

В.І. Панченко, Д.В. Ципленков канд. техн. наук, О.Ю. Скрипник
(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

МАСОГАБАРИТНІ ПОКАЗНИКИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Анотація. В статті наведено формули для розрахунку маси активних матеріалів синхронних індукторного генератора і генератора зі збудженням від постійних магнітів та надані рекомендації по вибору деяких геометричних співвідношень вказаних генераторів. Отримано аналітичні залежності маси активних матеріалів генераторів від розміру співвідношення активної довжини машини до діаметру розточки статора і визначено діапазон значень цього відношення, в якому маса активних матеріалів генератора з постійними магнітами значно менша ніж в індукторному генераторі. Також запропоновано використання у вітроенергетичних установках синхронних генераторів з комбінованим збудженням на основі конструкції індукторного одноіменнопольного генератора.

Ключові слова: вітроенергетична установка; постійні магніти; синхронний генератор з комбінованим збудженням; синхронний індукторний генератор; генератор зі збудженням від постійних магнітів; статор.

Аннотация. В статье приведены формулы для расчета массы активных материалов синхронных индукторного генератора и генератора с возбуждением от постоянных магнитов и даны рекомендации по выбору некоторых геометрических соотношений указанных генераторов. Получены аналитические зависимости массы активных материалов генераторов от размера соотношения активной длины машины к диаметру расточки статора и определен диапазон значений этого отношения, в котором масса активных материалов генератора с постоянными магнитами значительно меньше, чем в индукторной генераторе. Также предложено использование в ветроэнергетических установках синхронных генераторов с комбинированным возбуждением на основе конструкции индукторного одноименнопольного генератора.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка; постоянные магниты; синхронный генератор с комбинированным возбуждением; синхронный индукторный генератор; генератор с возбуждением от постоянных магнитов; статор.

Annotation. The article describes the formula to calculate the mass of active material of synchronous generator and inductor generator with permanent magnet excitation and recommendations on the choice of some of the geometric relationships of these generators. The analytical dependence of the mass of active material of generators on the size ratio of the active machine length to diameter of the stator bore and defined range of values of the ratio in which the mass of the active material of the generator with permanent magnets is considerably less than in the inductor generator. Also provided is the use in wind turbines with synchronous generators excited by a combined design inductor homopolar generator.

Keywords: Wind power plant; Permanent magnets; Synchronous generator with a combined excitation; Synchronous inductor generator; Generator with permanent magnet excitation; Stator.

Вступ. У вітроенергетичних установках знаходять широке застосування синхронні генератори як зі збудженням від постійних магнітів так і з електромагнітним збудженням. До таких генераторів пред'являються наступні вимоги: вони мають бути багатопольсними, мати мінімальні габарити та масу, бути безконтактними але керованими, при роботі на систему електропостачання забезпечувати максимально можливу вихідну напругу.

Постановка завдання. Багатопольсність 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. На рис. 1 схематично представлено конструкції вказаних синхронних генераторів. Індукторний генератор (рис. 1, а) в даному випадку є одноіменнополюсним у складі двох кільцевих пакетів статора 1 і 2, набраних з пластин електротехнічної сталі, з пазами та зубцями на внутрішніх поверхнях пакетів. В пази, які співпадають в осьовому напрямку, вкрито трифазну обмотку змінного струму 3. Пакети статора вмонтовано у цільний циліндричний корпус 4 із магнітом'якого заліза. Між пакетами 1, 2 і впритул до корпусу розміщено обмотку збудження 5, яку живлять постійним струмом. Ротор генератора зроблено з двох шихтованих кільцевих зубчастих пакетів 6 і 7, посаджених на цільну магнітом'яку втулку 8, яку закріплено на валу 9.

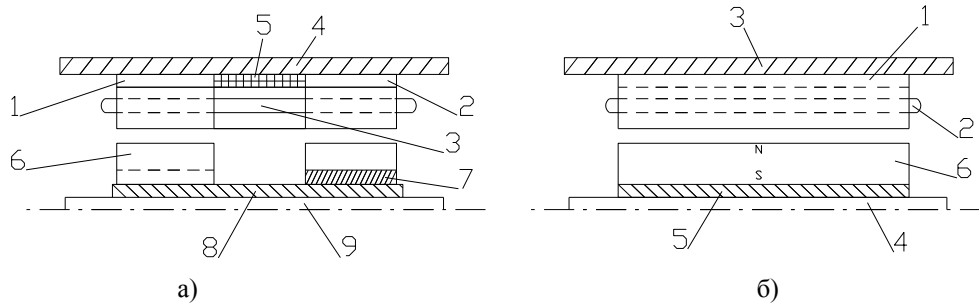


Рис. 1. Конструкції синхронних генераторів:
а) індукторного; б) зі збудженням від постійних магнітів

Генератор зі збудженням від постійних магнітів (рис. 1, б) має статор, циліндричний магнітопровід 1 якого зроблено з пластин електротехнічної сталі з пазами та зубцями на його внутрішній поверхні. В пазах розміщено трифазну обмотку 2. Магнітопровід статора закріплено у циліндричному корпусі 3. На валу 4 машини розміщено втулку 5 із магнітом'якого заліза, на зовнішній поверхні якої закріплено постійні магніти 6, намагнічені у радіальному напрямку з почерговою, взаємно протилежною орієнтацією вектора намагніченості.

Викладення основного матеріалу. Визначемо відносну масу активних матеріалів елементів конструкції за формулою:

$$g = \frac{G}{S},$$

де G – маса активних матеріалів окремого елемента або їх сумарна маса, кг; S – розрахункова потужність генератора, кВА.

Для визначення розрахункової потужності індукторного генератора в [2] наведено таке співвідношення

$$S = 0,165K_\phi K_{ob} K_\epsilon B_\delta AD^2 \ln, \text{ ВА}, \quad (1)$$

де K_ϕ – коефіцієнт форми кривої магнітної індукції у повітряному проміжку ($K_\phi \approx 1,11$); K_{ob} – обмотковий коефіцієнт; K_ϵ – коефіцієнт використання магнітного потоку збудження $K_\epsilon = 0,37 \dots 0,4$; B_δ – магнітна індукція у повітряному проміжку між зубцями статора і ротора ($B_\delta = 1,2 \dots 1,4$, Тл); A – лінійне навантаження, $\frac{\text{А}}{\text{м}}$; D, l – внутрішній діаметр магнітопроводу статора та його активна довжина, м; n – частота обертання ротора, $\frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

Масу електротехнічної сталі зубців статора визначають за формулою

$$G_{z1} = \pi \gamma_c D l h_{z1} \frac{b_{z1}}{t_{z1}}, \text{ кг}, \quad (2)$$

де $\gamma_c = 7,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина електротехнічної сталі; t_{z1}, b_{z1}, h_{z1} – відповідно, зубцева поділлка, ширина та висота зубця, м.

Маса електротехнічної сталі ярма (спинки) статора

$$G_{j1} = \pi \gamma_c D l \left(1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{j1}}{D} \right) h_{j1}, \text{ кг}, \quad (3)$$

де h_{j1} – товщина ярма.

Відносна маса електротехнічної сталі статора в цілому

$$g_{cm1} = \frac{G_{z1} + G_{j1}}{S} = C_1 \left[\frac{h_{z1}}{D} \cdot \frac{b_{z1}}{t_{z1}} + \left(1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{j1}}{D} \right) \frac{h_{j1}}{D} \right], \quad (4)$$

де $C_1 = 19\gamma_c / K_\phi K_{ob} K_\delta B_\delta A n$ – співмножник, що залежить від електромагнітних параметрів генератора та частоти обертання ротора; співмножник формули квадратних дужках характеризує геометричні розміри елементів конструкції генератора.

У виразі (4) розмір відношення $\frac{b_{z1}}{t_{z1}} = 0,55 \div 0,6$.

Висоту зубця статора орієнтовано визначають за формулою, м:

$$h_{z1} = \frac{A}{j_1 \left(1 - \frac{b_{z1}}{t_{z1}} \right) K_{zm1}} = \frac{A^2}{A j_1 \left(1 - \frac{b_{z1}}{t_{z1}} \right) K_{zm1}},$$

де j_1 – густина струму в обмотці статора, $\frac{A}{\text{м}^2}$; $A j_1$ – показник допустимого теплового навантаження обмотки (довідкова величина); $K_{zm1} = 0,52 \div 0,6$ – коефіцієнт заповнення паза статора міддю.

Висоту ярма статора h_{j1} , роблять не меншою товщини котушки обмотки збудження. Площа, яку займає ця котушка, м^2 :

$$S_{z\delta} = \frac{2K_\gamma K_\mu K_p \delta B_\delta}{\mu_0 j_2 K_{zm2}},$$

де $K_\gamma = 1,1 \div 1,15$ – коефіцієнт запасу по збудженню; $K_\mu = 1,3 \div 1,4$ – коефіцієнт, що враховує насичення складових магнітного кола; $K_p = 2,1 \div 2,4$ – коефіцієнт впливу реакції якоря на магнітний потік збудження; δ – повітряний проміжок, м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; $j_2 = 3,5 \div 4,0 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ – густина струму в обмотці збудження; $K_{zm2} = 0,75 \div 0,8$ – коефіцієнт заповнення площі поперечного перерізу котушки міддю.

Товщина котушки обмотки збудження

$$h_{z\delta} = \frac{S_{z\delta}}{l_{z\delta}},$$

де $l_{3\sigma}$ – ширина обмотки. Позначимо: $\frac{h_{3\sigma}}{l_{3\sigma}} = K_{3\sigma}$. Тоді $h_{3\sigma} = \sqrt{K_{3\sigma} \cdot S_{3\sigma}}$. Звичайно $K_{3\sigma} = 0,3 \div 0,4$.

Відносну масу електротехнічної сталі ротора генератора визначають за формулою

$$g_{cm2} = \frac{G_{z2} + G_{j2}}{S} = C_2 \left[\frac{h_{z1}}{D} \cdot \frac{b_{z1}}{D} + \left(1 - \frac{2h_{z2}}{D} - \frac{h_{j2}}{D} \right) \frac{h_{j2}}{D} \right], \quad (5)$$

де G_{z2}, G_{j2} – маса зубців та ярма ротора, відповідно; $C_2 = C_1$; b_{z2}, h_{z2}, t_{z2} і h_{j2} – відповідно, ширина та висота зубця, зубцева поділка та товщина ярма ротора.

У виразі (5) значення відношення $\frac{b_{z2}}{t_{z2}} = 0,36 \div 0,44$. Висота зубця

$$h_{z2} = 30 \div 50 \delta K_{\delta}$$

де K_{δ} – коефіцієнт Картера. У випадку, коли кількість зубців статора z_1 , вибрано за формулою: $z_1 = 2z_2 + K$, де z_2 – кількість зубців ротора; $K = 1, 2, 3, \dots$, то приймають $K_{\delta} \cong 1,0$. Товщину ярма ротора роблять виходячи з конструктивних міркувань такою $h_{j2} = 20 \div 35$ мм.

Визначимо витрати провідникового матеріалу на виготовлення обмоток. Маса міді обмотки статора

$$G_{m1} = \gamma_m \pi D d l \left(1 + \frac{n_k l_{3\sigma}}{l} + \frac{2l_a}{l} \right), \text{ кг,}$$

де γ_m – густина міді; $d = \frac{A}{j_1}$ – еквівалентна товщина провідникового шару обмотки; l_a – довжина однієї лобової частини обмотки. Для «зубцевої» обмотки $l_a \approx 1,2 t_{z1}$; n_k – кількість котушок обмотки збудження.

Відносна маса міді обмотки

$$g_{m1} = \frac{G_{m1}}{S} = C_4 \left(1 + \frac{\frac{n_k l_{3\sigma}}{l} + \frac{2,4 t_{z1}}{l}}{D} \right), \quad (6)$$

де $C_4 = 19 \gamma_m / K_{\phi} K_{o\sigma} K_{\delta} B_{\delta} j_1 n$ – співмножник виразу (6). Густина струму j_1 , визначають так:

$$j_1 = \frac{A j_1 \delta}{A}.$$

Масу міді обмотки збудження розраховують за формулою

$$G_{m2} = \gamma_m n_k h_{z1} l_{3\sigma} K_{3\sigma} \pi D \left(1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{3\sigma}}{D} \right)$$

Відносна маса міді обмотки

$$g_{m2} = \frac{G_{m1}}{S} = C_5 \left[\frac{h_{3\phi}}{D} \cdot \frac{l_{3\phi}}{l} \left(1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{3\phi}}{D} \right) n_k K_{3M} \right], \quad (7)$$

де $C_5 = 19\gamma_M / K_\phi K_{o\phi} K_\epsilon B_\delta A n$ – співмножник виразу (7).

Масу втулки ротора розраховують за формулою

$$G_{em} = \frac{\pi\gamma_3 D B_\delta b_{z2} l l + n_k l_{3\phi}}{K_m B_{em} t_{z2}}, \quad (8)$$

де $\gamma_3 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина заліза; $K_m = 0,79 \div 0,82$ – коефіцієнт [3]; $B_{em} \approx 1,6 \text{ Тл}$ – допустиме значення магнітної індукції у втулці.

Відносна маса втулки

$$g_{em} = C_6 \frac{b_{z2}}{t_{z2}} \left(1 + \frac{n l_{3\phi}}{l} \right) \lambda \quad (9)$$

де $C_6 = 19\gamma_3 / K_m K_\phi K_{o\phi} K_\epsilon B_{em} A n$ – співмножник виразу (9); $\lambda = l/D$ – відносна активна довжина генератора.

Масу корпусу генератора визначають за формулою

$$G_k = \frac{\pi D \gamma_3 B_\delta b_{z2} l K_\sigma}{K_m B_k t_{z2}} l + n_k l_{3\phi} + 2l_g, \quad (10)$$

де $K_\sigma \cong 1,05$ – коефіцієнт, що враховує магнітний потік розсіювання обмотки збудження; $B_k \approx 1,6 \text{ Тл}$ – допустиме значення магнітної індукції у корпусі; l_g – виліт лобової частини обмотки статора в осьовому напрямку (у випадку «зубцевої» обмотки $l_g = 0,6t_{z1}$). Порівнюючи вирази (8) і (10), запишемо

$$G_k = G_{em} K_\partial \left(1 + \frac{1,2t_{z1}}{l + n l_{3\phi}} \right) \approx 1,25 \div 1,3 G_{em}.$$

Відносна маса корпусу

$$g_k = \frac{G_k}{S} = 1,25 \div 1,3 g_{em}$$

За наведеними формулами виконано розрахунки відносних мас електротехнічної сталі статора і ротора $g_{cm} = g_{cm1} + g_{cm2}$, втулки ротора та корпусу $g_3 = g_{em1} + g_k$, міді обмоток статора та збудження $g_m = g_{m1} + g_m$ та сумарної відносної маси активних матеріалів $g_e = \frac{G_e}{S}$ трифазного індукторного генератора з розрахунковою потужністю $S = 1000 \text{ кВА}$ і частотою обертання $n = 250 \text{ об/хв}$ для різних можливих діаметрів розточки. Кількість зубців ротора при частоті вихідної напруги 50 Гц прийнято рівною 12, тобто $z_2 = p = 12$. Кількість зубців статора розраховано за формулою

$$z_1 = 2z_2 + K = 2 \cdot 12 + 3 = 27,$$

де $K = 3$.

Передбачено використання «зубцевої» обмотки статора, тобто на кожному зубці статора розміщується одна котушка обмотки. Прийнято: $B_\delta = 1,2Tл$; $K_g = 0,38$; $K_{oo} = 0,92$. Генератор чотирипакетний з двома котушками обмотки збудження. Розмір повітряного проміжку δ між зубцями статора і ротора вибрано за емпіричною формулою

$$\delta = 1,8\sqrt{D},$$

де δ в мм, D в метрах. Результати розрахунків приведені в табл. 1. На основі даних таблиці побудовані графіки відповідних залежностей (рис.2). Активна довжина статора (табл.1) розрахована за формулою

$$l = \frac{S}{0,165K_\phi K_{oo} K_g B_\delta A D^2 n}.$$

Таблиця 1

Результати розрахунків абсолютних та відносних мас активних матеріалів елементів конструкції індукторного генератора

D , мм	l , мм	l/D	$G_{ст}$, кг	$g_{ст}$, кг/кВА	$G_з$, кг	$g_з$, кг/кВА	$G_{м1}$, кг	$g_{м1}$, кг/кВА	$G_{м2}$, кг	$g_{м2}$, кг/кВА	$g_{м2}$, кг/кВА	$G_м$, кг	$g_м$, кг/кВА	$G_с$, кг	$g_с$, кг/кВА
800	2280	2,81	3684	3,68	17547	17,5	601	0,6	150	0,15	751	0,75	21982	21,9	800
1200	976	0,813	2349	2,35	5185	5,18	510	0,51	231	0,23	741	0,74	8275	8,28	1200
1600	527	0,33	1747	1,7	2484	2,48	503	0,5	310	0,31	813	0,81	5044	5,04	1600
2000	331	0,165	1418	1,4	1378	1,38	490	0,49	389	0,39	879	0,88	3675	3,68	2000
2400	225	0,093	1223	1,2	899	0,899	515	0,52	470	0,47	985	0,99	3107	3,11	2400

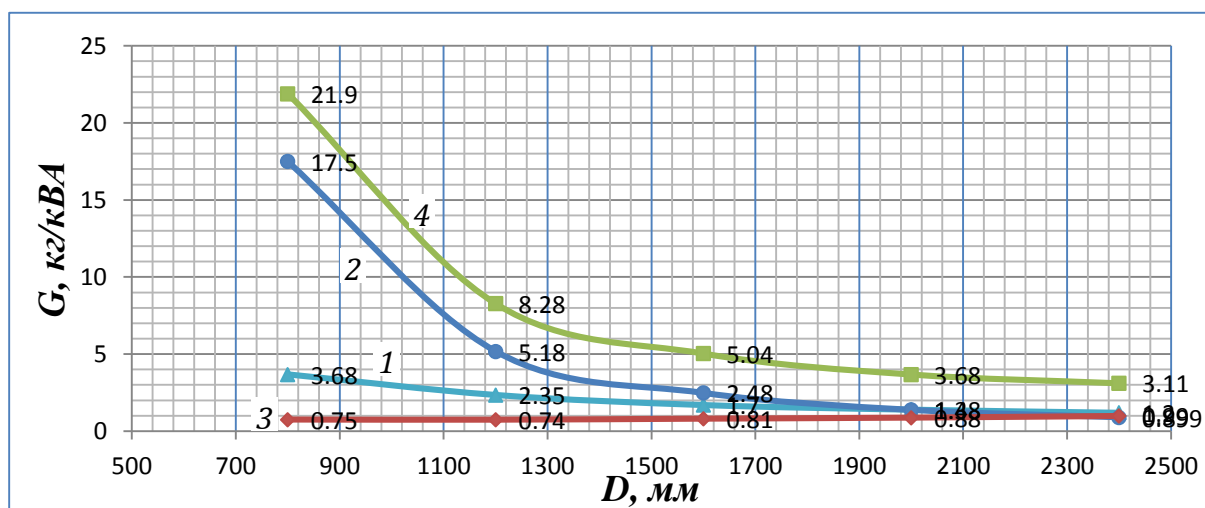


Рис. 2. Залежність відносних мас активних матеріалів елементів конструкції індукторного генератора від діаметра розетки:

- 1 –стали; 2 –втулки ротора та корпусу; 3 –міди обмоток статора та збудження;
4 – сумарної маси активних матеріалів

Наведемо формули для розрахунку відносних мас активних матеріалів елементів конструкції синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів. Розрахункова потужність такого генератора, ВА:

$$S = 0,165\alpha_i K_\phi K_{\sigma\delta} B_\delta A D^2 \ln ,$$

де $\alpha_i = 0,75 - 0,8$ – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

Відносна маса постійних магнітів [4]:

$$g_{nm} = \frac{G}{S} = \frac{2\gamma_{nm} K_d K_3}{\pi^2 f K_u B_r H_c K_n} ,$$

де K_d – коефіцієнт зведення поздовжньої реакції якоря до розміру магніторушійної сили (МРС) магніту

($K_d \approx 0,85$); $K_3 = 1,2$ – коефіцієнт запасу; $K_u = u \left(\sqrt{1 - u \cos \varphi} - u \sin \varphi \right)$ – коефіцієнт; $u = \frac{U}{E_0}$; U –

вихідна напруга і електрорушійна сила (ЕРС) генератора (прийнятне значення $\frac{U}{E_0} = 0,8$); $\cos \varphi$ –

коефіцієнт потужності; B_r, H_c – залишкова магнітна індукція та коерцитивна сила магніту; f – частота

ЕРС; K_n – коефіцієнт використання магніту (для магнітів з прямолінійною характеристикою розмагнічу-

вання $K_n < 0,25$.)

Відносну масу електротехнічної сталі статора (зубців та ярма) можна розрахувати за формулою, подібної до (4):

$$g_{cm1} = \frac{G_{z1} + G_{j1}}{S} = \Pi_1 \left[\frac{h_{z1}}{D} \cdot \frac{b_{z1}}{t_{z1}} + \left(1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{j1}}{D} \right) \frac{h_{j1}}{D} \right] , \quad (11)$$

де $\Pi_1 = 19\gamma_c / \alpha_i K_\phi K_{\sigma\delta} B_\delta A n$ – співмножник формули (11). Слід зазначити, що у виразі для Π_1 значення

$B_\delta = 0,75 \div 0,9$ Тл. Висоту зубця статора h_{z1} орієнтовно визначають за формулою, що приведена

для індукторного генератора. Товщина ярма статора $h_{j1} = \frac{\alpha_i \tau B_\delta}{2K_{zc} B_{j1}}$, де τ – полюсна поділка;

$K_{zc} = 0,94 \div 0,95$ – коефіцієнт заповнення поздовжнього перерізу ярма сталлю; $B_{j1} \approx 1,5$ Тл – допустиме значення магнітної індукції в ярмі.

Постійні магніти кріплять на втулці (циліндрі із маловуглецевої сталі), масу якої визначають за формулою:

$$G_{em} = \pi \gamma_3 D l h_{em} \left(1 - \frac{2h_m}{D} - \frac{h_{em}}{D} \right) .$$

Відносна маса втулки

$$g_{em} = \frac{G_{em}}{S} = \Pi_1 \frac{h_{em}}{D} \left(1 - \frac{2h_m}{D} - \frac{h_{em}}{D} \right) ,$$

де h_{em}, h_m – відповідно, товщина втулки і радіальна висота магніту, які в свою чергу розраховують так:

$$h_{em} = \frac{\alpha_i \tau B_\delta}{2B_{em}}; \quad h_m = \frac{K_n \mu_m}{\left(\frac{B_r}{B_\delta} - K_{\sigma m} \right)} \delta,$$

де $B_{em} \approx 1,6 \text{ Тл}$; $K_n \approx 1,3$ – коефіцієнт, що враховує магнітне насичення магнітопроводу і вплив реакції якоря; $K_{\sigma m} = 1,1 \div 1,2$ – коефіцієнт розсіювання магнітного потоку магнітів; $\mu_m = \frac{B_r}{\mu_0 H_c}$ – відносна магнітна проникність магнітів; δ – розмір повітряного проміжку. Формула для розрахунку h_m справедлива для магнітів з прямолінійною характеристикою розмагнічування. Орієнтовно $h_m = 5 \div 6 \delta$.

Відносну масу міді обмотки статора визначають за формулою, подібною до (6):

$$g_{m1} = \frac{G_{m1}}{S} = \Pi_2 \frac{\left(1 + \frac{2l_x}{l} \right)}{D}$$

де $\Pi_2 = 19 \gamma_m / \alpha_i K_\phi K_{\sigma\phi} B_\delta j_1 n$.

За наведеними формулами для трифазного генератора з постійними магнітами з розрахунковою потужністю $S = 895 \text{ кВА}$ виконано розрахунки абсолютних і відносних мас активних матеріалів елементів конструкції та сумарної їх маси для різних можливих значень діаметра розточки. Частота обертання ротора $n = 250 \text{ об/хв}$; кількість магнітів ротора $2\rho = 24$ (магніти системи $N_d - Fe - B$ з $B_r = 1,08 \text{ Тл}$, $H_c = 812 \text{ кА/м}$); кількість зубців статора $z_1 = 27$; обмотка статора «зубцева» за конструкцією. Прийнято: $B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$; $\alpha_i = 0,75$; $K_{\sigma\phi} = 0,92$; $K_n = 0,2$. Результати розрахунків представлені в табл. 2, а також графіками на рис. 3. Відносні маси міді та електротехнічної сталі генератора, як це видно із графіків, помітно зменшуються зі зростанням діаметра розточки, відносна маса ротора ($g_{nm} + g_{em}$) залишається при цьому практично незмінною.

Таблиця 2

Результати розрахунків абсолютних та відносних мас активних матеріалів елементів конструкції генератора з постійними магнітами

$D, \text{ мм}$	$l, \text{ мм}$	l/D	$G_{nm}, \text{ кг}$	$g_{nm}, \text{ кг/кВА}$	$G_{cm1}, \text{ кг}$	$g_{cm1}, \text{ кг/кВА}$	$G_{em}, \text{ кг}$	$g_{em}, \text{ кг/кВА}$	$G_m, \text{ кг}$	$g_m, \text{ кг/кВА}$	$G_c, \text{ кг}$	$g_c, \text{ кг/кВА}$
800	1430	1,78	698	0,78	1522	1,7	520	0,581	1369	1,53	4069	4,55
1200	608	0,507	698	0,78	1122	1,25	523	0,585	680	0,76	3073	3,43
1600	335	0,209	698	0,78	1010	1,13	525	0,587	483	0,54	2716	3,03
2000	210	0,105	698	0,78	907	1,01	522	0,583	413	0,46	2540	2,84
2400	150	0,0625	698	0,78	831	0,93	515	0,576	389	0,43	2433	2,72

За даними, наведеними в табл. 1 і 2, побудовано залежності (рис. 4) сумарних відносних мас активних матеріалів аналізуємих конструкцій генераторів від розміру відношення $\lambda = l/D$. Ці залежності в діапазоні значень $0,1 \leq \lambda \leq 0,9$ практично лінійні і можуть бути представлені (для частоти обертання 250 об/хв) такими формулами:

а) індукторний генератор: $g_c = 2,4 + 7,3 \frac{l}{D}, \text{ кг/кВА};$

б) генератор з постійними магнітами: $g_c = 2,8 + 1,2 \frac{l}{D}, \text{ кг/кВА}.$

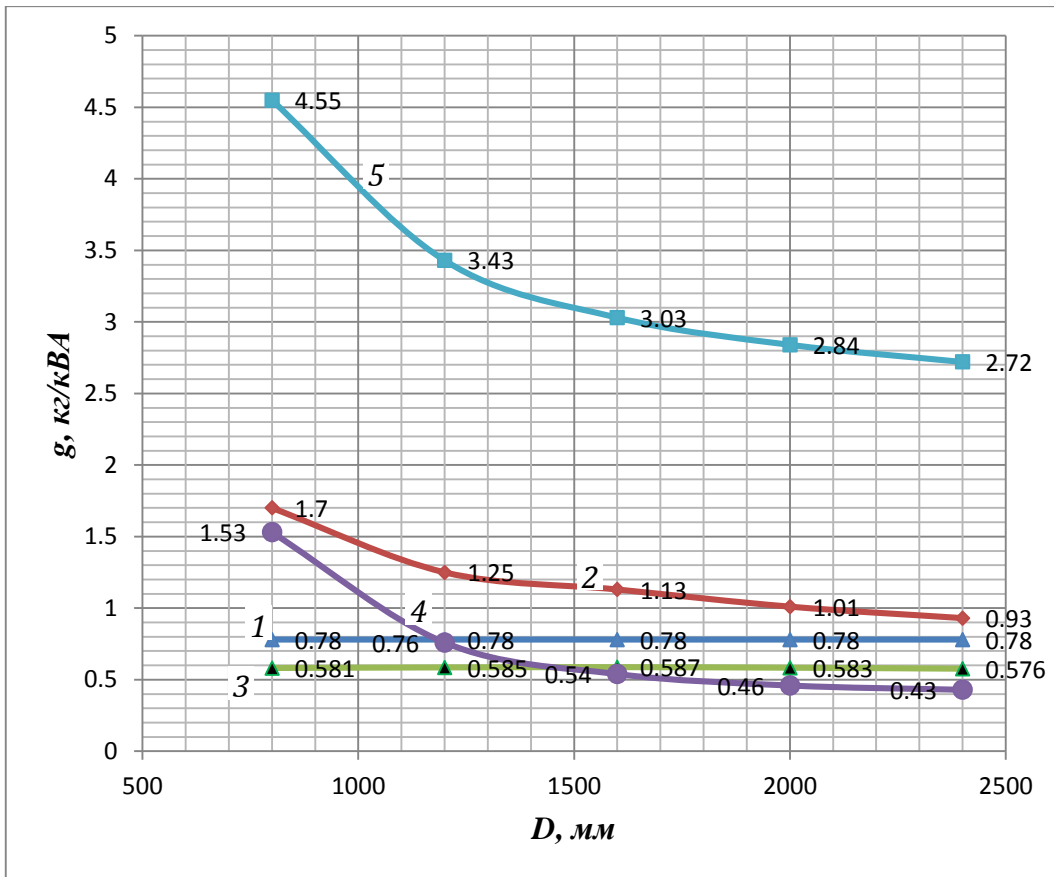


Рис. 3 Залежність відносних мас активних матеріалів елементів конструкції генератора з постійними магнітами від діаметра розточки
 1 – постійних магнітів; 2 – електротехнічної сталі статора; 3 – втулки; 4 – міді обмотки статора; 5 – сумарна

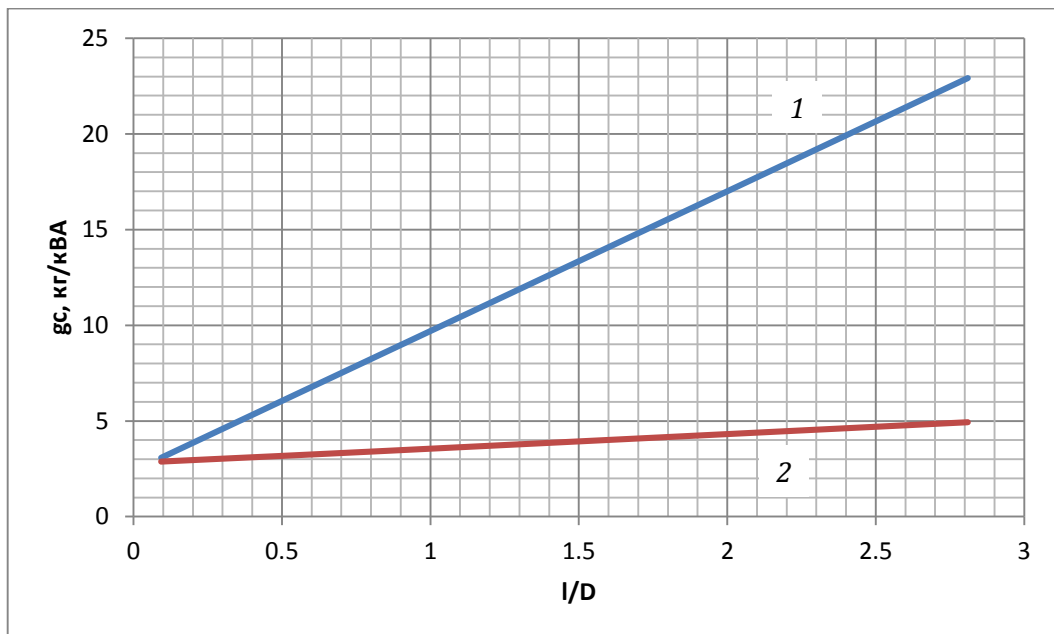


Рис. 4 Залежність відносних мас активних матеріалів генераторів від розміру відношення l/D
 (1 – індукторний генератор; 2 – генератор з постійними магнітами)

Для довільної частоти обертання n_o , об/хв одержані з останніх формул значення g_c необхідно до-множити на відношення $250/n_o$. Із аналізу графіка (рис. 4) слідує, що відносна маса активних матеріалів генератора з постійними магнітами менша такої ж індукторного генератора аж до значень $\lambda \leq 0,06$.

Стосовно генераторів з постійними магнітами треба зазначити значні витрати останніх і, як наслідок, значна вартість таких генераторів при використанні в них сучасних високоенергетичних магнітів. З іншого боку, вказані генератори не дозволяють регулювати розмір їх вихідної напруги. Вирішити вказані проблеми, на нашу думку, дозволить застосування у вітроенергетичних установках індукторних генераторів з комбінованим збудженням, наприклад, коли в пазах пакетів ротора закріплено постійні магніти і їх магнітний потік протилежний за напрямом потоку обмотки збудження. При цьому маса ротора в індукторному генераторі збільшиться за рахунок магнітів приблизно на величину маси його зубців; маса міді обмотки статора зменшиться приблизно у два рази, і на такий же розмір збільшиться коефіцієнт використання магнітного потоку збудження. Маса постійних магнітів зменшиться у два рази порівняно з витратами їх у генераторі з постійними магнітами, а генератор завдяки наявності обмотки збудження забезпечить регулювання розміру вихідної напруги.

Висновки

1. Наведено формули для розрахунку маси активних матеріалів синхронних індукторного генератора і генератора зі збудженням від постійних магнітів та надані рекомендації по вибору деяких геометричних співвідношень вказаних генераторів.

2. Отримано аналітичні залежності маси активних матеріалів генераторів від розміру відношення l/D (l – активна довжина машини; D – діаметр розточки) і визначено діапазон значень цього відношення, в якому маса активних матеріалів генератора з постійними магнітами значно менша такої в індукторному генераторі.

3. Запропоновано використання у вітроенергетичних установках синхронних генераторів з комбінованим збудженням на основі конструкції індукторного одноімпульсного генератора.

Список літератури

1. Патент UA № 49970. Вітродвигун / М.С. Голубенко, О.Л. Кадацький, В.С. Легеза та ін. // Бюл. № 10, 2002 р.
2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров. – М.: Высшая школа, 1982.
3. Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы / Н.Я. Альпер, А.А. Терзян. – М.: Энергия, 1970.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины / Д.А. Бут. – М.: Высшая школа, 1990.

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

УДК 622.67

С.В. Самуся, канд. техн. наук¹, Ю.А. Комисаров², Д.А. Федоряченко², А.В. Виниченко²

¹ (Україна, Дніпропетровськ, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України)

² (Україна, Дніпропетровськ, ГВУЗ «Національний горний університет»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОБИЛЬНОЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Анотація. У статті представлена математична модель динамічних процесів в струні і отвісі канату мобільної підйомної установки в режимах гальмування і реалізовано програмне рішення системи диференціальних рівнянь за допомогою адаптованого чисельного методу Рунге-Кутта. У розробленому програмному модулі проведені чисельні експерименти для реальних параметрів підйомної установки і характеристики гальмівного зусилля, результатом яких є залежності відносних поперечних переміщень струни каната, вертикальних переміщень підйомної посудини і кінематики барабана. Встановлено, що динамічні зусилля в канаті, отримані при використанні дискретного аналога, перевищують зусилля для континуальної системи на 5 ... 7%, що забезпечує запас надійності.

Ключові слова: мобільна підйомна установка; гальмівне зусилля; барабан; динамічні процеси; канат.