

*О. Ю. ЮР'ЄВА, В. П. ШАЙДА*

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Проаналізовано існуючі принципи обирання електромагнітних навантажень та головних розмірів синхронних машин. Виявлено принципи обирання головних розмірів та електромагнітних навантажень високочастотних генераторів у відповідності до номінальних даних, зазначених у технічному завданні. Сформульовано рекомендації щодо проектування високочастотних синхронних генераторів для автономних енергетичних установок. Отримано залежності, якими рекомендується користуватись при створенні нових високочастотних синхронних генераторів.

**Ключові слова:** високочастотний синхронний генератор, проектування, машинна постійна, головні розміри, електромагнітні навантаження, частота мережі, частота обертання.

Проанализированы существующие принципы выбора электромагнитных нагрузок и главных размеров синхронных машин. Выявлены принципы выбора главных размеров и электромагнитных нагрузок высокочастотных генераторов в соответствии с номинальными данными, указанными в техническом задании. Сформулированы рекомендации по проектированию высокочастотных синхронных генераторов для автономных энергетических установок. Определены зависимости, которые рекомендуется использовать при создании новых высокочастотных синхронных генераторов.

**Ключевые слова:** высокочастотный синхронный генератор, проектирование, машинная постоянная, главные размеры, электромагнитные нагрузки, частота сети, частота вращения.

**Purpose.** To provide recommendations on the principles of selecting the main sizes and electromagnetic loads of high-frequency synchronous generators for autonomous electric power installations. **Methodology.** The proposed design principles are based on the use of a machine constant. Electromagnetic loads are proposed to be determined through the apparent power of the generator. The relationship between the main dimensions and the nominal data is determined by analytical methods. **Results.** The results of the design of synchronous generators according to the machine constant are analyzed. The discrepancy between the technical data of the designed synchronous generators and the calculated results was revealed. The proposed principles of developing a mathematical relationship between nominal data, electromagnetic characteristics and geometric sizes are based on the formula of the apparent power of the synchronous machine. The proposed approach to choosing the main dimensions does not contain any assumptions in the transformation of the EMF and the stator winding current to the magnetic induction in the air gap and the stator linear load, respectively. The dependences of the calculated volume of the machine on nominative apparent power at different rotation frequencies are determined in order to create the correct technical task for the design of a synchronous generator. Differences in determining the diameter of the rotor based on mechanical strength conditions were determined. Checking the correctness of determined main dimensions and electromagnetic loads is the fulfillment of the requirements for the energy characteristics and the thermal state of the synchronous generator. **Originality.** Dependencies that are recommended for creating new high-frequency synchronous generators are found. **Practical value.** These design features proposed for use in research and engineering practice.

**Keywords:** high frequency synchronous generator, design, machine constant, main dimensions, electromagnetic loads, network frequency, rotation speed.

**Постановка проблеми.** З середини минулого сторіччя почало поширюватись застосування змінного струму непромислової частоти для спеціальних систем, установок та пристроїв у будівництві, сільському господарстві, авіаційних електроенергетичних системах, на залізниці, на суднових та інших автономних енергетичних установках. Непромишленою частотою вважається така частота, величина якої не дорівнює частоті загальної мережі (50 або 60 Гц залежно від країни). Для створення змінного струму високої частоти використовуються високочастотні генератори з частотою до 30 кГц, для струму низької частоти – генератори низької частоти (16,67 Гц) для електрифікованих залізниць центральної та північної Європи.

Найбільшого поширення мають два типи синхронних генераторів – з електромагнітним збудженням (з обмоткою збудження на роторі) та зі збудженням від постійних магнітів. Для генерування електроенергії підвищеної частоти використовуються обидва типи генераторів, кожному з яких відповідає своя переважна область застосування, обумовлена властивостями цих машин. Для можливості регулювання ЕРС обмотки збудження застосовують синхронні генератори з електромагнітним збудженням, для зменшення масогабаритних показників – з постійними магнітами. Синхронні генератори з електромагнітним збудженням

за своїми основними характеристиками мають кращі властивості, ніж синхронні генератори з постійними магнітами, особливо при частоті обертання 6000–8000 об/хв та частоті більшій за 200 Гц.

Згідно з дослідженням [1], здійсненим за джерелами електронної бібліотеки IEEE/IEE та мережі Internet, потужність високошвидкісних електричних машин сягає 1 МВт, а частота обертання – 120000 об/хв. Також в [1] зазначається, що ці величини є лиш показовими, оскільки часто неможливо було з'ясувати, чи були зазначені величини номінальними або максимально досягнутими.

Дослідження [2] спирається на синхронні генератори номінальною потужністю від 8 до 36 МВт, номінальною частотою обертання 3600, 4800, 6200, 7000, 7200 об/хв при частоті мережі від 60 до 240 Гц, спроектованих для живлення електричної мережі морських суден.

Обмеженість номенклатури існуючих високочастотних синхронних генераторів спонукала до проектування нових генераторів широкого діапазону номінальних потужностей та частот обертання для автономних енергетичних установок.

**Постановка задачі.** Існуючі принципи обирання головних розмірів та електромагнітних навантажень синхронних генераторів базуються на методиці проєк-

© О.Ю. Юр'єва, В.П. Шайда, 2019

тування синхронних машин частотою 50 Гц. Відмінність цих принципів для синхронних генераторів не-промислової частоти потребує аналізу виникнення цієї невідповідності та розробки нових, відкоригованих рекомендацій з проектування.

**Мета дослідження.** Визначення принципів прийняття рішення щодо обирання електромагнітних навантажень та геометрії активної частини високочастотних синхронних генераторів відповідно до номінальних даних.

**Проектування синхронних машин за машинною постійною.** Проектування будь-якої електричної машини ґрунтується на формулі машинної постійної, яка пов'язує номінальні дані (номінальну повну потужність  $S_N$  та номінальну частоту обертання  $n_N$ ), головні розміри (внутрішній діаметр статора  $d_s$  та його активну довжину  $l_s$ ) та електромагнітні навантаження (магнітну індукцію у повітряному проміжку  $B_\delta$  та лінійне навантаження статора  $A_s$ ).

При проектуванні синхронних машин в загальній прийнятій практиці [3, 4] пропонується використовувати формулу машинної постійної такого вигляду:

$$\frac{d_s^2 \cdot l_s \cdot n_N}{S_N} = \frac{6,1 \cdot 10^{10}}{\alpha_e \cdot k_f \cdot K_W \cdot B_\delta \cdot A_s}, \quad (1)$$

де  $\alpha_e$  – еквівалентний коефіцієнт дуги полюса ротора;  $k_f$  – коефіцієнт форми магнітного поля в повітряному проміжку;  $K_W$  – обмотковий коефіцієнт обмотки статора; потужність  $S_N$  виражена в кіловольт-

Таблиця 1 – Технічні дані та результати розрахунків синхронних машин

| Параметр          | Значення           |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $S_N$ , кВ·А      | 300                | 315                | 375                | 380                | 430                | 440                | 500                |
| $n_N$ , об/хв     | 300                | 375                | 500                | 600                | 750                | 300                | 500                |
| $d_s$ , мм        | 1160               | 1164               | 860                | 887                | 860                | 1160               | 860                |
| $l_s$ , мм        | 1381               | 1408               | 1092               | 1154               | 1163               | 1381               | 1092               |
| $A_s$ , А/см      | 350                | 430                | 400                | 370                | 380                | 340                | 380                |
| $B_\delta$ , Тл   | 0,81               | 0,74               | 0,8                | 0,82               | 0,8                | 0,78               | 0,77               |
| $\alpha_e$        | 0,72               | 0,73               | 0,72               | 0,75               | 0,73               | 0,72               | 0,72               |
| $k_f$             | 1,14               | 1,12               | 1,1                | 1,09               | 1,08               | 1,14               | 1,11               |
| $K_W$             | 0,92               | 0,91               | 0,91               | 0,92               | 0,93               | 0,92               | 0,91               |
| Права частина (2) | $46 \cdot 10^{10}$ | $59 \cdot 10^{10}$ | $28 \cdot 10^{10}$ | $37 \cdot 10^{10}$ | $38 \cdot 10^{10}$ | $28 \cdot 10^{10}$ | $19 \cdot 10^{10}$ |

**Проектування синхронних машин за повною потужністю.** При проектуванні нових синхронних генераторів необхідно мати більш точну залежність, що пов'язує номінальні дані, електромагнітні навантаження та головні розміри. Для отримання такої залежності пропонується скористатися формулою повної електромагнітної потужності:

$$S_{em} = m_s \cdot E \cdot I, \quad (3)$$

де  $m_s$  – кількість фаз обмотки статора,  $E$  – діюче значення ЕРС фазної обмотки статора;  $I$  – діюче значення струму фазної обмотки статора.

При синусоїдному змінюванні струму обмотки статора у часі діюче значення ЕРС фазної обмотки статора визначається як

$$E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot N \cdot f \cdot \Phi_m \cdot K_W, \quad (4)$$

де  $N$  – кількість витків фазної обмотки статора;  $f$  – частота мережі;  $\Phi_m$  – максимальне значення магнітного потоку.

За визначенням синхронної машини частота мережі  $f$  визначає номінальну частоту обертання синх-

амперах; частота обертання  $n_N$  – в обертах за хвилину; магнітна індукція  $B_\delta$  – в теслах; лінійне навантаження  $A_s$  – в амперах на сантиметр; розміри  $d_s$  та  $l_s$  – у міліметрах.

Для перевірки адекватності запропонованої залежності використовувались технічні дані з розрахункових формулярів синхронних генераторів середньої потужності 16-го та 17-го габаритів, що були спроектовані та виготовлялись Харківським електромеханічним заводом (ХЕМЗ) до 2000 року (табл. 1). Перевірка проводилась за значенням  $6,1 \cdot 10^{10}$ , якому повинно дорівнювати співвідношення між номінальними даними, головними розмірами та електромагнітними навантаженнями:

$$6,1 \cdot 10^{10} = \frac{\alpha_e \cdot k_f \cdot K_W \cdot B_\delta \cdot A \cdot d_s^2 \cdot l_s \cdot n_N}{S_N}. \quad (2)$$

Результати розрахунку показали, що в жодному випадку значення  $6,1 \cdot 10^{10}$  не дотримано. Крім того, розкид отриманих значень від середнього сягає 97 %. Тому це значення не може використовуватися як машинна постійна для даного класу електричних машин.

Формулу (1) не можна використовувати при виборі електромагнітних навантажень та головних розмірів синхронних машин середньої потужності. Цей висновок має непряме підтвердження в [5], де виявлено порушення принципу геометричної подібності для синхронних машин середньої потужності.

ронної машини

$$n_N = \frac{60f}{p}, \quad (5)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів.

Максимальне значення магнітного потоку

$$\Phi_m = B_{\delta av} \cdot \tau_p \cdot l_s, \quad (6)$$

де  $B_{\delta av}$  – середнє значення магнітної індукції на полюсному кроці  $\tau_p$  при синусоїдному розподілі магнітного поля у повітряному проміжку.

При синусоїдній формі розподілу магнітного поля в повітряному проміжку

$$B_{\delta av} = \frac{2}{\pi} B_{\delta m}, \quad (7)$$

де  $B_{\delta m}$  – амплітудне значення магнітної індукції в повітряному проміжку (рис. 1).

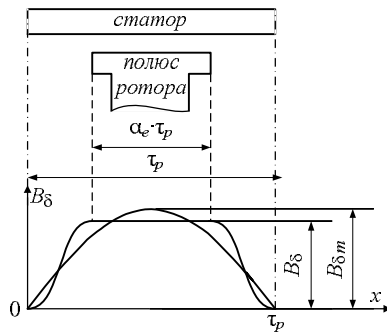


Рисунок 1 – Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку в поперечному перерізі синхронної явнопольосної машини

При проектуванні електричних машин використовується значення магнітної індукції під полюсним наконечником  $B_{\delta}$ , коли розподіл магнітного поля в повітряному проміжку має форму криволінійної трапеції (див. рис. 1).

Значення магнітних індукцій  $B_{\delta}$  та  $B_{\delta m}$  пов'язуються коефіцієнтом форми магнітного поля в повітряному проміжку  $k_f$ :

$$B_{\delta m} = k_f \cdot B_{\delta}. \quad (8)$$

Крім того, необхідно враховувати, що магнітна індукція величиною  $B_{\delta}$  діє не на всьому полюсному кроці, а тільки на його частині довжиною  $\alpha_e \cdot \tau_p$  (див. рис. 3)

При створенні формули машинної постійної було введено величину лінійного навантаження статора як кількість струму на одиницю довжини лінії, уздовж

якої розташовано обмотку статора. Діюче значення струму фазної обмотки статора  $I$  виражається через величину лінійного навантаження статора  $A_s$ :

$$I = \frac{A_s \cdot \pi d_s}{m_s \cdot 2N}. \quad (10)$$

Підставляючи (4) – (10) до (3) та виконуючи деякі перетворення, отримується математичний зв'язок між номінальними даними, електромагнітними навантаженнями та головними розмірами синхронної машини, якщо всі величини виражаються в одиницях вимірювання SI:

$$S_{em} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot \alpha_e \cdot k_f \cdot K_w \cdot B_{\delta} \cdot A_s \cdot d_s^2 \cdot l_s \cdot n_N. \quad (11)$$

Перетворюючи (11) до вигляду (1) отримується

$$\frac{d_s^2 \cdot l_s \cdot n_N}{S_{em}} = \frac{60\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{1}{\alpha_e \cdot k_f \cdot K_w \cdot B_{\delta} \cdot A_s} \quad (12)$$

або переводячи одиниці вимірювання до таких, що застосовувалися в (1),

$$\frac{d_s^2 \cdot l_s \cdot n_N}{S_{em}} = \frac{8,6 \cdot 10^{10}}{\alpha_e \cdot k_f \cdot K_w \cdot B_{\delta} \cdot A_s}. \quad (13)$$

Порівнюючи номінальну повну потужність синхронних машин  $S_N$ , наведеною в табл. 1, з потужністю  $S_{em}$ , розрахованою за (11), можна зробити висновок, що спроектовані машини є «недовикористаними» щонайменше в 2 рази (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняння номінальних потужностей синхронних машин

| Параметр                | Значення |      |      |      |      |      |     |
|-------------------------|----------|------|------|------|------|------|-----|
| $S_N$ з табл. 1, кВ·А   | 300      | 315  | 375  | 380  | 430  | 440  | 500 |
| $S_{em}$ за (11), кВ·А, | 1480     | 1965 | 1083 | 1451 | 1674 | 1310 | 999 |
| $S_{em} / S_N$          | 4,93     | 6,24 | 2,89 | 3,82 | 3,89 | 2,98 | 2   |

Перевищення розрахованої потужності над реальною можна пояснити тепловим навантаженням та вимогами виробництва.

Обмеження рівня теплового навантаження обмотки статора не враховується в (11), але примушує зменшувати густину струму при проектуванні, що призводить до зменшення вихідної потужності.

Зовнішній та внутрішній діаметри статора можуть збільшуватися для забезпечення можливості розміщення обмотки збудження на явновражених полюсах ротора. Тому що для синхронних машин середньої потужності мінімальна відстань між котушками обмотки збудження поруч розташованих полюсів повинна бути не меншою 7 мм (рис. 2).

Методика проектування геометрії осердь статора та ротора до останнього часу була прив'язана до штампів, існуючих на виробництві. Геометрія магнітопроводу (зовнішній та внутрішній діаметри статора, кількість та розміри зубців статора, висота спинки осердя статора, форма полюсних наконечників та розміри полюсів ротора) серій синхронних машин, які були створені в 60–70 роках 20 століття, визначалася штампами, які замовляли на верстатобудівних підприємствах. Впровадження технології лазер-

ного різання металів дозволило вільно обирати геометрію магнітопроводу електричних машин.

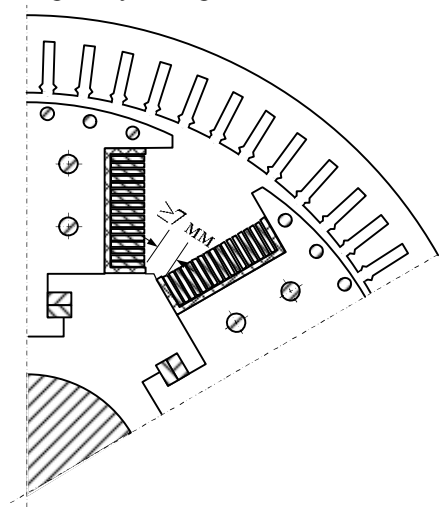


Рисунок 2 – Поперечний переріз активної частини шестипольосної синхронної машини з шихтованим корпусом ротора на одному полюсному кроці

При проектуванні нових синхронних машин можна вважати, що потужність  $S_{em}$ , яка отримана за (11), є мак-

симально можливою номінальною повною потужністю при обраних головних розмірах та електромагнітних навантаженнях.

**Рекомендації з вибору головних розмірів високочастотних синхронних генераторів середньої потужності.** Перед початком проектування будь-якої електричної машини необхідно узгодити технічне завдання, де зазначаються номінальні вихідна потужність та частота обертання.

Номінальна вихідна потужність синхронного генератора для автономної енергетичної установки визначається сумарною потужністю споживачів електричної енергії, які будуть жити від зазначеного генератора.

Номінальна частота обертання синхронного генератора  $n_N$  обирається залежно від частоти обертання, яку забезпечує приводний механізм. Частота обертання  $n_N$  та частота мережі  $f$  визначають кількість полюсів синхронного генератора  $2p$  за (5) (табл. 3). Наприклад, газова турбіна, яка використовується в суднових системах, має частоту обертання до 15000 об/хв. Найближчою синхронною частотою обертання є значення 12000 об/хв. При номінальній частоті 200 Гц синхронний генератор буде двополюсним, а при частоті 400 Гц – чотириполюсним з номінальною частотою обертання 12000 об/хв.

Таблиця 3 – Шкала частот обертання синхронних машин

| Кількість полюсів $2p$ | Частота обертання $n_N$ , об/хв, при частоті $f$ |        |        |        |
|------------------------|--|--------|--------|--------|
|                        | 50 Гц  | 100 Гц | 200 Гц | 400 Гц |
| 2                      | 3000   | 6000   | 12000  | 24000  |
| 4                      | 1500   | 3000   | 6000   | 12000  |
| 6                      | 1000   | 2000   | 4000   | 8000   |
| 8                      | 750  | 1500   | 3000   | 6000   |
| 10                     | 600  | 1200   | 2400   | 4800   |
| 12                     | 500  | 1000   | 2000   | 4000   |
| 14                     | 428,6  | 857,1  | 1714,3 | 3428,6 |
| 16                     | 375  | 750    | 1500   | 3000   |
| 18                     | 333,3  | 666,7  | 1333,3 | 2666,7 |
| 20                     | 300  | 600    | 1200   | 2400   |

В рекомендаціях з проектування синхронних машин пропонується вибирати коефіцієнт  $\alpha_e$  з діапазону 0,68–0,73. Але багаторічний досвід проектування синхронних машин середньої потужності довів, що оптимальним значенням коефіцієнта  $\alpha_e$  є величина 0,72.

Коефіцієнт  $k_f$  в синхронних явнополюсних машинах є функцією розкриття повітряного проміжку, відношення повітряного проміжку до полюсного кроку, еквівалентного коефіцієнту дуги полюса ротора. Тобто коефіцієнт  $k_f$  визначається формою повітряного проміжку. В синхронних неявнополюсних машинах коефіцієнт  $k_f$  визначається співвідношенням обмотаної та необмотаної частин ротора (частини поверхні ротора, де розміщено обмотку, до частини поверхні ротора без обмотки). Для максимального наближення форми розподілу магнітного поля в повітряному проміжку до синусоїдної ( $k_f = 1,0$ ) рекомендується обирати явнополюсний ротор та моде-

лювати форму полюсних наконечників за допомогою чисельних методів розрахунку магнітного поля.

Для двошарових обмоток з цілою або дробовою кількістю пазів на полюс і фазу та зі скороченням кроку обмотки на 0,83 полюсного кроку коефіцієнт  $K_W$  становить 0,92.

Спираючись на технічні дані вже спроектованих синхронних машин середньої потужності (див. табл. 1), можна вважати, що добуток  $B_\delta \cdot A_s$  становить 300 Тл·А/см.

На основі (11) створено рекомендації у вигляді сімейства залежностей щодо вибору головних розмірів високочастотних синхронних генераторів. Для частот обертання, на яких можуть працювати синхронні генератори при частотах 100, 200, 400 Гц (див. табл. 3), визначено залежності розрахункового об'єму машини  $d_s^2 \cdot l_s$  від номінальної повної потужності  $S_N$  (рис. 3).

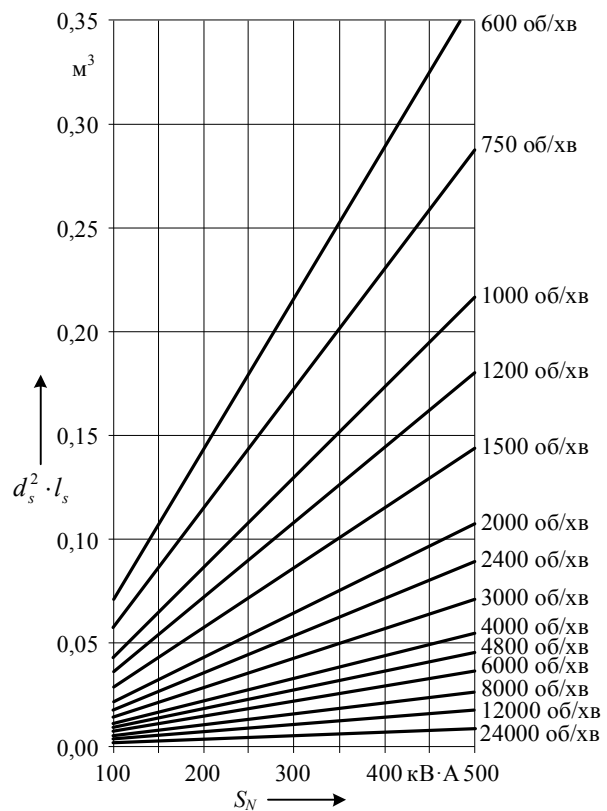


Рисунок 3 – Залежності розрахункового об'єму синхронного генераторів від номінальної повної потужності при різних частотах обертання

Спираючись на величину розрахункового об'єму  $d_s^2 \cdot l_s$ , вибираються величини діаметру  $d_s$  та довжини  $l_s$ , що надалі вплине на габаритні розміри синхронного генератора. Тому при виборі величин  $d_s$  та  $l_s$  необхідно зважати на умови розташування синхронного генератора в автономній енергетичній установці.

Для попереднього визначення внутрішнього діаметру статора в електричних машинах використовується відношення розрахункової довжини осердя статора до його внутрішнього діаметра  $\lambda = l_s / d_s$ .

У синхронних машин промислової частоти це відношення знаходиться в межах 1,1–1,3 (див. табл. 1).

Тоді розрахунковий об'єм високочастотного синхронного генератора

$$d_s^2 \cdot l_s = \lambda \cdot d_s^3. \quad (14)$$

Наприклад, якщо проектується генератор номінальною потужністю 400 кВ·А та номінальною частотою обертання 24000 об/хв, з рис. 3 визначається розрахунковий об'єм  $d_s^2 \cdot l_s$ , який дорівнюватиме 0,0072 м<sup>3</sup>. Внутрішній діаметр статора  $d_s$ , визначений за (14) при  $\lambda = 1,3$  становитиме 177 мм, а розрахункова довжина осердя статора  $l_s = 230$  мм.

При визначенні внутрішнього діаметра статора необхідно зважати на величину зовнішнього діаметра ротора  $d_r$ . Максимально можлива величина зовнішнього діаметра ротора  $d_{r \max}$  обмежується вимогами механічної міцності матеріалу, з якого виготовлено ротор.

Згідно з [1] механічна міцність неявнополюсного ротора, виготовленого з поковки, обмежується величиною лінійної швидкості точки на поверхні ротора 400 м/с, явнополюсного ротора з шихтованими полюсами – 250 м/с. Користуючись співвідношенням між лінійною швидкістю  $v$  (в метрах за секунду), діаметром ротора  $d_r$  (в міліметрах) та частотою обертання (в обертах за хвилину)

$$v = \frac{\pi d_r \cdot n}{6 \cdot 10^4}, \quad (15)$$

отримано формули, які визначають максимально можливий діаметр ротора  $d_r$  при заданій номінальній частоті обертання  $n_N$  за умовами механічної міцності неявнополюсного та явнополюсного роторів відповідно:

$$d_{r \max} = \frac{7,64 \cdot 10^6}{n_N} \quad \text{та} \quad d_{r \max} = \frac{4,77 \cdot 10^6}{n_N}. \quad (16)$$

Згідно з [7] максимально можливий діаметр ротора за умовами механічної міцності визначається як

$$d_{r \max} = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{1}{n_N} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho \cdot k_s}}, \quad (17)$$

де  $\sigma_y$  – межа плинності матеріалу ротора, для поковок становить 500–700 МПа, для листової електротехнічної сталі – 300–450 МПа;  $\rho$  – густина матеріалу ротора, для сталі становить 7800 кг/м<sup>3</sup>,  $k_s$  – коефіцієнт безпеки (коефіцієнт запасу міцності), для газових турбін дорівнює 3 [7].

Для попереднього прикладу максимальний діаметр ротора, визначений за (16), становитиме 318 мм для неявнополюсного або 199 мм для явнополюсного роторів. Максимальний діаметр неявнополюсного та явнополюсного роторів, визначений за (17), для значень межі плинності  $\sigma_y$  700 МПа та 450 МПа становитиме 138 мм та 110 мм відповідно. Отримані значення за (16) та (17) суттєво різняться.

Визначення попереднього значення внутрішнього діаметра статора та максимального діаметра ротора потребує подальшого дослідження, яке спиратиметься на достовірні дані добре спроектованих (well-design) високочастотних синхронних машин.

Подальше проектування високочастотного синхронного генератора ведеться звичайним порядком: проектування статора з обмоткою, розрахунок величини та вибір форми повітряного проміжку, проектування ротора, магнітний розрахунок, вибір демпферної обмотки, проектування обмотки збудження, розрахунок характеристик.

У синхронних генераторів потужністю до 100 кВ·А при частоті більшій за 200 Гц та кількості полюсів більшій за 10 розміри спинки осердя статора визначаються не значенням магнітної індукції (як у класичній методиці проектування статора), а вимогами механічної міцності листів осердя статора через надмірно тонку спинку осердя статора. При забезпеченні цих вимог висоту спинки статора доводиться збільшувати, що призведе до збільшення розмірів синхронного генератора в цілому.

Перевіркою правильності визначених головних розмірів та електромагнітних навантажень є виконання вимог за енергетичними характеристиками та тепловим станом синхронного генератора. При виконанні всіх цих вимог синхронний генератор вважається спроектованим правильно.

**Висновки.** З розширенням меж застосування перетворювальної техніки з'явилась необхідність у створенні синхронних генераторів непромислової частоти.

Натепер немає рекомендацій щодо створення високочастотних синхронних генераторів через обмежену кількість створених електричних машин такого виду. Існуюча методика проектування високочастотних синхронних генераторів через машинну постійну не дає точних рекомендацій щодо обрання головних розмірів синхронного генератора – внутрішнього діаметру статора та його довжини.

Запропонований підхід до вибору головних розмірів, який засновано на формулі повної потужності генератора, не містить припущень при перетворенні ЕРС та струму обмотки статора до магнітної індукції в повітряному проміжку та лінійного навантаження статора відповідно.

Отримані залежності дозволяють на початковому етапі проектування визначитись з частотою обертання та кількістю полюсів синхронного генератора, внутрішнім діаметром статора та довжиною осердя статора.

Отримані рекомендації дозволяють сформувати технічне завдання та розпочати проектування високочастотного синхронного генератора для автономної енергетичної установки.

#### Список літератури

1. Arkkio A. Induction and permanent-magnet synchronous machines for high-speed applications / A. Arkkio, T. Jokinen, and E. Lantto // Proc. 2005 8th International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China. –2005. – pp. 871-876.
2. Zheng H. High Frequency AC Power Systems. (Doctoral dissertation). – University of South Carolina – Columbia. – 2014. – 101 p. Режим доступу: <http://scholarcommons.sc.edu/etd/2684>. – Дата звертання : 04 лютого 2019.
3. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. Под ред. И. П. Копылова. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

4. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : учеб. пособие для студентов вузов / В. А. Балагуров – М. : «Высшая школа», 1982. – 282 с.
5. Загирняк М. В. Оценка электрических машин и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера / М. В. Загирняк, В. В. Прус, Б. И. Невзлин // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – № 5. – С. 32–40.
6. Vijlee S. Z. A. Directly-Coupled Gas Turbine Permanent Magnet Generator Sets for Prime Power Generation On Board Electric Ships / S. Z. Vijlee, A. Ouroua, L. N. Domaschk, J. H. Beno // 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Arlington, VA. – 2007. – pp. 340-347. doi: 10.1109/ESTS.2007.372108.
7. Kolpakchyan P.G. High speed generator for gas microturbine installations / P. G. Kolpakchyan, V. I. Parshukov, A. R. Shaikhiev, A. E. Kochin, M. S. Podbereznyaya // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Volume 12. – Issue 23. – P. 13874–13878.
- Available at: <http://scholarcommons.sc.edu/etd/2684>. (accessed 04.02.2019).
3. Kopyilov I. P., Goryainov F. A., Klokov B. K. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Yurait Publ, 2011, 767 p.
4. Balagurov V. A. *Proektirovanie special'nykh jelektricheskikh mashin peremennogo toka : ucheb. posobie dlja studentov vuzov* [Design of special electric machines for AC: proc. allowance for university students]. Moscow, Vysshaja shkola, 1982, 282 p.
5. Zagirnyak M., Prus V., Nevzlin B. *Ocenka jelektricheskikh mashin i ih serij s ispol'zovaniem funkcional'nykh zavisimostej parametrov ot obshhennogo linejnogo razmera* [Estimation of Electric Machines and Their Series Using Parameter Functional Dependences on the Generalized Linear Size] // *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2013, no. 5, pp. 32–40.
6. Vijlee S. Z., Ouroua A., Domaschk L. N., Beno J. H. Directly-Coupled Gas Turbine Permanent Magnet Generator Sets for Prime Power Generation On Board Electric Ships / 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Arlington, VA, 2007, pp. 340-347. doi: 10.1109/ESTS.2007.372108.
7. Kolpakchyan P.G., Parshukov V. I., Shaikhiev A. R., Kochin A. E., Podbereznyaya M. S. High speed generator for gas microturbine installations / *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 12, Issue 23, 2017, pp. 13874–13878/

#### References (transliterated)

1. Arkkio A., Jokinen T., Lantto E. Induction and permanent-magnet synchronous machines for high-speed applications" / *Proc. 2005 8th International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, China, 2005, pp. 871-876.
2. Zheng H. High Frequency AC Power Systems. (Doctoral dissertation), University of South Carolina – Columbia, 2014, 101 p.

Надійшла (received) 27.02.2019

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Особливості проектування високочастотних синхронних генераторів для автономних енергетичних установок / О. Ю. Юр'єва, В. П. Шайда** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 56-61. – Библиогр: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

**Особенности проектирования высокочастотных синхронных генераторов для автономных энергетических установок / Е. Ю. Юрьева, В. П. Шайда** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 56-61. – Библиогр: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

**Design Features of High-frequency Synchronous Generators for Autonomous Power Installations / O. Yu. Yurieva, V. P. Shayda** // *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 56-61. – Bibliogr: 7. – ISSN 2409-9295.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Юр'єва Олена Юрійівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-68-44, e-mail: [ele6780@gmail.com](mailto:ele6780@gmail.com).

**Юрьева Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел. (057)707-68-44, e-mail: [ele6780@gmail.com](mailto:ele6780@gmail.com).

**Yurieva Olena Yuriyivna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel. +38 (057) 707-68-44, e-mail: [ele6780@gmail.com](mailto:ele6780@gmail.com).

**Шайда Віктор Петрович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-68-44; e-mail: [viktor-shayda@ukr.net](mailto:viktor-shayda@ukr.net).

**Шайда Виктор Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел. (057)707-68-44, e-mail: [viktor-shayda@ukr.net](mailto:viktor-shayda@ukr.net).

**Shaida Viktor Petrovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel. +38 (057) 707-68-44, e-mail: [viktor-shayda@ukr.net](mailto:viktor-shayda@ukr.net).