

В.І. Панченко, Д.В. Ципленков, канд. техн. наук, М.О. Леонова
(Україна, м. Дніпропетровськ, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ІНДУКТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Індукторні генератори – це електричні машини змінного однофазного або трифазного струму із зубчастим безобмотковим ротором і обмотками якоря та збудження на статорі. Циліндричний магнітопровід статора цих машин часто роблять з відкритими або напіввідкритими пазами, що разом із зубчастим ротором ускладнює аналіз структури магнітного поля у повітряному проміжку і робить неможливим швидко і наочне порівняння конструкцій генераторів з відмінними зубчастими зонами. Пропонується використати для такого порівняння аналіз розподілу векторного магнітного потенціалу (ВМП) у повітряному проміжку машини. Вважаємо магнітопроводи статора і ротора зубчастими; в пазах статора розміщені котушки обмотки якоря; на довжині полюса збудження магнітний потік збудження однонаправлений (рис.1,а). Для побудови графіка розподілу ВМП у повітряному проміжку δ приймемо умовно внутрішню поверхню статора гладкою, а розмір проміжку $\delta' = K_\delta \cdot \delta$, де $K_\delta > 1$ – коефіцієнт Картера. Сторони котушок обмотки якоря винесемо у повітряний проміжок і розмістимо на поверхні умовно гладкого статора (рис.1,б).

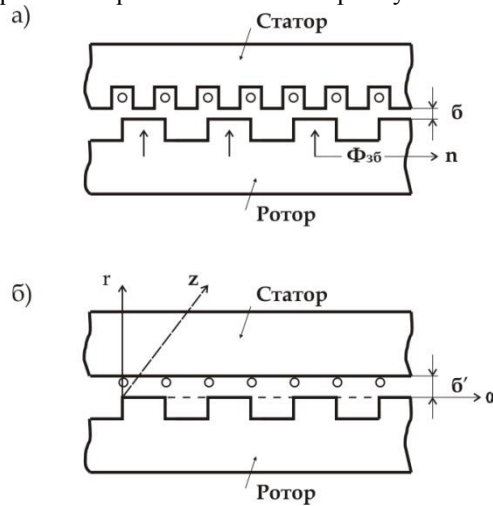


Рис. 1. Повітряний проміжок між статором і ротором

Значення ВМП на вказаній поверхні можна знайти із розв'язку рівняння $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$, де \vec{B}, \vec{A} - вектори магнітної індукції і ВМП в даній точці повітряного проміжку, враховуючи що $\vec{A} = A_r$ і $r = \text{const}$, r - радіус розточки статора. Згідно з [1]

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \alpha} \vec{e}_r - \frac{\partial A}{\partial r} \vec{e}_\alpha \quad (1)$$

де $\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \alpha} \vec{e}_r = B_r$ - радіальна; $-\frac{\partial A}{\partial r} \vec{e}_\alpha = B_\alpha$ - тангенціальна складова магнітної індукції; $\vec{e}_r, \vec{e}_\alpha$ - одиничні вектори.

Складова B_α має місце тільки біля країв пазів або полюсів (у різнойменнополюсних генераторів). Нею без помітної похибки можна знехтувати, тоді над зубцем ротора у повітряному проміжку магнітна індукція $B = B_r = B_0$, а в зоні паза $B_n = K \cdot B_0$, де $K = 0,01 - 0,1$. З деяким наближенням вважаємо $K=0$. Тоді із [1] і рівняння $\partial A = r \cdot B_0 \cdot \partial \alpha$ маємо:

$$A = r \cdot \alpha \cdot B_0, \text{ при } 0 < \alpha < \alpha_0, \text{ зубець,} \quad (2)$$

$$A = r \cdot \alpha_0 \cdot B_0 + r(\alpha - \alpha_0) \cdot B_n \cong r \cdot \alpha_0 \cdot B_0 \quad (3)$$

при $\alpha_0 < \alpha < \beta_0$, паз, де α_0, β_0 – кутові координати, відповідно, кінця зубця і кінця пазу.

Формули (2) і (3) дають можливість побудувати залежність розміру ВМП у повітряному проміжку машини від кутової координати, тобто по розточці. При цьому необхідно врахувати умови (в магнітному відношенні) на границях зон, а також те, що лінія значень ВМП неперервна.

Значення ВМП у повітряному проміжку машини дозволить визначити магнітний потік через будь-яку поверхню у цьому проміжку згідно з формулою (4)

$$\Phi = \oint Adl. \quad (4)$$

Електрорушійна сила (ЕРС), яка виникає у проводах обмотки якоря при обертанні ротора, може бути розрахована за формулою

$$e = -\frac{\partial A}{\partial t} \cdot l, \quad (5)$$

де A – розмір ВМП в точці розташування провідника у повітряному проміжку, l – осьова довжина провідника.

Розглянуто зубцеву зону однойменно-полюсного індукторного генератора з постійним потоком зубця ротора (рис.2, а) [2]. По формулам (2) і (3) побудовано розподіл ВМП по розточці статора (рис.2, б), причому суцільною лінією показано розподіл ВМП у випадку початкового положення ротора (рис.2, а), а пунктирною – розподіл ВМП при зміщеному роторі відносно початкового положення на $0,5t_{z2}$, де t_{z2} – зубцева поділлка ротора.

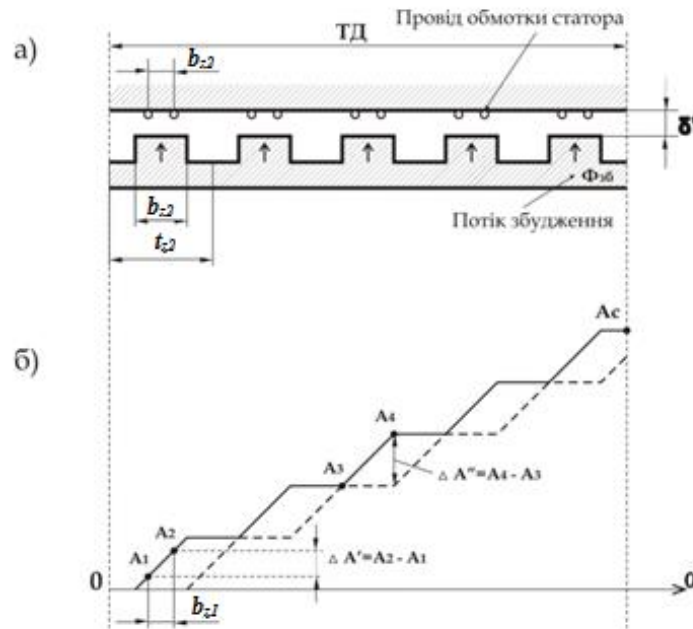


Рис. 2. Зубцева зона однойменно-полюсного індукторного генератора
а – розгорнута схема зубцевої зони; б – розподіл векторного магнітного потенціалу по розточці статора

Висота сходинки на графіку ВМП $\Delta A'' = A_4 - A_3 = B_0 \cdot r \cdot \alpha_0 = B_0 \cdot b_{z2}$ дозволяє визначити магнітний потік зубця ротора

$$\Phi_{z2} = (A_4 - A_3) \cdot l = B_0 \cdot b_{z2} \cdot l, \quad (6)$$

де A_4, A_3 – магнітні потенціали по краях зубця. Аналогічно, магнітний потік зубця статора

$$\Phi_{z1} = \Delta A' \cdot l = (A_2 - A_1) \cdot l = \Phi_{z2} \frac{b_{z1}}{b_{z2}}, \quad (7)$$

де A' – різниця ВМП в точках, відповідних краям зубця статора, b_{z1}, b_{z2} – ширина, відповідно, зубців статора і ротора.

При зміщенні зубців ротора по розточці на $0,5t_{z2}$ відносно початкового положення, що відповідає часовому інтервалу $0,5T$, де T – період електрорушійної сили, яка виникає в обмотці якоря, магнітний потік Φ_z зменшується від максимального до нуля. Середнє значення ЕРС котушки з числом витків w_k буде:

$$e_{cp} = w_k \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = w_k \cdot \frac{\Phi_{z1} - 0}{T/2} = 2 \cdot f \cdot w_k \cdot \Phi_{z1}, \quad (8)$$

де $f = \frac{1}{T}$ – частота ЕРС.

Значення ЕРС e_{cp} можна знайти іншим шляхом, а саме: із графіків розподілу ВМП при початковому і зміщеному на $0,5t_{z2}$ положеннях ротора (рис. 2,б) та із співвідношення

$$e_{cp} = w_k \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot l, \quad (9)$$

де ΔA – зміна розміру ВМП в місцях розташування сторін котушки в результаті переміщення ротора, тобто це знову $\Delta A' = A_z - A_l$.

Отже,

$$e_{cp} = w_k \cdot \frac{\Phi_{z1}}{T/2} = 2 \cdot f \cdot w_k \cdot \Phi_{z1}. \quad (10)$$

Магнітний потік у втулці ротора також можна визначити із рис. 2,б за формулою

$$\Phi_{om} = (A_k - A_n) \cdot l,$$

де A_k, A_n – кінцеве і початкове значення ВМП, прийнято $A_n = 0$; $A_k = (A_4 - A_3) \cdot Z_2 = \Delta A'' \cdot Z_2$; Z_2 – кількість зубців ротора.

Якщо в однопакетному однофазному генераторі котушки обмотки якоря розміщені на всіх зубцях статора, кількість яких Z_1 , то середнє значення ЕРС генератора буде

$$e_{r1} = 2 \cdot f \cdot w_k \cdot Z_1 \cdot \Phi_{z1} \quad (11)$$

Розглянемо зубцеву зону різнойменнополюсного індукторного генератора з постійним потоком зубця (рис. 3, а) [2]. Як і у попередньому випадку на рис. 3, б суцільною лінією показано розподіл ВМП по розточці статора, пази якого умовно закриті, у деякому початковому положенні зубчастого ротора, пунктиром – розподіл ВМП після зміщення ротора на $0,5t_{z2}$ від початкового положення, крапками – невизначеність значень ВМП в зонах пазів статора з обмоткою збудження.

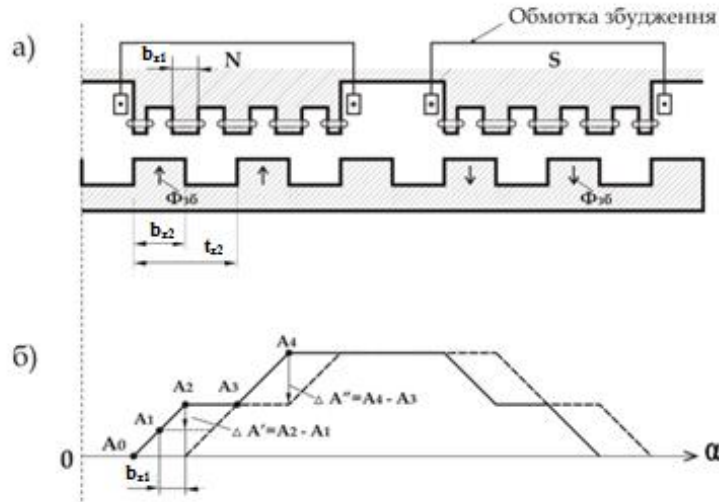


Рис. 3. Зубцева зона різнойменнополюсного індукторного генератора з постійним потоком зубця а – розгорнута схема генератора; б – розподіл ВМП по розточці статора

Згідно рис. 3, б висота сходинки на графіках ВМП $\Delta A'' = A_4 - A_3 = B_0 \cdot b_{z2}$, магнітний потік зубця ротора $\Phi_{z2} = \Delta A'' \cdot l = B_0 \cdot b_{z2} \cdot l$, магнітний потік одного полюса збудження $\Phi_n = (A_4 - A_0) \cdot l = Z_n \cdot \Phi_{z2}$, де Z_n – кількість зубців ротора на полюсі збудження. Магнітний потік зубця статора $\Phi_{z1} = (A_2 - A_1) \cdot l = \Phi_{z2} \cdot \frac{b_{z1}}{b_{z2}}$. Середнє значення ЕРС, яка виникає в котушці обмотки статора при обертанні ротора,

$$e_{cp} = w_k \cdot \frac{\Delta A'}{\Delta t} \cdot l = 2 \cdot f \cdot w_k \cdot \Phi_{z1}. \quad (12)$$

Позначимо через m кількість зубців статора на полюс збудження, тоді середнє значення ЕРС на пару полюсів збудження буде

$$e'_{r2} = 2 \cdot m \cdot e_{cp} = 4 \cdot f \cdot w_k \cdot \Phi_{z1}. \quad (13)$$

ЕРС генератора в однофазному виконанні

$$e_{r2} = 2 \cdot f \cdot w_k \cdot Z_1 \cdot \Phi_{z1}. \quad (14)$$

Порівнюючи одно- і різноіменнополюсні індукторні генератори робимо висновок, що при однакових числах зубців статора і, відповідно, ротора, однакових числах витків у котушках обмотки якоря вони створюють однакові ЕРС при умові однакової активної довжини. Однак, аналізуючи конструктивне використання слід зазначити, що у різноіменнополюсних генераторах значно гірше використовується розточка статора і складніша конструкція його магнітопроводу.

Розглянемо ще один тип генератора – це різноіменнополюсний, з пульсуючим потоком зубця ротора (рис. 4). Принципово пази статора у такій конструкції повинні бути відкритими. Для використання ВМП з деяким наближенням прийемо поверхню статора умовно гладкою з відповідним збільшенням повітряного проміжку. За таких умов на рис. 4, б побудовано лінії розподілу ВМП у повітряному проміжку по розточці, причому, як і раніше суцільною лінією – для початкового положення ротора, пунктирної – коли ротор зміщено на $0,5t_2$ від попереднього стану.

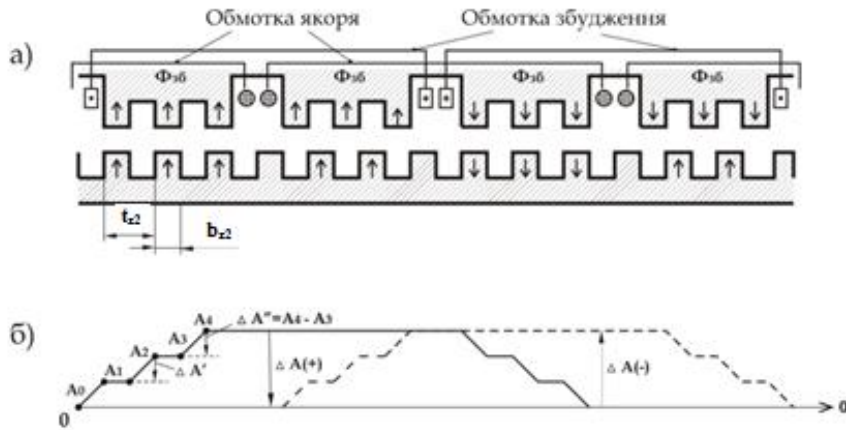


Рис. 4. Зубцева зона різноіменнополюсного індукторного генератора з пульсуючим потоком зубця ротора:

а – розгорнута схема зубцевої зони; б – розподіл векторного магнітного потенціалу по розточці статора

Висота сходинки $\Delta A'' = A_4 - A_3 = B_0 \cdot b_{z2}$ на графіку ВМП у два рази менша порівняно з двома поперечними конструкціями із-за меншої у стільки ж разів ширини зубця ротора, що обумовлено конструкцією генератора. Магнітні потоки зубців статора і ротора при їх співвісному положенні однакові, тобто

$$\Phi_{z1} = \Phi_{z2} = B_0 \cdot b_{z2} \cdot l, \quad (15)$$

враховуючи що $b_{z1} = b_{z2}$. Магнітний потік напівполюса збудження

$$\Phi_{nm} = (A_4 - A_0) \cdot l = n \Delta A'' \cdot l, \quad (16)$$

де n – кількість зубців ротора (статора) на напівполюсі. У двох сусідніх різноіменних полюсах, які задіяні в даний момент, як це слід з рис 4,б магнітні потоки однакові за розміром, але протилежні за напрямом, що свідчить про відсутність у магнітопроводі уніполярного магнітного потоку.

Середнє значення ЕРС, яка виникає в одній котушці обмотки якоря при обертанні ротора,

$$e_{cp} = w_k \cdot l \frac{2\Delta A}{\Delta t} = w_k \cdot l \frac{2(A_4 - A_0)}{\Delta t} = w_k \cdot l \frac{2nA''}{T/2} = 4w_k f n B_0 b_{z2} l = 4w_k f n \Phi_{z1} = 2 \cdot w_k f m \Phi_z, \quad (17)$$

де $m = 2n$ - кількість зубців статора на полюсі збудження.

При двох полюсах збудження ЕРС обмотки якоря буде:

$$e'_{z3} = 4w_k f m \Phi_z. \quad (18)$$

Порівняємо ЕРС на пару полюсів двох останніх конструкцій генераторів

$$\frac{e'_{z3}}{e'_{z2}} = \frac{4w_{k3} f m \Phi_{z1}}{4w_{k2} f m \Phi_{z2}} = \frac{w_{k3}}{w_{k2}}. \quad (19)$$

Позначено: w_{k2}, w_{k3} – кількість витків в одній котушці вказаних генераторів. Очевидно, що при рівності числа витків і частот, ЕРС обох типів генераторів будуть однаковими.

Проведемо аналіз витрат міді на обмотку якоря в обох останніх конструкціях. Із рис.3 і 4 слідує, що на ширині котушки обмотки якоря генератора з пульсуючим потоком, яка дорівнює приблизно ширині полюса збудження, можна розмістити m котушок обмотки якоря генератора з постійним потоком. Довжина проводу однієї котушки згаданих генераторів: $l_{03} = w_{k3} \cdot l_{63}, l_{02} = w_{k2} \cdot l_{62}$, де l_{63}, l_{62} - довжини одного витка відповідних котушок, причому $l_{62} = 2 \cdot (l + l_{r2}), l_{63} = 2(l + l_{r3}) = 2(l + m l_{r2})$. Позначено: l_{r2}, l_{r3} - довжини лобових частин котушок. Приблизно $l_{r2} = t_{z1}$. Запишемо відношення при умові $w_{k2} = w_{k3}$:

$$K_m = \frac{l_{02}}{l_{03}} = \frac{m(l+t_{z1})}{K_r(l+mt_{z1})} = \frac{m + \frac{mt_{z1}}{l}}{K_r(1 + \frac{mt_{z1}}{l})}, \quad (20)$$

де $K_r = 1,1$ – коефіцієнт, що враховує деяке подовження лобових частин генератора з пульсуючим током. Так, при $m=4, \frac{t_{z1}}{l} = 0,2$, маємо $K_r=2,4$, тобто витрати міді на обмотку якоря генератора з пульсуючим магнітним потоком значно менші порівняно з генератором з постійним потоком при практично однакових витратах міді на їх обмотки збудження.

В однофазних генераторах з постійним потоком зубця $t_{z2} = 2t_{z1}$, в генераторах з пульсуючим потоком $t_{z2} = t_{z1}$ [2], тому при однакових значеннях $(D \cdot n)$, де D – діаметр розточки, n – частота обертання ротора, останні генерують ЕРС з частотою, у два рази більшою ніж перші, згідно з формулою $f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{z_2 n}{60} = \frac{\pi D n}{60 t_{z2}}$.

Розмір ЕРС таких генераторів при вказаних умовах також збільшується у два рази відносно генераторів з постійним потоком.

Коефіцієнт використання розточки статора машини α_p , що дорівнює відношенню дуги розточки, зайнятої зубцями, до полюсної поділки по збудженню для генератора з пульсуючим потоком зубця $\alpha_p = \frac{m t_{z1}}{m t_{z1} + 0,5 t_{z1}} = \frac{m}{m + 0,5}$. Мінімальне значення m для таких генераторів дорівнює чотирьом, при цьому $\alpha_p = \frac{4}{4+0,5} = 0,89$. Для різноіменнополюсного генератора з постійним потоком при $m=4$ одержимо:

$$\alpha_p = \frac{m}{m+2} = \frac{4}{4+2} = 0,67. \quad (21)$$

В останньому випадку це приведе до збільшення габаритів та маси генератора.

Висновок: аналіз графіків розподілу векторного магнітного потенціалу у повітряному проміжку дає можливість виявити особливості і можливості різних типів індукторних генераторів. При дещо складній конструкції магнітопроводу статора різноіменнополюсний генератор з пульсуючим магнітним потоком зубця ротора забезпечить мінімальні витрати міді на обмотку якоря.

Список літератури

1. Поливанов К.М. Электродинамика движущихся тел. – М.: Электроатомиздат, 1982 – 192 с.
2. Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы. – М.: Энергия, 1970 – 192 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.