болтами:

мідь, лужена	500-100;
мідь, латунь, бронза	600-1200;

алюміній	2000-2500;
сталь лужена	1000-1500;
сталь нелужена	5000-6000.

Площа поверхні контактування S_1 визначається струмом I , що проходить через контакт, і удаваній щільністю струму j :

$$S_1 = \frac{I}{j}. \quad (1.12)$$

Згідно [2] для мідних шин при перемінному струмі меншому за 200 А з частотою 50 Гц $j_M = 0,31 \text{ А/мм}^2$.

При струмі від 200 до 2000 А:

$$j_M \approx [0,31 - 1,05 \cdot 10^{-4}(1 - 200)], \quad (1.13)$$

За струму більше 2000 А $j_M = 0,12 \text{ А/мм}^2$. Для інших матеріалів, що застосовуються у контактних з'єднаннях, перерахунок щільності струму ведуть з урахуванням співвідношення питомих провідностей іншого металу Q и меди Q_M , тобто:

$$j = j_M \sqrt{\frac{Q_M}{Q}}. \quad (1.14)$$

У найпростішому випадку площу поверхні контактування можна визначити, прийнявши величину перекриття шини за рівну ширині контакту b :

$$S_1 = b^2$$

Встановивши величину P_k з табл. [2], обирають болт (або декілька болтів), для якого повинна виконуватись нерівність $P_{\text{р.болта}} > P_k$.

Опір R_{k1} відрізняється від опору прямої ділянки контактуючих частин через викривленості ліній струму у місці контактування. Це враховується поправковим коефіцієнтом K_c , що визначається за графіками рис. 1.3.

$$R_{k1} = K_c \cdot \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (1.15)$$

де ρ – питомий електричний опір металів контактуючих деталей;
 l, S – довжина та площа перетину контактного з'єднання.

Необхідно визначити падіння напруги U_k ; для одного контакт-ного з'єднання воно не повинно перевищувати 8 мВ.

Після визначення Θ_k порівнюють температуру контактного з'єднання з температурою нагріву струмоведучої шини і роблять висновки про правильність розрахунку.

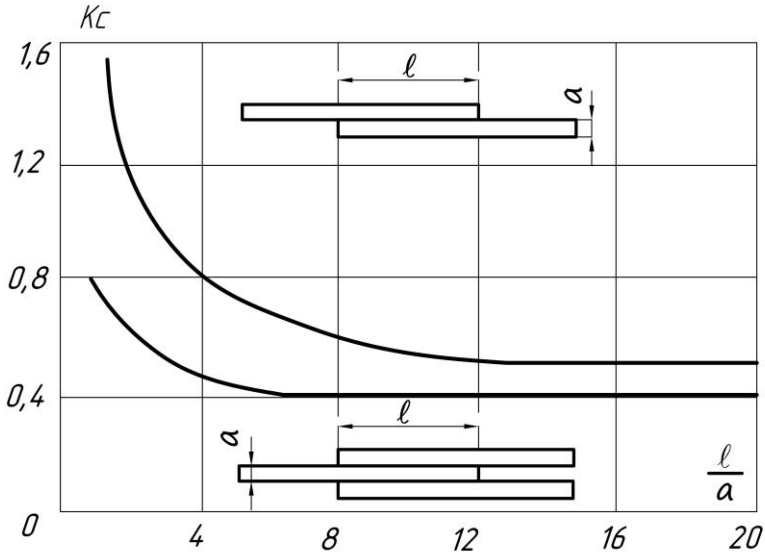


Рисунок 1.3 – Графік залежності $K_c = f(\frac{1}{a})$

1.3 Розрахунок гнучкого контактного з'єднання

У контакторах змінного струму крім розбірних контактних з'єднань широко застосовуються гнучкі контактні з'єднання (див. рис. 1.2), які здійснюють струмовий зв'язок рухомого контакту апарату з вивідними струмопровідними шинами. Гнучкі з'єднання виконуються, як правило, з еластичної мідної стрічки товщиною 0,1 мм і менш або з багатожильного плетеного провідника, що складається з мідних жил діаметром 0,08 ... 0,1 мм.

При роботі гнучкий зв'язок не повинен мати різких перегинів. Перетин міді гнучкого зв'язку повинний бути не меншим перетину струмоведучих елементів, які він з'єднує.

Необхідно визначити число стрічок гнучкого зв'язку або число круглих провідників у джгуті і число джгутів у плетеному гнучкого зв'язку.

1.4. Розрахунок потужних комутуючих контактів

Залежно від типу прийнятої конструктивної схеми контактора (див. рис. 1.1 та каталоги аналогів) обирають певну форму комутуючих контактів. В контакторах змінного струму знайшли велике поширення пальцеві важільні контакти.

Вибір матеріалу і розмірів перетину комутуючих контактів виконують виходячи з наступних рекомендацій [2,5].

Більшість контакторів, що мають пальцеві важільні контакти, виготовляють з твердотягнутої кадмієвої міді МК-ТВ.

Для пальцевих контактів ширину рухомого контакту обирають рівною або дещо більшою (до 25%) ширини струмопровідної шини або гнучкого зв'язку. Ширину нерухомого контакту приймають на 20 ... 25% більше ширини рухомого контакту. З міркувань механічної міцності комутуючих контактів і з урахуванням їх зносу при роботі товщину контактів приймають в 1,5 ... 2 рази більшою за товщину шини.

Завдання розрахунку силових комутуючих контактів полягає у визначенні сили натискання в контактах P_{κ} , при якій температура в місці контактування Θ_{κ} не перевищує допустиму, а також не проходить зварювання контактів і їх самовільного розходження під дією електродинамічних зусиль відкиду замкнутих контактів.

Розрахунок комутуючих контактів проводять для номінального режиму і режиму короткочасного проходження по замкненим контактам струму короткого замикання.

Розрахунок контактів в режимі тривалого проходження номінального струму зводиться до визначення сили P_K натискання в контактах, при якій температура в місці контактування Θ_m не перевищує допустиму $\Theta_{доп}$. Вона не повинна перевищувати температуру рекристалізації (температуру розм'якшення) обраного контактного матеріалу [1]. Згідно ГОСТ403-73 для контактів з міді встановлена $\Theta_{доп}$, що дорівнює 105 °С, а для контактів зі срібла і матеріалів на його основі - до 200 °С і обмежується гранично допустимими температурами сусідніх частин:

$$\Theta_m = \Theta_{окр} + \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha_c \cdot \Theta_{доп}) \cdot I_H^2}{K_T \cdot p \cdot S_K} + \frac{R_K \cdot I_H^2}{2\sqrt{\lambda \cdot K_T \cdot p \cdot S_K}}, \quad (1.16)$$

де p, S_K – відповідно, периметр і перетини контакт-деталей по лінії контактування;

R_K – перехідний опір контактів;

λ – теплопровідність контактного матеріалу Вт/см·град;

K_T – коефіцієнт теплопередачі з поверхні контакту.

Перехідний опір контактів R_K визначають за однією з наведених в [1] залежностей:

$$R_K = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_{см}}{n \cdot P_K}}, \quad (1.17)$$

где $\sigma_{см}$ – опір матеріалу контактів зминанню;

P_K – контактне натискання, н;

n – мінімальна кількість α плям.

Опір матеріалу контактів зминанню згідно [1] можна прийняти рівним: для міді 50 500 Н/см², для срібла – 30 300 Н/см², для сталі 60 000 Н/см², для нікелю 220 000 Н/см².

Мінімальна кількість α плям залежить від типу контакту.

Для точкового контакту n дорівнює 1, для лінійного контакту - 2, для площинного контакту - 3.

Перехідний опір R_K можна також визначити за емпіричною залежністю [1]:

$$R_K = K_1 \cdot \frac{1 + \frac{2}{3} a_c \cdot \Theta_{\partial on}}{(0,1 \cdot P_K)^m}, \quad (1.18)$$

де a_c – температурний коефіцієнт опору 1/град;

$\Theta_{\partial on}$ – допустима температура нагріву контакту $^{\circ}\text{C}$;

P_K – сила натискання в контактї;

K_1 – емпіричний коефіцієнт для різних контактних пар, рівний:

Al-Al – 0,006; мідь-латунь – 0,0004; мідь-мідь – 0,0004; Ag-Ag – 0,0006; латунь-латунь – 0,0007;

m коефіцієнт для різних видів контактування: для площа-площина - 1,0; куля-куля - 0,5; лінійний контакт – 0,7... 0,8

Силу натискання контактів P_K можна визначити за виразом [1]:

$$P_K = \frac{\pi \sigma_{cm} \cdot \rho \cdot I_n^2}{[32 \cdot \lambda \cdot n \cdot (\Theta_{\partial on} - \Theta_{\kappa.д.})]}, \quad (1.19)$$

або

$$P_K = \frac{\pi \sigma_{cm} \rho^2 \cdot I_n^2}{4 \cdot n \cdot U_K^2}, \quad (1.20)$$

де $\Theta_{\kappa.д.}$ – температура контакт-деталі;

U_K – напруга на контактї.

$$\Theta_{\kappa.д.} = \Theta_{окр.} \cdot \frac{\rho_0 \cdot (1 + a_c \cdot \Theta_{\partial on.})}{K_T + \rho \cdot S_k}. \quad (1.21)$$

Припустимо напругу U_K можна обрати за напругою розм'якшення (рекристалізації) матеріалу контакту U_1 (В): для Cu – 0,12; Ag – 0,09; Ni – 0,22; Al – 0,1.

Зазвичай допустима напруга на контактах

$$U_K \leq (0,1 \dots 0,3) U_1. \quad (1.22)$$

Правильність розрахунку сили контактної натискання перевіряють температурою площини торкання.

За формулою 1.16 розраховується максимальна температура площини торкання Θ_m . Вона вище температури контактної деталі $\Theta_{к. д.}$ (зазвичай на 5...15 градусів) і не повинна перевищувати припустимої $\Theta_{доп.}$ (для Cu = 105 °C).

Якщо умова $\Theta_m \leq \Theta_{доп.}$ не виконується, то необхідно збільшити контактне натискання P_K . Для цього можна скористатися наступною методикою.

У практиці експлуатації апаратів управління встановлені деякі характерні питомі натискання в контактах, віднесені до 1А тривалого струму.

$$P_{yд} = \frac{P_K}{I_H}. \quad (1.23)$$

Для контактів з Ag і композицій на основі Ag $p_{yд.} = 0,07 \dots 0,145 \frac{H}{A}$; для мідних контактів – $0,145 \dots 0,24$.

Для розрахованого раніше P_K визначається питоме контактне натискання $p_{yд}$. Якщо воно менше рекомендованих, то слід взяти нижню межу наведених рекомендованих питомих натискань в контактах і визначити нові значення P_K і R_K .

$$P_K = p_{yд.} \cdot I_H, \quad (1.24)$$

$$R_k = \frac{K_1 \cdot (1 + \frac{2}{3} a_c \cdot \Theta_{дон})}{(0,102 \cdot P_k)^m}. \quad (1.25)$$

Правильність розрахунку сили контактного натискання знову перевіряються температурою майданчика торкання.

У режимі короткочасного протікання струму короткого замикання необхідно з'ясувати, чи забезпечить розрахована сила контакт-ного натискання P_k неприварювання контактів, а також чи виключає мимовільне розмикання контактів під дією електродинамічних сил $P_{эду}$. Визначають струм зварювання [1].

$$I_{св} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot P_k (\Theta_{пл.} - \Theta_m)}{0,1 \cdot \rho_0 \cdot \sigma_{см}} \cdot \exp\left(\frac{c \cdot \gamma}{\lambda} \sqrt{\frac{P_k}{\pi \cdot \sigma_{см} \cdot t_{к.з.}}}\right)}, \quad (1.26)$$

де $\Theta_{пл.}$ – температура плавлення матеріалу контакту;

Θ_m – температура контактної площі в режимі тривалого проті-кання номінального струму;

c – теплоємність Дж/(г. град);

γ – щільність матеріалу контактів, г/см³

λ – теплопровідність матеріалу контакту, Вт/(см·град);

ρ_0 – питомий електричний опір, Ом·см;

$\sigma_{см}$ – опір матеріалу зминанню, Н/см², для міді – 50 500 Н/см², сребро – 30 300 Н/см², сталь 60 000 Н/см², вольфрам – 293 000 Н/см²;

$t_{к.з.}$ – час термічної стійкості (для контакторів приймається не менше 5 с)

Одержаний струм приварювання $I_{св.}$ порівнюють з граничним значенням відключаемого струму $I_{отк.}$. Якщо $I_{отк.} < I_{св.}$, то контакти при розрахованій силі контактного натискання приварюватись не будуть. Якщо наведена нерівність не виконується, необхідно збільшити силу контактного натискання.

Електродинамічна сила $P_{эду}$, що викликає відштовхування кон-тактів, виникає внаслідок звуження ліній струму в контактній деталі

при підході його до місці контактування і може бути визначена з теоретичної залежності [1]:

$$P_{\text{эду}} = 10^{-7} \cdot I_{\text{отк}}^2 \cdot \ln \frac{S_{\kappa}}{S_{\text{см}}}, \quad (1.27)$$

де S_{κ} – площа перерізу контактів по лінії (точці) контактування;

$S_{\text{см}}$ – площа перерізу майданчика зминання у контактї;

Значення $S_{\text{см}}$ можна визначити методом послідовних наближень за формулою:

$$S_{\text{см}} = \frac{P_{\kappa} - P_{\text{эду}}}{\sigma_{\text{см}}}. \quad (1.28)$$

силу пінч-ефекту $P_{\text{неф}}$, спрямовану згідно з $P_{\text{эду}}$ і викликану силою електромагнітного стиснення контактного перешийка, можна визначити за допомогою коефіцієнта Пуассона:

$$P_{\text{неф}} = \left[\frac{\sigma_n}{1 - \sigma_n} \right] \cdot \left[\frac{\mu_0 \cdot h}{\pi d_0} \right] \cdot I_{\text{отк}}^2, \quad (1.29)$$

де h – довжина металевого перешийка у контактї, яку можна прийняти рівною $0,5d_0$;

σ_n – коефіцієнт Пуассона, для міді рівний 0,34, для срібла 0,36;

d_0 – діаметр контактного перешийка.

$$d_0 = 2 \sqrt{\frac{P_{\kappa}}{\pi \sigma_{\text{см}}}}. \quad (1.30)$$

У раціонально сконструйованій контактній системі повинна виконуватися умова:

$$P_{\text{эду}} + P_{\text{неф}} < P_{\kappa}. \quad (1.31)$$

Якщо умова не виконується, необхідно збільшити контактне натискання P_{κ} .

2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИВОДНОГО МЕХАНІЗМУ

Електромагнітні контактори мають два приводних механізми: електромагнітний привід, який здійснює включення контактора і пружинний - для відключення контактора. Попередній розрахунок електромагнітного приводу можливий тільки після розрахунку і побудови характеристики пружинного приводу, яку називають характеристикою протидіючих сил.

2.1 Розрахунок характеристики протидіючих сил

Основними елементами пружинного механізму є контактні і зворотні пружини, які створюють сили, що відривають якір від сердечника після відключення електромагнітного приводу.

Одним з вихідних параметрів для розрахунку контактних і зворотних пружин є зусилля попереднього P_1 і кінцевого P_2 стиснення контактних пружин і зусилля попереднього P_{1B} і кінцевого P_{2B} стиснення зворотних пружин.

Для визначення величини P_1 і P_2 контактної пружини необхідно розраховану раніше силу контактного натискання P_K привести до осі контактної пружини, використовуючи ескіз проєктованого апарату з попередньо прийнятими лінійними розмірами, наприклад, для електромагнітних контакторів постійного і змінного струму з важільними контактами і електромагнітом постійного струму клапанного типу ескіз зображений на рис 2.1.

Для електромагнітних контакторів змінного струму з важільними контактами і електромагнітом змінного струму клапанного типу ескіз зображений на рис. 2.2.

На рис. 2.1 і 2.2. позначені: 1 - пружини контактні; 2 - пружина поворотна; δ - робочий повітряний зазор.

Сила контактного натискання, приведена до осі контактної пружини:

$$P'_K = \frac{P_1 + P_2}{2}. \quad (2.1)$$

Для контакту важільного типу:

$$P'_K = P_K \frac{l}{l_1}, \quad (2.2)$$

де l_1 і l_2 – відстані згідно рис. 2.1. і 2.2. для контактних систем важільного типу.

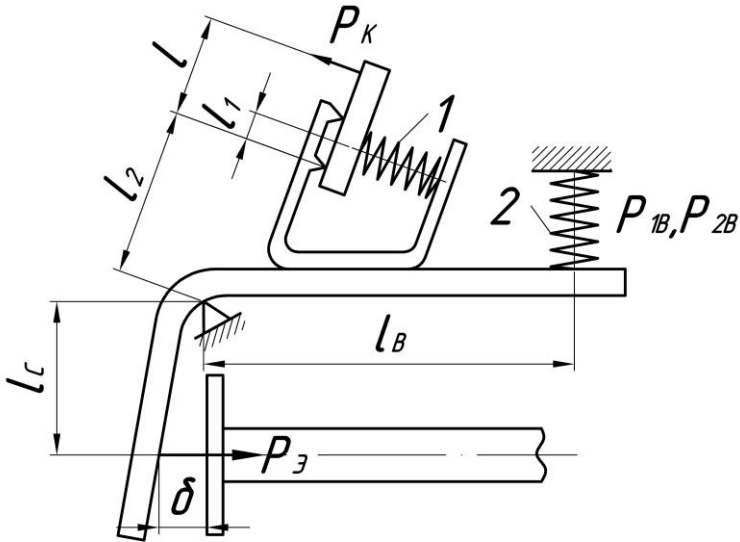


Рисунок 2.1 – Ескіз взаємного розташування контактів, пружин і електромагніту постійного струму клапанного типу

Для контактних схем місткового типу сила пружини забезпечує натискання двох контактів. В цьому випадку:

$$P'_K = 2 \cdot P_K. \quad (2.3)$$

Співвідношення між P_1 і P_2 можна прийняти:

$$P_1 = 0,6 \cdot P_2. \quad (2.4)$$

Величину попереднього (початкового) зусилля поворотної пружини P_{1B} приймають за величиною кінцевого натискання контактної пружини P_{2B} , наведеною до осі поворотної пружини. Для апарату з електромагнітом клапанного типу та розмикаючими головними контактами:

$$P_{1B} = (1,3...1,5) \cdot P_2 \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_B} \cdot K. \quad (2.5)$$

Для апарату з замикаючими контактами (рис. 2.1, 2.2):

$$P_{1B} = 0,3P_2 \frac{l_1 + l_2}{l_B} \cdot K. \quad (2.6)$$

де l_1 , l_2 , l_B – відстань, відповідно, від осі контактної пружини до осі контактного вузла, від осі повороту вузла до осі повороту всієї рухомої системи апарату (до призми), від осі поворотної пружини до призми;

K – число головних контактів апарату.

Для магнітного пускача з прямоходовим електромагнітом, трьома контактними пружинами і двома симетричними поворотними пружинами:

$$P_{1B} = \frac{0,3 \cdot 3}{2} \cdot P_2. \quad (2.7)$$

Кінцеве натискання зворотної пружини P_{2B} (в притягнутому положенні якоря) орієнтовно може бути прийняте $1,3 \cdot P_{1B}$.

Для побудови характеристики протидіючих сил розхил β_k і провал δ_n контактів, зусилля попереднього P_1 і кінцевого P_2 стиснення контактних пружин приводять до осі котушки електромагніту (до його робочого повітряного зазору).

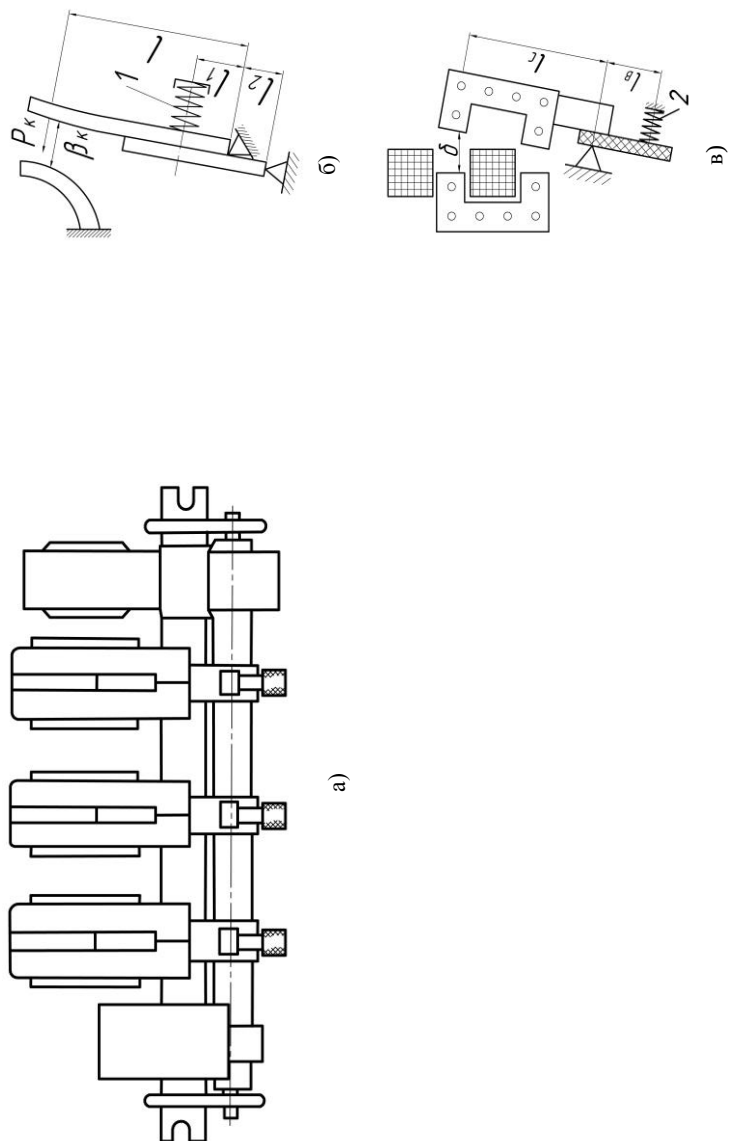


Рисунок 2.2 – Контактор змінного струму з електромагнітом змінного струму клапанного П-образного типу
а) – загальний вид, фронтальна проекція б) – перетин по контактам в) – перетин по електромагніту

Наприклад, для апарату, зображеного на рис. 2.1:

$$\begin{aligned} \beta'_k &= \beta_k \frac{l_c}{l_1 + l_2} & \sigma'_n &= \sigma_n \frac{l_c}{l + l_2} \\ P'_1 &= P_1 \frac{l_1 + l_2}{l_c} & P'_2 &= P_2 \frac{l_1 + l_2}{l_c} \\ P'_{1B} &= P_{1B} \frac{l_b}{l_c} & P'_{2B} &= P_{2B} \frac{l_b}{l_c} \end{aligned} \quad (2.8)$$

де β'_k , σ'_n – приведений до осі котушки розчин і провал контактів відповідно;

P'_1 , P'_2 и P'_{1B} , P'_{2B} – приведений до осі котушки початкове і кінцеве зусилля відповідно контактної і поворотної пружини.

Для апарату на рис 2.2. плече l_2 дорівнює нулю.

Приблизна характеристика протидіючих сил контактору з трьома замикаючими головними контактами і однією поворотною пружиною приведена на рис. 2.3.

На цій характеристиці не враховано наведені значення сил тяжіння і тертя, а також точність виготовлення пружини і інших деталей. Крім того, динамічна тягова характеристика електромагніту проходить нижче статичної тягової. У зв'язку з цим силу електромагніту, яку він може розвивати при критичному зазорі, можна визначити за виразом:

$$P_{эл.кр} = K_з \cdot P_{кр}, \quad (2.9)$$

де $K_з$ – коефіцієнт запасу для контакторів та магнітних пускачів рівний 1,3...1,7;

$P_{кр}$ – значення сумарної протидіє сили при критичному зазорі.

У контакторах за критичний зазор приймають зазор між якорею і сердечником при торканні контактів σ'_{II}

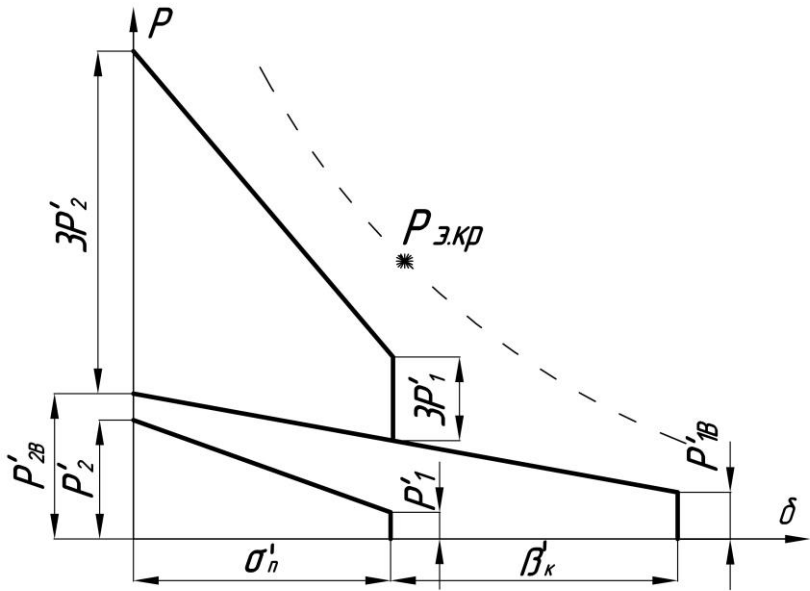


Рисунок 2.3 – Характеристика протидіючих сил

2.2 Попередній розрахунок електромагніту постійного струму

Завдання розрахунку - попереднє визначення розмірів магнітопроводу, намагнічувальної сили обмотки та її геометричних розмірів.

Для електромагнітів з полюсним наконечником площу перетину полюсного наконечника, см, визначають за формулою Максвелла:

$$S_{н.н.} = \sqrt{\frac{P_{э.кр}}{39,8 \cdot B_{\delta}^2}}, \quad (2.10)$$

де $P_{э.кр.}$ – тягова сила електромагніту в критичному зазорі Н;

B_{δ} – індукція в повітряному зазорі Т.

В існуючих конструкціях B_{δ} лежить в межах 0,5-0,9 Т.

Діаметр полюсного наконечника:

$$d_{н.н.} = \sqrt{\frac{4S_{н.н.}}{\pi}}. \quad (2.11)$$

Діаметр сердечника d_c встановлюють з рекомендованих літературою [3] співвідношень:

для малогабаритних клапанних електромагнітів $d_{н.н.}/d_c = 1,1..1,2$.

для великогабаритних $d_{н.н.}/d_c = 1,4..1,5$.

Висоту полюсного наконечника $h_{п.н.}$ визначають із співвідношень для малогабаритних клапанних електромагнітів $h_{п.н.}/d_c = 0,1..0,2$, для великогабаритних $h_{п.н.}/d_c = 0,2..0,3$.

Площа перетину сердечника:

$$S_c = \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (2.12)$$

Площа перетину якоря:

$$S_{я} = \frac{S_c}{\sigma_{вин}}, \quad (2.13)$$

де $\sigma_{вин}$ - коефіцієнт випинання, в попередньому розрахунку приймається рівним 1,1...1,5;
перетину ярма

$$S_{яp} \geq S_{я}. \quad (2.14)$$

Ширину якоря $\epsilon_{я}$ обирають рівною або дещо більшою діаметра полюсного наконечника $d_{н.н.}$.

Товщина якоря

$$a_{я} = \frac{S_{я}}{\epsilon_{я}}. \quad (2.15)$$

Намагнічуючу силу спрацювання обмотки F_{cp} розраховують для критичного зазору:

$$F_{cp} = K_{II} \cdot F_{\delta} = \frac{B_{\delta} \cdot \delta \cdot K_{II}}{\mu_0}, \quad (2.16)$$

де K_{II} – коефіцієнт, що враховує падіння намагнічувальної сили в неробочих зазорах і сталі магнітопроводу, становить 1,2-1,5;

B_{δ} – індукція у повітряному зазорі, Т;

δ – повітряний зазор у критичній точці, м;

μ_0 – магнітна проникність повітря, що дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м

Розміри обмотки обирають за тепловим фактором:

$$l_k = 3 \sqrt{\frac{F_{kp}^2 \cdot n \cdot \rho_0 (1 + a \cdot \Theta_{don}) \cdot ПВ \cdot K_3}{2 f_0 K_T \tau_{don}}}, \quad (2.17)$$

де n – співвідношення довжини котушки l_k до товщини h_k , для клапаних електромагнітів постійного струму приймається рівним 4 – 8;

$ПВ$ – тривалість включення, визначається режимом роботи електромагніту (при тривалому включенні $ПВ = 1$; при повторно-короткочасному режимі $ПВ < 1$ і приводиться в завданні);

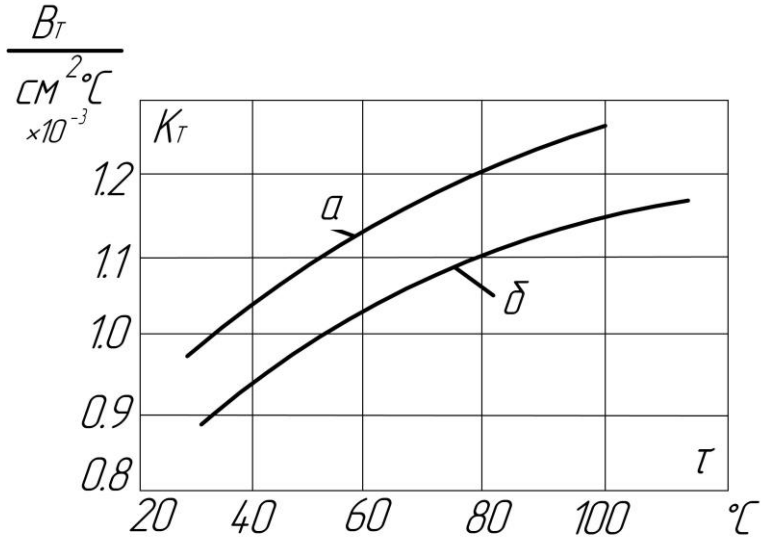
K_3 – коефіцієнт запасу, який визначається I/I_{mr} , зазвичай приймається рівним 1,3 – 2,0;

f_0 – коефіцієнт заповнення обмотки, в попередньому розрахунку приймається рівним 0,5;

K_T – коефіцієнт тепловіддачі, приймається по рис. 2.4, залежно від перевищення температури нагріву обмотки; а - для котушки безкаркасної, б - каркасної.

Товщина котушки:

$$h_k = \frac{l_k}{n}. \quad (2.18)$$

Рисунок 2.4 – залежність $K_T=f(\tau)$

Ширина ярма:

$$e_{\text{я}} \approx d_c + 2 \cdot h_k. \quad (2.19)$$

його товщина:

$$a_{\text{яp}} = \frac{S_{\text{яp}}}{e_{\text{яp}}}. \quad (2.20)$$

З конструктивних міркувань зазор між ярмом і обмоткою $h - h_k$ з метою зменшення потоків розсіювання приймають рівним 0,5 – 1,5 см.

За результатами викреслюють ескіз електромагніту із зазначенням конкретних розмірів, отриманих при розрахунку.

Котушка - основна частина всіх електромагнітів, що забезпечує необхідну намагнічувальну силу (н. с.) спрацьовування електромагніту.

Завдання розрахунку - визначити діаметр проводу d , кількість витків W і опір обмотки, які забезпечують необхідну н. с. при допустимих параметрах нагріву.

У електромагнітних контакторах постійного і змінного струму застосовують каркасні і безкаркасні котушки. Недолік каркасних котушок - погіршена теплопровідність і велика втрата обмоткового простору.

Розріз каркасних котушок надано на рис. 2.6, а поздовжній для круглої; б - поперечний для прямокутної.

Для визначення обмоткового простору каркасної котушки необхідно врахувати товщину стінок ізоляційного матеріалу каркаса, яка з технологічних міркувань може виявитися значною. З урахуванням товщини стінок визначають довжину обмотки l_0 і її товщину h_0 .

Середня довжина витка обмотки для круглої котушки:

$$l_{cp} = \pi(d_0 + h_0). \quad (2.21)$$

для прямокутної (рис. 4.11, б)

$$l_{cp} = a_0 + b_0 + A_0 + B_0. \quad (2.22)$$

Діаметр круглого дроту обмотки:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho_0(1 + a\Theta_{don}) \cdot l_{cp} \cdot F_{cp} \cdot K_3}{\pi U}}, \quad (2.23)$$

де U – напруга джерела живлення.

За знайденим діаметром дроту d з [2] визначають найближчий більший стандартний діаметр голого проводу; діаметр ізольованого проводу d_1 і коефіцієнт заповнення обмотки f_0 .

Кількість витків обмотки:

$$W = f_0 \frac{4 \cdot h_0 \cdot l_0}{\pi d_1^2}. \quad (2.24)$$

Активний опір обмотки:

$$R = \frac{4\rho_0(1 + \alpha\theta_{дон}) \cdot l_{cp}}{\pi d^2} W. \quad (2.25)$$

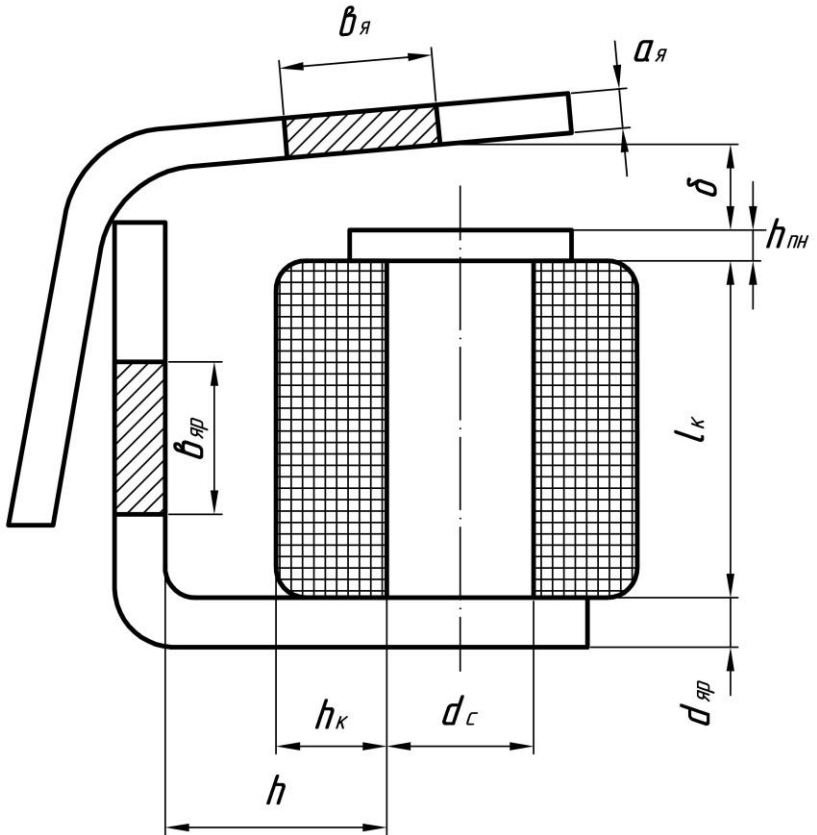


Рисунок 2.5 – Ескіз клапанного електромагніту

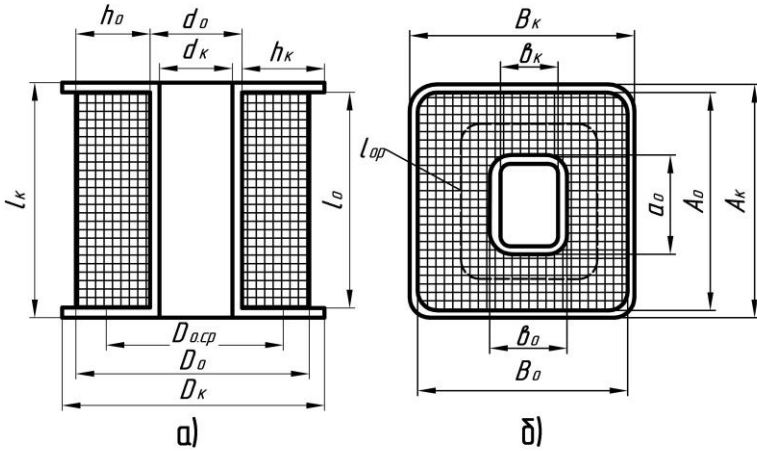


Рисунок 2.6 – Перетин каркасних котушок

Для теплового розрахунку необхідно знати максимальний струм обмотки:

$$I = \frac{1,05 \cdot U}{R} . \quad (2.26)$$

та її максимальну потужність:

$$P = I^2 \cdot R . \quad (2.27)$$

Уточнюють значення н. с. обмотки: $F = I \cdot W$

Перевіряють умову $F \geq F_{сп} \cdot K_3$. Якщо вона не виконується, то змінюють габарити котушки, а іноді і всього електромагніту.

Для контролю розрахунків доцільно визначити щільність струму в обмотці:

$$j = \frac{I}{g} = \frac{4I}{\rho \cdot d^2} , \quad (2.28)$$

і порівняти її з припустимою величиною j .

Припустима щільність струму, A/mm^2 :

для нормального терміну служби і тривалого режиму включення обмотки

$$j=2\dots4.$$

для повторно-короткочасного режиму включення

$$j=5\dots12.$$

Для короткочасного

$$j=13\dots30.$$

Перевищення температури над температурою навколишнього середовища розраховують за формулою Ньютона

$$\tau_y = \frac{P}{K_T S_{охл}}, \quad (2.29)$$

де P – максимальна теплова потужність, виділена в обмотці;

K_T – коефіцієнт тепловіддачі, визначається за рис 2.4;

$S_{охл}$ – площа поверхні охолодження котушки.

$$S_{охол} = \pi(D_0 + K_B d_0) l_0, \quad (2.30)$$

де K_B – коефіцієнт, що характеризує відношення тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхні котушки.

Досвід показує, що K_B має приблизно наступні значення:

для каркасних котушок (залежно від товщини стінок каркаса) – 0,4...0,5;

безкаркасних – 0,9;

намотаних на ізольовану металеву гільзу – 1,7;

намотаних на ізольований сердечник – 2,4.

Критерій правильності розрахунку обмотки - виконання умови

$$\tau_y \leq \tau_{\text{доп}}.$$

де $\tau_{\text{доп}}$ – допустиме перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, яке визначається класом ізоляції проводу та міжшаровою ізоляцією.

Для найбільш часто застосовуваного обмоткового дроту з емалевою ізоляцією парки ПЕЛ $\tau_{\text{доп}}=85^{\circ}\text{C}$.

2.3 Попередній розрахунок електромагніту змінного струму

Для зменшення втрат на вихрові струми і перемагнічування магнітні системи електромагнітів змінного струму виконують з тонколистової сталі з високим питомим опором. Тому для них характерним є квадратний або прямокутний перетин магнітопроводу і прямокутна форма котушки. Ескізи магнітопроводів Ш- і П-образного типів представлені, відповідно, на рис 2.7 а і 2.7 б, ескіз котушки - на рис. 2.6 б.

Площа перетину сердечника, см^2 , розраховуються за формулою Максвела:

$$S_c = \frac{P_3 K_3}{19,9 B_{\delta}^2}. \quad (2.31)$$

Визначають розміри сторін сердечника a і b :

$$a = \frac{S_c}{K_{3, \text{ст}} b}, \quad (2.32)$$

де $K_{3, \text{ст}}$ – коефіцієнт заповнення перерізу пакета сталлю для листів товщиною 0,35 мм і 0,5 мм $K_{3, \text{ст}}=0,9$ і 0,95 відповідно.

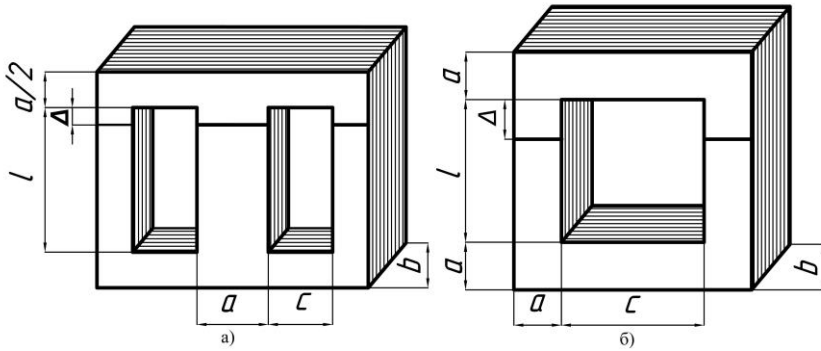


Рисунок 2.7 – Ескізи шихтованих магнітопроводів

У шихтованих магнітопроводів оптимальне відношення сторін прямокутного перерізу $a/\delta=1$, однак з конструктивних міркувань його можна прийняти від 0,8 до 2.

У Ш-образного магнітопроводу ширину крайніх стрижнів приймають рівною $a/2$, площа перетину підстави – $(0,5 \dots 0,7) S_c$.

Площа перетину якоря визначають через результуючий коефіцієнт розсіювання σ_p :

$$S_{\text{я}} = \frac{S_c}{\sigma_p}, \quad (2.33)$$

$$\sigma_p = 1,75 \dots 4,75\delta^* \text{ при } \Delta > \delta;$$

$$\sigma_p = 1 \dots 11,5\delta^* \text{ при } 0 \leq \Delta < \delta.$$

Ширину якоря приймають рівною ширині сердечника δ .

Значення базового розміру

$$l_{\text{баз}} = \sqrt{S_c} = \sqrt{a \cdot \delta}. \quad (2.34)$$

Відносна величина робочого зазору

$$\delta^* = \frac{\delta}{l_{\text{баз}}}. \quad (2.35)$$

Ширина вікна

$$C = c^* \cdot a, \quad (2.36)$$

де $C^*=0,8 \dots 1,2$.

Середня довжина витка обмотки

$$l_{cp} = 2(a + b) + 4c. \quad (2.37)$$

Висота вікна

$$l = \frac{0,33 \cdot l_{cp} \cdot \sqrt{l_{\delta a3}}}{C}. \quad (2.38)$$

Число витків котушки

$$W = \frac{K_{н.мин} \cdot U_H K_r}{4,44 \cdot f \cdot B_{\delta maxomn} \cdot S_c}, \quad (2.39)$$

де $K_{н.мин}$ – коефіцієнт, що враховує мінімально можливу напругу в мережі, рівний $0,7 \dots 0,8$;

U_H – номінальна напруга мережі, яка живить обмотку;

K_K – коефіцієнт, що враховує падіння напруги в активному опорі;

f – частота живильної мережі;

B_δ – індукція в повітряному зазорі при відпущеному якорі.

$$K_r = \sin \left\{ \arctg \left[0,078 \left(4,75 + \frac{1,75}{\delta^*} \right) \sqrt{l_{\delta a3}^3} \right] \right\}. \quad (2.40)$$

Площа перетину обмотувального дроту:

$$g_M = \frac{S_K \cdot K_{3M}}{W}, \quad (2.41)$$

де S_k – площа перетину магнітопроводу;

$K_{зм}$ – коефіцієнт заповнення котушки, за рекомендаціями [6] приймається в середньому у межах 0,2-0,22.

Значення намагнічувальної сили спрацьовування визначається з виразу:

$$F_{cp} = \frac{B_{\delta_{максomn}}}{\mu_0 \cdot \sigma_{вып}} (\Sigma \delta_{omn} + \sigma_p \Sigma \delta_{пр.э}), \quad (2.42)$$

де $\Sigma \delta_{omn}$ – сумарний зазор «відлипання», дорівнює для Ш і П-образних систем $2\delta_{omn}$, при відпущеному якорі, м;

$\Sigma \delta_{пр.э}$ – сумарний еквівалентний зазор при притягнутому якорі, рівний $(0,2 \dots 0,7) \cdot 10^{-3}$ м;

$\sigma_{вып}$ – коефіцієнт випинання, значення якого вибирається в межах 1...1,8.

Максимальний струм котушки при відпущеному якорі приблизно можна визначити якщо знехтувати індуктивним опором обмотки:

$$I_{макс} = \frac{1,05U_n}{R}. \quad (2.43)$$

Тоді сила, що намагнічує електромагніту у момент включення при відпущеному якорі

$$F = I_{макс} \cdot W. \quad (2.45)$$

Перевіряють умову $F \geq F_{cp}$. Якщо вона не виконується, то змінюють габарити котушки, а іноді і всього електромагніту.

Для теплового розрахунку електромагніту необхідно знати величину струму, що проходить по обмотці в притягнутому положенні якоря:

$$I = \frac{1,05U_n}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (2.46)$$

де R , X – активний і індуктивний опір обмотки відповідно.

$$R = \frac{\rho_0(1 + a\theta_{don})l_{cp}}{g_m} W, \quad (2.47)$$

$$X = \omega \cdot L, \quad (2.48)$$

де ω – частота, що дорівнює $2\pi f$;

L – індуктивність обмотки.

$$L = W^2 \Delta\delta,$$

де $\Delta\delta$ – провідність повітряного зазору при притягнутому якорі.

$$A_\delta = \mu_0 \frac{S_c}{\Sigma\delta_{np.з.}}. \quad (2.49)$$

Стале підвищення температури τ_{yct} згідно формули Ньютона

$$\tau_{yct} = \frac{\Sigma P}{K_{TO} \cdot S_{охл}}, \quad (2.50)$$

або

$$\tau_{yct} = \frac{P_{cm} + P_\varepsilon + P_m}{K_{TO} \cdot S_{охл}}, \quad (2.51)$$

де ΣP – сумарні втрати в обмотці електромагніту;

P_{cm} , P_ε , P_m – втрати відповідно в стали від гистерезису і вихрових струмів; в екранованому витку; в активному опорі обмотки.

$$P_m = I^2 R, \quad (2.52)$$

$$P_{cm} = K_g \cdot P_{з.в.} \cdot G_{cm}, \quad (2.53)$$

де K_g – дослідний коефіцієнт, що враховує підвищення втрат в зібраному магнітопроводі в порівнянні з втратами в листах сталі, приймається рівним 2-3;

$P_{r.b.}$ – питомі втрати потужності від гистерезису і вихрових струмів, що визначаються за таблицями або графіками [3] при $B_m = 1,5B$;

G_{cm} – маса сталі магнітопроводу.

Втрати в екрануючому витку P_g враховують, якщо він розташований на сердечнику всередині котушки. За дослідними даними [3] вони становлять близько 58-60% від загальних втрат у котушці. З урахуванням цього:

$$P = P_{cm} + P_g + P_M = (2,4...2,5)(P_{cm} + P_M). \quad (2.54)$$

Для котушок електромагнітів змінного струму у випадках, коли втрати в сталі незначні і магнітопровід має низьку температуру, площу охолодження $S_{охл}$ враховують так само, як і для електромагнітів постійного струму.

У каркасних котушок з ізоляційного матеріалу відносно великої товщини, в яких внаслідок нагріву сердечник утворюється зустрічний тепловий потік, площею охолодження $S_{охл}$ є тільки зовнішня бокова поверхня.

У безкаркасних котушок електромагнітів, що мають сумірні з довжиною l_k величини зовнішнього діаметру (одної з зовнішніх сторін), площею охолодження є бічна зовнішня і торцеві поверхні.

Коефіцієнт тепловіддачі K_{TO} можна брати таким же, як і для котушок електромагнітів постійного струму (див. рис 2.4).

Якщо в результаті теплового розрахунку котушки буде задоволена нерівність:

$$\tau_{уст.} < \tau_{доп.}$$

то попередній розрахунок можна вважати закінченим. При недотриманні нерівності необхідне коригування розмірів магнітопроводу і обмотки.

Перевірочні розрахунки електромагнітів постійного і змінного струму з розрахунком і побудовою тягових характеристик досить докладно викладено в [2] в главах 12 і 13 відповідно.

З ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАПІВПРОВІДНИКОВОГО БЛОКУ ГІБРИДНОГО КОНТАКТОРА ЗМІННОГО СТРУМУ

Детальний аналіз силових схем гібридних контакторів змінного струму приведений в [3] виходячи з наступних критеріїв:

- тривалість горіння дуги на контактах t_d , яка визначає рівень комутаційної зносостійкості;
- кількість корпусів СНП, що визначає габарити та вартість;
- наявність гальванічної розв'язки між вхідними та вихідними затисками, від чого залежать вимоги до техніки безпеки;
- галузь застосування (для мереж з ізолюваною та неізолюваною нейтраллю);
- можливості використання базових серійних контакторів для застосування пристроїв, що забезпечують бездугову комутацію;
- необхідність спеціального приводу для керування контактами;
- можливість застосування базових серійних контакторів для застосування пристроїв, що забезпечують бездугову комутацію;

В даному посібнику розглянута силова схема прийнята у гібридних контакторах змінного струму серій КТ64, КТ65, КТП64, КТП65, на номінальні струми від 160 А до 630 А., що серійно випускаються (Рис. 3.1).

3.1 Вибір силових напівпровідникових пристроїв

У відімкненому стані контактора на тиристори діють змінна напруга мережі та імпульсні перенапруги, що створюються зовнішніми джерелами (в основному при вимкненні паралельно ввімкнених індуктивних навантажень різними комутаційними апаратами). Захист від перенапруг виконується обиранням відповідного класу тиристорів, застосуванням RC-ланцюгів або варисторів, ввімкнених паралельно тиристорам. Тепловий режим тиристорів визначається лише темпера-

турою навколишньої середи, оскільки втрати від струму в зачиненому стані тиристорів і зворотнього струму є дуже незначними.

У ввімкнутому положенні контактора на тиристори впливають тільки теплові втрати в колах управління в схемі з трансформатором струму при практично нульовій напрузі (не більше 0,1 В) між анодом і катодом.

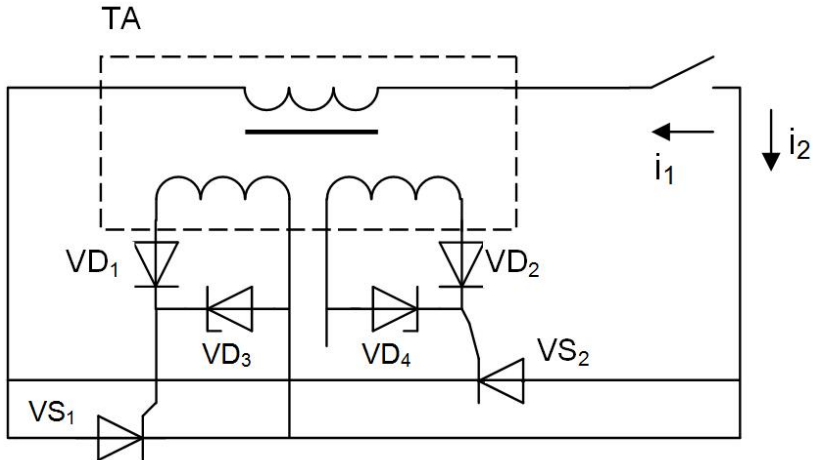


Рисунок 3.1 - Базова схема управління по струму комутованого ланцюга із застосуванням трансформатора струму ТА

У цьому полягає основна відмінність режиму роботи тиристорів в гібридних апаратах від тиристорів, де у ввімкненому стані відбувається виділення підвищеної потужності внаслідок застосування тиристорів на великі номінальні струми з громіздкими радіаторами для відводу тепла. Все це істотно збільшує габарити тиристорних апаратів.

У зв'язку з незначною середньою розсіюваною потужністю тиристорів в гібридних контакторах застосовуються на менші номінальні струми і без радіаторів.

Дуже важливим фактором при виборі силових напівпровідникових приладів є захист СНП при протіканні через гібридний контактор наскрізних струмів короткого замикання. У контактних контакторах

при протіканні наскрізних струмів короткого замикання під дією електродинамічних сил відбувається розмикання контактів, виникнення електричної дуги, руйнування контактів або зварювання при подальшому відключенні струму зовнішнім апаратом. Існуючі нормативні документи не регламентують стійкість контакторів до струмів короткого замикання. У гібридних контакторів при відкинутих контактах внаслідок виникнення падіння напруги на дузі відбувається перехід струму короткого замикання в тиристори й можливий їх вихід з ладу. Захист тиристорів може бути виконана наступними способами:

- застосування тиристорів з підвищеним номінальним струмом, які мають ударний струм за час 10 мс, більшим струму що відгалужується в коло тиристорів при відкиненні контактів;
- використання спеціальних засобів для відключення кіл управління тиристорів у ввімкненому стані контактора для того, щоб зовсім виключити протікання струму через тиристори;
- застосування контактів з електродинамічної компенсацією відкиду;
- включення послідовно з тиристорами запобіжників;
- включення послідовно з контактором швидкодіючого струмобмежувального вимикача.

Аналіз перерахованих способів захисту тиристорів від наскрізних струмів короткого замикання наведений в [3] і досвід експлуатації гібридних контакторів показують, що в більшості випадків за умови надійної профілактики цехових мереж і внаслідок цього вельми малої ймовірності виникнення струму короткого замикання взагалі і особливо, з підвищеними струмами короткого замикання (більше 10-15 кА) достатньо вибрати тиристори для гібридних контакторів з кратністю ударного струму до максимально комутованого, орієнтовно рівною 2-3, що забезпечить надійну роботу контакторів при захисті їх швидкодіючим вимикачем серії АЗ700. Для перспективних контакторів з підвищеною надійністю доцільним є застосування контактів з електродинамічної компенсацією.

3.2 Розрахунок системи управління гібридного контактору з трансформатором струму

Базова схема управління по струму комутованого ланцюга із застосуванням трансформатора струму (ТА) приведена в однополюсному виконанні на рис. 3.1. При ввімкнених головних контактах (ГК) по первинній обмотці w_1 проходить струм $i_1 = I_m \cdot \sin \omega t$. У вторинних обмотках з числом витків w_2 протікають струми i_2 , які у загальному випадку через матеріал магнітопроводу ТА і впливу стабілітрону є несинусоїдальними. При струмі i_2 більшому за відмикаючий струм тиристора I_{GT} тиристири знаходяться у відчиненому стані і по ланцюгу анод-катод можуть проходити струми, якщо падіння напруги U_K між місцями приєднання тиристорів до головного ланцюгу перевищують порогову напругу тиристора U_{GT} . Вибором параметрів ТА забезпечується виконання нерівності $U_K < U_{GT}$ з метою зменшення теплових втрат в номінальних режимах. Наприклад, в серійних гібридних контакторах КТ64 і ТК65 $U_K \approx 0,1$ В, тоді як $U_{GT} > 1$ В. При розмиканні контактів між ними виникає коротка електрична дуга з напругою $U_d \geq 10$ В і під дією різниці напруг $U_d - U_{TM}$ відбувається перехід струму в ланцюг тиристора зі швидкістю, яка визначається індуктивностями контурів контактів L_K та первинної обмотки ТА L_1 .

Значення швидкості визначається наближено за наступним співвідношенням:

$$\frac{di}{dt} \approx -\frac{U_d - U_{TM}}{L_K + L_1}, \quad (3.1)$$

где U_{TM} - імпульсна напруга у відкритому стані тиристора.

Проектування ТА повинно виконуватися з умови мінімального кута зсуву фаз між i_1 і i_2 . Значення струму i_2 та зсув фаз i_1 і i_2 визначаються параметрами ТА: w_1 , w_2 , перетином магнітопроводу S , серед-

ньою довжиною магнітопроводу l , петлею гистерезиса $B = B(H)$, активним опором вторинних обмоток, а також елементами схеми: напругою стабілізації U_{cm} , опором ланцюга управління R .

Зменшення кута зсуву фаз між струмами i_1 і i_2 досягається зменшенням опору вторинних обмоток r , збільшенням S і w_2 і застосуванням сталей з максимальним μ і B_S . Для наближених розрахунків можна припускати, що:

$$i_2 \cdot w_2 \approx i_1 w_1, \quad (3.2)$$

тоді:

$$\varphi_y = \arcsin \frac{w_2 \cdot I_{GT}}{w_1 \cdot I_m}. \quad (3.3)$$

Для визначення доцільності зменшення φ_y в [3] наведена оцінка зносу контактів гібридного і контактного апаратів. Розраховано відношення комутаційної зносостійкості гібридного апарата N_Γ до комутаційної зносостійкості контактного апарату N_K , у функції φ_y . Дані розрахунку зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Залежність $\frac{N_\Gamma}{N_K} = f(\varphi_y)$

φ_y	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
$\frac{N_\Gamma}{N_K}$	9461	1184	352	149	76,8	44,8	28,4

З наведеного розрахунку випливає, що для підвищення зносостійкості гібридних апаратів до 5 млн. циклів при 0,2 млн. циклів у контактних досить вибрати $\varphi_y \approx 35^\circ$.

Однак, оскільки знос обумовлений також короткою дугою при розмиканні контактів і механічними впливами при ввімкненні, то необхідним є зменшення φ_y нижче за 35° . Конкретний вибір виконується на основі експериментальних даних шляхом зміни w_2 за максималь-

ним значенням I_{GT} , наведеним в технічних умовах на тиристори. Оскільки реальні значення I_{GT} завжди менше за максимальні, то матиме місце запас за комутаційною зносостійкістю, зумовленою дуговою ерозією. При зменшенні φ_y (або w_2) збільшується i_2 , що призводить до підвищення теплових втрат P в ТА на опорі вторинних обмоток r і особливо в стабілітронах, а також ростуть S і габарити ТА.

Числа витків w_1 і w_2 , визначаються за заданим із умови комутаційної зносостійкості кутом φ_y при максимальному відмикаючому струмі I_{GT} .

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{I_{GT}}{I_m \cdot \sin \varphi_y}, \quad (3.4)$$

де I_m – амплітуда максимального коммутуємого струму.

Перетин магнітопроводу S може бути визначено за такою формулою:

$$S = \frac{U_{cm}^2}{2\omega w_1 I_m \cdot R_0 B_{\max}} \cdot f_{S1}, \quad (3.5)$$

де

$$f_{S1} = \frac{\pi}{\sin \varphi_y} \left[1 - \frac{2}{\pi} \varphi_{cm} + \frac{2}{\pi} \sin \varphi_{cm} (1 - \cos \varphi_{cm}) + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{r}{R_0 \cdot \sin \varphi_y} \cdot \frac{U_{FM}}{U_{cm}} \right]$$

,

$$R_0 = \frac{U_{GT}}{I_{GT}}, \quad \sin \varphi_{cm} = \frac{R_0}{R_{\max}} \cdot \sin \varphi_y,$$

де $B_{\max}$ – максимальне значення індукції матеріалу магнітопроводу;

U_{cm} – максимальна напруга стабілізації, яка визначається з урахуванням допусків:

$$U_{cm} = \frac{R_{max}[U_{cm.ном} + r_{TC}(\frac{w_1 I_m}{w_2} - I_{cm.ном})]}{r_{TC} + \frac{w_1 I_m}{w_2}}, \quad (3.6)$$

де r_{max} – максимальний опір ланцюга управління;

$U_{cm. ном.}$ – номінальний опір стабілізації;

r_{TC} – динамічний опір стабілітрона;

U_{FM} – напруга на діоді, приймається для спрощення постійною.

Для наближених розрахунків при $R_0 \leq R_{max}$ і $r \leq R_{max}$

$$f_{S1} = \frac{\pi}{\sin \varphi_y} (1 + \frac{U_{FM}}{U_{CT}}). \quad (3.7)$$

Теплові втрати у схемі P складаються з втрат у активних опорах обмотки r , ланцюга управління R , в діодах і стабілізаторах.

$$P = \frac{U_{CT}^2}{\pi R_0} \cdot f_{P1}, \quad (3.8)$$

$$f_{P1} = f_R + f_D + f_r + f_{CT}, \quad (3.9)$$

де f_R, f_D, f_r, f_{cm} , – відповідно складові втрат в R , діоді r і стабілізаторі

$$f_R = \frac{R_{max}}{R_0} \cdot \frac{\varphi_{cm} - \frac{1}{2} \sin 2\varphi_{cm}}{\sin^2 \varphi_y}, \quad (3.10)$$

$$f_D = \frac{2U_{FM}}{U_{cm} \cdot \sin \varphi_y}, \quad (3.11)$$

$$f_r = \frac{\pi r}{2R_0 \cdot \sin^2 \varphi_y}, \quad (3.12)$$

$$f_{cm} = \frac{2 \cos \varphi_{CT}}{\sin \varphi_y}. \quad (3.13)$$

Значення амплітуди напруги на тиристорі при незначному впливі намагнічувального струму дорівнює:

$$U_T = r \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot I_m + (U_{cm} + U_{FM}) \cdot \frac{w_1}{w_2} + U_K, \quad (3.14)$$

де U_K – напруга на контактах в замкнутому стані і в провідниках між місцями приєднання тиристорів.

При $U_T > U_{GT}$ ((порогова напруга) струм в тиристорі практично дорівнює нулю;

При $U_T < U_{GT}$ струм в тиристорі i_T може бути визначений з рівняння:

$$i_T = \frac{r \frac{w_1}{w_2} I_m \cdot \sin \omega t + U_K + (U_{cm} + U_{FM}) \cdot \frac{w_1}{w_2} - U_{GT}}{r_T + r \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2}. \quad (3.15)$$

Амплітуда струму i_T визначається при $\omega t = \pi/2$.

Час протікання струму:

$$\Delta t_T = \frac{2}{\omega} \left[\pi - \arcsin \frac{U_{GT} - U_K - (U_{cm} + U_{FM}) \cdot \frac{w_1}{w_2}}{\left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot r \cdot I_m} \right]. \quad (3.16)$$

Діоди VD3, VD4, які здійснюють захист кін управління тиристорів, вибираються за значенням напруги стабілізації U_{cm} з умови:

$$U_{cm} > U_{GT}.$$

Після розрахунку перерізу магнітопроводу S і числа витків вторинної обмотки ТА вибирається перетин дроту вторинної обмотки і розраховуються її активний опір r .

Знаючи розміри струмоведучих шин контактора і товщину намотування вторинних обмоток ТА визначається мінімальний внутрішній діаметр сердечника трансформатора струму ТА.

Діоди VD3 і VD4 обираються за максимальним вторинним струмом ТА.

3.3 Конструктивна розробка напівпровідникового блоку

Напівпровідниковий блок призначено для установки на серійно виробляемі контактори КТ 6000 без істотної зміни конструкції контактору. Це означає, що окремі габарити напівпровідникового блоку повинні відповідати габаритам контактора. Це стосується в першу чергу товщини напівпровідникового блоку, яка буде обмежуватися міжосьовою відстанню між смугами контактора. Конструкція серійно виробляемого напівпровідникового блоку БПК21 наведена в [3], опис якого і рекомендації з його проектування будуть вельми корисні для розробки напівпровідникового блоку.

Напівпровідниковий блок можна встановлювати безпосередньо на полюсі контактора або окремо.

В останньому варіанті довжина сполучних проводів повинна бути не більше 1,5 метра.

Використання серійних контакторів для гібридних апаратів змінного струму дозволяє прискорити процес освоєння у виробництві та впровадження в промисловість. У серійних контакторів може бути вилучена котушка магнітного дуття, необхідність в якій відпала у зв'язку з відсутністю дуги. При цьому можна економити мідь і прискорити перехід струму з контактів в тиристори у зв'язку з тим, що наявність котушки уповільнює цей перехід.

Істотним недоліком контакторів серії КТ з електромагнітним приводом змінного струму є менша механічна зносостійкість внаслідок великих значень ударів якоря в ярмо, а також підвищені струми ввімкнення приводу, що вимагає збільшення потужності і габаритів апаратів управління контактором. Ці недоліки відсутні у контакторів з електромагнітним приводом постійного струму клапанного типу. Однак такий привід має великі габарити, велику матеріаломісткість сталі та міді і великі часи включення і відключення. У зв'язку з цим, як відмічається у [3], розроблена нова конструкція приводу контактора змінного струму з електромагнітом постійного струму з використанням форсування котушки що має пускову і утримуючу обмотки. Це дозволяє істотно економити сталь магнітної системи і мідь обмотки. Також практично в два рази зменшується час спрацьовування при включенні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Таєв І.С. Електричні апарати управління. – М.: Вища школа, 1984. – 247 с.
2. Сахаров П.В. Проектування електричних апаратів. – М.: Енергія, 1971. – 560 с.
3. Могилевський Г.В. Гібридні електричні апарати низької напруги. – М.: Енергоатоміздат, 1986. – 214 с