

## **Розділ 5. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРООБЛАДНЕННЯ**

### **5.1. Розрахунок тягових реле стартера**

#### *5.1.1. Етапи проектування та структура розрахунку*

На практиці зазвичай вирішується напівзворотна задача коли як вихідні дані задаються номінальна напруга борта та необхідні хід і тягова сила електромагнітного приводу. Проектування та розрахунок тягового реле виконують, якщо за результатами підбору стартера не вдається обрати аналог з задовільними характеристиками (наприклад, при оригінальній конструкції механізму приводу) або в разі використання нових матеріалів та прогресивних технологій виготовлення електричних апаратів.

На етапі попереднього проектування стартера аналізуються вихідні дані та умови експлуатації, обирається принципове технічне рішення реле, розглядаються аналоги окремих деталей (рис. 5.1.1).

Попередній розрахунок тягового реле на етапі ескізного проектування полягає в послідовному визначенні основних структурних параметрів електромагнітного приводу. За результатами попереднього розрахунку синтезується конструкція магнітної системи та електричної обмотки реле. Метою попереднього розрахунку є визначення працездатності синтезованого реле на основі аналізу тягової та протидіючої характеристик [3]. Якщо на цьому етапі отримані незадовільні результати, розрахунки повторюють, обираючи нові структурні параметри в межах рекомендованих значень. Цей процес носить ітераційний характер.

Далі деталізується ескізне креслення конструкції реле з максимальним застосуванням уніфікованих деталей та вирішується пряма задача. На етапі перевірного розрахунку, після синтезу конструкції реле у вигляді робочих креслень, послідовно уточнюються параметри магнітної системи (магнітні провідності повітряних зазорів, коефіцієнти розсіювання) та обмотки (тип проводу, вид намотки), виконується розрахунок температурного режиму, визначаються динамічні характеристики (час рушання).

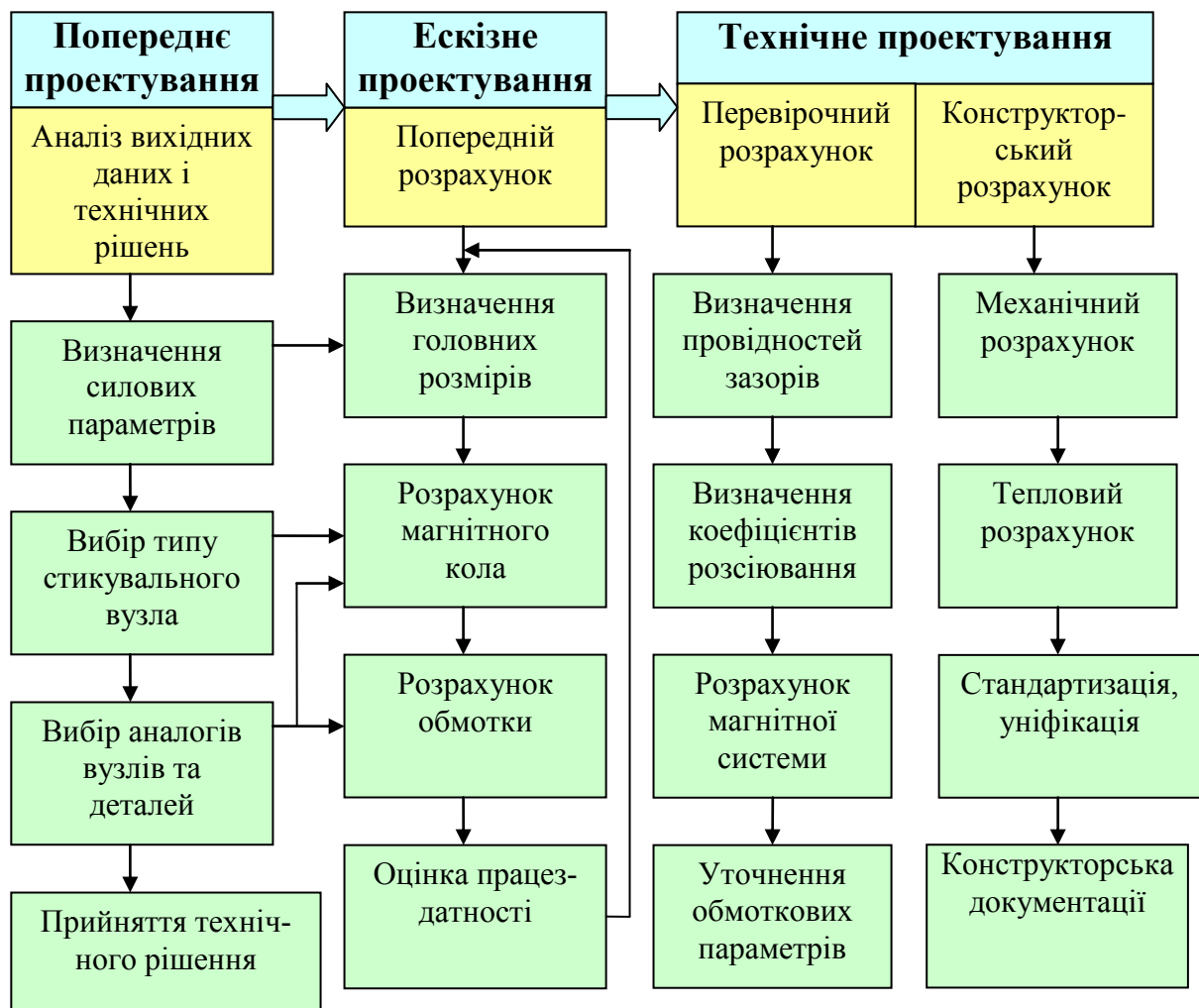


Рис. 5.1.1. Етапи проектування та структура розрахунку тягового реле стартера

На етапі конструкторського розрахунку вирішуються завдання, пов'язані з надійністю та технологічністю виготовлення тягового реле, виконується підготовка конструкторської документації.

### 5.1.2. Аналіз вихідних даних та вибір типу магнітної системи

До розрахунку тягового реле приступають після вибору стартерного електродвигуна та синтезу механізму приводу стартера. Як вихідні дані для розрахунку електромагніта приводу розглядають напругу бортової мережі та необхідний хід якоря реле. Під якорем реле розуміють рухому частину внутрішнього магнітопроводу, під сердечником – нерухому. Таким чином напруга живлення обмотки

розглядається як керуючий сигнал, а механізм приводу як механічне навантаження тягового реле.

Для попереднього розрахунку визначають (якщо не обумовлено замовником в технічному завданні) такі параметри.

1. Напругу обмотки електромагніту  $U_{OP}$ , виходячи з параметрів АКБ і електростартера (номінальні потужності).

2. Потужність  $P_{OP}$  або струм  $I_{OP}$ , що споживається обмоткою, виходячи з потужності стартерного електродвигуна.

3. Початкове тягове електромагнітне зусилля  $F_{EP}$ , виходячи з початкового тиску пружини, що повертає, у механізмі приводу.

4. Хід якоря (початковий зазор)  $\delta_{II}$ , виходячи з конструкції механізму приводу (хід ведучої шестерні, передача важеля).

5. Коефіцієнт повернення  $k_{пов}$ , виходячи з допустимої підсадки напруги  $\Delta U_{AB}$  під час вмикання стартерного електродвигуна.

6. Матеріал магнітопроводу, виходячи з економічних міркувань і вимог до габаритних розмірів реле.

7. Температуру навколишнього середовища (повітря), виходячи з умов експлуатації (обирається максимальна плюсова).

8. Режим включення обмотки (тривалість старту, тривалість перерви між спробами старту, кількість спроб старту), виходячи з пускових характеристик ДВЗ для найважчих умов (при мінімальній температурі пуску) та експлуатаційних вимог.

Згідно з кінематичною схемою (рис. 5.1.2, а) будується протидіюча характеристика механізму приводу **де**: 1 – обмотка електромагніта; 2 – якір тягового реле; 3 – пружина, що демпфірує; 4 – силові контакти; 5 – пружина, що повертає; 6 – важіль приводу; 7 – буферна пружина; 8 – муфта вільного ходу; 9 – шестерня приводу.

Протидіюча характеристика механізму приводу (рис. 5.1.2, б) має окремі силові ділянки: 1 – початковий тиск пружини, що повертає; 2 – стискування пружини, що повертає; 3 – упор шестерні у прокладки (початковий тиск буферної пружини); 4 – стискування буферної пружини та пружини, що повертає, одночасно; 5 – вхід шестерні у зачеплення й замикання контактної групи; 6 – стискування пружини, що демпфірує, пружини, що повертає, та буферної пружини одночасно. Побудована в такий спосіб протидіюча характеристика дозволяє обрати початкові тягове зусилля  $F_{EP}$  та зазор  $\delta_{II}$  тягового реле, що проектується, під заданий механізм приводу.

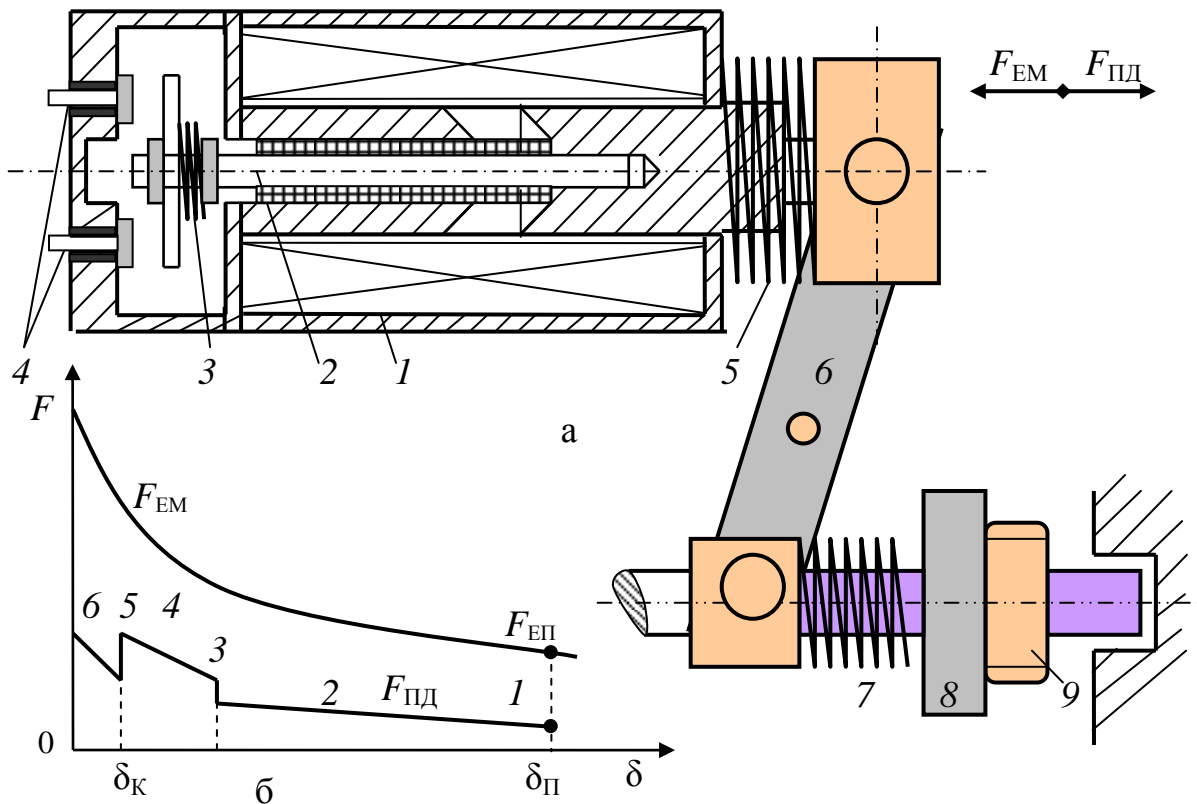


Рис. 5.1.2. Механізм приводу: а – кінематична схема; б – протидіюча характеристика

Перш за все обирають тип магнітного кола, яке для тягових електромагнітів характеризується геометрією стикувального вузла якоря та сердечника (стопа). Можливі варіанти стикувальних вузлів наведені на рис. 5.1.3.

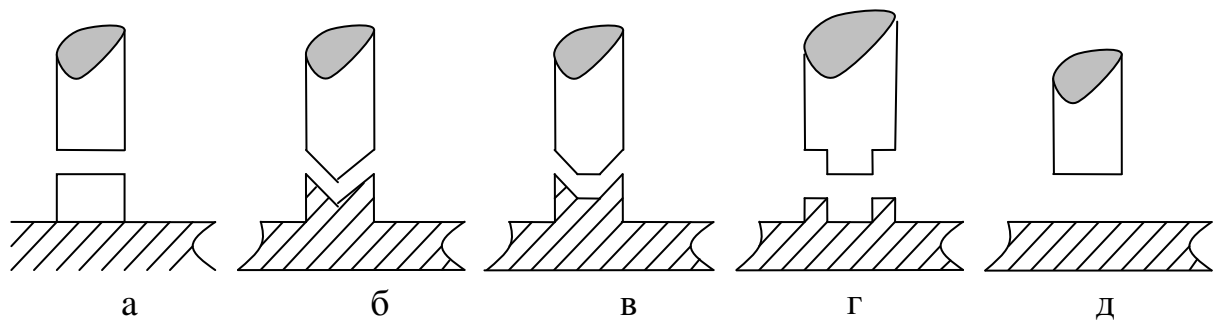


Рис. 5.1.3. Стикувальні вузли магнітної системи тягових реле: а – з плоскими торцями; б – з конусними торцями; в – у вигляді усіченого конуса; г – клапанного типу; д – без основи

Тип магнітного кола визначає вид тягової (статичної) характеристики електромагніта (рис. 5.1.4.).

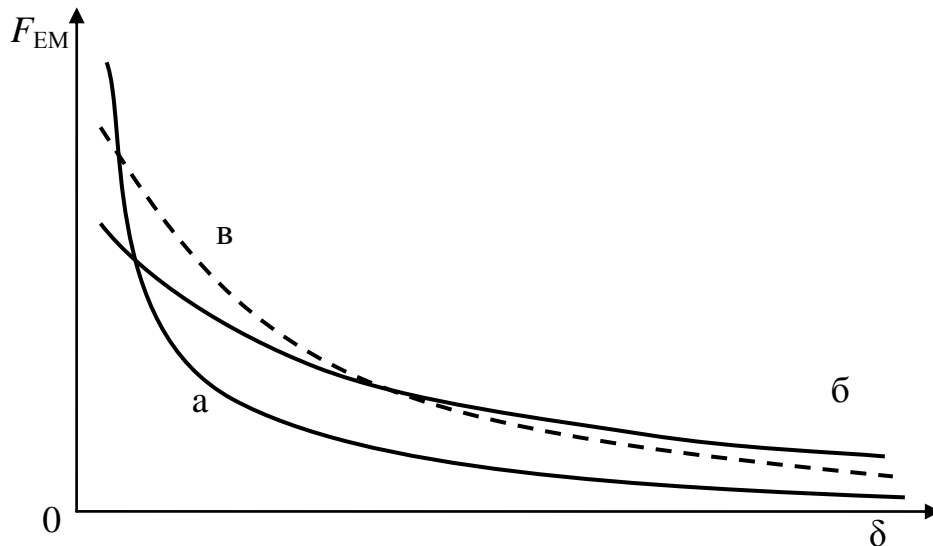


Рис. 5.1.4. Тягові характеристики електромагнітів з різними стикувальними вузлами: а – з плоскими торцями; б – з конусними торцями; в – у вигляді усіченого конуса

Порівнюючи протидіючу характеристику (рис. 5.1.2, б) та варіанти тягових характеристик (рис. 5.1.4), обирають найбільш схожу за нахилом. Крім того, при виборі типу магнітного кола слід врахувати додаткові параметри, які впливають на вид тягової характеристики: коефіцієнт повернення  $k_{пов}$ , що задається; допустимий час спрацьовування (відпускання); бажаний коефіцієнт корисної дії; конструктивні параметри силових контактів.

### 5.1.3. Визначення головних розмірів електромагнітного приводу

Головні розміри електромагнітного приводу визначаються його потужністю, яка в свою чергу залежить від потрібних тягових зусиль та величини переміщення якоря. При виборі типу магнітного кола тягового реле прагнуть одержати мінімальну масу й мінімальні розміри при заданій потужності приводу. Для визначення основних розмірів магнітопроводу тягового реле (рис. 5.1.5) вводиться поняття конструктивного показника, значення якого пропорційне відношенню габаритних розмірів електромагніта [3, 18]

$$\Pi_K = \frac{\sqrt{F_{EП}}}{\delta_{П}} \equiv \frac{\sqrt{S}}{l} \equiv \frac{d}{l}, \quad (5.1.1)$$

де  $S$  – площа перетину сердечника електромагніта;  
 $d$  – діаметр сердечника електромагніта;  
 $l$  – довжина електромагніту.

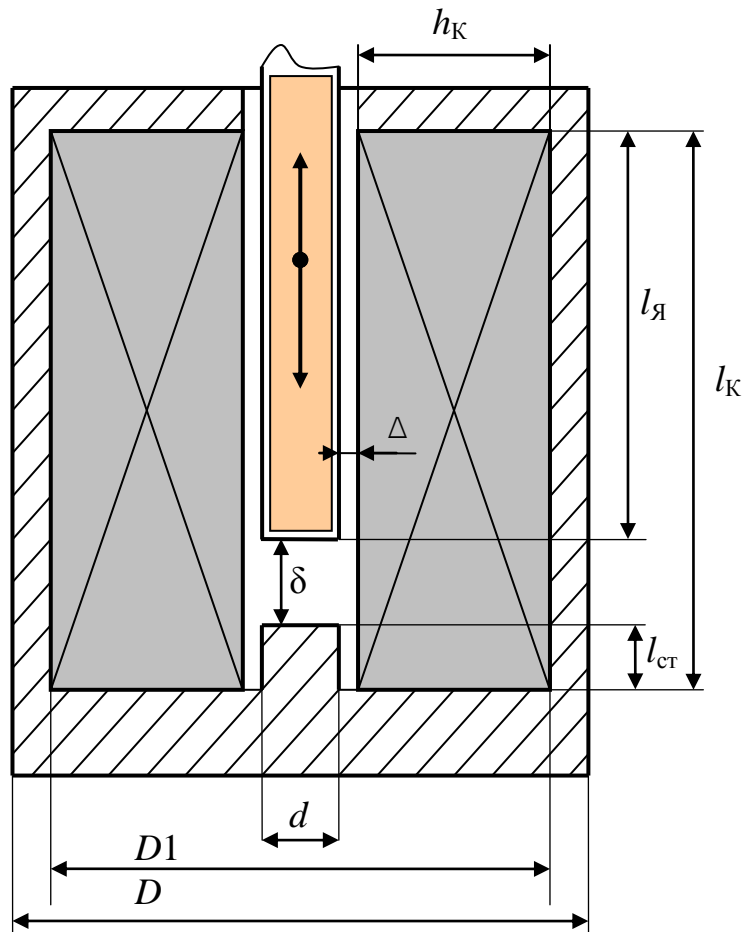


Рис. 5.1.5. Конструктивні розміри тягового електромагніта

Конструктивний показник  $\Pi_K$  має різні числові значення залежно від конструкції якоря електромагніта.

Для кожного типу магнітного кола наводяться довідкові залежності рекомендованих значень магнітної індукції  $B_\delta$  (при початковому зазорі  $\delta_{п}$ ) й співвідношення довжини до висоти котушки реле  $l_h = l_K / h_K$  від величини конструктивного показника (рис. 5.1.6).

Вихідними даними для розрахунку головних розмірів є початкове тягове зусилля  $F_{ЕП}$ , хід якоря  $\delta_{п}$  та довідкові залежності для вибору магнітного навантаження  $B_\delta = f \Pi_K$  і його реалізації в конструкції обмотки  $l_h = f \Pi_K$ . Розрахунок головних розмірів тягового реле виконують у такий спосіб [3, 18].

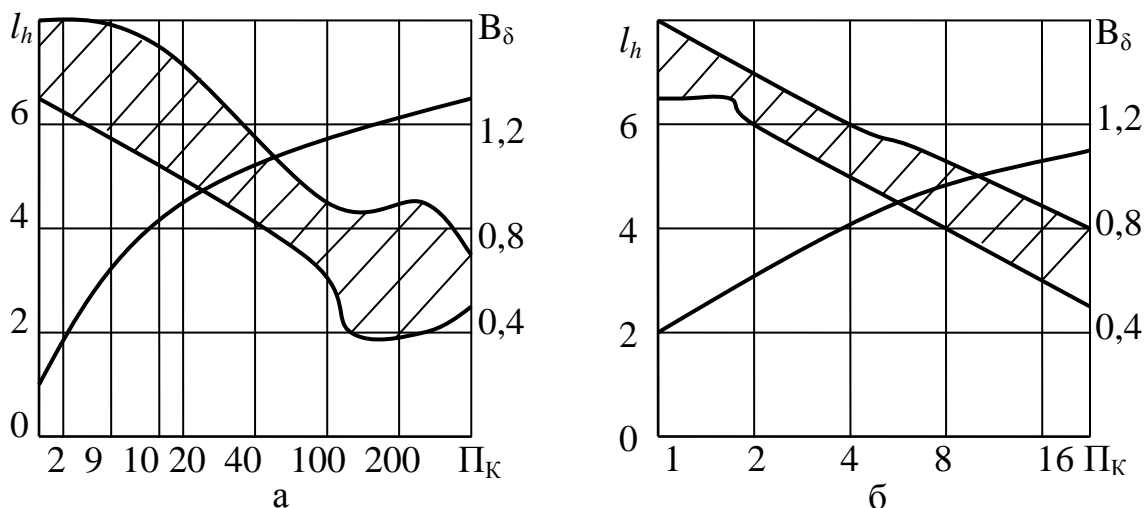


Рис. 5.1.6. Рекомендовані значення індукції в зазорі й співвідношення розмірів котушки: а – для плоских торців; б – для конусних торців

1. За заданими значеннями  $F_{\text{ЕП}}$  і  $\delta_{\text{П}}$  розраховують величину конструктивного показника згідно з (5.1.1). Якщо  $\Pi_K \leq 0,2$  – обирають стикувальний вузол без основи, при  $\Pi_K = 1,2 - 5$  – доречно застосовувати конічний вузол з кутом  $60^\circ$ , при  $\Pi_K = 5 - 16$  більш доцільно використовувати конус з кутом  $90^\circ$ . Якщо показник перевищує значення 16, рекомендується обирати вузол з плоскими торцями якоря і стопа. Вузол клапанного типу забезпечує задовільні характеристики при  $\Pi_K = 2,6 - 26$ .

2. За графіками (рис. 5.1.6) обирають значення  $B_\delta$  і  $l_h$ .

3. Виходячи з потрібного ходу якоря, визначають довжину котушки з урахуванням магнітного захвату  $l_K = (1,1 - 1,3)\delta_{\text{П}}$ .

4. Розраховують ширину котушки  $h_K = l_K / l_h$ .

5. На основі формули Максвелла (1.85) визначають потрібну площу перетину магнітопроводу  $S$  і відповідний їй діаметр сердечника магнітної системи  $d$ . Для плоских торців використовують такі розрахункові формули

$$S = \frac{F_{\text{ЕП}}}{kB_\delta^2}, \quad d = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (5.1.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності (залежно від системи вимірювань), визначений через магнітну сталу  $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

Коефіцієнт пропорційності дорівнює  $k = 4 \cdot 10^4$ , якщо тягове зусилля вимірюється в кілограм-силах та  $k = 39,8 \cdot 10^4$ , якщо в Ньютонах. У випадку застосування стикувального вузла іншого типу необхідно привести його до еквівалентного виду за віддачею корисної роботи. Так для конусних торців

$$F_{\text{ЕП}}^{\text{к}} = \frac{F_{\text{ЕП}}}{\cos^2 \beta}, \quad \delta_{\text{П}}^{\text{к}} = \delta_{\text{П}} \cos^2 \beta, \quad (5.1.3)$$

де  $2\beta$  – кут при вершині конуса.

6. Визначають розміри зовнішнього магнітопроводу згідно рис. 5.1.5, виходячи з рівняння площ перетинів якоря й корпусу

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4},$$

$$D_1 = d + 2h_{\text{к}} + 2\Delta, \quad D = \sqrt{D_1^2 + d^2}, \quad (5.1.4)$$

де  $\Delta$  – зазор між обмоткою й сердечником магнітної системи (зазвичай складає 2 – 5 мм).

Загальною довжиною корпусу реле з урахуванням лобових частин (фланців) задаються через довжину котушки

$$l_{\text{ТР}} = 2(D - D_1) + l_{\text{к}}. \quad (5.1.5)$$

На рис. 5.1.7 показано послідовність операцій розрахунку головних розмірів тягового реле.

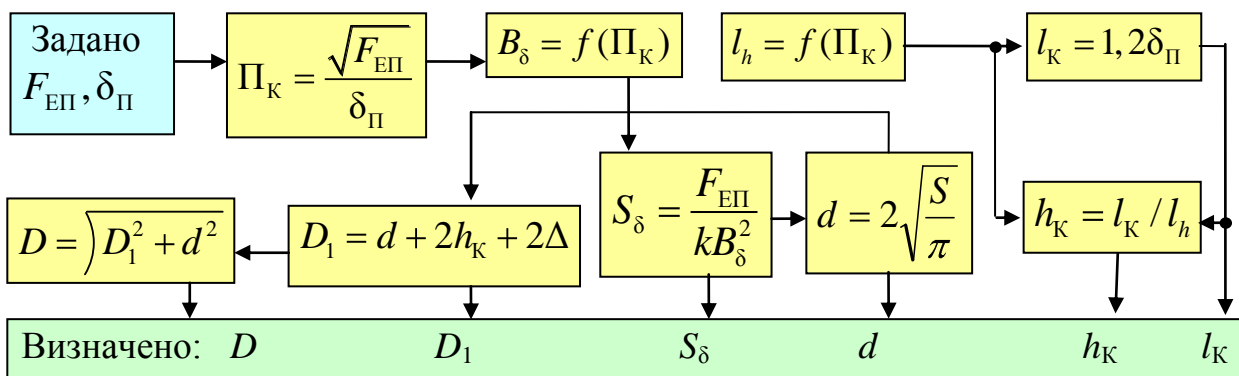


Рис. 5.1.7. Структурна схема визначення головних розмірів тягового електромагніта



Отримані параметри використовуються для побудовання ескізного креслення магнітної системи та попереднього розрахунку обмотки і тягової характеристики реле.

#### 5.1.4. Розрахунок магнітного кола

Розрахунок магнітних кіл починають з визначення магнітної провідності повітряного зазору та питомої провідності розсіювання. Для рівномірного поля, коли лінії магнітної індукції паралельні, а екіпотенційні поверхні є площинами, магнітна провідність визначається через геометричні розміри зазору (1.81). В інженерних розрахунках провідність повітряного зазору розглядають як суму трьох складових провідності: рівномірного поля, опуклості і провідності з бокових граней [3, 18]. На практиці магнітна провідність зазору визначається за емпіричними формулами залежно від типу стикувального вузла (рис. 5.1.8).

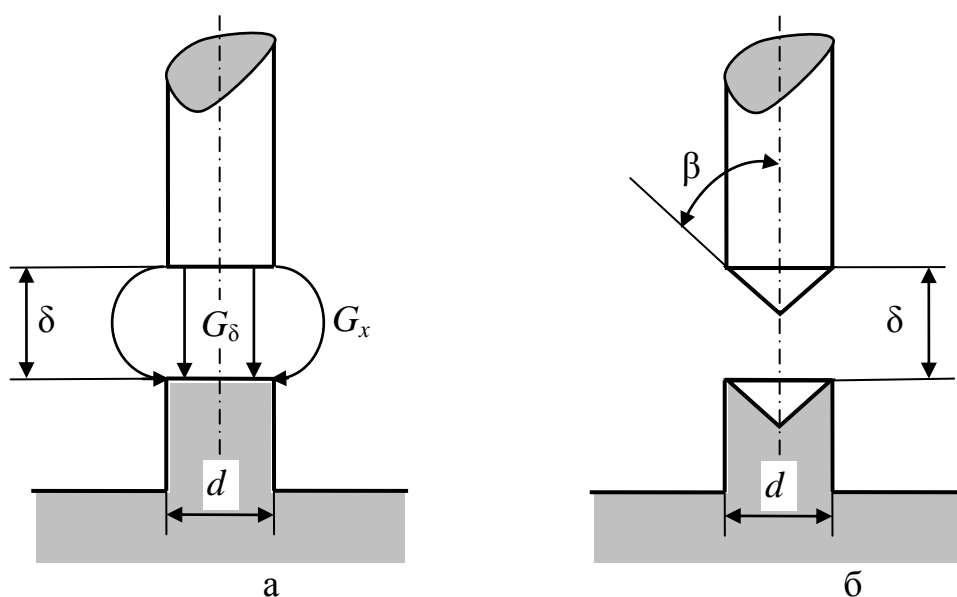


Рис. 5.1.8. До визначення магнітної провідності в зазорі електромагніта: а – з циліндричним сердечником і плоскими торцями; б – з конусним стикувальним вузлом

Для циліндричного сердечника електромагніта з плоскими торцями (рис.5.1.8,а) магнітна провідність підраховується за двома складовими

$$G_{\delta} = G_0 + G_x, \quad G_0 = \mu_0 \left( \frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d \right),$$

$$G_x = \mu_0 \frac{\pi d \left( \frac{2h_K}{\pi} - \frac{\delta}{2} \right)}{0,22\pi d + 0,8h_K - 0,2\pi\delta}. \quad (5.1.6)$$

Для конусного вузла (рис. 5.1.8, б) достатньо обмежитись тільки провідністю в зазорі з урахуванням ефективною поверхні нахиленої площини

$$G_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d^2}{4\sin^2 \beta} - \frac{0,157d}{\sin^2 \beta} + 0,75d \right). \quad (5.1.7)$$

На окремих ділянках магнітопроводу утворюються потоки розсіювання, які не замикаються через робочий зазор. Щоб компенсувати послаблення потоку в робочому зазорі (шляхом підвищення МРС обмотки реле) треба підвищити розрахунковий потік на ділянці розсіювання відносно потоку в робочому зазорі на величину розсіювання. Для цього визначають коефіцієнти розсіювання окремих ділянок. В тягових електромагнітах розглядають потоки розсіювання якоря і стопа. Відповідні коефіцієнти розсіювання для цих ділянок визначають за емпіричними формулами [3, 18]

$$\sigma_{\text{я}} = 1 + \frac{l_{\text{я}} - 0,25d}{2l_{\text{к}} G_{\delta}} g_s \delta_{\text{п}}, \quad \sigma_{\text{с}} = 1 + \frac{l_{\text{с}} - 0,25d}{2l_{\text{к}} G_{\delta}} g_s \delta_{\text{п}}, \quad (5.1.8)$$

де  $g_s$  – питома провідність розсіювання (визначається за емпіричними формулами залежно від перетину та конфігурації магнітної системи).

Коефіцієнти розсіювання на етапі попереднього розрахунку обираються за довідковими даними.

Вихідними даними для розрахунку магнітного кола є головні розміри реле  $l_{\text{к}}, h_{\text{к}}, D, D_1, d$ , значення магнітної індукції  $B_{\delta}$ , яку слід забезпечити, початковий зазор  $\delta_{\text{п}}$  та довідкові (емпіричні) формули для визначення магнітних провідностей та коефіцієнтів розсіювання. Розрахунок магнітного кола виконують у такий спосіб [3, 18].

1. Визначають магнітну провідність зазору **залежно** від обраного типу магнітного кола (5.1.6), (5.1.7).

2. Визначають коефіцієнти магнітного розсіювання окремих ділянок магнітопроводу  $\sigma_i$  за довідковими таблицями або за емпіричними формулами (5.1.8).

3. Визначають МРС робочого зазору, виходячи з закону Ома для магнітного кола

$$F_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta}} = \frac{B_{\delta} S_{\delta}}{G_{\delta}}, \quad (5.1.9)$$

де  $S_{\delta} = S$  – площа перекритого перетину в зазорі.

4. Розраховують магнітну провідність паразитного зазору між якорем та верхнім фланцем згідно (1.81)

$$G_{\Delta} = \frac{\mu_0 S_{\Delta}}{\Delta} = \frac{\mu_0 \pi d (D - D_1)}{2\Delta}. \quad (5.1.10)$$

5. Визначають МРС паразитного зазору

$$F_{\Delta} = \frac{\sigma_{\text{я}} \Phi_{\delta}}{G_{\Delta}}. \quad (5.1.11)$$

6. Підраховують спадання магнітного потенціалу (МРС) на залізних ділянках магнітної системи. Для цього визначаються індукції  $B_i$  у відповідних перетинах  $S_i$  з урахуванням розсіювання  $\sigma_i$ , магнітні напруженості  $H_i$  по кривих намагнічування, а потім відповідні їм МРС  $F_i$ , що спадають на довжині кожної ділянки  $l_i$ .

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} S_{\delta}, \quad B_i = \sigma_i \Phi_{\delta} / S_i, \quad H_i = f(B_i), \quad F_i = l_i H_i. \quad (5.1.12)$$

7. Підсумовують намагнічуючу силу обмотки реле  $F_{\text{ОР}}$  для забезпечення потрібного потоку в повітряному зазорі при заданій індукції  $B_{\delta}$  в перетині сердечника  $S_{\delta}$ . Намагнічуюча сила обмотки складається зі спадань магнітних потенціалів на окремих ділянках магнітного кола (рис. 5.1.5): робочому зазорі  $F_{\delta}$ , якорі  $F_{\text{Я}}$ , сердечнику (стопі)  $F_{\text{С}}$ , верхньому фланці  $F_{\text{ВФ}}$ , нижньому фланці  $F_{\text{НФ}}$ , корпусі  $F_{\text{К}}$ , паразитному зазорі  $F_{\Delta}$

$$F_{OP} = F_{\delta} + \sum F_i = F_{\delta} + F_{Я} + F_C + F_{B\Phi} + F_{H\Phi} + F_K + F_{\Delta} . \quad (5.1.13)$$

Основна частина магнітного потенціалу спадає на робочому зазорі реле, який має найгіршу магнітну провідність (спричиняє найбільший опір магнітному потоку). Тому на етапі попереднього розрахунку можна вважати  $F_{OP} = (1,1-1,2)F_{\delta}$  .

На етапі перевірконого розрахунку  $F_{OP}$  визначають з урахуванням зазорів між рухомою і нерухомою частинами магнітопроводу та зазорів на стику окремих деталей.

### 5.1.5. Розрахунок обмотки реле

Намагнічуюча сила обмотки  $F_{OP}$  створюється ампер-витками котушки  $F_{OP} = w_{OP}I_{OP}$ . Опір обмотки  $r_{OP}$  при заданій напрузі живлення  $U_{OP}$  в такому разі визначається через число витків

$$r_{OP} = \frac{U_{OP}w_{OP}}{F_{OP}} . \quad (5.1.14)$$

Опір обмотки також можна виразити через її конструктивні параметри

$$r_{OP} = \frac{4\rho w_{OP}l_{cp}}{\pi d_{II}^2} , \quad (5.1.15)$$

де  $\rho$  – питомий опір проводу обмотки;

$l_{cp}$  – середня довжина витка;

$d_{II}$  – діаметр проводу.

Прирівнюючи (5.1.14) і (5.1.15), можна позбавитися невідомої  $w_{OP}$  та визначити діаметр проводу котушки без ізоляції

$$d_{II} = \sqrt{\frac{4\rho l_{cp}F_{OP}}{\pi U_{OP}}} . \quad (5.2.16)$$

Підставляючи отримане значення  $d_{II}$  в (5.1.15) при заданому опорі  $r_{OP}$ , рівняння вирішується відносно числа витків котушки

$$w_{OP} = \frac{\pi d_{II}^2 r_{OP}}{4\rho l_{cp}}. \quad (5.1.17)$$

Вихідними даними для розрахунку обмотки реле є намагнічуюча сила обмотки  $F_{OP}$ , напруга живлення  $U_{OP}$ , струм споживання  $I_{OP}$  або потужність обмотки  $P_{OP}$ , розміри котушки  $h_K, l_K, d, \Delta$ , довідкові таблиці параметрів обмотувальних проводів. Розрахунок обмотки реле виконують у такий спосіб [3, 18].

1. Згідно з ескізним кресленням (рис. 5.1.5) розраховують середню довжину витка котушки

$$l_{cp} = \pi(h_K + d + 2\Delta). \quad (5.1.18)$$

2. Розраховують діаметр проводу котушки без ізоляції згідно (5.1.16).

3. За довідковими таблицями обирають марку проводу за ближчим більшим діаметром.

4. Визначають опір обмотки через задану напругу живлення та струм споживання або дозволена потужність.

5. Визначають розрахункову кількість витків котушки з обраним проводом згідно (5.1.17).

6. Визначають можливе число витків у вікні котушки з урахуванням діаметру проводу в ізоляції  $d_{II}$  та коефіцієнта заповнення вікна міддю  $k_M$

$$w_{OP}^* = \frac{4l_K h_K k_M}{\pi d_{II}^2}. \quad (5.1.18)$$

Можлива кількість витків повинна бути не менше розрахункової  $w_{OP}^* > w_{OP}$ . Якщо це не так, повертаються до визначення головних розмірів реле.

При застосуванні в тяговому реле двох обмоток (тягової та утримуючої) розрахунок обмоток виконують аналогічно, виходячи з таких міркувань. Утримуюча обмотка розраховується на напругу  $U_{OP} = U_{AB} - \Delta U_{AB}$ , а тягова на  $U_{OP} = 0,5U_{AB}$ . Магніторушійна сила утримуючої обмотки повинна бути достатньою для втримання якоря в кінцевому положенні. Обидві обмотки мають рівне число витків, що дозволяє одержати однакові МРС (ампер-витки) у початко-

вий момент відключення реле. Тому провід тягової обмотки реле має перетин вдвічі більший ніж утримуючої. Сумарна МРС обох обмоток при цьому повинна забезпечувати спрацювання реле при початковому положенні якоря.

Для засвоєння викладеного матеріалу на рис. 5.1.9 наведено структурну схему розрахунку магнітної системи та обмотки тягового реле.

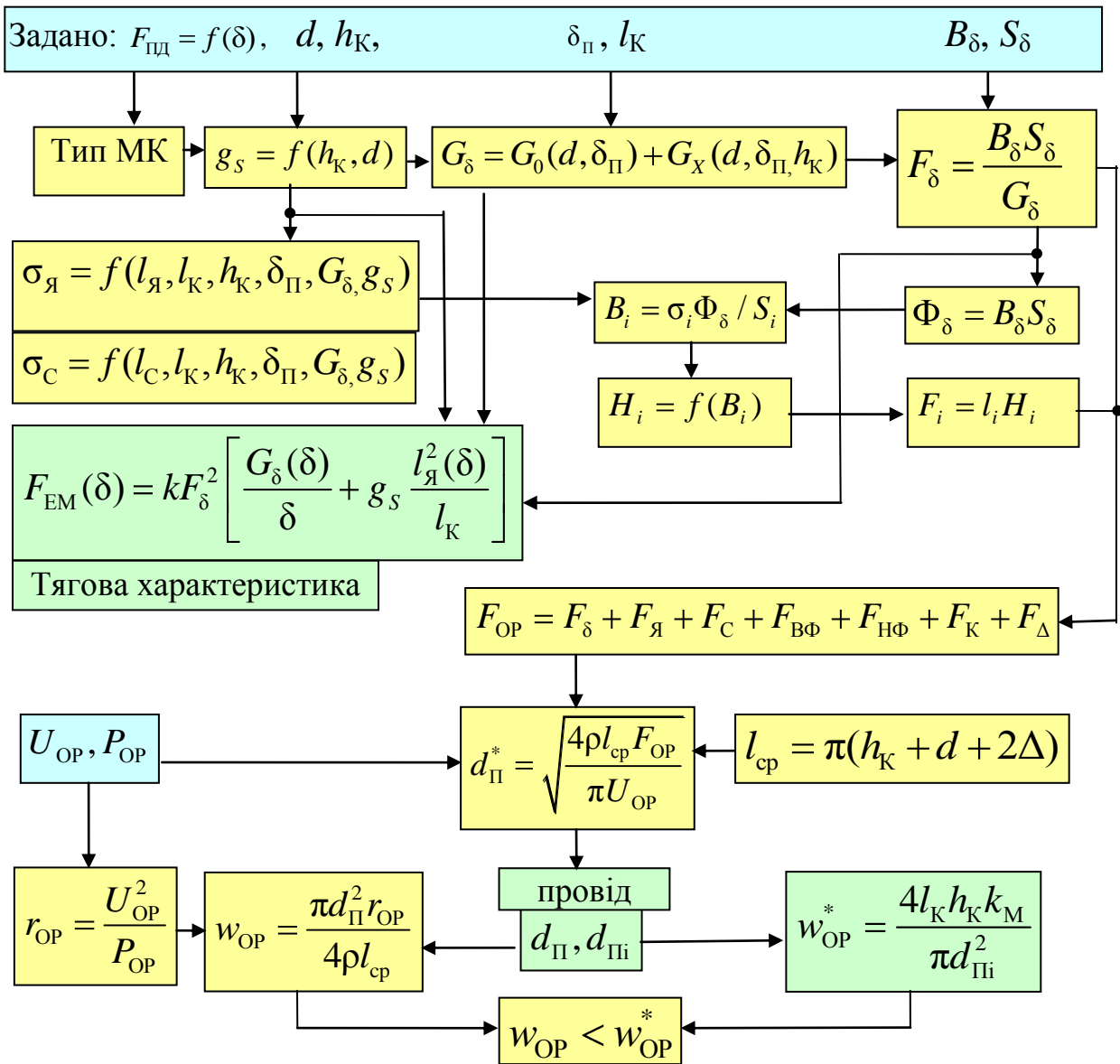


Рис. 5.1.9. Структурна схема розрахунку тягового реле стартера

**В цій схемі** параметри з позначкою (\*) розглядаються при уточненнях конструктивних параметрів.

Крім перерахованих параметрів, на етапі перевірного розрахунку тягового реле визначають ударні навантаження при спрацюванні, контактний тиск наприкінці ходу якоря, характеристику зусиль при вході шестерні в зачеплення.

### **5.1.6. Побудування тягової характеристики та оцінка працездатності тягового реле**

Формула Максвелла (1.85) для визначення тягової сили електромагніта правильна при малих зазорах  $\delta$ , коли вектор індукції  $B$  нормальний до поверхні перетину стикувального вузла. При зазорах, що перевищують діаметр сердечника, для визначення тягової сили використовують енергетичну формулу Максвелла, яка для втяжних електромагнітів має вигляд [3, 18]

$$F_{EM} = k(wI)_{\delta}^2 \left[ \left| \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \right| + g_s \frac{l_{Я}^2}{l_K^2} \right], \quad (5.1.19)$$

де  $l_{Я}$  – довжина якоря в тілі котушки;

$g_s$  – питома магнітна провідність розсіювання.

Питома магнітна провідність  $g_s$  на етапі попереднього розрахунку обирається за довідковими даними для визначеного профілю та матеріалу магнітопроводу. На етапі перевірного розрахунку значення  $g_s$  розраховують відповідно до синтезованої конструкції реле на основі емпіричних формул (довідкові дані). Стосовно визначених параметрів тягову характеристику будують за залежністю

$$F_{EM}(\delta) = kF_{\delta}^2 \left[ G_{\delta}(\delta) + g_s \frac{l_{Я}^2(\delta)}{l_K^2} \right]. \quad (5.1.20)$$

Для оцінки працездатності реле, тягова характеристика будується разом із протидіючою.

Сили рушання й відпускання  $F_{руш}$ ,  $F_{від}$  утворюються відповідними потоками та згідно з (1.85) визначаються відповідно

$$F_{\text{руш/від}} = k \frac{\Phi_{\text{руш/від}}^2}{\mu_0 S} . \quad (5.1.21)$$

Якщо  $F_{\text{ЕМ}} = F_{\text{руш}}$  відбувається рушання якоря електромагніта. Величина  $F_{\text{від}}$  визначається сумою протидіючих сил в кінцевому положенні якоря ( $\delta=0$ ), приведеними до плеча дії електромагнітної сили. Потоки рушання й відпускання, у свою чергу, визначаються через силу, що намагнічує  $Iw$ , і провідність магнітної системи  $G$ . Відношення струму відпускання до струму рушання називається коефіцієнтом повернення. Цей коефіцієнт задається у технічному завданні на розробку та може визначатися як співвідношення відповідних МРС або як корінь квадратний із співвідношення відповідних тягових сил

$$k_{\text{пов}} = \sqrt{\frac{F_{\text{від}}}{F_{\text{руш}}}} . \quad (5.1.22)$$

Час спрацьовування електромагніта  $t_{\text{спр}}$  постійного струму складається з часу затримки  $t_{\text{зат}}$ , спричиненої електричною (індуктивність обмотки), магнітною (час намагнічування) та механічною (маса рухомої частини) інерційністю і часу руху якоря до стопу  $t_{\text{рух}}$ . Найбільша частка періоду спрацьовування приходить на затримку  $t_{\text{зат}}$ , яка виникає по причині реактивного опору, який чинить обмотка реле. Тому вважають, що час спрацьовування приблизно дорівнює часу затримки.

Процес зростання струму в обмотці згідно (1.53) описується рівнянням

$$i_{\text{ОР}} = \frac{U_{\text{АБ}}}{r_{\text{ОР}}} \left[ 1 - \exp\left(-t \frac{r_{\text{ОР}}}{L_{\text{ОР}}}\right) \right], \quad (5.1.23)$$

де  $L_{\text{ОР}} = w_{\text{ОР}}^2 G_e$  – індуктивність обмотки реле;

$G_e = G_\delta + g_s \frac{l_{\text{Я}}^3 + l_{\text{ст}}^3}{3l_{\text{К}}^2}$  – еквівалентна провідність електромагніта в

початковому стані ( $\delta(x) = \delta_{\text{II}}$ );

$l_{\text{ст}}$  – довжина стопу (рис. 5.1.5).



Рух якоря електромагніта починається за умовою  $i_{OP} \geq I_{руш}$ . Значення струму рушання визначають через МРС обмотки  $I_{руш} = F_{OP} / w_{OP}$ , підставляють в рівняння (5.1.23) та вирішують його відносно часу рушання

$$t_{руш} = \frac{L_{OP}}{r_{OP}} \ln \left( \frac{r_{OP} I_{руш} - U_{AB}}{U_{AB}} \right). \quad (5.1.24)$$

Розрахунок температурного режиму полягає у визначенні перевищення температури обмотки реле над температурою оточуючого повітря. Таке перевищення визначають на основі формули Ньютона – Рихмана для сталого режиму (1.84)

$$\vartheta_C = \frac{P}{\alpha_T S_{ox}} - t^{\circ}_{OP} = \frac{U_{OP}^2}{r_{OP} \alpha_T (S_{ПЗ} + k_{ПВ} S_{ПВ})} - t^{\circ}_{OP}, \quad (5.1.25)$$

де  $S_{ox}$  – площа поверхні, що охолоджується;

$t^{\circ}_{OP}$  – температура оточуючого повітря;

$\alpha_T$  – коефіцієнт тепловіддачі  $9 - 14$  [Вт/м<sup>2</sup> С°];

$S_{ПЗ}$  – площа поверхні зовнішньої;

$S_{ПВ}$  – площа поверхні внутрішньої;

$k_{ПВ}$  – коефіцієнт поверхні (залежно від типу каркасу).

Якщо розраховане перевищення температури нижче допустимого значення, вважають, що реле придатне для тривалого включення, якщо ні розраховують допустимий час включення обмотки при короткочасному режимі.

Перевищення температури для короткочасного режиму визначають за формулою, яка враховує електричні та конструктивні параметри реле [3, 18]

$$\vartheta_K(t) = \frac{U_{OP}^2}{r_{OP} \alpha_T S_{ox}} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{T_{наг}} \right) \right], \quad (5.2.26)$$

де  $T_{наг} = \frac{c_T m_{кот}}{\alpha_T S_{ox}}$  – стала часу нагріву;

$c_T$  – питома теплоємність котушки;

$m_{кот}$  – маса котушки.

Допустимі значення  $\vartheta_K = \vartheta_{\text{доп}}$  підставляють в рівняння (5.1.26) та вирішують рівняння відносно дозволеного часу ввімкненого стану реле

$$t_{\text{роб}} = T_{\text{наг}} \ln \left( \frac{\vartheta_{\text{доп}} r_{\text{ОР}} \alpha_T S_{\text{ох}} - U_{\text{ОР}}^2}{U_{\text{ОР}}^2} \right). \quad (5.1.27)$$

Вихідними даними для побудування тягової характеристики та перевірки працездатності тягового реле є: намагнічуюча сила робочого зазору  $F_\delta$ , напруга живлення  $U_{\text{ОР}}$ , опір обмотки  $r_{\text{ОР}}$ , заданий коефіцієнт повернення  $k_{\text{пов}}$ , конструктивні розміри магнітної системи реле, допустиме значення часу спрацьовування, довідкові дані з конструкційних матеріалів і обмотувальних проводів. Розрахунок робочих характеристик тягового реле виконують у такий спосіб [3].

1. Будують тягову характеристику реле, підставляючи в (5.1.20) поточні значення зазору. Для зручності аналізу характеристики прагнуть отримати числові значення тягової сили, що відповідають позиціям якоря 1, 3, 5, (див. рис. 5.1.2, б). Поточні значення магнітної провідності отримують на основі емпіричних формул (5.1.6), (5.1.7) В кінці ходу якоря, коли  $\delta = 0$  тягова сила визначається через індукцію, що задана для робочого зазору

$$F_0 = kB_\delta^2 S. \quad (5.1.28)$$

Порівнюючи тягову та протидіючу сили у кожній точці характеристики (рис. 5.1.10) оцінюють працездатність реле.

Тягова характеристика повинна проходити вище протидіючої. Якщо характеристики доторкуються – якір зупиниться в точці дотику. Якщо тягова характеристика пройде нижче за протидіючу – якір буде повертатися під дією пружин.

2. Перевіряють значення коефіцієнта повернення згідно з (5.1.22). За силу рушання приймають значення побудованої характеристики  $F_0$ , а сила відпускання  $F_{\text{від}}$  відповідає протидіючій силі на момент замикання силових контактів реле (рис. 5.1.10). При  $\delta = \delta_K$  підключається електродвигун, зумовлюючи підсадку напруги АКБ (живлення тягового реле), це може привести до повернення якоря реле в початковий стан під дією протидіючих сил.

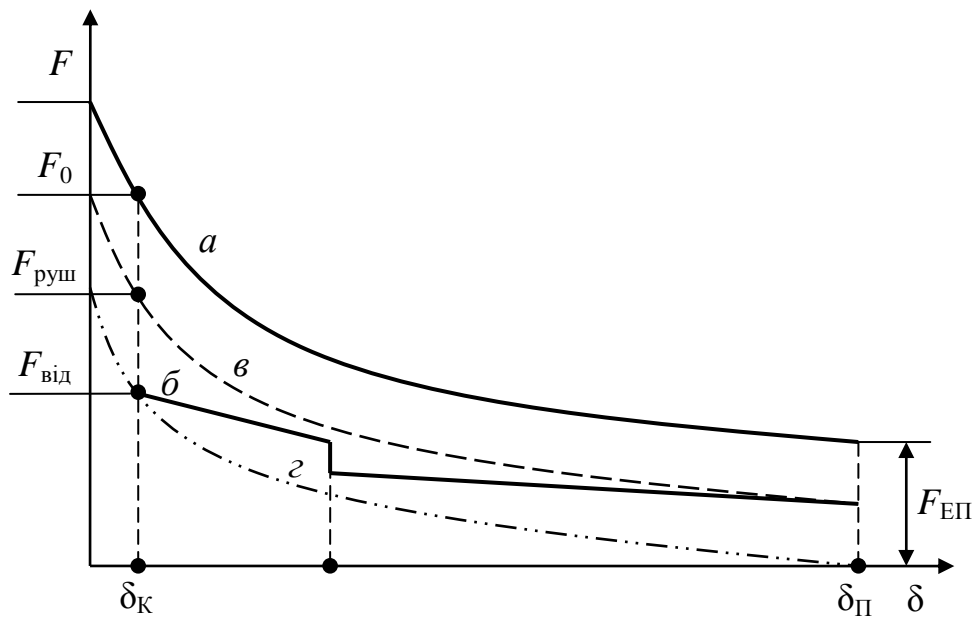


Рис. 5.1.10. Побудування характеристик для оцінки працездатності тягового реле стартера: а – тягова; б – протидіюча; в – вмикання; г – повернення

Така можливість виключається, якщо розрахований коефіцієнт не перевищує заданий.

3. Визначають допустиме спадання напруги АКБ при вмиканні стартерного електродвигуна через розрахований коефіцієнт  $\Delta U_{AB} = U_{AB}(1 - k_{пов})$ .

4. Визначають час спрацьовування реле за формулами (5.1.24). Якщо час спрацьовування реле задовольняє динамічним характеристикам механізму приводу (згідно технічному завданню) реле вважають працездатним, якщо ні – переглядають параметри обмотки (діаметр проводу, кількість витків) з метою підвищення струму при поменшанні індуктивності або обирають провід з підвищеним питомим опором.

5. Розраховують перевищення температури реле над оточуючим повітрям згідно (5.1.25). Якщо отриманий результат незадовільний (температура при тривалому вмиканні перевищує термостійкість ізоляції проводу), розраховують допустиму тривалість ввімкненого стану при короткочасному режимі згідно (5.1.27). Якщо визначений час не задовольняє режиму старту (згідно технічному завданню) переглядають головні розміри тягового реле, марку проводу та ізоляційних матеріалів.