

5.4. Розрахунок вентильних генераторів індукторного типу

5.4.1. Особливості розрахунку генераторів з пульсуючим полем

В індукторних генераторах обмотка збудження та якірні обмотки розташовані на статорі. За принципом побудови індукторні генератори можна поділити на різнойменно полюсні (з тангенціальним збудженням) та однойменно полюсні машини (з коаксіальним збудженням). В першому випадку, магнітний потік в зубцях (дзьобках) ротора направлено від полюсів позитивної полярності до відповідних полюсів негативної полярності, в другому – потік в зубцях ротора має однакове направлення [4, 18, 20, 21].

Електрорушійна сила в обмотці якоря однойменно полюсного генератора виникає в результаті зчеплення обмотки з пульсуючим полем, що періодично змінюється внаслідок зміни магнітної провідності зубцевої зони при обертанні ротора (феромагнітної маси).

Розрахунок магнітної системи індукторного генератора включає: розрахунок магнітної системи у поперечному перерізі (визначення коефіцієнтів провідності зубцевої зони) і розрахунок у поздовжньому перетині (визначення результуючого потоку збудження).

Особливості розрахунку магнітної системи індукторного генератора пов'язані з значним відкриттям пазів (ширина і глибина пазів порівнянні із шириною зубців). При цьому необхідно враховувати збільшення потоку в зубці ротора відносно потоку в зубці статора за рахунок приходу потоку від найближчих сусідніх зубців статора.

Розрахунок магнітної системи машин постійного струму, генераторів з дзьобоподібним ротором та індукторних різнойменно полюсних генераторів доцільно виконувати на пару полюсів. Для індукторного однойменно полюсного генератора розрахунок магнітної системи проводять для всієї машини.

Зміна потоку в полюсах індукторного генератора при його обертанні відбувається не за синусоїдальним законом, а визначається профілем зубцевої зони ротору. Тому при визначенні діючих значень напруги в обмотці якорю треба враховувати гармонійні складові функції потоку.

5.4.2. Аналіз електромагнітних процесів в індукторних генераторах

В однофазній індукторній машині всі зубці (полюса) статора з котушками якірної обмотки повинні перебувати в однакових умовах. Ця умова виконується, якщо зубцевий крок ротора дорівнює двом зубцевим крокам статора $t_{z2} = 2t_{z1}$ (рис. 5.4.1, а).

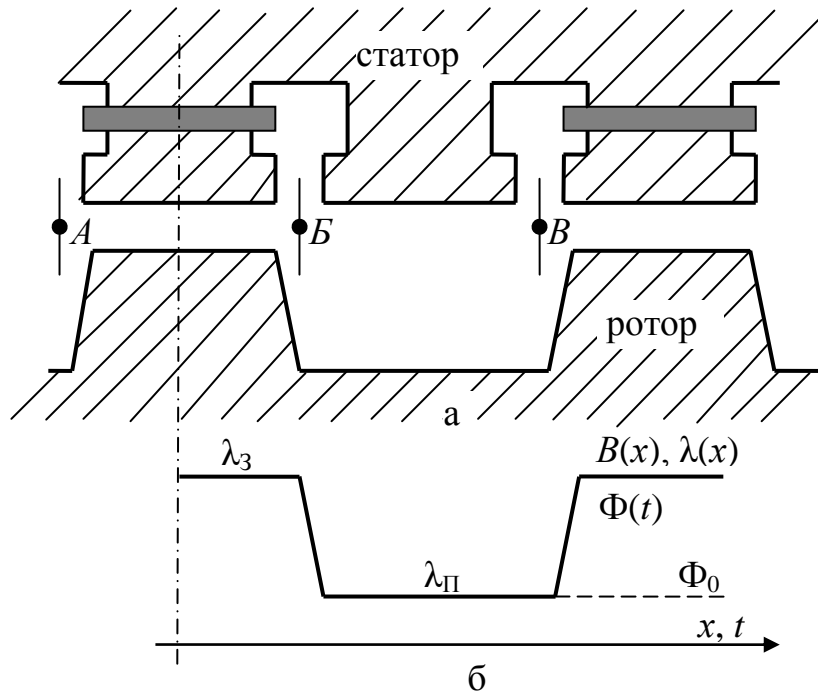


Рис. 5.4.1. Розподіл магнітного поля у робочому зазорі індукторного генератора: а – конфігурація зубцевої зони; б – функції розподілу магнітних параметрів

Розкриття пазів статора при такому співвідношенні є незначним та при аналізі електромагнітних процесів їм нехтують. Зубці статора і ротора не насичені та мають порівняльно малу висоту. При таких умовах вважають, що уздовж полюсної дуги на зазор діє однакова магніторушійна сила F_δ , яка визначається різницею між МРС, що утворює обмотка збудження F_z та МРС, яка йде на проведення магнітного потоку Φ по залізу F_i . Індукція B_x на кожній елементарній ділянці зазору dx пропорційна коефіцієнту магнітної провідності ділянки λ й МРС зазору F_δ . Коефіцієнт магнітної провідності λ визначається відношенням перетину однорідної ділянки зазору dx до його довжини δ . Таким чином перемноження коефіцієнту

провідності ділянки λ на магнітну сталю середовища μ_0 визначає магнітну провідність силової трубки g_x .

Магніторушійна сила зазору постійна уздовж всієї полюсної дуги, отже, крива провідності $\lambda(x)$ в просторі має форму кривої розподілу поля (рис. 5.4.1, б) і її можна представити гармонійним рядом. Для перших трьох гармонік маємо

$$\lambda(x) = A_0 + A_1 \cos \frac{\pi}{t_{z1}} x + A_2 \cos 2 \frac{\pi}{t_{z1}} x + A_3 \cos 3 \frac{\pi}{t_{z1}} x . \quad (5.4.1)$$

При повороті ротору на кут $\alpha = \omega t$, миттєві значення сумарного коефіцієнту провідності зазору в межах полюсного ділення статора будуть складатися з постійної та непарних складових (обмежимось трьома гармоніками)

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \lambda_1 \cos \omega t + \lambda_3 \cos 3\omega t . \quad (5.4.2)$$

Часова функція потоку, що входить у зубцеве (полюсне) ділення AB (рис. 5.4.1), дорівнює

$$\Phi_{AB}(t) = F_\delta \mu_0 \lambda_{AB}(t) l_1 , \quad (5.4.3)$$

де l_1 - довжина пакета статора.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна проникливість повітря.

Крива зміни потоку $\Phi(t)$ буде подібна кривій зміни провідності уздовж полюсної дуги $\lambda(x)$. Сумарний магнітний потік на двох зубцях статора (ділянка AB) буде незмінним

$$\Phi_{AB}(t) = \Phi_{AB}(t) + \Phi_{BB}(t) = F_\delta \mu_0 l_1 \lambda_0 - const , \quad (5.4.4)$$

де $\lambda_0 = (\lambda_3 + \lambda_{II}) / 2$ - коефіцієнт провідності постійної складової магнітного потоку;

λ_3, λ_{II} - відповідно коефіцієнти провідності над зубцем і над пазом ротора.

Незважаючи на пульсацію потоку в зубцях статора, сумарний потік по двох сусідніх зубцях і сумарний потік всієї машини при обертанні ротора залишається постійним. З боку конструкції магні-

тної системи це дозволяє виконувати нерозгалужений магнітопровід генератора не шихтованим.

У котушці якоря з числом витків w в результаті проходження потоку $\Phi(t)$ виникає ЕРС, миттєве значення якої пропорційно швидкості зміни потоку

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f F_{\delta} l_1 w \mu_0 (\lambda_1 \sin \omega t + 3\lambda_3 \sin 3\omega t) . \quad (5.4.5)$$

Діюче значення основної гармоніки ЕРС у котушці становить

$$E_w = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w l_1 F_{\delta} \mu_0 \lambda_1 , \quad (5.4.6)$$

де $\lambda_1 = (\lambda_3 - \lambda_{II})/2$ - коефіцієнт провідності першої гармоніки.

Для ненасиченої машини ЕРС якірної котушки можна визначити через відповідні потоки

$$E_w = \frac{\pi f}{\sqrt{2}} w (\Phi_3 - \Phi_{II}) . \quad (5.4.7)$$

Діюче значення напруги при реальній кривій $\lambda(x)$ визначається з урахуванням дії інших гармонік розкладання

$$E_{wS} = 2\pi f w l_1 F_{\delta} \mu_0 \lambda_1 \sqrt{\sum_1^K \frac{2K}{\pi} \int_0^{\pi/2K} K^2 \lambda_K^2 \sin^2 Kx dx} , \quad (5.4.8)$$

де K – номер гармоніки.

Зубці ротора z_2 можна вважати полюсами однієї полярності, а пази полюсами іншої полярності. Тоді для синхронних генераторів вважають $z_2 = p$, а число пазів на полюс i фази становить $q = z_1 / 2z_2 m$. Частота пульсацій ЕРС, що утворюється машиною, визначається через оберти генератора $f = z_2 n / 60 \text{хв}^{-1}$.

В синхронних багатофазних генераторах знайшли розповсюдження конструкції якірних обмоток з $q=1; 0,5; 0,25; 0,166$ (рис.5.4.2).

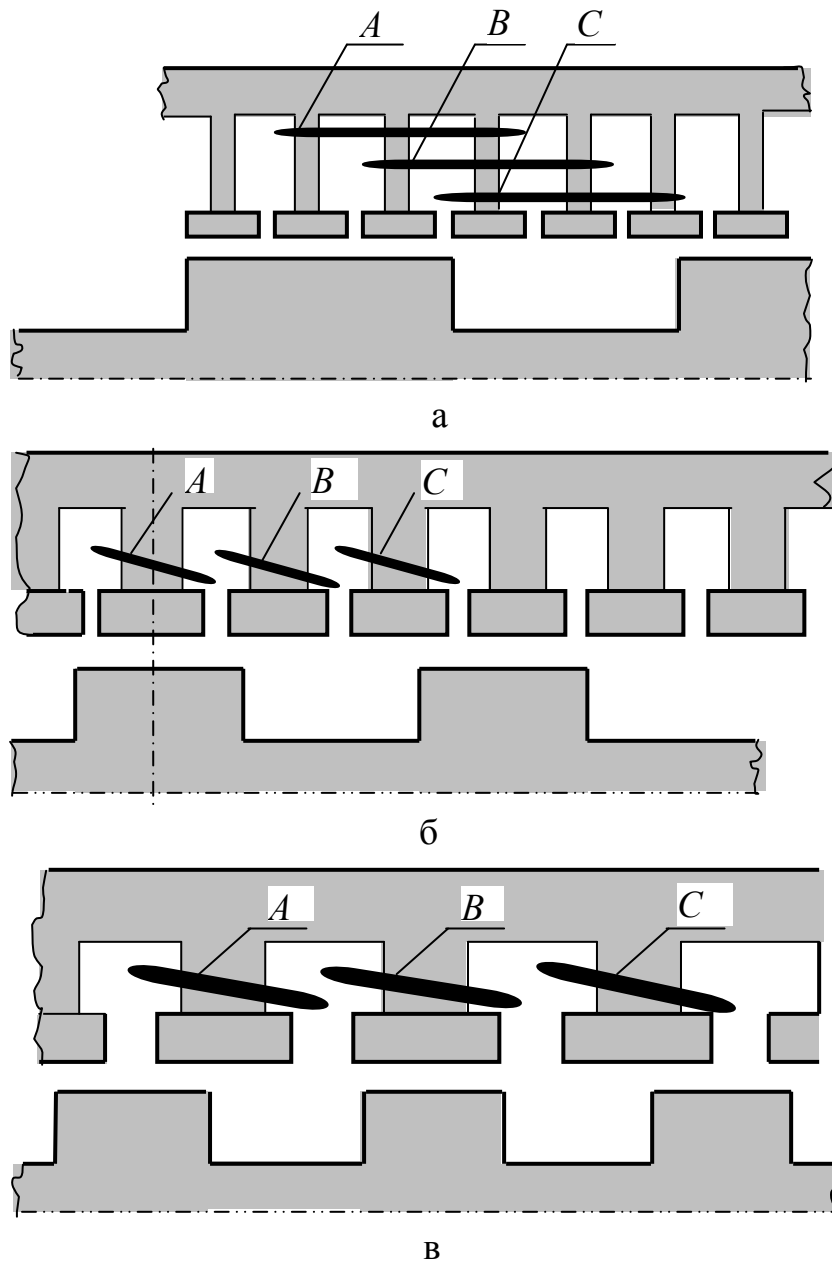


Рис. 5.4.2 Зубцева зона трьохфазних індукторних генераторів з числом: а – $q=1$; б – $q=0,5$; в – $q=0,25$

Більш ретельно розглянемо останній варіант для $q=0,25$. В межах двох зубцевих ділень ротора на трьох полюсах статора розташовані три котушки з кроком рівним одиниці. Кожна котушка має подовжений крок $y=4t_{z1}/3$ (t_{z1} – полюсне ділення).

При подовженому кроці функція зміни сумарного коефіцієнту провідності зазору в межах полюсного ділення статора має вигляд

$$\lambda_t = \lambda_0 + \sum_1^K A_K \frac{t_{z1}}{K\pi} 2 \sin K \frac{\alpha_y}{\pi} \cos K\omega t, \quad (5.4.9)$$

де $\alpha_y = 4\pi/3$ – кут охопту котушки;

A_K – амплітудне значення K -ї гармоніки провідності.

В цьому випадку функція коефіцієнта провідності буде мати всі парні та непарні гармоніки ($\sin 0,5K\alpha_y = 0,865$) окрім кратних трьом ($\sin 0,5K\alpha_y = 0$). В такому разі згідно (5.4.3), (5.4.6), (5.4.9) функції потоку та миттєвої ЕРС набудуть вигляду

$$\Phi t = F_{\delta 1} l_1 \mu_0 \lambda_0 + 0,865 \lambda_1 \cos \omega t - 0,865 \lambda_2 \cos 2\omega t + 0,865 \lambda_4 \cos 4\omega t ,$$

$$e = 2\pi f w l_1 F_{\delta} \mu_0 0,865 \lambda_1 \sin \omega t - 2\lambda_2 \sin 2\omega t + 4\lambda_4 \sin 4\omega t . \quad (5.4.10)$$

Розрахункове число 0,865 для обраного варіанту зубцевої зони ($q=0,25$) прийнято називати обмотковим коефіцієнтом k_O .

Діючі значення ЕРС основної гармоніки для кожної фази визначають на підставі (5.4.6) або (5.4.7) з урахуванням кількості котушок N_K в фазній обмотці

$$E_A = E_B = E_C = \frac{2\pi f N_K}{\sqrt{2}} k_O w l_1 F_{\delta} \mu_0 \lambda_1 . \quad (5.4.11)$$

Діючі значення ЕРС з урахуванням гармонічних складових визначають згідно (5.4.8)

$$E_{AS} = E_{BS} = E_{CS} = \frac{2\pi f N_K}{\sqrt{2}} k_O w l_1 F_{\delta} \mu_0 \lambda_1 \sqrt{1 + \frac{4\lambda_2^2}{\lambda_1^2} + \frac{16\lambda_4^2}{\lambda_1^2} + \frac{25\lambda_5^2}{\lambda_1^2}} . \quad (5.4.12)$$

5.4.3. Методи визначення магнітної провідності робочого зазору

Розрізняють напівграфічний й аналітичний методи визначення коефіцієнтів провідності зазору λ_{δ} . Напівграфічний метод полягає в побудуванні картини поля, на підставі якої визначають λ_x окремих ділянок й зубцевої зони у цілому. Для одержання картини поля (силових й екіпотенційних ліній) існують різні способи [4, 18].

Спосіб Лемана-Рихтера полягає в наступному. В перетині зубцевої зони задаються декількома екіпотенційними лініями, що розділяють магнітну напругу в зазорі F_{δ} на кілька рівних частин. Для

роторів з профілем зубців у вигляді трапеції, еквіпотенційні лінії в зоні бокових поверхонь будуються по точках, що пропорційно віддалені від поверхонь ротору та статора. Для роторів з прямокутними зубцями еквіпотенційні поверхні робочого зазору визначаються за спеціальною методикою (рис. 5.4.3).

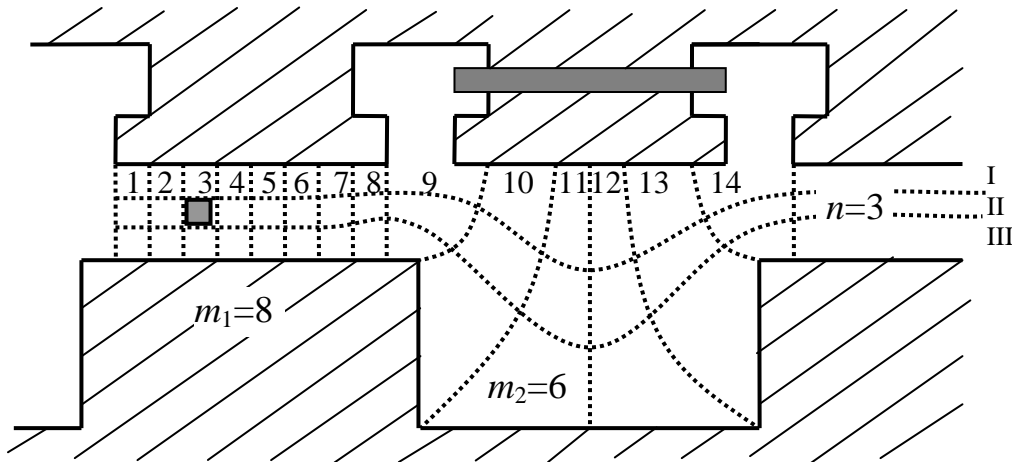


Рис. 5.4.3. Побудування картини поля по Леману-Рихтеру

Нормально до еквопотенційних ліній відбудовують силові лінії поля так, щоб утворені криволінійні чотирикутники були «квадратами» (середня довжина рівнялася середній ширині). Тоді коефіцієнт провідності однієї силової трубки визначений згідно картині поля зворотно пропорційний кількості розбивок n

$$\lambda_x = \mu_0 / n . \quad (5.4.13)$$

Складаючи коефіцієнти провідності в зонах максимальної й мінімальної провідності, одержують коефіцієнти магнітної провідності для ділянки зубцевої зони над зубом та над пазом

$$\lambda_3 = \mu_0 m_3 / n , \quad \lambda_{II} = \mu_0 m_{II} / n , \quad (5.4.14)$$

де m_3, m_{II} - число силових трубок в зоні над зубом та пазом.

Якщо пази ротора мають складну конфігурацію, побудування еквіпотенційних ліній за методом Лемана-Рихтера ускладнюється.

Для зубців закругленої форми переважним є спосіб побудування картини поля по методу Унгера, який полягає в наступному. Для окремих точок поверхні зубця a^I, b^I, c^I проводяться дотичні $a^I a, b^I b, c^I c$. Радіусами цих відрізків окреслюються дуги, що є силовими лініями (рис. 5.4.4).

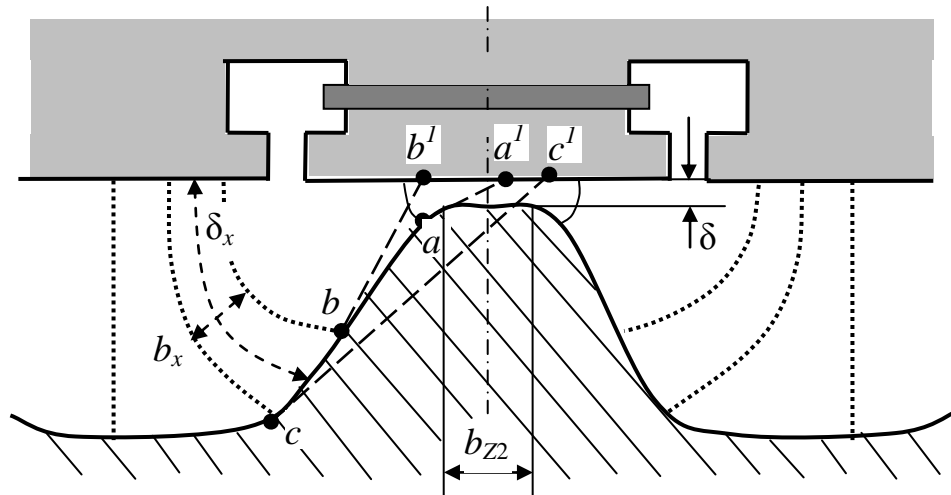


Рис. 5.4.4. Побудування картини поля по Унгеру

Побудована в такий спосіб силова лінія є нормальною до бокової поверхні зубця ротора й до поверхні розточення якоря. Коефіцієнти провідності силових трубок λ_x для цього методу розраховують через їх розміри, а коефіцієнти ділянок λ_{Π} визначають як суму коефіцієнтів окремих трубок. У зонах максимальної провідності λ_3 , коефіцієнт розраховується через розміри мінімального робочого зазору

$$\lambda_{\Pi} = \sum \lambda_x = \sum \mu_0 \frac{b_x}{\delta_x}, \quad \lambda_3 = \mu_0 b_{z2} / \delta, \quad (5.4.15)$$

де b_x, δ_x - середні ширина та довжина трубки;

b_{z2} - ширина зубця ротора;

δ - мінімальний робочий зазор.

Аналітичний метод (метод Р. Поля) є переважним для зубців прямокутної форми і полягає в наступному. Картину поля будують відрізками прямих і дугами концентричних окружностей для характерних ділянок зубцевої зони a, b, c, d, e, f (рис. 5.4.5).

Відповідно до побудованої в такий спосіб картини поля визначають коефіцієнти провідності окремих ділянок методом інтегрування. Для компенсації погрішності, при цьому, вводяться коефіцієнти фіктивного нахилу стінок зубця β до напрямку x . При цьому вважають, що кути нахилу бокових стінок дорівнюють радіанам помноженим на коефіцієнт β .

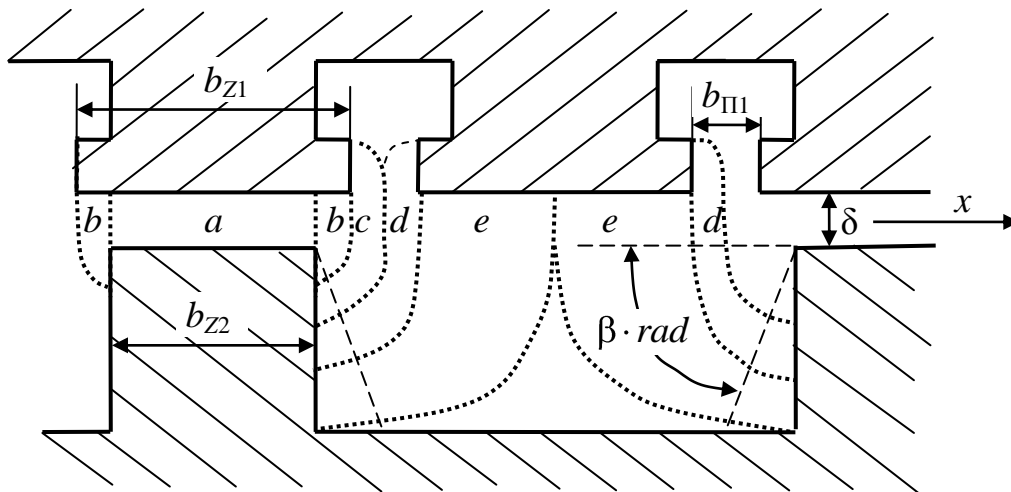


Рис. 5.4.5. Побудування картини поля по методу Р.Поля

Відповідно до рис. 5.4.5 коефіцієнт провідності для ділянки a визначається інтегруванням силових трубок з елементарною шириною dx на довжині ділянки

$$\lambda_a = \int_0^{b_{z2}} \frac{dx}{\delta} = \frac{x}{\delta} \Big|_0^{b_{z2}} = \frac{b_{z2}}{\delta} \quad (5.4.16)$$

Коефіцієнт провідності на ділянці b визначається за двома складовими довжини трубки

$$\lambda_b = \int_0^{0,5 b_{z1} - b_{z2}} \frac{dx}{\delta + \beta x} = \frac{1}{\beta} \ln \left[1 + \frac{\beta b_{z1} - b_{z2}}{2\delta} \right]. \quad (5.4.17)$$

На ділянці c розглядають три складові

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \int_0^{0,5 b_{III}} \frac{dx}{\delta + \beta x + \beta [0,5 b_{z1} - b_{z2} + x]} = \\ &= \frac{1}{\beta} \ln \left[1 + \frac{2\beta b_{III}}{2\delta + \beta b_{z1} - b_{z2}} \right]. \end{aligned} \quad (5.4.18)$$

Складаючи коефіцієнти окремих ділянок, визначених за результатами інтегрування (5.4.16)...(5.4.17) отримують загальні провідності зубцевого ділення в аналітичному вигляді

$$\lambda_3 = \lambda_a + 2\lambda_b + 2\lambda_c, \quad \lambda_{II} = 2\lambda_d + 2\lambda_e. \quad (5.4.19)$$

Метод Р. Поля є універсальним (може застосовуватися для зубців будь-якого профілю) і дозволяє застосовувати обчислювальні засоби, але для ручного рахунку - трудомісткий.

На даний час, в автотракторних індукторних генераторах зубцева зона набула певної конфігурації. Найбільш ефективними з боку питомих показників та технологічності виготовлення є конструкції генераторів з однаковою шириною прямокутних зубців ротора і статора. В цьому випадку криву провідності робочого зазору $\lambda = f \alpha$ можна апроксимувати до вигляду трапеції. Такий підхід значно полегшує розрахунки.

На практиці розглядають три характерні точки в напрямку відліку x кутового положення ротору α . Максимальна провідність λ_{\max} спостерігається коли вісі зубців ротора і статора співпадають ($\alpha=0$ ел. град.). Мінімальна λ_{\min} - при $\alpha=180$ ел. град. (паз ротора під зубцем статора). Провідність λ_A при повороті ротора на кут α_A , що відповідає його переміщенню на ширину зубця b_{Z2}

$$\alpha_A = 360 \frac{b_{Z2}}{t_{Z2}}, \quad (5.4.20)$$

де t_{Z2} - зубцевий крок ротору.

Таким чином, завдяки кусочно-лінійній апроксимації, для відтворення кривої $\lambda = f \alpha$ достатньо трьох значень провідності (Гн/м) для яких визначені стохастичні коефіцієнти

$$\lambda_{\max} = 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{b_{Z1}}{\delta}, \quad \lambda_{\min} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{b_{II2}}{b_{II2} - b_{Z1}}, \quad (5.4.21)$$

$$\lambda_A = 1,4 \cdot 10^{-6} \ln \left[\left(1 + \frac{b_{II1}}{2\delta} \right) \left(1 + \frac{b_{II2}}{2\delta} \right) \right],$$

де b_{II1} , b_{II2} - ширина пазів статора і ротору.

Трапецеїдальна апроксимація дозволяє спростити розкладення функції $\lambda = f \alpha$ в ряд Фур'є. Амплітуда будь-якої гармоніки λ_K визначається на підставі значень (5.4.20), (5.4.21)

$$\lambda_K = \frac{360 \lambda_{\max} - \lambda_A}{\pi^2 K^2 \alpha_A} \left[1 - \cos \left(K \alpha_A \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_A} \right) \right]. \quad (5.4.22)$$

Повертаючись до (5.4.12) можна визначити діюче значення ЕРС якірних обмоток з урахуванням верхніх гармонік.

5.4.4. Розрахунок магнітної системи та побудування характеристики холостого ходу

Попередній розрахунок індукторного генератора для синтезу магнітної системи виконується аналогічно розрахунку генератора з дзьобоподібним ротором. Результатом попереднього розрахунку є синтезована конструкція генератора у вигляді ескізного креслення. Вихідними даними для перевірного розрахунку, в такому разі, є: конфігурація та конструктивні розміри магнітної системи; магнітні характеристики матеріалів; параметри якірних обмоток та конструкція фазних котушок; параметри та конструкція обмотки збудження. Розрахунок генератора без навантаження складається з декількох етапів. Спочатку розраховують питомі магнітні провідності робочого зазору за обраним методом (5.4.21), будують залежність $\lambda = f \alpha$ та визначають її гармонічні складові (5.4.22). Далі виконують розрахунок розгалуженої та нерозгалуженої частини магнітної системи з метою визначення необхідної МРС обмотки збудження. Вкінці розрахунку, по заданих значеннях індукції або МРС робочого зазору будують характеристику холостого ходу для фіксованих обертів генератора.

В основу перевірного розрахунку магнітної системи покладений закон повного струму (1.72). На розрахунковій схемі магнітної системи ротор генератора розглядають у положенні при якому загальна магнітна провідність робочого зазору буде максимальною (зубці ротора під полюсами статора). У поздовжньому перетині генератора проводять основну магнітну силову лінію (контур інтегру-

вання) і розбивають магнітну систему на однорідні ділянки з постійною напруженістю магнітного поля (рис. 5.4.6).

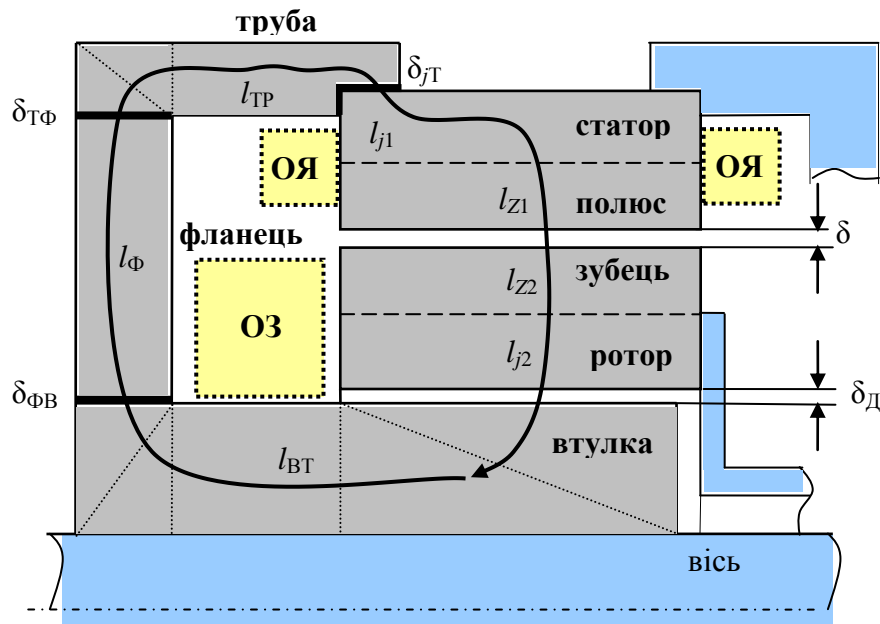


Рис. 5.4.6. Поздовжній перетин магнітопроводу індукторного генератора

Для однойменно полюсного генератора консольного типу розглядають ділянки: зубці l_{z1} , l_{z2} та ярмо пакету статора l_{j1} і ротора l_{j2} ; стик ярма з трубою δ_{jT} ; труба l_{TR} (ліва та середня частина); стик фланця з трубою $\delta_{ТФ}$; фланець $l_{Ф}$; стик фланця з втулкою $\delta_{ФВ}$; втулка l_{BT} (права, ліва та середня частини); додатковий зазор δ_D .

Розрахунок магнітної системи виконують у такий спосіб [4].

1. Задаються значеннями магнітної індукції в мінімальному робочому зазорі B_{δ} (рекомендовані значення до 1,6Тл) і визначають МРС, що йде на проведення потоку через повітряний зазор δ

$$F_{\delta} = k B_{\delta} \delta, \quad (5.4.23)$$

де $k = 0,8 \cdot 10^{-6}$ коефіцієнт пропорційності.

2. Визначають магнітний потік Φ_{z1} й значення індукції B_{z1} в зубцях статора та МРС необхідну для проведення потоку F_{z1}

$$\Phi_{z1} = F_{\delta} \lambda_3 l_1, \quad B_{z1} = \Phi_{z1} / (b_{z1} l k_C), \quad F_{z1} = H_{z1} h_{z1}, \quad (5.4.24)$$

де k_C - коефіцієнт заповнення перетину сталлю

h_{z1} - висота зубця статора;

H_{z1} - питома магнітна напруженість в зубцях статора.

3. Визначають магнітний потік в зубці ротора (індуктора) Φ_{z2} з урахуванням потоків, що надходять від сусідніх зубців статора через провідність λ^1

$$\Phi_{z2} = \Phi_{z1} + 2F_{\delta}l_2\lambda^1, \quad (5.4.25)$$

де l_2 - довжина пакету ротора.

Провідність λ^1 знаходиться по кривій $\lambda = f \alpha$ для кута в електричних градусах

$$\alpha^1 = 360 \left(1 - \frac{z_2}{z_1} \right). \quad (5.4.26)$$

4. Аналогічно (5.4.24) розраховують B_{z2} та F_{z2}

5. Знаходять сумарний магнітний потік через повітряний зазор, який проходить в нерозгалуженій частині магнітної системи

$$\Phi_S = N_Z \sum_{i=1}^n F_{\delta} \lambda(\alpha_i) l_{\delta}, \quad (5.4.27)$$

де N_Z - кількість повторюваних зон;

$n=z_1/N_Z$ - кількість зубців статора в зоні повторення;

l_{δ} - довжина робочого зазору перекрита зубцями статора і ротора;

$\lambda(\alpha_i)$ - магнітна провідність під i -тим зубцем статора.

Значення $\lambda(\alpha_i)$ отримують на підставі кривої розподілу $\lambda = f \alpha$ для визначеної конфігурації зубцевої зони.

6. Далі послідовно (по контуру інтегрування) визначають спадання магнітного потенціалу (МРС) на залізних ділянках, стиках та зазорах магнітної системи. Для залізних ділянок по формулах (5.1.12) розраховують індукції B_i у відповідних перетинах S_i з урахуванням розсіювання σ_i , магнітні напруженості H_i по кривих намагнічування, а потім відповідні їм МРС F_i , що спадають на довжині кожної ділянки l_i , згідно синтезованої конструкції (рис. 5.4.6). Коефіцієнти розсіювання σ_i обирають за рекомендованими значеннями відповідно до конструкції магнітної системи. В стиках МРС $F_{ст}$ визначають згідно (5.4.23) для зазору $\delta_{ст}$.

7. Підраховують намагнічуючу силу обмотки збудження F_3 для забезпечення потрібного потоку в повітряному зазорі при заданій індукції B_δ . Намагнічуюча сила обмотки збудження складається з падінь сил, що намагнічують окремі ділянки магнітного кола

$$F_3 = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + \sum F_{ct} + \sum F_i . \quad (5.4.28)$$

8. На основі виразів (5.4.11) та (5.4.28) з урахуванням, що $f = z_2 n / 60 \text{ хв}^{-1}$, будують залежність фазної ЕРС генератора від МРС, яка підтримується на робочому зазорі при заданій індукції B_δ для визначеної швидкості обертання n

$$E_\Phi = \frac{\pi n}{30\sqrt{2}} z_2 k_O w_\Phi l_\delta \mu_0 \lambda_1 F_3 - \Delta F = C_{eF} n F_3 - \Delta F , \quad (5.4.29)$$

де $C_{eF} = 7,4 \cdot 10^{-2} z_2 k_O w_\Phi l_\delta \mu_0 \lambda_1$ - конструктивна стала;

$\Delta F = F_{z1} + F_{z2} + \sum F_{ct} + \sum F_i$ - падіння МРС на магнітопроводі.

Щоб урахувати верхні гармоніки ЕРС та приблизити розрахункові значення до дійсних, використовують формулу (5.4.12).

Таким чином задаючись поточними значеннями B_δ , за результатами розрахунку будують характеристику холостого ходу у вигляді $E_\Phi = f(F_\delta)$. Аналогічно отримують характеристику холостого ходу у вигляді $E_\Phi = f(F_3)$ для фіксованих обертів $n - const$. Вважаючи, що $I_3 B_\delta = F_3 B_\delta / w_{O3}$, можна побудувати характеристику холостого ходу на підставі залежності $E_\Phi = f(F_3)$ у вигляді $E_G = f(I_3)$. Враховуючи співвідношення (1.42) для схеми «трикутник», в загальному виді можна записати

$$E_G I_3 = 1,15 w_{O3} I_3 B_\delta . \quad (5.4.30)$$

5.4.5. Розрахунок струмо-швидкісної характеристики

Несиметрична картина поля, верхні гармоніки напруги, нерівноцінність процесів в вентилях різної полярності для багатофазних якірних кіл, а також отримання струму збудження від додаткового випрямляча та використання постійних магнітів в пазах ротору,

ускладнює перехід від середніх значень струму I_G та напруги U_G в навантаженні генератора до діючих значень I_Φ , U_Φ в кожній його фазі. На практиці використовують довідкові таблиці для коефіцієнтів зв'язку [18]

$$K_I = \frac{I_\Phi}{I_G}, \quad K_U = \frac{U_\Phi}{U_G}. \quad (5.4.31)$$

Значення цих коефіцієнтів залежать від навантаження генератора I_G , кількості фаз m , та послідовності їх включення в багатокутник (див. табл. 5.4.1).

Таблиця 5.4.1

Значення розрахункових коефіцієнтів K_I , K_U

Режим	Структура якірного кола							
	$m=3$		$m=5-(13524)$		$m=7-(1234567)$		$m=7-(1357246)$	
I_G, A	K_I	K_U	K_I	K_U	K_I	K_U	K_I	K_U
0	0,52	0,87	0,4	0,7	0,21	0,86	0,27	0,66
10	0,47	0,94	0,31	0,79	0,21	0,94	0,22	0,79
20	0,45	0,95	0,33	0,86	0,21	0,96	0,19	0,89
30	0,45	0,95	0,3	0,94	0,21	0,97	0,18	0,94
40	0,45	0,95	0,28	1,0	0,21	0,98	0,17	0,98
50	0,45	0,95	0,26	1,03	0,21	0,98	0,16	0,99
60	0,45	0,95	0,25	1,03	0,21	0,98	0,16	1,0

На етапі аналізу моделі генератора, що проектується, застосовують два методи розрахунку струмо-швидкісної характеристики – графоаналітичний метод, заснований на побудуванні векторної діаграми синхронного генератора (діаграми Блонделя) і аналітичний метод розрахунку з використанням схем заміщення [18]. В першому випадку вважають, що струм і напруга у фазах індукторного генератора мають синусоїдальну форму (аналогічно генераторам з дзьобоподібним ротором). Таке припущення приводить до погрешностей (похибок) при розрахунку характеристики, особливо для генераторів з прямокутним профілем зубців ротора і постійними магнітами в пазах.

Відмінною рисою розрахунку індукторного генератора за першим методом є визначення складової індуктивного опору обмотки якоря x_σ (5.3.53) та постійної складової поля якоря F_J (5.3.55), потік якої зчеплений з потоком обмотки збудження (реакція якоря)

$$x_{\sigma} = \frac{15,8 f w_{\Phi}^2 l_1 (\lambda_{\text{паз}} + \lambda_{\text{лоб}} + \lambda_{\text{диф}})}{z_2 q}, \quad (5.4.32)$$

$$F_{\text{я}} = 0,91 I_{\Phi} w_{\Phi} \frac{m}{z_1} \cdot \frac{\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}} \sin \psi, \quad (5.4.33)$$

де ψ - кут між векторами струму у фазі і ЕРС, що утворюється потоком збудження (див. векторну діаграму рис. 5.3.10);

$\lambda_{\text{max}}, \lambda_{\text{min}}$ - питомі провідності при $\alpha=0$ і $\alpha=180$ ел. град. (5.4.21);

$\lambda_{\text{паз}}, \lambda_{\text{лоб}}, \lambda_{\text{диф}}$ - коефіцієнти провідності розсіювання відповідних ділянок робочого зазору.

Значення магнітної провідності можна отримати за результатами аналізу картини поля, або приблизно по емпіричним співвідношенням

$$\lambda_{\text{паз}} = \frac{1}{b_{\text{III}}} (0,38 h_{z1} + h_{z2}) \left[\sin \left(180 \frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2 10^{-6}, \quad (5.4.34)$$

$$\lambda_{\text{диф}} = 3 \cdot 10^{-9} \frac{t_{z2} (t_{z1} + b_{z1} + 10\delta)}{q\delta (t_{z1} + 10\delta)}, \quad \lambda_{\text{лоб}} = 4,5 \cdot 10^{-8} \frac{t_{z2}}{l_1},$$

Сумарна МРС на яку розраховується обмотка збудження (5.4.28), визначається з урахуванням реакції $F_{\text{я}}$ (5.4.33).

Другий метод розрахунку струмо-швидкісної характеристики придатний для будь-якого профілю зубцевої зони, але більш складний при ручному рахуванні. Відповідно до цього методу, індукторний генератор представляється у вигляді двох схем заміщення: схеми заміщення магнітної системи (рис. 5.4.7) і схеми заміщення електричних кіл (рис. 5.4.8).

На відзнаку від схеми заміщення магнітного кола генератора із дзьобоподібним ротором (рис. 5.3.7), схема заміщення індукторної генератора складається для всієї машини. На схемі (рис. 5.4.7) прийняті такі позначення:

Φ_{Z1-3}, Φ_{Z4-6} – потоки в зубцях статора та ротора;

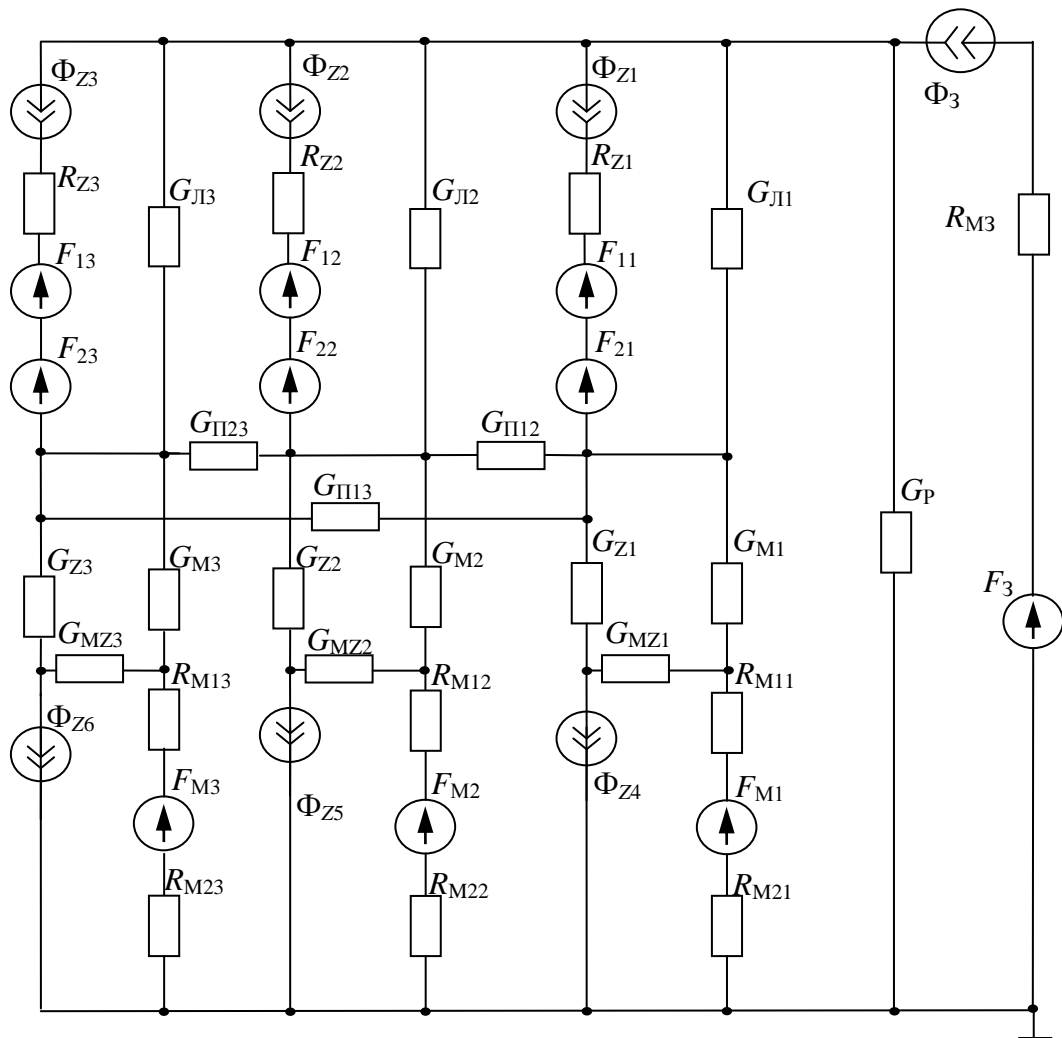


Рис. 5.4.7 Схема заміщення магнітного кола трифазного індукторного генератора з постійними магнітами в пазах ротора

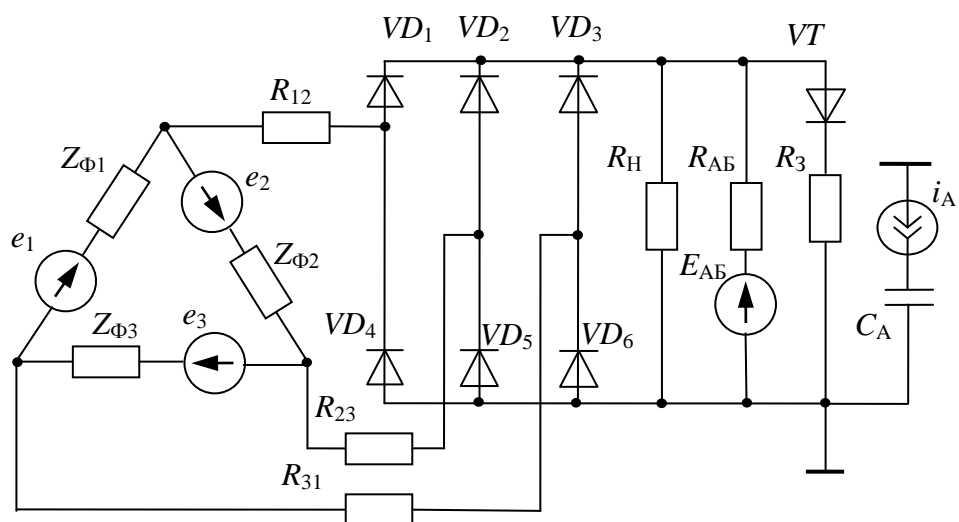


Рис. 5.4.8. Схема заміщення електричного кола трифазного генератора

R_Z, R_{M1}, R_{M2} – магнітний опір зубців статора, постійного магніту та зазору між спинкою впадини ротору і магнітом;

F_1, F_2, F_M, F_3 – МРС фазних обмоток (котушок), вихрових струмів, постійних магнітів та обмотки збудження;

$G_{П}, G_{Л}, G_{MZ}, G_P$ – магнітна провідність розсіювання пазів статора, лобових частин статорних обмоток, постійних магнітів та нерозгалуженої частини магнітної системи;

G_Z, G_M – магнітна провідність між зубцями статора і ротору та між зубцями статора і магнітами; Φ_3, R_{M3} – потік, та магнітний опір нерозгалуженої частини магнітної системи.

Схема заміщення електричного кола вентильного генератора (рис. 5.4.8), з урахуванням підключеної АКБ (E_{AB}, R_{AB}), навантаження R_H та кола збудження R_3 , практично повторює схему електричну принципову. В фазах якірної обмотки з повним опором Z_Φ наводяться відповідні ЕРС (e), які пов'язані з параметрами магнітної системи, характером та швидкістю їх зміни (частотою обертання ротору). Щоб врахувати реальні параметри схеми випрямляча ($VD_1 - VD_6$), в схемі заміщення передбачено опори лінійних кіл якірної обмотки R_{31}, R_{32}, R_{21} . Якості $p-n-p$ структури виконавчого транзистора регулятора напруги означена вентилем VT .

В магнітному колі під дією МРС збудження утворюється магнітний потік, а в електричному – зміна потоку від обертання ротору викликає появу відповідної ЕРС в фазних обмотках якорю ненавантаженого генератора. Струм у фазах навантаженого генератора спричиняє реакцію якоря F_1 , та послаблення потоку збудження від дії вихрових струмів в матеріалі магнітної системи F_2 . Розрахунок режимів схем заміщення зводиться до визначення обертів ротору при яких результуючий потік навантаженого генератора підтримує напругу на його фазних обмотках на заданому рівні.

Розрахунок постійних параметрів елементів схеми заміщення (рис. 5.4.7) виконують відповідно до конструктивних розмірів зубцевої зони (рис. 5.4.9).

Магнітний опір зубців в порівнянні з опором зазору малий і тому при розрахунках його вважають $R_Z=0$. МРС постійних магнітів визначають через його магнітну напруженість H_M

$$F_M = H_M h_M \cdot \quad (5.4.35)$$

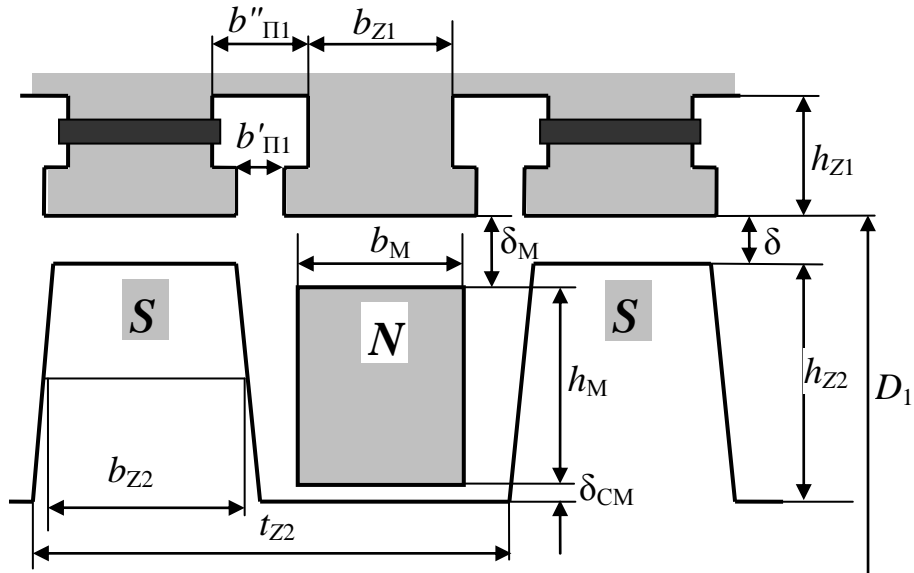


Рис. 5.4.9. Ескізне креслення зубцевої зони індукторного генератора з постійними магнітами на роторі

Магнітний опір постійного магніту визначають через коерцитивну силу (індукцію) яку здатен утворювати його матеріал

$$R_{M1} = \frac{F_M m}{B_M S_M z_1} . \quad (5.4.36)$$

Для магнітів марки 6БИ240 питомі параметри становлять:
 $H_M = 620 \cdot 10^3$ А/м, $B_M = 0,16$ Тл

Зазор між спинкою впадини ротору і магнітом

$$R_{M2} = \frac{8 \cdot 10^5 \delta_{CM} m}{z_1 b_M l_M} . \quad (5.4.37)$$

Магнітна провідність розсіювання пазів статора

$$G_{\Pi} = \frac{2,5 \cdot 10^{-6} h_{z1} l_1 z_1}{m b'_{\Pi 1} + b''_{\Pi 1}} . \quad (5.4.38)$$

Магнітна провідність розсіювання лобових частин статорних обмоток

$$G_{Л} = 3,5 \cdot 10^{-8} \frac{\pi D}{m} . \quad (5.4.39)$$

Магнітна провідність розсіювання постійних магнітів на сусідні зубці ротора розраховують через конструктивні розміри зубцевої зони (див. рис. 5.4.9)

$$G_{MZ} = \frac{5 \cdot 10^{-6} z_1 z_2 l_M [h_{Z2} - 0,4 t_{Z2} - b_{Z2} - b_M]}{m [2\pi D_1 - 0,8 t_{Z2} - b_{Z2} - b_M - 2\pi h_{Z2} - b_{Z2} + b_M]} . \quad (5.4.40)$$

Магнітні провідності між зубцями статора і ротору G_Z та між зубцями статора і магнітами G_M визначають по формулах

$$G_Z = \lambda_\delta l_1 \frac{z_1}{m} = l_1 \frac{z_1}{m} \sum \lambda_{\delta,i}, \quad G_M = \lambda_M l_1 \frac{z_1}{m} = l_1 \frac{z_1}{m} \sum \lambda_{M,i} . \quad (5.4.41)$$

Питомі провідності окремих ділянок зубцевої зони $\lambda_{\delta,i}, \lambda_{M,i}$ (в межах зони повторювання) визначають за методом Р. Поля (див. п. 5.4.3) на підставі аналізу конструктивних розмірів (рис. 5.4.9).

Магнітний опір нерозгалуженої частини магнітної системи визначають на основі (5.4.27)...(5.4.28) для максимальної індукції згідно з законом Ома

$$R_{M3} = \frac{\sum F_i + \sum F_{CT}}{\Phi_S} \quad (5.4.42)$$

Якщо при визначенні МРС окремих ділянок магнітопроводу (5.28) не враховувалось їх розсіювання σ_i , до схеми додають магнітну провідність розсіювання, величина якої в першому наближенні визначається через довжину контуру інтегрування силової лінії потоку в нерозгалуженій частині $G_p = 10^{-5} l$.

При визначенні коефіцієнтів провідності для даної конструкції генератора в (5.4.27) враховують складову провідності в зонах постійних магнітів $\lambda \alpha_i = \lambda_\delta \alpha_i + \lambda_M \alpha_i$. Початкове значення МРС обмотки збудження F_3 визначають через максимальну індукцію в зазорі (5.4.23) або через напругу АКБ

$$F_3 = I_{3,max} w_{O3} = U_{AB} w_{O3} / R_3 . \quad (5.4.43)$$

Таким чином для схеми (рис. 5.4.7) знайдені магнітні опори елементів R та параметри F джерел ЕРС, а визначенню за результа-

тами розрахунку підлягають потоки в зубцях машини Φ_Z та сумарний потік збудження Φ_3 . При визначенні невідомих параметрів використовують наступні розрахункові формули та припущення.

Миттєві значення електромагнітних змінних у фазах зсунуті на кут $\varphi = 360^\circ / m$. Напруга, що підтримується на виході генератора дорівнює напрузі АКБ $U_{GH} = U_{AB}$. Зростання струму генератора при підвищенні обертів ротору $I_G(n)$ відбувається тільки за рахунок зниження опору АКБ по змінній складовій $x_{CA} = 30 / \pi n z_2 C_A$ (зміну опору споживачів не враховують). Опір фаз генератора при цьому вважають цілком активним $Z_\phi = R_\phi$.

ЕРС в фазах ненавантаженого генератора визначають як похідна від потоку в зубцях статора, згідно (5.4.5)

$$e_\phi = w_\phi \frac{m}{z_1} \cdot \frac{d\Phi}{dt} . \quad (5.4.44)$$

Струми у фазах, визначають через напругу, яка спадає на внутрішньому опорі генератора, відповідно до закону Ома

$$i_\phi = \frac{u_\phi}{Z_\phi} \quad (5.4.45)$$

МРС котушок обмоток фаз F_1 (реакцію якоря) вважають пропорційною струму у фазі

$$F_1 = w_\phi \frac{m}{z_1} i_\phi , \quad (5.4.46)$$

МРС вихрових струмів F_2 , що виникають під час обертання ротору визначають через параметри магнітної системи генератора

$$F_2 = \frac{d\Phi}{dt} \cdot \frac{1}{R_{Me}} , \quad (5.4.47)$$

де $R_{Me} = 0,38 \frac{z_1 l b_{z1}}{m h_{z1}}$ - магнітний опір еквівалентного контуру.

Розрахунок складених схем відомими методами електротехніки (метод вузлових потенціалів, контурних струмів) приводить до одержання залежності $I_G=f(n)$, тобто до одержання СШХ. Розрахунок режимів схем заміщення доцільно виконувати за допомогою ЕОМ з використанням прикладних програм.