

В.І. Панченко, Д.В. Ципленков, А.М. Гребенюк, М.С. Кириченко, О.В. Бобров

МАШИННО-ТРАНСФОРМАТОРНИЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В роботі запропонована нова конструкція індукторної електричної машини, яка в технічній літературі називається – машинно-трансформаторним агрегатом (МТА). Для такого агрегату отримано співвідношення для визначення розрахункової потужності. На конкретному прикладі показано, що при однакових габаритах розрахункова потужність МТА може перевищувати таку для звичайних синхронних машин. Конструкція МТА дозволяє розмістити котушки обмотки статора на деякій відстані від рухомих елементів машини, а саме, у закритій ємності, заповненій електроізоляційною рідиною. Це дасть змогу збільшити потужність за рахунок більш ефективного охолодження обмотки, а також підвищити вихідну напругу МТА як генератора до рівня 35 кВ і більше. Бібл. 3, рис. 2.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроенергетичні установки, індукторна електрична машина, машинно-трансформаторний агрегат, полюс, обмотка статора, генератор.

В работе предложена новая конструкция индукторной электрической машины, которая в технической литературе называется – машинно-трансформаторный агрегат (МТА). Для такого агрегата получено соотношение для определения расчетной мощности. На конкретном примере показано, что при одинаковых габаритах расчетная мощность МТА может превышать таковую для обычных синхронных машин. Конструкция МТА позволяет разместить катушки обмотки статора на некотором расстоянии от подвижных элементов машины, а именно, в закрытой емкости, заполненной электроизоляционной жидкостью. Это позволит увеличить мощность за счет более эффективного охлаждения обмотки, а также повысить выходное напряжение МТА как генератора до уровня 35 кВ и более. Библ. 3, рис. 2.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроэнергетические установки, индукторная электрическая машина, машинно-трансформаторный агрегат, полюс, обмотка статора, генератор.

Вступ. До електричних генераторів вітроустановок пред'являються наступні вимоги: вони мають бути багатополюсними, мати мінімальні габарити та масу, бути безконтактними але керованими, при роботі на систему електропостачання забезпечувати максимально можливу вихідну напругу.

Постановка завдання. Багатополісність та безконтактність порівняно просто реалізуються у синхронних генераторах зі збудженням від постійних магнітів та в синхронних індукторних генераторах з електромагнітним збудженням, причому в перших, як недолік – відсутня можливість керувати вихідною напругою, у других – малий (до 0,4) коефіцієнт використання магнітного потоку збудження.

Стан питання. В роботі [1] запропоновано нову конструкцію електричної машини – машинно-трансформаторний агрегат, який є безконтактним, має електромагнітне збудження по типу індукторного генератора і більший відносно до останнього коефіцієнт використання магнітного потоку. Але конструкція такого агрегату, особливо у трифазному виконанні, досить складна і, крім того, вимагає значних витрат міди для обмотки статора. В роботі [2] представлено удосконалену конструкцію машинно-трансформаторного агрегату з вертикальним валом у трифазному виконанні.

Матеріали дослідження. Машинно-трансформаторний агрегат, що розглядається, складається з двох частин – машинної (рис. 1,а зверху) та трансформаторної (рис. 1,а внизу), які мають загальний зовнішній магнітопровід (статор) у вигляді поздовжніх пакетів 1 з ізольованих пластин електротехнічної сталі. На валу 2 машинної частини закріплено втулку ротора 3, на зовнішній поверхні якої розміщено зубчасті радіальні пакети 4 і 5, зроблені також з ізольованих пластин електротехнічної сталі і взаємно зсунуті в осьовому напрямку. Зубці в цих пакетах орієнто-

вані в бік проміжку між ротором і поздовжніми пакетами статора та взаємно зміщені в тангенціальному напрямку на геометричний кут π/z_2 , де z_2 – число зубців в одному пакеті ротора. У проміжку між зубчастими пакетами розміщено кільцеву обмотку збудження 6, прикріплену по її зовнішній поверхні до поздовжніх пакетів статора. Обмотку поділено на дві секції, розташовані поруч. Кожна з них навита з провідної стрічки у взаємно протилежних напрямках, а секції сполучені між собою в кінці навивки зі сторони ротора. Поздовжні пакети 1 по довжині машинної частини агрегату зафіксовано шляхом заливки проміжків між ними немагнітним сплавом, який також утворює корпус 7 цієї частини. У радіальному напрямку пакети 1 опираються на циліндричні боковини 8 і 9, в яких зроблено отвори для їх проходу. У боковинах закріплено підшипники 10 і 11, які посаджені на вал 2. Зовні підшипники закрито кришками.

Ширину (по колу) кожного з пакетів 1 зроблено меншою ширини відповідного паза ротора у його зовнішній (по радіусу) частині. На пакетах трансформаторної частини, в крайніх по довжині областях закріплені котушки робочої обмотки, з'єднані між собою за відповідними схемами – «трикутником» або «зіркою». Нижні торці пакетів притиснені до кільцевого ярма 13, навитого із ізольованої феромагнітної стрічки. Пакети 1 трансформаторної частини, котушки 12 та ярмо 13 розміщені у закритій ємності 14, яку заповнено електроізоляційною рідиною. На зовнішній поверхні ємності закріплено охолоджуючі пристрої 15, сполученні з її внутрішнім об'ємом трубами 16.

При живленні обмотки збудження 6 постійним струмом у магнітній системі агрегату виникає магнітний потік, який виходить, наприклад, із зубців пакету 4 ротора і входить у ті поздовжні пакети статора, площа «перекриття» яких і зубців ротора макси-

мальна (на рис. 1 напрям магнітного потоку збудження показано стрілками). Далі магнітний потік із пакетів 1 входить у кільцеве яро 13 і звідти – в інші пакети статора 1, а саме в ті, площа «перекриття»

яких і зубців ротора пакету 5 максимальна. Далі, із відповідних пакетів статора 1 магнітний потік входить у зубці ротора пакету 5 і по втулці 3 знову в пакет 4 ротора.

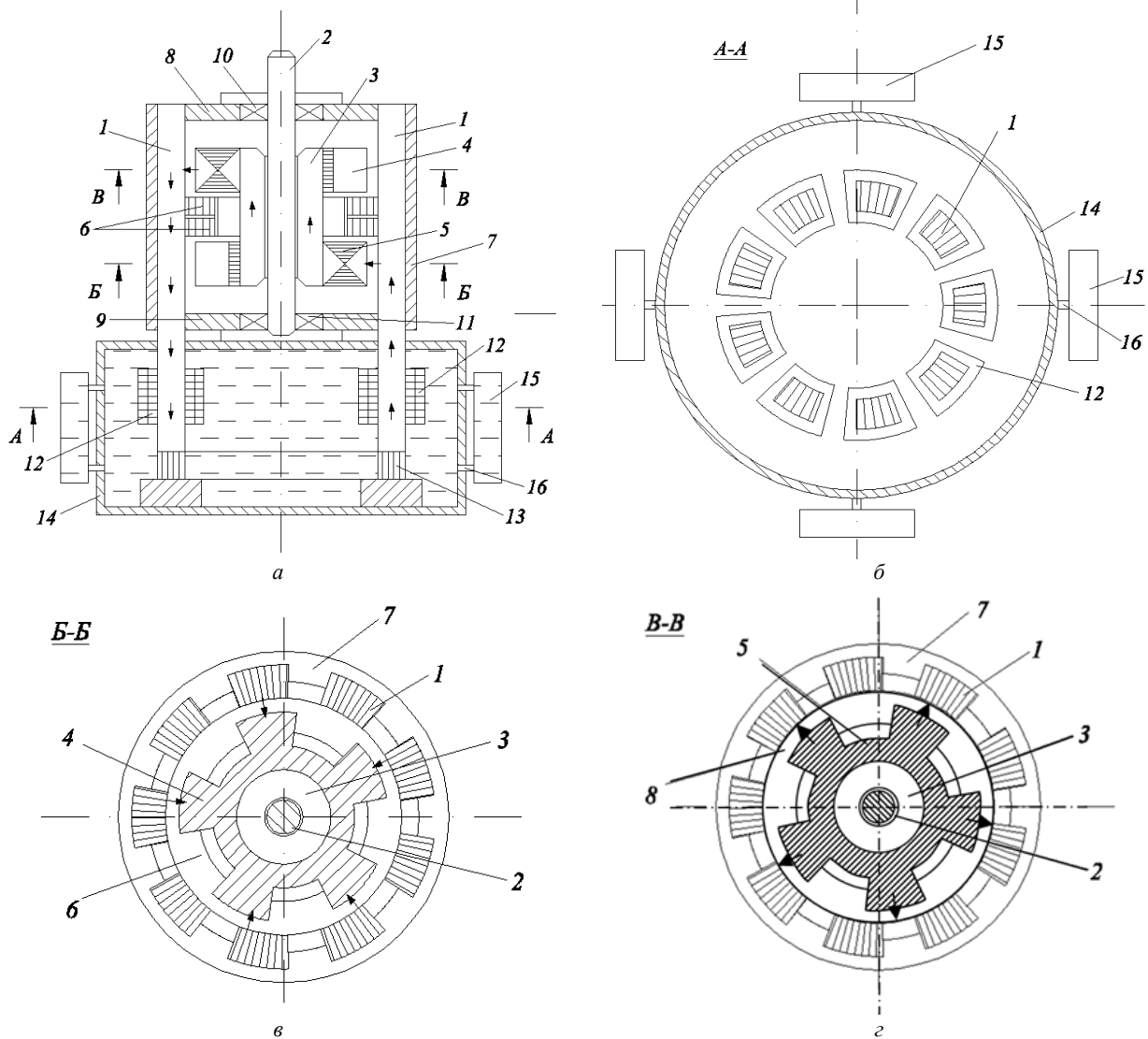


Рис. 1. Конструкція машинно-трансформаторного агрегату (а – поздовжній осьовий переріз; б, в, г – поперечні перерізи у різних місцях по висоті)

При обертанні ротора, наприклад, вітрогенератором зубці його пакетів безперервно змінюють своє положення відносно поздовжніх пакетів статора, що приводить до зміни розміру і напрямку магнітних потоків в останніх. Вказані потоки пронизують котушки 12 робочої обмотки, що викликає появу в ній електроорушійної сили (ЕРС) з частотою $f = z_2 n / 60$, де n – частота обертання ротора, об/хв.

Розрахункова потужність машино-трансформаторного агрегату (МТА):

$$P' = m E_1 I_1, \quad (1)$$

де m – число фаз обмотки статора; E_1 – електроорушійна сила (ЕРС) фази; I_1 – струм фази.

На кожному поздовжньому пакеті магнітопроводу статора розміщена котушка однієї з фаз. Кількість таких котушок на фазу складе $z_\phi = z_1 / m$, відповідно, ЕРС фази

$$E_1 = z_\phi E_\kappa K_p = z_\phi E_\kappa K_p / m,$$

де z_1 – загальна кількість пакетів; E_κ – ЕРС однієї котушки; K_p – коефіцієнт розподілення, що враховує взаємний фазовий зсув векторів ЕРС котушок фази.

На рис. 2 умовно показано взаємне положення пакетів статора і зубців ротора в деякий початковий момент часу та після зміщення ротора на полюсну поділку $\tau = 0,5 t_2$, де t_2 – зубцева поділка ротора.

Магнітний потік, який пронизує витки котушки, $\Phi_\kappa = \Phi_3 - \Phi_\Pi$, де Φ_3 – потік, що входить в пакет статора із зубця ротора; Φ_Π – потік, який із пакета статора входить у паз сусіднього пакета ротора.

Середнє значення ЕРС котушки

$$E_{\kappa_{cp}} = w_\kappa \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = w_\kappa \frac{2 \Phi_\kappa}{T/2} = 4 f w_\kappa (\Phi_3 - \Phi_\Pi), \quad (2)$$

де w_κ – кількість витків котушки; $\Delta \Phi = 2 \Phi_\kappa$ – зміна магнітного потоку через котушку за час $\Delta t = 0,5 T$, відповідного зміщенню ротора на відстань τ відносно початкового положення. $T = 1/f$ – період ЕРС; f – її частота.

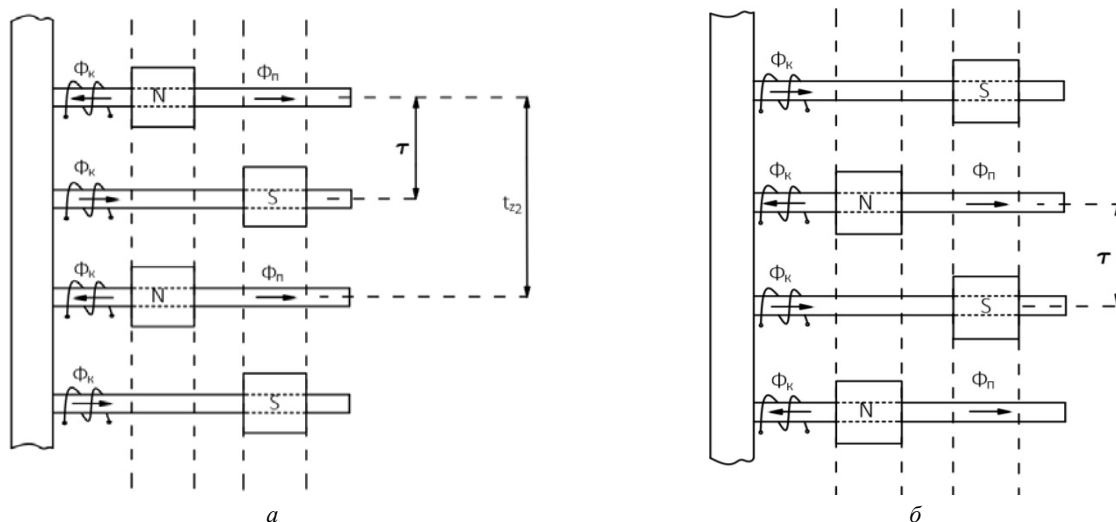


Рис. 2. Схеми взаємного розташування пакетів статора і зубців ротора у різні моменти часу

Значення магнітних потоків:

$$\Phi_3 = \frac{\mu_0 F_\delta S_3}{\delta_1}; \quad \Phi_\Pi = \frac{\mu_0 F_\delta S_\Pi}{\delta_2},$$

де μ_0 – магнітна стала; F_δ – магніторушійна сила (МРС) обмотки збудження на один повітряний проміжок; δ_1, δ_2 – повітряні проміжки між пакетом статора і зубцем ротора та, відповідно, між пакетом статора і пазом ротора; S_3, S_Π – площі магнітних потоків між пакетом і зубцем та між пакетом і пазом, причому, $S_3 = b_{z1} l_\Pi$; $S_\Pi = b'_\Pi l_\Pi$, де b_{z1} – ширина пакета; l_Π – осьова довжина (товщина) зубця ротора; b'_Π – розрахункова ширина паза ротора.

Після підстановки наведених формул у вираз (2) маємо:

$$E_{Kcp} = 4w_K f B_\delta l_\Pi b_{z1} \left(1 - \frac{\delta_1 b'_\Pi}{\delta_2 b_{z1}} \right), \quad (3)$$

де B_δ – магнітна індукція у повітряному проміжку між пакетом статора і зубцем ротора (максимальне значення).

Запишемо: $b_{z1} = \alpha_p \tau$, де α_p – коефіцієнт полюсної дуги. В результаті відповідних розрахунків одержано відношення $(b'_\Pi / b_{z1}) = 1,2$. Машина, що аналізується, з боку ротора є двопакетною; зона дії магнітного потоку збудження в осьовому напрямку – це активна довжина магнітопроводу, тобто $l_\delta = 2l_\Pi$. Запишемо вираз у дужках формули (3) таким чином:

$$\left(1 - \frac{\delta_1 b'_\Pi}{\delta_2 b_{z1}} \right) = \left(1 - \frac{1,2\delta_1}{\delta_2} \right) = K_\Pi,$$

де K_Π – коефіцієнт, що враховує магнітний потік розсіювання.

З урахуванням наведеного запишемо вираз для діючого значення ЕРС котушки

$$E_K = K_\Phi E_{Kcp} = 2K_\Phi \alpha_p K_\Pi w_K f B_\delta l_\delta \tau, \quad (4)$$

де K_Φ – коефіцієнт форми магнітного потоку збудження.

Котушки обмотки статора за конструкцією подібні таким же на стрижнях силових трансформаторів. Як і для трансформаторів запишемо співвідношення для лінійного навантаження: $A = I_1 w_K / l_K$, де l_K – осьова довжина котушки. Звідки фазний струм

$$I_1 = \frac{A l_K}{w_K}. \quad (5)$$

Підставимо співвідношення (3), (4), (5) у формулу (1) з урахуванням того що: $f = pn/60$ і $\tau = \pi D / (2p)$, де p – число пар полюсів машини, яке дорівнює кількості зубців ротора z_2 в одному пакеті; D – діаметр розточки, на якому розміщені пакети статора; n – частота обертання ротора, об/хв. Одержимо:

$$P' = \frac{\pi}{60D} \alpha_p K_\Phi K_p K_\Pi B_\delta A D^2 l_\delta l_K z_1 n. \quad (6)$$

Розглянемо більш детально вираз для лінійного навантаження

$$A = \frac{I_1 w_K}{l_K} = \frac{j_a S_{\text{пр}} w_K}{l_K} = \frac{j_a h_K l_K K_{3M}}{l_K} = j_a h_K K_{3M},$$

де h_K – товщина котушки; K_{3M} – коефіцієнт заповнення поздовжнього перерізу котушки міддю; j_a – густина струму в котушці.

Проміжок по колу між пакетами статора на діаметрі D позначимо через $b_{\Pi 1}$, причому $b_{\Pi 1} = t_1 - b_{z1}$, де t_1 – зубцева поділлка статора. Бажано забезпечити $b_{\Pi 1} = 0,5t_1$. Тоді, товщина котушки $h_K \approx 0,45b_{\Pi 1} \approx 0,23t_1$. Значення наступного добутку у формулі (6) буде таким:

$$\frac{A l_K z_1}{D} = 0,72 j_a l_K K_{3M}.$$

Після підстановки останнього співвідношення у (6) одержимо:

$$P' = 3,8 \cdot 10^{-2} \alpha_p K_\Phi K_p K_\Pi K_{3M} B_\delta j_a D^2 l_\delta l_K n. \quad (7)$$

Стосовно коефіцієнта $\alpha_p = b_{z1} / \tau$:

- ширина пакета статора $b_{z1} = t_1 - b_{\Pi 1} = 0,5t_1$;
- полюсна поділлка $\tau = \pi D / (2z_2)$.

Тому

$$\alpha_p = \frac{t_{z1}}{t_{z2}} = \frac{z_2}{z_1}.$$

Для виконання машини трифазною треба забезпечити:

$$z_1 = 2z_2 + K,$$

де $K = 1, 2, 3 \dots$, тоді

$$\alpha_p = \frac{z_2}{2z_2 + K} = \frac{1}{2 + \frac{K}{z_2}} < 0.5.$$

Формула для розрахункової потужності класичних синхронних машин з електромагнітним збудженням має вид [3].

$$P'_c = 0,164 \alpha_i K_\phi K_{об} B_{\delta_c} A_c D^2 l_{\delta n}. \quad (8)$$

Відношення розрахункових потужностей при однакових габаритних розмірах

$$\frac{P'}{P'_c} = \frac{0,23 \alpha_p K_p K_\pi K_{зм} B_\delta j_a l_k}{\alpha_i K_{об} B_{\delta_c} A}. \quad (9)$$

Виконаємо за останньою формулою розрахунки (генератори в діапазоні потужностей до 1000 кВА).

Прийmemo: $\alpha_p=0,45$; $K_p=0,95$; $K_{зм}=0,58$; $B_\delta=1,5$ Тл; $j_a = 4 \cdot 10^6$ А/м²; $\alpha_i=0,85$; $K_{об}=0,92$; $B_{\delta_c}=0,9$ Тл; $A_c=4 \cdot 10^4$ А/м.

В результаті розрахунків одержимо:

$$\frac{P'}{P'_c} = \frac{0,23 \cdot 0,45 \cdot 0,95 \cdot 0,58 \cdot 1,5 \cdot 4 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,92 \cdot 0,9 \cdot 4 \cdot 10^4} l_k = 11,2 l_k.$$

При $l_k = 0,1$ м маємо $P' = 1,12 P'_c$, тобто розрахункова потужність МТА може перевищувати таку для звичайного синхронного генератора. Вибором значення l_k можна змінювати розмір потужності в межах допустимого теплового навантаження обмотки статора. Слід зазначити, що індукція B_δ у повітряному проміжку МТА обмежується тільки магнітним насиченням електротехнічної сталі пакетів статора, тобто $B_\delta \leq 1,8$ Тл, що значно вище у порівнянні з класичними генераторами.

Просторове розподілення машинної і трансформаторної частин в МТА дозволить розмістити котушки обмотки статора на деякому віддаленні від рухомих елементів, наприклад, у закритій ємності, заповненій електроізоляційною рідиною. При цьому забезпечується більш ефективно охолодження обмотки статора в робочому режимі, що дає змогу збільшити густину струму в обмотці і, відповідно, потужність МТА у порівнянні з випадком повітряного охолодження. З іншого боку, розміщення обмотки в електроізоляційній рідині дозволить збільшити вихідну напругу МТА в режимі генератора до рівня 35 кВ і вище і відмовитись при цьому від використання силового трансформатора, що підвищує напругу перед подачею електроенергії у високовольтну мережу.

Обмотка статора МТА складається з окремих котушок, закріплених на поздовжніх пакетах. Котушки є зосередженими, що забезпечить мінімальну довжину лобових частин. У звичайних синхронних генераторах кількість зубців статора вибирають згідно формули: $z_1=2ptq$, де $q \geq 2$. Для малообертових генераторів, наприклад, коли $n = 150$ об/хв, $f = 50$ Гц, $q = 2$, треба забезпечити $p = 20$ і $z_1 = 2 \cdot 20 \cdot 3 \cdot 2 = 240$. При цьому ускладнюється виконання статора і вимушено збільшуються габарити генератора. Розглянемо можливість реалізувати трифазну машину (МТА), коли $z_1=2z_2+K$. Магнітне поле збудження забезпечує у повітряному проміжку кожного з пакетів ротора кількість пар полюсів $p = z_2$. Взаємний кут зсуву γ (в електричних градусах) двох котушок, розташованих на сусідніх пакетах статора у цьому магнітному полі, складе:

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z_1} = \frac{2\pi(z_1 - K)}{2z_1} = \pi - \frac{K\pi}{z_1}.$$

Сусідні пакети відносяться до однієї з фаз, а котушки цих пакетів з'єднуються між собою послідовно зустрічно, то електричний кут між векторами ЕРС котушок буде таким

$$\gamma_c = \pi - \gamma = \frac{K\pi}{z_1}.$$

Кількість пакетів статора у трифазній електричній машині $z_1 = am$, де $a = 2, 3, 4 \dots$ – кількість пакетів на фазу. У формулі $z_1 = 2z_2 + K$ число K позначає кількість віток обмотки однієї фази, з'єднаних між собою послідовно або паралельно. Кількість котушок в одній вітці обмотки буде такою:

$$a_\Gamma = \frac{z}{Km} = \frac{a}{K}.$$

Електричний кут, який займають по розточці котушки однієї вітки,

$$\gamma_\Gamma = a_\Gamma \gamma_c = \frac{z_1}{K \cdot m} \cdot \frac{K \cdot \pi}{z_1} = \frac{\pi}{m} = 60 \text{ град.ел.}$$

Остання формула підтверджує можливість створення симетричної трифазної обмотки з 60-ти градусною фазною зоною. Із попередніх міркувань слідує, що числа a_Γ і K повинні бути цілими. Зв'язок між ними описує співвідношення:

$$a_\Gamma = \frac{z_1}{K \cdot m} = \frac{2z_2/(K+1)}{m}. \quad (10)$$

Значення K бажано мати мінімальним. Послідовно збільшуючи значення K , починаючи з одиниці, знаходимо із формули (10) відповідну величину a_Γ у вигляді першого цілого числа. Наприклад, коли $n = 150$ об/хв, $f = 50$ Гц, $z_2 = 20$, $m = 3$, то тільки при $K = 2$ отримаємо $a_\Gamma = 7$. Тоді: $z_1 = 2 \cdot 20 + 2 = 42$, $a = z_1/m = 42/3 = 14$.

Як було зазначено раніше, збудження у МТА забезпечує одна нерухома кільцева обмотка. Визначимо витрати міді для створення такої обмотки. Для магнітного кола, по якому проходить потік збудження, справедливе рівняння:

$$2\delta H_\delta K_F = I_3 w_3 = F_3,$$

де H_δ – напруженість магнітного поля у повітряному проміжку розміром δ_1 між пакетом статора і зубцем ротора; $K_F > 1$ – коефіцієнт, що враховує феромагнітні ділянки кола; I_3 і w_3 – струм і кількість витків обмотки збудження; F_3 – магніторушійна сила (МРС) обмотки.

Враховуємо наступне: $H_\delta = B_\delta/\mu_0$; $I_3 w_3 = j_3 S_{пр} w_3 = S_{м3} w_3$, де j_3 – густина струму в обмотці; $S_{пр}$ – площа поперечного перерізу провідника; $S_{м3} = S_{пр} w_3$ – площа поперечного перерізу міді обмотки, причому

$$S_{м3} = \frac{F_3}{j_3} = \frac{2\delta B_\delta K_F}{\mu_0 j_3}.$$

Враховуючи, що середня довжина витка $l_{cp} = \pi(D-h_0)$, де h_0 – радіальна товщина обмотки, об'єм міді обмотки збудження буде таким:

$$V_M = S_{м3} l_{cp} = \frac{2\pi D \delta B_\delta K_F}{\mu_0 j_3} \left(1 - \frac{h_0}{D}\right) = \frac{2V_\delta B_\delta K_F}{\mu_0 j_3} \left(1 - \frac{h_0}{D}\right),$$

де $V_\delta = \pi D \delta$ – об'єм повітряного проміжку між пакетами статора та зубцями ротора.

Для порівняння визначимо витрати міді на обмотку збудження синхронного явнополюсного генератора. Запишемо рівняння магнітної рівноваги для магнітного кола, який проходить через два сусідні полюси,

$$2\delta H_{\delta_c} K_F K_{\delta} = 2I_k w_k = 2F_k,$$

де K_{δ} – коефіцієнт, що враховує зубчастість статора; I_k і w_k – струм та кількість витків котушки полюса; $F_k = I_k w_k$ – МРС котушки.

Площа поперечного перерізу міді котушки

$$S_{mk} = S_{pp} w_k = \frac{F_k}{j_k} = \frac{\delta B_{\delta_c} K_F K_{\delta}}{\mu_0 j_k},$$

де j_k – густина струму в котушці.

Об'єм міді котушки

$$V_{mk} = S_{mk} l_{cpk},$$

де l_{cpk} – середня довжина витка. Вона складає приблизно $l_{cpk} = 2,5(l_{\delta} + b_p)$; l_{δ} – довжина магнітопроводу статора; b_p – ширина осердя полюса.

Звичайно $b_p \approx 0,35\tau$. Запишемо:

$$l_{cpk} = 2,5(l_{\delta} + 0,35\tau) = 2,5D \left(\frac{l_{\delta}}{D} + 0,55/p \right) = 2,5D \left(\lambda + 0,55/p \right),$$

де $\lambda = l_{\delta}/D$. Тоді

$$V_{mk} = \frac{0,8V_{\delta} B_{\delta_c} K_F K_{\delta}}{\mu_0 j_k} \left(\lambda + 0,55/p \right).$$

Загальний об'єм міді обмотки збудження, яка складається із $2p$ котушок, враховуючи рекомендацію до вибору $\lambda = 0,8/p^{1/2}$, буде таким

$$V_{mc} = 2pV_{mk} = \frac{0,9V_{\delta} B_{\delta_c} K_{\delta} K_F}{\mu_0 j_k} (1,45\sqrt{p} + 1).$$

Відношення об'ємів міді обмоток збудження при однакових об'ємах повітряного проміжку, густині струму в обмотках і насиченню магнітопроводів:

$$\frac{V_{mc}}{V_m} = \frac{0,45B_{\delta_c} K_{\delta} (1,45\sqrt{p} + 1)}{B_{\delta} (1 - h_0/D)}.$$

Так, для $p = z_2 = 20$; $B_{\delta} = 1,5$ Тл; $B_{\delta_c} = 0,9$ Тл; $K_{\delta} = 1,2$; $h_0/D = 0,05$, отримаємо: $V_m/V_{mc} = 2,5$.

Висновки.

1. Синхронна електрична машина у виді машино-трансформаторного агрегату завдяки явнополюсній конструкції і значній магнітній індукції у повітряному проміжку дозволить збільшити розрахункову потужність та зменшити витрати міді на обмотку збудження порівняно з класичною синхронною машиною з електромагнітним збудженням.

2. Розміщення трансформаторної частини агрегату у закритій ємності, заповненій електроізоляційною рідиною, дозволить збільшити вихідну напругу в режимі роботи генератором, а також потужність агрегату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент РФ № 2096893. Машинно-трансформаторный агрегат / Свечарник Д.В. – Открывтия. Изобретения, 1997, №32.
2. Патент України № 103685. Машинно-трансформаторний агрегат / Панченко В.І. – Промислова власність, 2013. – Бюл. №21.
3. Гольдберг О.Д., Гурич Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высш.шк., 1984. – 431 с.

REFERENCES

1. Svecharyk D.V. *Mashinno-transformatornyi agregat* [Machine-transformer unit]. Patent Russian Federation, no.2096893, 1997. (Rus).
2. Panchenko V.I. *Mashynno-transformatornyi ahrehat* [Machine-transformer unit]. Patent UA, no.103685, 2013. (Ukr).
3. Goldberg A.D., Gurin Y.S., Sviridenko Y.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing of electric machines]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1984. 431 p. (Rus).

Надійшла (received) 27.11.2015

Панченко Віктор Іванович¹,

Ципленков Дмитро Володимирович¹, к.т.н., доц.,

Гребенюк Андрій Миколайович¹, к.т.н., доц.,

Кириченко Марина Сергіївна¹, асистент,

Бобров Олексій Володимирович¹, к.т.н.,

¹ Державний вищий навчальний заклад

«Національний гірничий університет»,

49005, Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19,

тел/phone +38 056 3730743, +38 066 7746309,

e-mail: nmu.em@ua.fm

V.I. Panchenko¹, D.V. Tsyplenkov¹, A.M. Grebeniuk¹,

M.S. Kyrychenko¹, O.V. Bobrov¹

¹ State Higher Education Institution «National Mining University»,

19, K. Marksa Avenue, Dnipropetrovsk, 49005, Ukraine.

Machine-transformer units for wind turbines.

Background. Electric generators of wind turbines must meet the following requirements: they must be multi-pole; to have a minimum size and weight; to be non-contact, but controlled; to ensure the maximum possible output voltage when working on the power supply system. Multipole and contactless are relatively simply realized in the synchronous generator with permanent magnet excitation and synchronous inductor generator with electromagnetic excitation; moreover the first one has a disadvantage that there is no possibility to control the output voltage, and the second one has a low magnetic leakage coefficient with the appropriate consequences. **Purpose.** To compare machine dimensions and weight of the transformer unit with induction generators and is an opportunity to prove their application for systems with low RMS-growth rotation. **Methodology.** A new design of the electric inductor machine called in technical literature as machine-transformer unit (MTU) is presented. A ratio for estimated capacity determination of such units is obtained. **Results.** In a specific example it is shown that estimated power of MTU may exceed the same one for traditional synchronous machines at the same dimensions. The MTU design allows placement of stator coil at some distance from the rotating parts of the machine, namely, in a closed container filled with insulating liquid. This will increase capacity by means of more efficient cooling of coil, as well as to increase the output voltage of the MTU as a generator to a level of 35 kV or more. The recommendations on the certain parameters selection of the MTU stator winding are presented. The formulas for copper cost calculating on the MTU field winding and synchronous salient-pole generator are developed. In a specific example it is shown that such costs in synchronous generator exceed 2.5 times the similar ones in the MTU. References 3, figures 2.

Key words: wind power, wind turbines, electric machine inductor, transformer-machine unit, pole stator winding, generator.