

5.2. Розрахунок стартерних електродвигунів

5.2.1. Етапи розробки та структура розрахунку

Надійна та економічна робота стартерного електроприводу забезпечується при правильному виборі його номінальної потужності, яка визначається у відповідності з режимом роботи та навантаженням електродвигуна. Завищена потужність електродвигуна приводить до невиправданого росту габаритних розмірів, маси й вартості системи пуску. При недостатній потужності не забезпечуються потрібні пускові характеристики або підвищується тривалість пуску ДВЗ. Це викликає швидкий розряд АКБ, перегрів обмоток та передчасний вихід з ладу електродвигуна.

Для розрахунку системи пуску необхідно мати технічне завдання (ТЗ) на розробку. На практиці, зазвичай вирішується напівзворотна задача, коли як вихідні дані задаються номінальна напруга, корисна потужність на валу, частота обертання якоря, струмове навантаження та спосіб збудження електродвигуна. Останні дві позиції можуть обиратися розробником.

Стартерний електродвигун нової конструкції розробляють у випадках, коли за результатами підбору елементів системи пуску не вдається обрати електродвигун з задовільними характеристиками (наприклад, при оригінальних пускових якостях ДВЗ) або в разі використання нових матеріалів та прогресивних технологій виготовлення електричної машини. На рис. 5.2.1 показано структуру розрахунку стартерного електродвигуна на різних етапах проектування.

На етапі попереднього проектування системи пуску аналізуються вихідні дані, визначається необхідні розрахункові потужність електродвигуна та ємність АКБ, оптимізуються параметри стартерної мережі. Попередній розрахунок електродвигуна на етапі ескізного проектування полягає в послідовному визначенні основних структурних параметрів електричної машини і виборі її окремих вузлів та деталей з переліку уніфікованих.

Метою попереднього розрахунку є синтез конструкції магнітної системи та електричних обмоток машини. При цьому вирішується зворотна задача з незамкненими умовами (більшість невідомих параметрів обираються за рекомендованими значеннями).

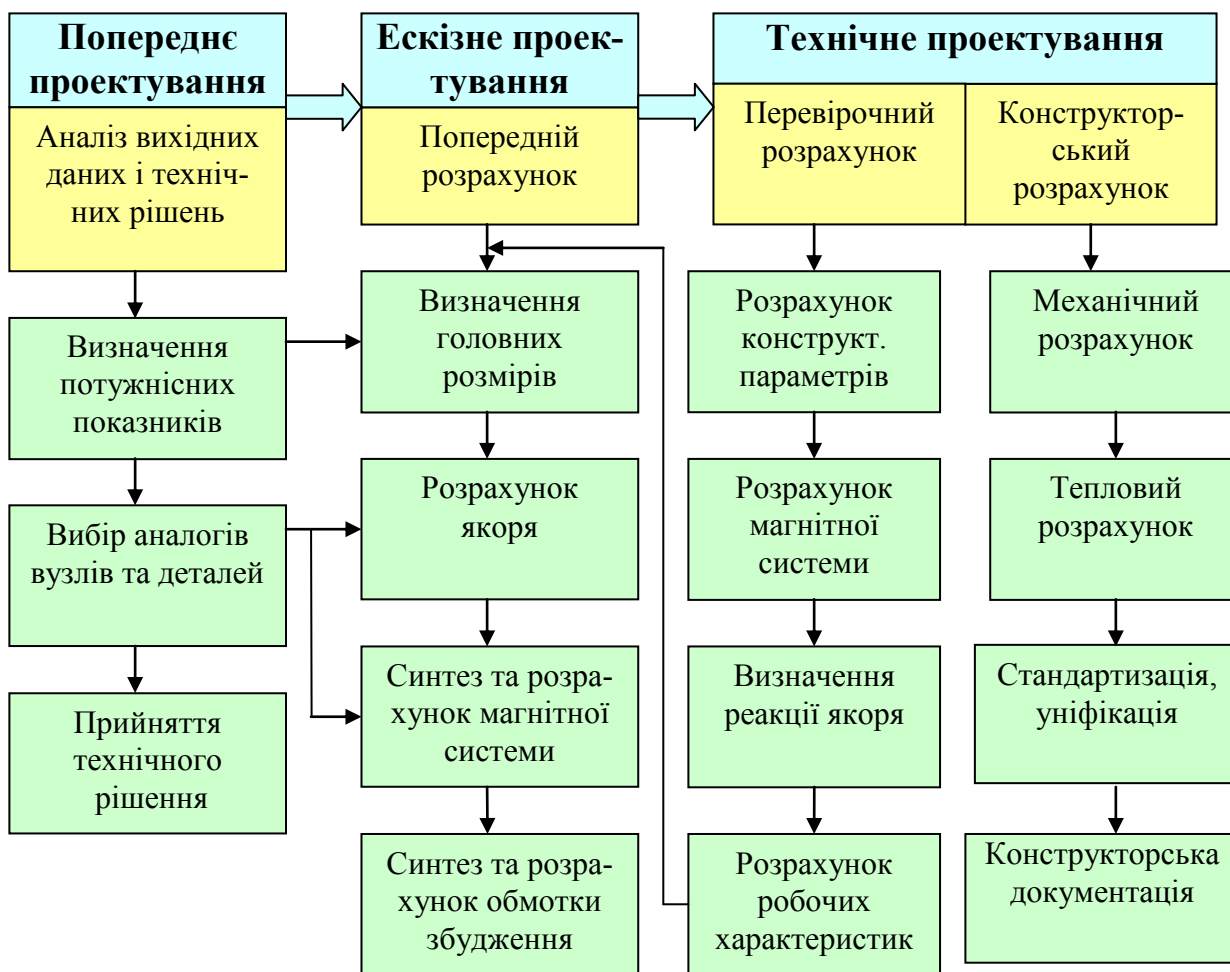


Рис. 5.2.1. Етапи проектування та структура розрахунку стартерного електродвигуна

Далі деталізується креслення конструкції машини та вирішується пряма задача з метою побудування робочих характеристик та перевірки придатності електродвигуна до системи пуску.

На етапі перевірного розрахунку послідовно уточнюються такі параметри:

- розміри, профілі, форми деталей, компонування обмоток електричних кіл;
- магнітна провідність ділянок за обраними елементами, спадання МРС на ділянках магнітного кола, сумарна МРС збудження;
- підраховується значення магнітного потоку якоря, що послабляє потік збудження (розглядається взаємодія магнітного кола збудження з електричним колом якорної обмотки);
- враховуються втрати в електродвигуні (спадання напруги на ділянках електричного кола, механічні та магнітні втрати).

Якщо після перевірного розрахунку отримані незадовільні результати, повторюють попередні розрахунки, обираючи нові структурні параметри в межах рекомендованих значень. Цей процес носить ітераційний характер.

На етапі конструкторського розрахунку вирішуються завдання, пов'язані з надійністю та технологічністю електродвигуна. Метою конструкторського розрахунку є розробка конструкторської документації, уніфікація, стандартизація деталей та матеріалів.

5.2.2. Визначення головних розмірів

Головні розміри електричної машини – діаметр $D_{\text{я}}$ й довжина пакету якоря (ротора) $l_{\text{я}}$ визначають ефективність використання активних (магнітних та струмопровідних) конструкційних матеріалів і досконалість конструкції стартерного електродвигуна. Зв'язок між головними розмірами машини постійного струму $D_{\text{я}}$, $l_{\text{я}}$, розрахунковою потужністю P , обертами якоря $n_{\text{я}}$ й електромагнітними навантаженнями встановлює рівняння [10, 18, 21]

$$D_{\text{я}}^2 l_{\text{я}} = \frac{6,1P}{B_{\delta} A_{\text{я}} \gamma_{\text{р.с}} n_{\text{я}}} = \frac{C_{\text{я}} P}{n_{\text{я}}}, \quad (5.2.1)$$

де $A_{\text{я}}$ – лінійне навантаження якоря [А/м];

B_{δ} – індукція у робочому зазорі [Тл];

$C_{\text{я}} = 6,1/B_{\delta} A_{\text{я}} \gamma_{\text{р.с}}$ – постійна стартерного електродвигуна;

$\gamma_{\text{р.с}}$ – коефіцієнт полюсного перекриття статора.

Перемноження $D_{\text{я}}^2 l_{\text{я}}$ визначає об'єм електричної машини, а лінійне навантаження $A_{\text{я}}$ та індукція в зазорі B_{δ} – струмову і магнітну складові, що утворюють обертовий момент на валу.

Лінійне навантаження якоря розраховується за формулою

$$A_{\text{я}} = \frac{I_{\text{я}} N_{\text{я}}}{2a_{\text{я}} \pi D_{\text{я}}}, \quad (5.2.2)$$

де $I_{\text{я}}$ – струм в обмотці якоря;

$N_{\text{я}}$ – число активних провідників обмотки якоря;

$2a_{\text{я}}$ – число секцій (паралельних гілок) обмотки якоря.

Магнітна індукція (щільність потоку) в робочому зазорі машини визначається через площу, яку пронизує потік Φ (1.94). Правильний вибір електромагнітних навантажень B_δ і A_δ забезпечує екстремум показника якості стартерного електродвигуна (максимум питомої потужності або мінімум об'єму, маси, вартості).

Коефіцієнт полюсного перекриття статора $\gamma_{p.c}$ визначається співвідношенням між розрахунковою довжиною полюсної дуги статора b_δ та полюсним діленням t_p .

$$\gamma_{p.c} = \frac{b_\delta}{t_p}, \quad t_p = \frac{\pi D_\delta}{2p}, \quad (5.2.3)$$

Зі збільшенням значення $\gamma_{p.c}$ зменшується об'єм якоря, але збільшується розсіювання магнітних потоків полюсів і погіршуються умови комутації.

Вихідними даними для попереднього розрахунку є: потрібна потужність стартера P , оберти стійкого прокручування n_δ , струмовий режим роботи електродвигуна K_C , довідкові дані для вибору структурних параметрів та електромагнітних навантажень. Розрахунок виконують у такий спосіб [3, 10].

1. Обирають діаметр двигуна D_δ по вихідним даним. Для цього визначають розрахунковий параметр $B_D = 0,5P/(K_C n_\delta)$ та використовують довідкові залежності $D_\delta = f(B_D)$ у табличному або графічному вигляді (рис. 5.2.2).

2. Обирають електромагнітні навантаження, виходячи з таких міркувань. Розміри якоря зменшуються зі збільшенням лінійного навантаження A_δ й магнітної індукції B_δ у робочому зазорі. Однак з ростом A_δ збільшується теплове навантаження поверхні якоря, погіршується комутація на колекторному вузлі, зростає реакція якоря, що послабляє потік збудження. При збільшенні B_δ різко зростають магніторушійні сили (МРС), що спадають на залізних ділянках магнітного кола і як наслідок підвищується потрібна МРС обмотки збудження. Найвигідніші значення B_δ і A_δ для стартерних електродвигунів знаходяться у певних межах і вибираються з умови мінімального об'єму або маси електричної машини.

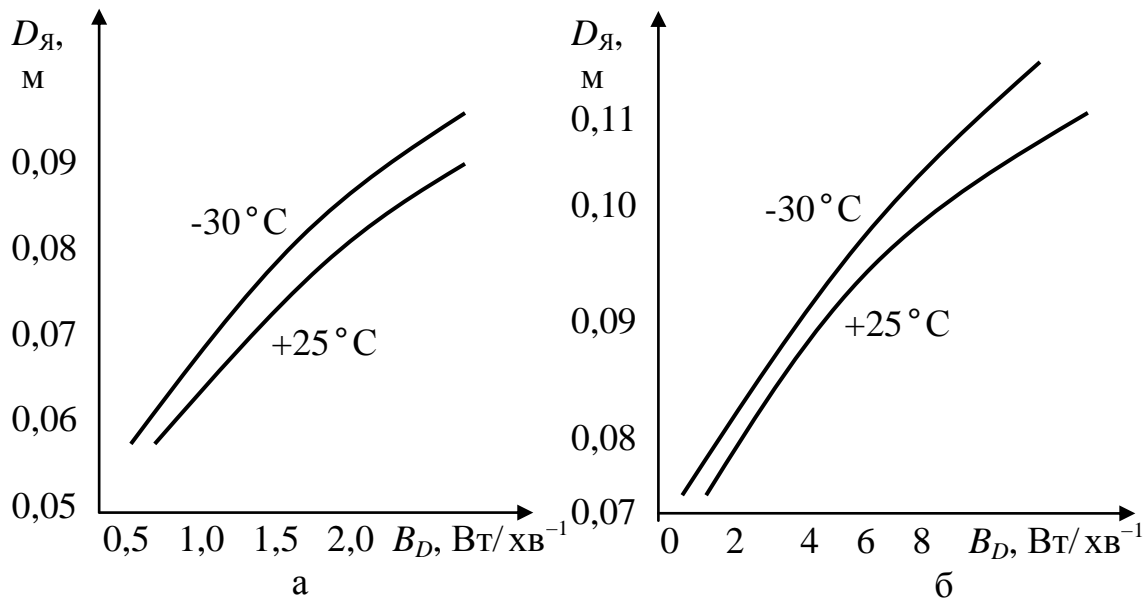


Рис. 5.2.2. Залежності для вибору діаметра електродвигуна:
 а – на номінальну напругу 12 В; б – на номінальну напругу 24 В

На практиці для вибору електромагнітних навантажень використовують рекомендовані значення цих параметрів у вигляді довідкових таблиць або графіків залежностей $B_{\delta}=f(D_K)$, $A_{я}=f(D_K)$ з коридором виправданих відхилень (рис. 5.2.3). Діаметр корпусу стартера при цьому обирають з урахуванням товщини статорної частини машини $D_K = (1,45 - 1,65)D_{я}$.

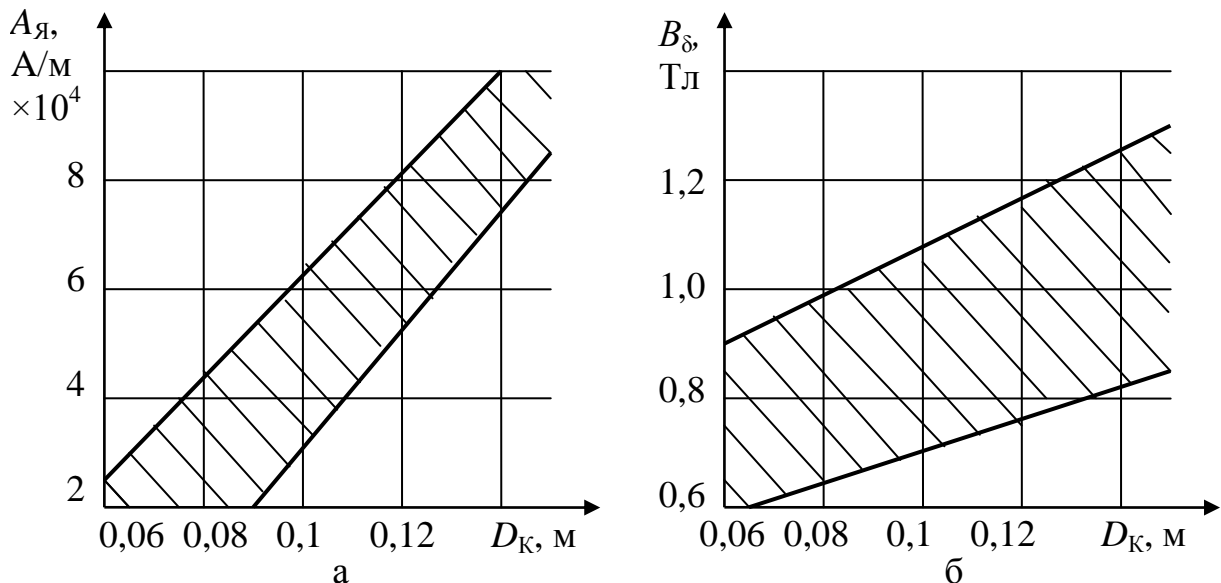


Рис. 5.2.3. Рекомендовані значення електромагнітних навантажень стартерного електродвигуна: а – лінійне навантаження; б – магнітна індукція

3. Обирають кількість пар полюсів. Для стартерів з електромагнітним збудженням зазвичай використовуються чотирьохполюсні ($2p=4$) електродвигуни.

Зі збільшенням числа полюсів зменшується магнітний потік Φ через полюс і струмове навантаження щіток колекторного вузла. Це дозволяє зменшити перетин окремих ділянок магнітопроводу і підвищити ресурс щіток. Однак при великій кількості полюсів збільшується трудомісткість виготовлення стартерного електродвигуна, підвищуються частота перемагнічування й магнітні втрати.

4. Обирають значення коефіцієнта полюсного перекриття в межах $\gamma_{p,c}=0,5-0,78$.

5. Розраховують довжину пакета якоря на основі співвідношення (5.2.1)

$$l_{\text{я}} = \frac{C_{\text{я}} P}{n_{\text{я}} D_{\text{я}}^2} . \quad (5.2.4)$$

При оцінці конструкції стартерного електродвигуна розглядається параметр форми $\lambda_{\text{я}} = l_{\text{я}} / D_{\text{я}}$, який не повинен виходити за межі $\lambda_{\text{я}}=0,75-1,25$. При незмінному значенні $C_{\text{я}}$ можна одержати безліч варіантів стартерного електродвигуна з однаковим об'ємом пакета якоря, але з різним співвідношенням між довжиною $l_{\text{я}}$ та діаметром $D_{\text{я}}$. Співвідношення головних розмірів $\lambda_{\text{я}}$ значно впливає на характеристики стартерного електродвигуна.

Допустиму довжину корпуса стартера обирають, виходячи з довжини ротора $l_{\text{к}} = (1,6-2,0)l_{\text{я}}$ з урахуванням довжини **колектора та** лобових частин машини.

6. Розраховують основний магнітний потік на два полюси, виходячи з обраного магнітного навантаження

$$\Phi = b_{\delta} l_{\text{я}} B_{\delta} , \quad (5.2.5)$$

де $b_{\delta} = \gamma_{p,c} \pi D_{\text{я}} / 2p$ – довжина полюсної дуги (5.2.3).

Структура визначення електромагнітних навантажень та головних розмірів стартерного електродвигуна наведена на рис. 5.2.4.

На схемі, параметри з позначкою (*) обирають за рекомендованими значеннями.

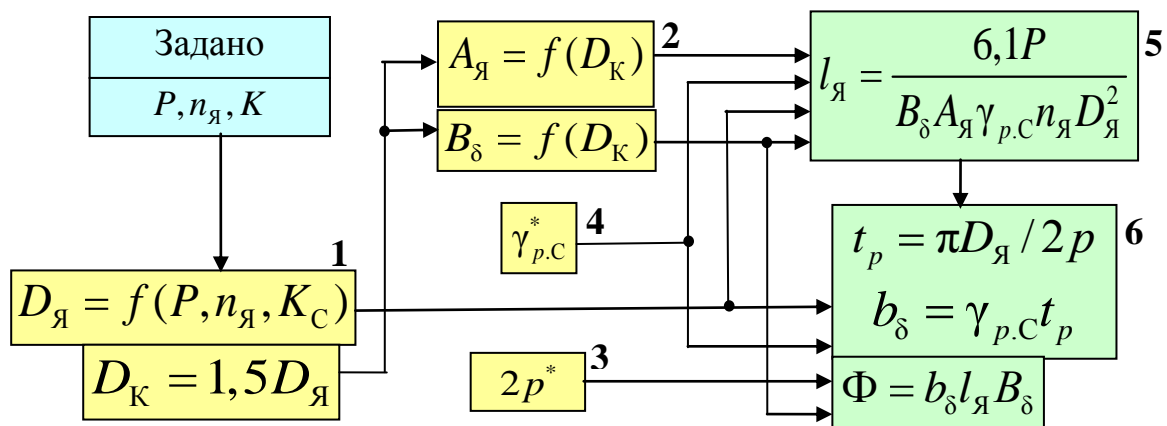


Рис. 5.2.4. Структурна схема визначення головних розмірів стартерного електродвигуна

5.2.3. Синтез конструкції якоря

Обмотка якоря ДПС є сукупністю паралельних гілок (ділянок) електричного кола, які почергово підключаються через щіткоколекторний вузол. Тому під ЕРС машини постійного струму розуміють ЕРС однієї паралельної гілки. Ця ЕРС утворюється всіма послідовно з'єднаними активними провідниками, які складають паралельну гілку. Середнє значення ЕРС обмотки якоря через параметри машини визначається за формулою (1.97).

В стартерних електродвигунах застосовуються хвильові обмотки якоря або обмотки у вигляді петлі (див. рис. 1.2.5). Кожна секція обмотки може складатися з одного чи двох витків. В основному конструкцію якоря стартерного електродвигуна визначає число пазів якоря $z_{\text{П}}$ в які укладаються обмотки.

Кількість пазів у стартерів, що випускаються промисловістю, лежить в межах $z_{\text{П}}=18 - 40$. Для хвильових обмоток кількість пазів $z_{\text{П}}$ повинна бути непарною, а для обмоток у вигляді петлі – парною. Зі збільшенням $z_{\text{П}}$ зменшується ширина зубця, ускладнюється технологія виготовлення якоря й збільшується вартість машини. При занадто малому числі пазів знижується використання сталі й збільшуються габаритні розміри якоря.

Вихідними даними для розрахунку якоря є номінальна напруга бортової мережі $U_{\text{Н}}$, головні розміри пакету якоря $l_{\text{Я}}$ (5.2.4), $D_{\text{Я}}$, режим навантаження $K_{\text{С}}$, магнітний потік Φ (5.2.5), довідкові дані

для вибору обмотувальних матеріалів. Число паралельних гілок обирають виходячи з числа пазів $2a_{\text{я}} = z_{\text{П}}$.

Розрахунок виконується у такий спосіб [3, 10].

1. На основі (1.97) розраховують кількість активних провідників обмотки якоря під задану напругу живлення

$$N_{\text{я}} = \frac{60a_{\text{я}}E_{\text{я}}}{pn_{\text{я}}\Phi}, \quad (5.2.6)$$

де $E_{\text{я}} = (U_{\text{Н}} - \Delta U_{\text{Щ}})(1 - K_{\text{С}})$ – електрорушійна сила якоря.

2. Визначають струм через якірну обмотку при заданій потужності стартера

$$I_{\text{я}} = P/E_{\text{я}}. \quad (5.2.7)$$

3. Визначають число витків у секції обмотки якоря (кількість провідників на паз якорю $w_{\text{я}}$). Якщо розрахункове $N_{\text{я}}$ менше за необхідну кількість згідно (5.2.2), приймають $w_{\text{я}}=1$, якщо навпаки – $w_{\text{я}}=2$. За обраним $w_{\text{я}}$ уточнюють число активних провідників та пазів якоря, враховуючи, що

$$N_{\text{я}} = z_{\text{П}}w_{\text{я}} \quad (5.2.8)$$

4. За формулами (5.2.2) – (5.2.5) розраховують (уточнюють) лінійне навантаження $A_{\text{я}}$, довжину пакета якоря $l_{\text{я}}$ і основний магнітний потік Φ для обраного діаметру машини.

5. Розраховують площу перетину провідників обмотки якоря, виходячи з розмірів ротору і необхідного опору якірної обмотки

$$S_{\text{я}} = \frac{k_t \rho_{\text{R.я}} L_{\text{я.ср}} N_{\text{я}}}{(2a_{\text{я}})^2 R_{\text{я}}}. \quad (5.2.9)$$

де k_t – коефіцієнт, що враховує зміну температури;

$\rho_{\text{R.я}}$ – питомий електричний опір матеріалу проводу обмотки;

$L_{\text{я.ср}} = l_{\text{я}} + v_{\text{я}}t_p$ – середня довжина провідника обмотки;

$v_{\text{я}}$ – коефіцієнт, що враховує довжину лобових частин обмотки

($v_{\text{я}} = 0,9$ при $2p = 2$, $v_{\text{я}} = 1,3$ при $2p = 4$);

$R_{\text{я}}=(0,45 - 0,65)R_{\text{С}}$ – активний опір обмотки якоря (залежно від типу збудження);

$R_{\text{С}}$ – активний опір стартера (визначається за умовою мінімізації маси елементів системи пуску).

6. Виходячи з величини $S_{\text{я}}$, для одновиткових секцій вибирають провід обмотки прямокутного перетину з урахуванням відношення його товщини $a_{\text{пр}}$ до ширини $b_{\text{пр}}$

$$\frac{a_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}}} = 0,05 + 10,4 / z_{\text{П}} + 14z_{\text{П}}^2. \quad (5.2.10)$$

За умовами технологічності намотки це відношення повинно не виходити за межі 0,33 – 0,73. Для секцій з двома витками вибирають круглий обмотувальний провід з перетином меншим удвічі.

7. Оцінюється щільність струму в обмотці якоря з метою перевірки умови перегріву

$$J_{\text{я}} = \frac{I_{\text{я}}}{2a_{\text{я}}S_{\text{я}}} \leq J_{\text{я.доп}}. \quad (5.2.11)$$

На практиці, зазвичай, перевірка температурного стану якірної обмотки стартерного електродвигуна оцінюють за умовами режиму номінальної потужності (враховуються струмове навантаження електродвигуна при стабільному прокручуванні ДВЗ та мінімальна температура пуску). Розрахункова щільність струму в проводі обмотки у режимі номінальної потужності не повинна перевищувати $J_{\text{я}} < 30 \cdot 10^6 [\text{А/м}^2]$.

8. Через кількість пазів та **розміри проводу обмотки** розраховують зубцевий крок t_z , ширину b_z і висоту h_z зуба ротора (для двох витків)

$$t_z = \frac{\pi D_{\text{я}}}{z_{\text{П}}}, \quad b_z = t_z b_{\text{П}}, \quad h_z = \frac{2b_{\text{пр}}}{k_{\text{М}}}, \quad (5.2.12)$$

де $b_{\text{П}} = a_{\text{пр}} + 2(\Delta_i + 0,3)$ – ширина паза;

$\Delta_i = 0,2 - 0,4$ мм – товщина ізоляційного картону;

$k_{\text{М}} = 0,6 - 0,8$ – коефіцієнт заповнення паза міддю.

9. На підставі основних розмірів зуба розраховують технологічні розміри паза: радіус закруглення проводу, ширину прорізу, технологічні діаметри, відстань між провідниками у пазу, закруглення зубцевої зони.

В стартерних електродвигунах застосовуються відкриті та напіввідкриті пази овального профілю. Форму й розміри паза вибирають за умовою максимального його заповнення. Ці конструктивні параметри залежать від числа витків в секції обмотки, швидкохідності стартера і вимог до технології виготовлення. Структура розрахунку якоря стартерного електродвигуна наведена на рис. 5.2.5.

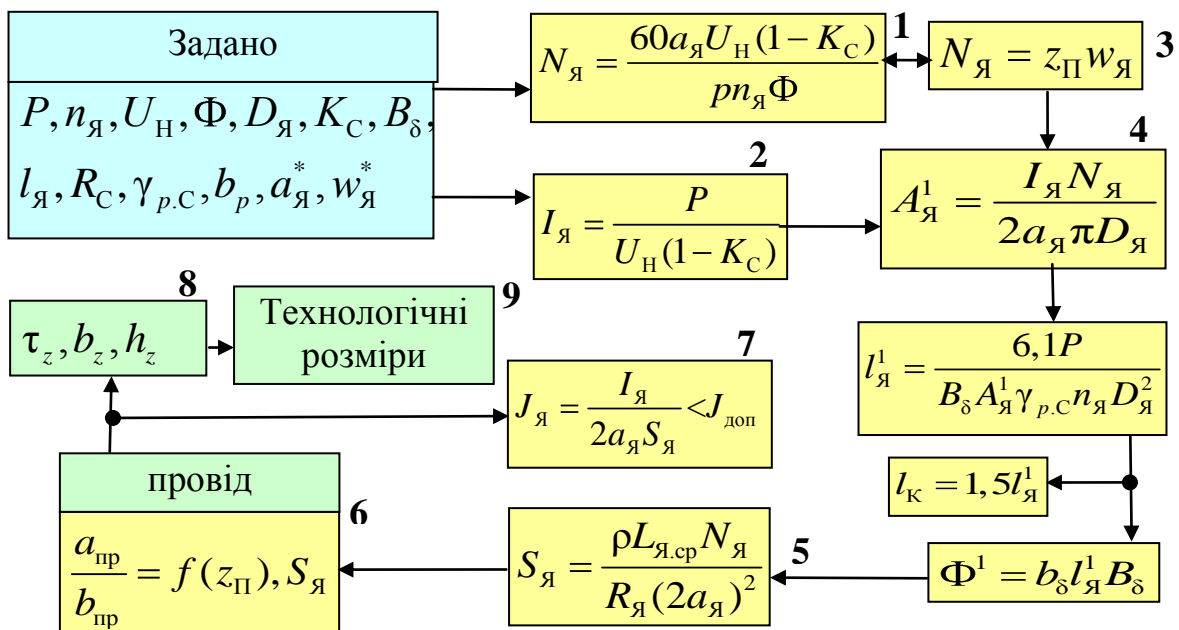


Рис. 5.2.5. Структурна схема розрахунку обмотки й пазів якоря стартерного електродвигуна

На схемі параметри з позначкою $(^1)$ уточнюються за результатами розрахунків.

5.2.4. Розрахунок магнітної системи

Розрахунок магнітної системи стартерного електродвигуна, як і будь-якої електричної машини, зводиться до визначення магніто-рушійної сили обмотки збудження, необхідної для проведення магнітного потоку Φ (5.2.5), який при взаємодії з струмом в обмотці якоря створює обертовий момент на валу двигуна. В процесі розрахунку виконується перевірка перетинів і матеріалів магнітопроводу,

необхідних для проведення потоку заданої величини. Результатом розрахунку магнітної системи є побудування характеристики намагнічування всієї машини [10, 21].

При проектуванні стартерного електродвигуна сумарну МРС визначають після розрахунку розмірів окремих ділянок магнітного кола. У стартерному електродвигуні виділяють шість ділянок магнітного кола, на яких напруженість магнітного поля H вважають постійною: повітряний (робочий) зазор з напруженістю H_δ , зубцева зона H_z , сердечник якоря $H_я$, полюс H_p , зазор на стику полюса з корпусом $H_{\delta,с}$, корпус $H_к$. МРС обмотки збудження машини $F_з$ розподіляється на цих ділянках магнітопроводу (рис. 5.2.6).

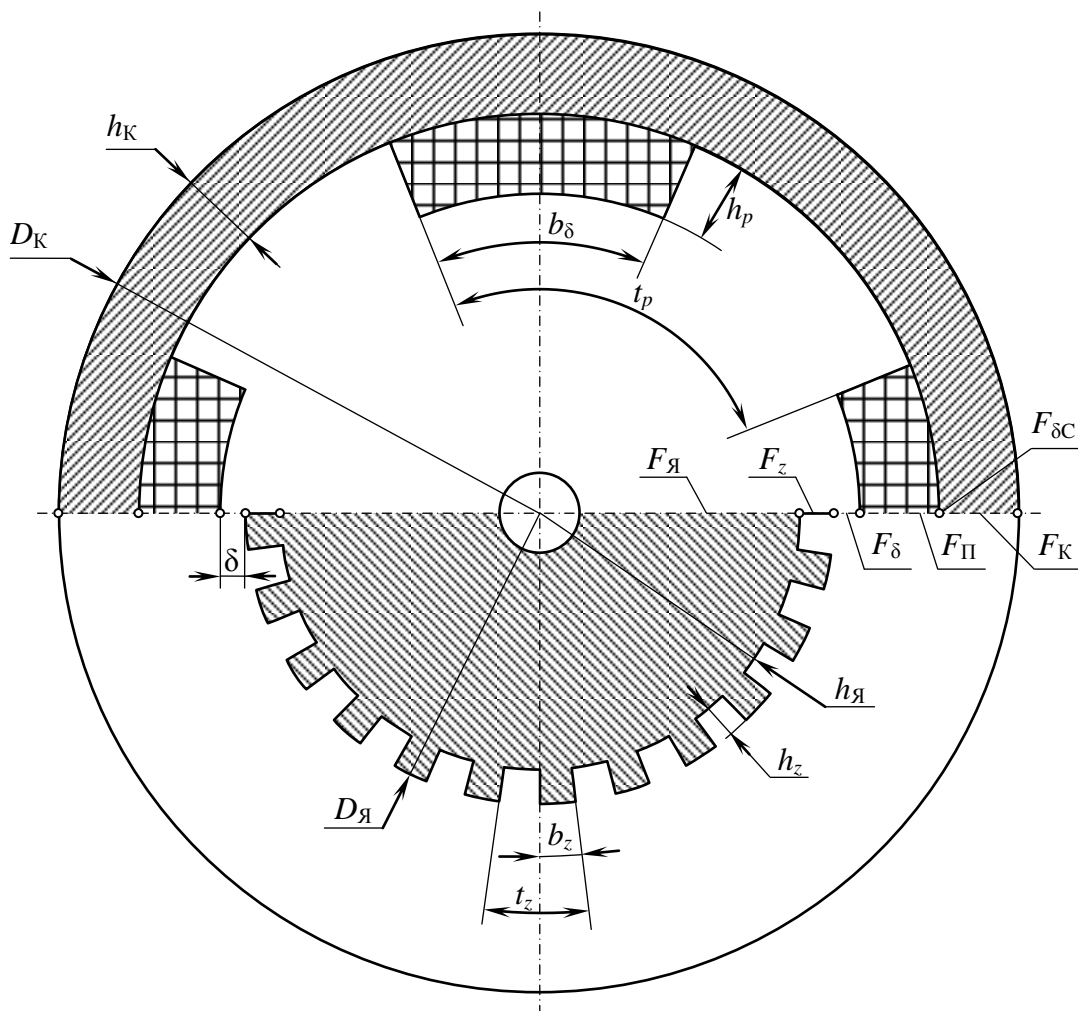


Рис. 5.2.6. Ескізне креслення та ділянки магнітопроводу стартерного електродвигуна

МРС робочого зазору визначається через розмір зазору δ і величину індукції B_δ , яку треба забезпечити в ньому (див. формули

1.73). Для залізних ділянок магнітного кола визначають індукції B_i у відповідних перетинах S_i з урахуванням розсіювання σ_i (1.79), магнітні напруженості за кривими намагнічування матеріалу з якого виготовляються деталі $H_i=f(B_i)$, а потім відповідні їм МРС F_i , що спадають на довжині l_i кожної ділянки (1.74). Сумарна МРС, яку повинна забезпечити обмотка збудження F_3 , за умовою, підтримки в робочому зазорі заданих значень індукції B_δ складається із спадань магнітних потенціалів на окремих ділянках магнітного кола

$$F_3 = F_z + F_{\text{Я}} + F_P + F_K + F_\delta + F_{\delta.C}. \quad (5.2.13)$$

Вихідними параметрами для розрахунку магнітної системи є потік Φ (5.1.4), індукція в робочому зазорі B_δ , довжина корпусу машини l_K , розміри зубцевої зони t_z , b_z , h_z (5.2.12), криві намагнічування та коефіцієнти магнітного розсіювання на окремих ділянках магнітопроводу σ_i (довідкові дані). Для спрощення виразів при викладенні методики розрахунку вважаємо, що пази ротора мають прямокутну форму. Розрахунок виконують у такий спосіб [3].

1. Визначають магнітний потік, що приходить на один зубцевий крок

$$\Phi_{t_z} = B_\delta t_z l_{\text{Я}}. \quad (5.2.14)$$

2. Розраховують індукцію в перетині зубця ротора з урахуванням заповнення пакету якоря сталлю ($k_C=0,95$)

$$B_z = \frac{\Phi_{t_z}}{k_C l_{\text{Я}} b_z} = \frac{t_z B_\delta}{k_C b_z} \quad (5.2.15)$$

3. За кривими намагнічування матеріалу ротора $H_z=f(B_z)$ визначають магнітну напруженість у зубці.

4. Визначають МРС, що спадає на зубцевій зоні

$$F_z = 2H_z h_z. \quad (5.2.16)$$

5. Обирають величину робочого зазору δ , яка для стартерних двигунів знаходиться у межах 0,4 – 1,0 мм. Зі зменшенням зазору зменшується потрібна МРС збудження і розміри індуктора. При малих зазорах поле під полюсом машини може змінювати напрямок

під впливом реакції якоря. Для стартерних електродвигунів це дозволяється і тому мінімальна величина зазору обмежується тільки з технологічних та механічних міркувань.

6. Розраховують коефіцієнт перекриття робочого зазору

$$k_{\delta} = \frac{t_z + 10\delta}{b_z + 10\delta} . \quad (5.2.17)$$

7. Визначають МРС робочого зазору

$$F_{\delta} = 2\delta k_{\delta} B_{\delta} / \mu_0 , \quad (5.2.18)$$

8. Розраховують осьовий перетин корпусу стартера S_K та його товщину h_K , що потрібні для проведення основного потоку

$$S_K = \frac{\sigma_K \Phi}{2B_K} , \quad h_K = \frac{S_K}{l_K} , \quad (5.2.19)$$

де σ_K – коефіцієнт магнітного розсіювання корпусу;

$B_K=1,0-1,7$ – рекомендовані значення індукції в матеріалі корпусу.

З підвищенням B_K зменшується товщина корпусу та збільшується площа міжполюсного простору (потенційні розміри котушки збудження), однак збільшується і МРС, що спадає на корпусі. Оптимальне значення B_K при мінімальних розмірах машини відповідає максимальній різниці між МРС обмотки збудження та корпусу.

9. Визначають лінійні розміри полюса та тіла якоря, виходячи з головних розмірів машини

$$h_p = \frac{D_K - D_{\text{я}} - 2h_K}{2} - 2\delta , \quad h_{\text{я}} = D_{\text{я}} - 2h_z . \quad (5.2.20)$$

За результатами розрахунків геометричних розмірів синтезують ескізне креслення магнітної системи машини та визначають довжину головної силової лінії l_i , що проходить по кожній ділянці магнітопроводу .

10. Визначають величини магнітної індукції B_i , магнітної напруженості H_i , і спадань магнітних потенціалів F_i на ділянках магнітопроводу (якорі, полюсі, корпусі) аналогічно пп. 2 – 4.

11. Визначають падіння МРС на стику полюса з корпусом

$$F_{\delta,C} = 2B_p \delta_C / \mu_0, \quad (5.2.21)$$

де $B_p=1,0 - 1,7$ – рекомендовані значення індукції в полюсі машини;
 δ_C – зазор на стику полюса з корпусом (обирається з технологічних міркувань за довідковими даними).

12. Згідно (5.2.13) підраховують сумарну МРС на два полюси, яку повинна утворювати обмотка збудження

На рис. 5.2.7 наведена структура розрахунку магнітної системи стартерного електродвигуна.

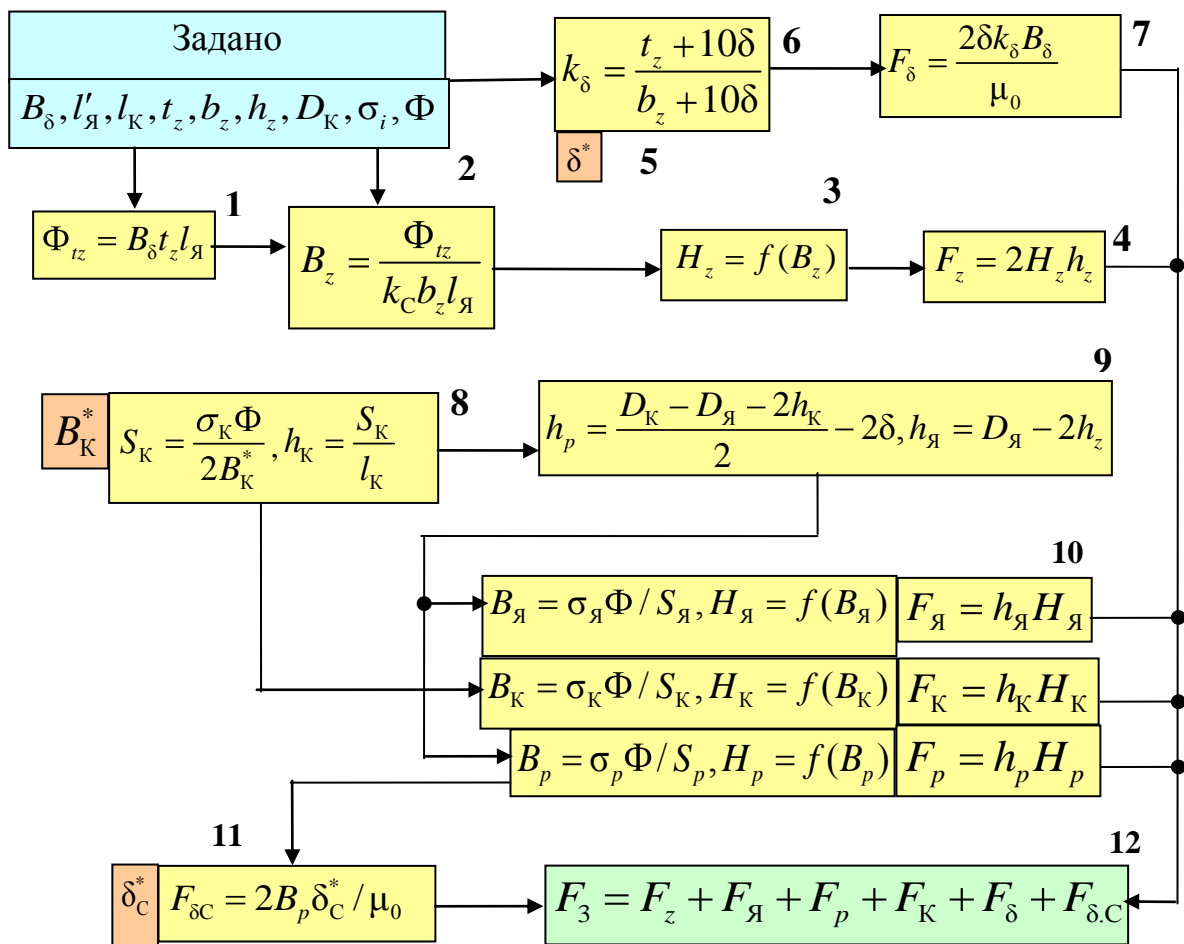


Рис. 5.2.7. Структурна схема розрахунку магнітної системи стартерного електродвигуна

На схемі параметри з позначкою (*) підлягають вибору на підставі рекомендацій та довідкових даних.

Щоб побудувати характеристику намагнічування всієї машини $B_{\delta} = f(F_3)$, задаються рядом значень індукції $B_{\delta,i}$ та за наведеною методикою визначають відповідні МРС $F_{3,i}$ (рис. 5.2.8, крива *a*).

Аналіз характеристики доводить, що при ненасиченій системі машини в сумарній МРС збудження переважно є частка МРС, що спадає на робочому зазорі.

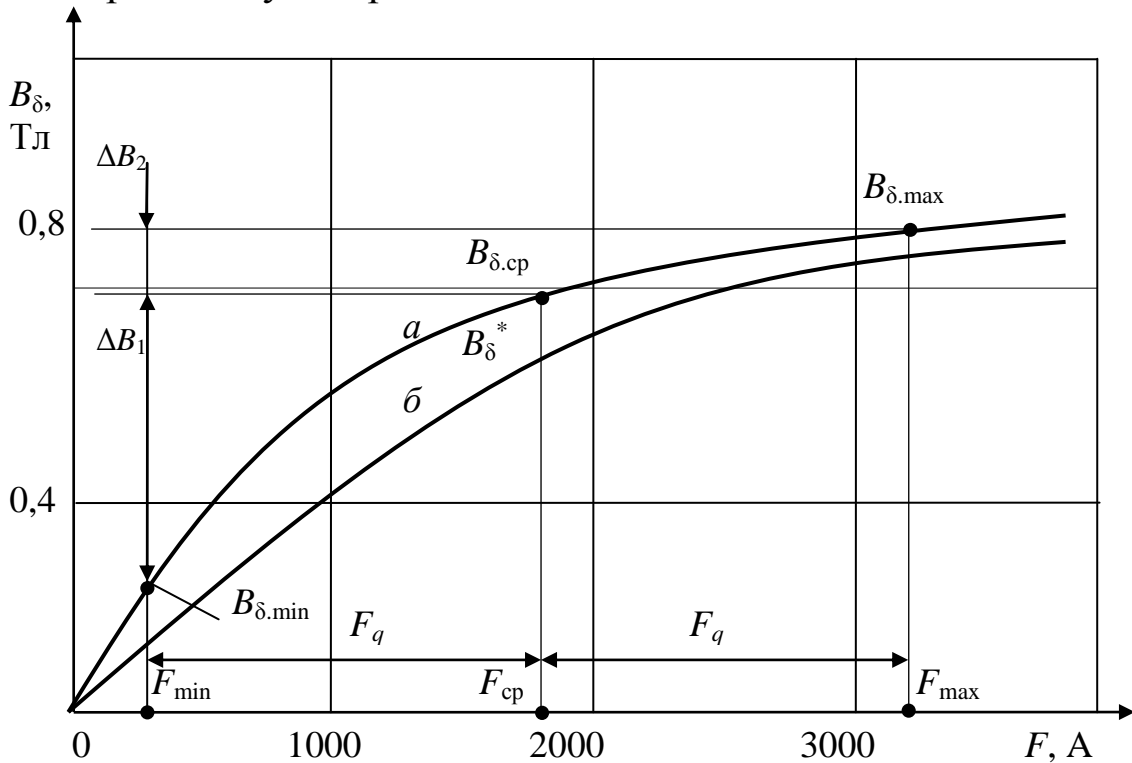


Рис. 5.2.8. Характеристика намагнічування стартерного електродвигуна:
а – без урахування реакції якоря; б – з урахуванням реакції якоря

Зі збільшенням B_{δ} збільшується частка МРС залізних ділянок (відбувається насичення машини) та необхідна МРС обмотки збудження для проведення потоку.

Як наслідок знижується ефективність утворення обертаючого моменту. Ступінь насичення машини оцінюється коефіцієнтом $k_H = F_3 / F_{\delta}$. Щоб скорегувати форму характеристики треба під час розрахунків обирати певні значення індукції в окремих деталях магнітної системи.

Струм якоря створює МРС, яка взаємодіє з МРС збудження. Цей вплив називається реакцією якоря. На основне поле, відповідно до конструкції стартерного електродвигуна, діє поперечна складова

реакції якоря. Як наслідок результуюче поле, що утворює **обертовий** момент, зменшується.

МРС поперечної реакції якоря пропорційна лінійному струмовому навантаженню машини $A_{\text{я}}$ (5.2.2). На робочому режимі МРС збудження повинна бути достатньою для компенсації негативної дії реакції якоря. У зв'язку із цим при розрахунках обмотки збудження значення сумарної МРС збільшують на 20 – 50%.

При розрахунках робочих характеристик стартерного електродвигуна кількісну оцінку магнітної індукції з урахуванням реакції якоря B_{δ}^* виконують так. Для заданого значення МРС $F_{\text{сп}}$ на характеристиці холостого ходу (рис. 5.2.8, крива *a*) визначають ділянку для аналізу $F_{\text{min}}-F_{\text{max}}$, де $F_q = b_{\delta}A_{\text{я}}$ – значення МРС реакції якоря. Відповідно до графіка розраховують величину індукції навантаженої машини [10]

$$B_{\delta}^* = \frac{B_{\delta.\text{min}} + 2B_{\delta.\text{сп}} + B_{\delta.\text{max}}}{4F_q} \frac{F_{\text{сп}} - F_{\text{min}}}{1}. \quad (5.2.22)$$

За отриманими значеннями будують магнітну характеристику під навантаженням (рис. 5.2.8, б).

5.2.5. Синтез обмотки збудження

У чотирьохполюсних стартерних електродвигунах можливі три схеми послідовного (рис. 2.2.6, а) та три схеми змішаного (рис. 2.2.6, б) включення обмотки збудження. При змішаному збудженні МРС паралельної обмотки вибирають 10 – 40% від сумарної МРС збудження.

Значення сумарної МРС, отримане за результатами розрахунку магнітної системи (5.2.13), визначає кількість ампер-витків обмотки збудження, яка забезпечить проведення заданого потоку Φ . В послідовних котушках збудження сумарний струм дорівнює якірному струму, а паралельні котушки збудження живляться від напруги на затискачах стартера. Тому кількість витків котушок збудження буде однозначною. Діаметр проводу котушок повинен витримувати струмове навантаження без перегріву і чинити дозволений опір струму, виходячи із значень напруги живлення.

Вихідними даними для розрахунку є: розрахована МРС обмотки збудження F_3 (5.2.13), обрана схема підключення котушок обмотки збудження, струм у колі якоря $I_я$ (5.2.8) і опір обмотки якоря $R_я$, головні розміри пакета якоря $l_я$ (5.2.4), $D_я$, довжина полюсної дуги $b_δ$, довідкові дані для вибору обмотувальних матеріалів та структурних розмірів полюса. Визначення конструктивних параметрів обмотки збудження виконують за ескізним кресленням (рис. 5.2.9).

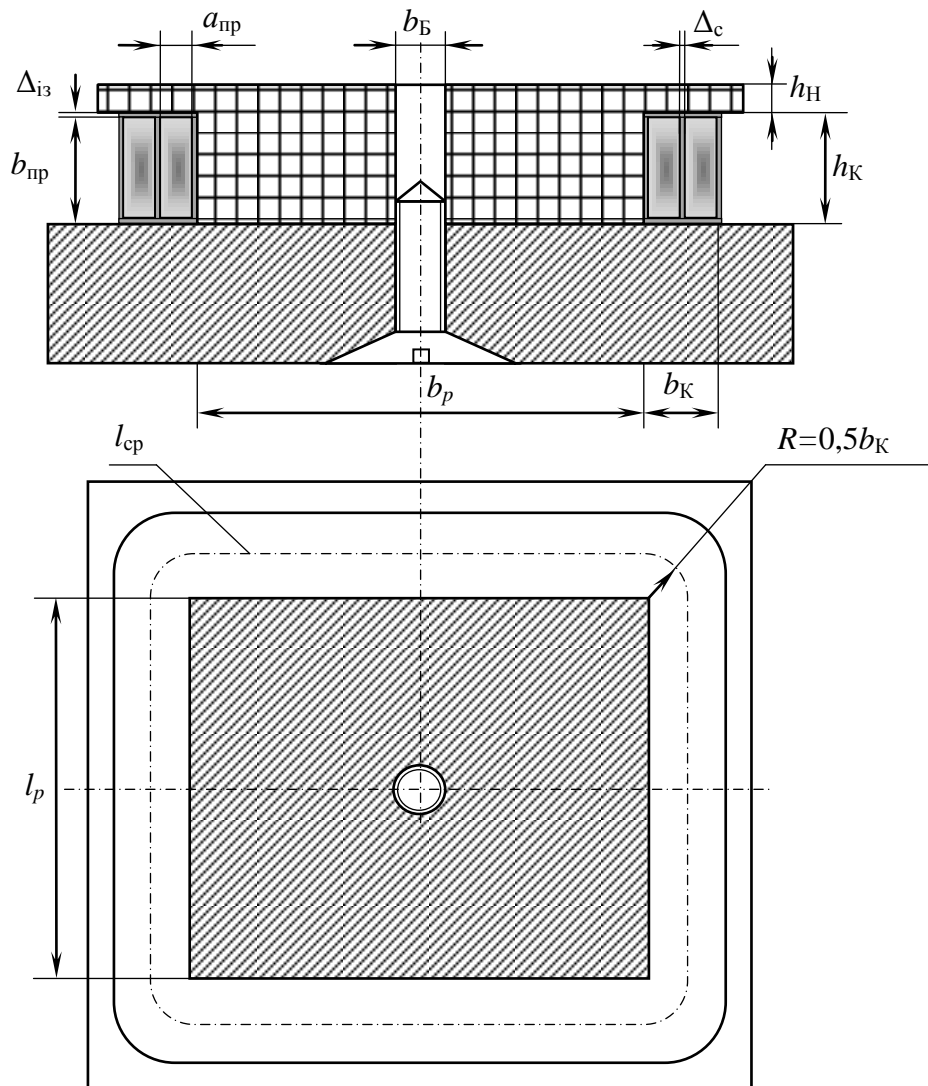


Рис. 5.2.9. Ескізне креслення для розрахунку обмотки збудження

Розрахунок послідовної обмотки збудження виконують так, як описано нижче [3, 10].

1. Розраховують число витків у кожній котушці обмотки відповідно до схеми їх підключення

$$w_{\text{К.с}} = \frac{F_3 a_c}{2I_{\text{я}}}, \quad (5.2.23)$$

де a_c – число паралельних кіл послідовної обмотки.

2. Розраховують опори для послідовної обмотки та однієї катушки

$$R_c = R_C - R_{\text{я}}, \quad R_{\text{К}} = \frac{a_c^2 R_c}{z_c}, \quad (5.2.24)$$

де z_c – загальне число катушок в обмотці.

3. Визначають припустиму ширину катушки на підставі ескізу синтезованої магнітної системи (рис. 5.2.9) або розраховують її за формулою (мм)

$$b_{\text{К}}^* = \frac{\pi(D_{\text{я}} + 2\delta + 2h_{\text{Н}})}{4p} - 0,5(b_p + d_{\text{Б}}) - 2, \quad (5.2.25)$$

де $d_{\text{Б}}$ – діаметр стяжного болта, залежить від розмірів двигуна;

b_p – ширина полюса (обирається у відповідності до довжини полюсної дуги b_{δ});

$h_{\text{Н}}$ – висота наконечника полюса.

4. Розраховують середню довжину витка катушки

$$l_{\text{К.ср}} = 2(l_p + b_p) + \pi b_{\text{К}}^*, \quad (5.2.26)$$

де l_p – довжина полюса вибирається залежно від довжини пакету якоря $l_{\text{я}}$ за довідковими таблицями.

5. Розраховують площу перетину проводу катушки, потрібну для забезпечення заданого опору і заданої МРС одночасно

$$S_c = \frac{k_t \rho_c l_{\text{К.ср}} w_{\text{К.с}}}{R_{\text{К}}} = \frac{k_t \rho_c l_{\text{К.ср}} F_3 z_c}{2I_{\text{я}} R_c a_c}, \quad (5.2.27)$$

де ρ_c – питомий електричний опір проводу катушки;

k_t – температурний коефіцієнт опору матеріалу проводу.

6. Визначають висоту котушки, виходячи з розмірів полюса $h_K = h_p - h_H$, і допустиму ширину проводу котушки з урахуванням товщини зовнішньої ізоляції Δ_{i3} (довідкові дані) $b_{пр} = h_K - 2\Delta_{i3}$.

7. За довідковими таблицями вибирають марку проводу прямокутного перетину, виходячи з визначених площі перетину S_c і ширини проводу $b_{пр}$.

8. Підраховують дійсну ширину котушки при застосуванні обраного проводу з товщиною $a_{пр}$

$$b_K = a_{пр} w_{K.c} + \Delta_c (w_{K.c} - 1) + 2\Delta_{i3}, \quad (5.2.28)$$

де Δ_c – товщина ізоляційного картону між витками обмотки.

Ширина котушки не повинна перевищувати припустимого значення $b_K \leq b_K^*$. Якщо умова не виконується змінюють $D_{я}$ або B_{δ} .

9. Визначають щільність струму в послідовній обмотці збудження для перевірки умови за припустимим нагрівом обмотки

$$J_c = \frac{I_{я}}{a_c S_c} \leq J_{c.доп}. \quad (5.2.29)$$

Щільність струму у режимі номінальної потужності не повинна перевищувати $30 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ (умова допустимого нагріву). Структура розрахунку послідовної статорної обмотки збудження стартерного двигуна наведена на рис. 5.2.10.

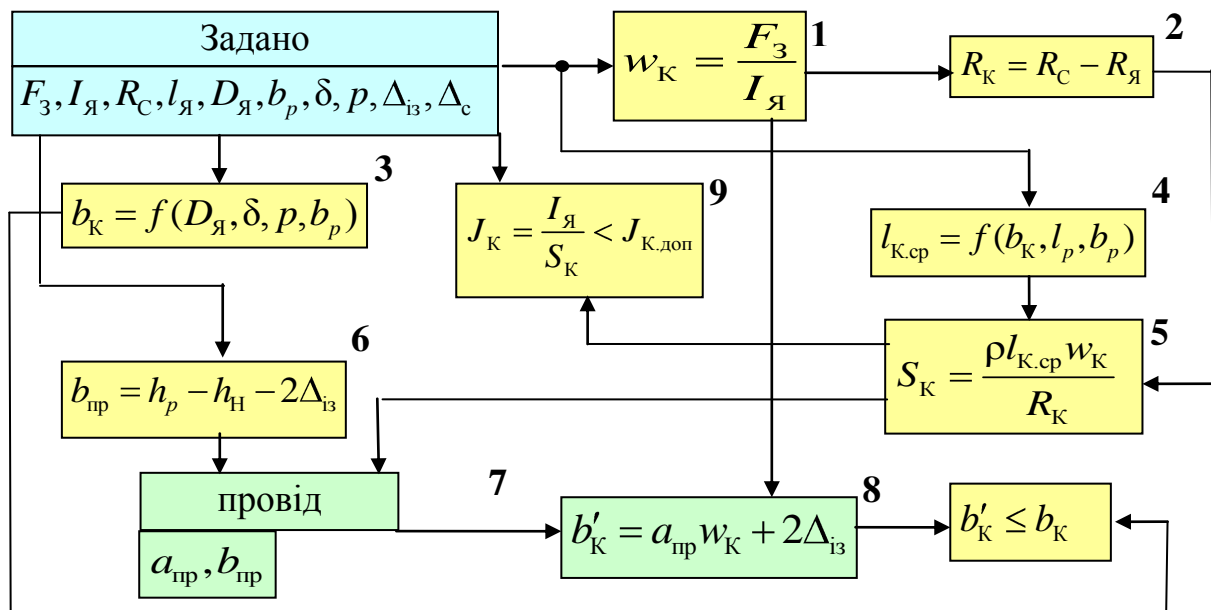


Рис. 5.2.10. Структурна схема розрахунку послідовної обмотки збудження

На схемі параметри з позначкою (') уточнюються за результатами розрахунку.

При застосуванні змішаного збудження (рис. 2.2.6, б), МРС паралельної обмотки обирають в межах 10 – 40% від загальної МРС збудження, а струм збудження в межах 2 – 5% від струму якоря

$$F_s = (0,1 - 0,4) p F_3 = F_{K.s} z_s, \quad I_s = (0,02 - 0,05) I_{я}, \quad (5.2.30)$$

де $F_{K.s}$ – МРС однієї котушки;

z_s – кількість котушок в паралельній обмотці.

Струм в кожній паралельній котушці $I_{K.s} = I_s / a_s$ визначається в залежності від кількості паралельних гілок a_s .

Як різницю між сумарною та паралельною МРС визначають частку МРС та кількість витків послідовної котушки збудження

$$F_c = p F_3 - F_s, \quad w_{K.c} = \frac{F_c a_c}{z_c I_{я}}. \quad (5.2.31)$$

Далі розраховують послідовні котушки збудження за вище наведеною методикою.

Розрахунок паралельної обмотки збудження виконується у такий спосіб [3, 10].

1. Розраховують потрібне число витків у кожній котушці

$$w_{K.s} = \frac{F_s a_s}{z_s I_s}. \quad (5.2.32)$$

2. Розраховують опір однієї котушки

$$R_{K.s} = \frac{a_s^2 R_s}{z_s}. \quad (5.2.33)$$

3. Розраховують площу перетину проводу котушки, потрібну для забезпечення заданого опору і заданої МРС одночасно

$$S_s = \frac{k_t \rho_s l_{K.c.p} w_{K.s}}{R_{K.s}} = \frac{k_t \rho_s l_{K.c.p} F_s}{U_C R_c a_s}, \quad (5.2.34)$$

де $U_C = U_H - I_{\text{я}}(R_{\text{АБ}} + R_{\text{тр}})$ – напруга на затисках стартера.

4. Виходячи з отриманої площі, за довідковими таблицями вибирають марку проводу круглого перетину з діаметром d_s .

5. Підраховують можливу кількість витків, виходячи із заданого (визначеного) вікна котушки та діаметру обраного проводу

$$w_{\text{К.с}} = (b_{\text{К}}^* - 2\Delta_{\text{із}})(h_{\text{К}} - 2\Delta_{\text{із}}) / d_{\text{із}}^2, \quad (5.2.35)$$

де $d_{\text{із}}$ – діаметр проводу в ізоляції.

Можлива кількість витків повинна бути не менше за потрібну. Розміри вікна котушки визначаються при розрахунку послідовної та паралельної одмоток, але як робочий варіант обирають вікно з найбільшою площею.

5. Розраховують опір котушки та всієї паралельної обмотки

$$R_{\text{К.с}} = \frac{4k_t \rho_s l_{\text{К.сп}} w_{\text{К.с}}}{\pi d_s^2}, \quad R_s = \frac{R_{\text{К.с}} z_s}{a_s^2}. \quad (5.2.36)$$

7. Визначають струм та щільність струму в паралельній обмотці збудження для перевірки умови за припустимим нагрівом

$$I_s = \frac{U_C}{R_s}, \quad J_s = \frac{I_s}{a_s S_s} \leq J_{s.\text{доп}}. \quad (5.2.37)$$

Щільність струму у режимі номінальної потужності не повинна перевищувати $25 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Конструктивні параметри, що отримують на етапі ескізного проектування, використовують для підбору аналогів окремих деталей (вузлів) або розробки креслень оригінальних конструкцій і синтезу конструкції стартерного електродвигуна на задану потужність, швидкість обертання і струмовий режим.

Електричні розрахункові параметри дозволяють у першому наближенні побудувати і проаналізувати робочі характеристики електродвигуна, що проектується. При побудованні потужнісних характеристик слід враховувати втрати потужності, що виникають в реальній конструкції стартера. Такі втрати визначають за емпіричними формулами [10].

Втрати потужності на тертя в підшипниках

$$\Delta P_{\text{пш}} = 0,03 P_{\text{max}} n_{\text{я}} / n_{\text{я.max}} \cdot \quad (5.2.38)$$

Втрати потужності на тертя в колекторному вузлі

$$\Delta P_{\text{щ}} = 0,005 \pi D_{\text{кол}} F_{\text{щ}} N_{\text{щ}} n_{\text{я}} , \quad (5.2.39)$$

де $D_{\text{кол}}$ – діаметр колектора, виходячи з розмірів пакета якоря;
 $F_{\text{щ}}$ – сила тиску щіток, виходячи зі значень сили струму якоря;
 $N_{\text{щ}}$ – кількість щіток (виходячи з кількості полюсів машини).

Магнітні втрати в зубцевій зоні

$$\Delta P_z = 2 B_T^2 m_z (0,044 f_{\text{я}} + 2240 \Delta_{\text{пя}}^2 f_{\text{я}}^2) , \quad (5.2.40)$$

де B_T – індукція в зубцевій зоні;

$f_{\text{я}} = p n_{\text{я}} / 60$ – частота перемагнічування сталі;

$\Delta_{\text{пя}} = 1 - 1,2$ мм – товщина пластин пакета якоря;

m_z – маса зубцевої зони пакета якоря (визначається за ескізним кресленням).

Магнітні втрати в сердечнику якоря

$$\Delta P_{\text{я}} = 2 B_{\text{я}}^2 m_{\text{я}} (0,044 f_{\text{я}} + 2240 \Delta_{\text{пя}}^2 f_{\text{я}}^2) , \quad (5.2.41)$$

де $m_{\text{я}}$ – маса сердечника пакета якоря (визначають на підставі ескізного креслення).