

В.М. ХАЙ

РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯВНОПОЛЮСНИХ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ГАЗОВИХ ЧИ ДИЗЕЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Впровадження розподіленої генерації приносить ряд переваг такі як підвищення стійкості мережі, енергонезалежність, використання відновлювальних джерел енергії, розвиток локальної економіки регіону, створення нових робочих місць та стимули для розвитку інновацій. У цьому контексті перспективним рішенням для систем розподіленої генерації є використання добре відомих та відносно конструктивно простих синхронних генераторів. Для дослідження роботи явнопольосних синхронних генераторів газової чи дизельної електростанції у статті створені алгоритми розрахунку статичних характеристик (неробочого ходу, кутової, V-подібної, регульовальної та зовнішньої) та здійснена реалізація їх у вигляді комп'ютерних програм. Вхідними даними для комп'ютерного моделювання статичних характеристик явнопольосних синхронних генераторів газової чи дизельної електростанції використали технічні показники синхронного безщіткового трифазного генератора Stamford P1734B (Великобританія) з дизельним двигуном YANMAR AY40L-ET (Японія), який в умовах війни часто використовується у розподіленій генерації. У статті є наведені результати розрахунку статичних характеристик вище наведеного явнопольосного генератора за допомогою математичної моделі та комп'ютерного моделювання. Отримані результати комп'ютерного моделювання доцільно використовувати як науковцями, які займаються дослідженням електричних машин так і спеціалістами, які займаються експлуатацією та проектуванням електричних машин.

Ключові слова: явнопольосний синхронний генератор, алгоритми розрахунку, статичні характеристики.

V.M. KHAI

STEADY-STATE CHARACTERISTICS COMPUTATION OF SALIENT-POLE SYNCHRONOUS GENERATORS IN GAS- AND DIESEL-ENGINE GENERATOR SETS

The implementation of distributed generation provides a number of advantages, such as increased grid stability, energy independence, renewable energy sources usage, regional economy development, jobs creation, and incentives for innovation development. In this context, the use of well-known and structurally simple synchronous generators is a promising solution for distributed generation systems. To study the operation of salient-pole synchronous generators of gas or diesel power plants, algorithms for calculating static characteristics (no-load, angular, V-shaped, regulation, and external characteristics) were developed in the article and implemented in the form of computer programs. The input data for computer modeling of the static characteristics of salient-pole synchronous generators of gas or diesel power plants were the technical specifications of the synchronous brushless three-phase generator Stamford P1734B (United Kingdom) with the diesel engine YANMAR AY40L-ET (Japan), which under wartime conditions is often used in distributed generation. The article presents the results of calculating the static characteristics of the above-mentioned salient-pole generator using a mathematical model and computer simulation. The obtained computer simulation results can be used both by researchers engaged in the study of electrical machines and by specialists involved in the operation and design of electrical machines.

Keywords: salient-pole synchronous generator, calculation algorithms, steady-state characteristics.

Постановка задачі. Для розрахунку статичних характеристик (неробочого ходу, кутової, V-подібної, регульовальної та зовнішньої) явнопольосного синхронного генератора (ЯСГ) газової чи дизельної електростанції необхідно створити алгоритми розрахунку та реалізувати їх у вигляді комп'ютерних програм.

Актуальність дослідження. Поряд з перевагами, які приносить впровадження розподіленої генерації, як от підвищення стійкості мережі, енергонезалежність, використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), розвиток локальної економіки регіону, створення нових робочих місць та стимули для розвитку інновацій, існує також ряд викликів, на які потрібно звернути увагу, а саме:

- наявність достатньої кількості маневрових потужностей, які будуть компенсувати підвищене споживання електроенергії у години пікових навантажень та мінливий характер генерації ВДЕ;

- у розподіленій генерації, де широко використовуються ВДЕ, такі як сонячні та вітрові електростанції, інерційність часто відсутня або значно знижена, що підвищує ризики нестабільності.

Використання добре відомих та відносно конструктивно простих синхронних генераторів може стати одним із варіантів вирішення цих проблем.

На ринку представлений широкий спектр генераторних установок різної потужності, електрична частина яких базується на синхронній машині. Це можуть бути

поршневі чи турбінні установки, які працюють спалюючи дизель, бензин, природний газ, чи біогаз. Сучасні підходи та технології дозволяють зменшити, або нівелювати недоліки даних установок: такі, як шум, викиди в атмосферу відпрацьованих газів чи синхронізацію генератора з мережею.

Газові та дизельні електростанції з синхронними генераторами доступні в широкому діапазоні потужностей і можуть бути використані як для аварійного резервування, так і для повного енергозабезпечення підприємства на тривалий час. Незважаючи на вищу вартість експлуатації, газові чи дизельні генератори залишаються популярними завдяки їхній високій потужності, надійності, простоті обслуговування і широкій доступності газу чи дизельного палива навіть в умовах війни.

Розроблені у статті алгоритми розрахунку статичних характеристик (неробочого ходу, кутової, V-подібної, регульовальної і зовнішньої) ЯСГ, їхня реалізація на комп'ютері дозволять покращувати експлуатацію явнопольосних синхронних генераторів.

Метою статті є створення алгоритмів розрахунку статичних характеристик та реалізація їх на комп'ютері.

Об'єктом дослідження є газові та дизельні електростанції з синхронними явнопольосними генераторами.

Предметом дослідження є статичні

© В.М. Хай, 2026

характеристики ЯСГ – неробочого ходу, кутової, V-подібної, регулювальної і зовнішньої.

Аналітичний огляд. Математична модель ЯСГ містить сформовані на основі законів фізики і з урахуванням вихідних допущень системи рівнянь, необхідної і достатньої для досягнення поставленої мети, і аналітичне перетворення цієї системи, яке забезпечує оптимальність розв'язування задачі на комп'ютері [1, 4, 5].

Розроблена у [3] математична модель розрахунку та оптимізації обмотки збудження явнополюсної синхронної машини дозволяє проектувати однорядну обмотку збудження з метою досягнення поставлених проєктувальником вимог з урахуванням призначення машини та її вартісних показників.

Розроблена у роботі [2] математична модель розрахунку пускових характеристик явнополюсного синхронного двигуна та її реалізація на комп'ютері дозволяють досліджувати вплив параметрів пускової обмотки на пускові властивості двигуна та оптимізувати ці параметри з метою досягнення заданих пускових властивостей.

Аналіз літератури показав, що задовільною для більшості практичних задач точність розрахунку статичних характеристик досягається за допомогою математичної моделі насиченого ЯСГ, основаної на розрахунку робочого магнітного поля в одновимірній постановці [1, 4, 10,11].

Кардинальним вирішенням проблеми підвищення точності розрахунку статичних характеристик насичених ЯСГ можливе на основі розрахунків електромагнітних полів у двовимірній постановці [7, 8, 13, 14].

Вступ. У роботі розроблені алгоритми розрахунку статичних характеристик (неробочого ходу, кутової, V-подібної, регулювальної і зовнішньої) ЯСГ, їхня реалізація на комп'ютері:

1) характеристики неробочого ходу $E = E(I_f)$, тобто залежності діючого значення фазної ЕРС від струму збудження;

2) кутової характеристики $M = M(\Theta)$, $I_f = const$, тобто залежності електромагнітного моменту від кута навантаження при незмінному струмі збудження;

3) V-подібної характеристики $I = I(I_f)$, для $P = const$, тобто залежності струму статора від струму збудження при незмінній потужності.

4) регулювальної характеристики синхронного генератора $I = I(I_f)$, для $U = const$, $\cos \varphi = const$, тобто залежності струму статора від струму збудження при незмінній напрузі;

5) зовнішньої характеристики синхронного генератора $U = U(I)$, для $I_f = const$, $\cos \varphi = const$, тобто залежності напруги статора від струму статора при незмінному струмі збудження.

Розрахунок характеристики неробочого ходу

Розрахунок характеристики неробочого ходу можна здійснювати двома шляхами:

- 1) задатися E і відшукати I_f ;
- 2) задатися I_f і відшукати E .

За неробочого ходу $\Theta = 0$, $\vec{I} = 0$ рівняння (2) [1] електричного стану набуває вигляду

$$\omega \Omega \vec{\Psi} + \vec{U} = 0. \quad (1)$$

Оскільки при неробочому ході фазна напруга на застискачах обмотки статора дорівнює наведеній в обмотці електрорушійній силі E , то рівняння (5) [1] набуває вигляду

$$\vec{U} = E \check{1}_2 \vec{D}(\Theta); \quad (2)$$

Розрахунок характеристики неробочого ходу виконуватимемо, задаючись значенням E і відшукуючи струм I_f збудження, тобто у цьому випадку вектор напруг \vec{U} відомий.

Доповнимо рівняння (1) рівняннями (18) [1], (13) [1] магнітного стану, характеристиками (19) [1], (9) [1], (10) [1] намагнічування елементів магнітопроводу ЯСМ, формулою (17) [1] для обчислення потоку Φ_a та формулою (22) [1] для обчислення потокозчеплень, тобто

$$2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta \vec{B}_\delta - \vec{C} F_a - \vec{C} F_f = 0; \quad (3)$$

$$\Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f} (2w_f I_f - F_f) = 0; \quad (4)$$

$$\vec{F}_z = \vec{F}_z(\vec{B}_\delta); \quad (5)$$

$$F_a = F_a(\Phi_a); \quad (6)$$

$$F_f = F_f(\Phi_f); \quad (7)$$

$$\Phi_a = c_\Phi \vec{C}_T \vec{B}_\delta; \quad (8)$$

$$\vec{\psi} = c_\psi \Xi_T \vec{B}_\delta. \quad (9)$$

Розв'язуючи нелінійну систему алгебричних рівнянь (1), (3)–(9) методом Ньютона, отримуємо на i -тій ітерації лінійну систему алгебричних рівнянь

$$Z^{(i-1)} \Delta \vec{X}_n^{(i)} = -\vec{f}^{(i-1)}, \quad (10)$$

де $Z^{(i-1)}$ – значення матриці

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & c_\psi \omega \Omega \Xi_T & 0 \\ 2w_f \vec{C} & -\rho_z - \delta' - c_\Phi R_{ma} \vec{C} \vec{C}_T & -\vec{C} R_{mf} \\ -\lambda_{\sigma f} 2w_f & -c_\Phi \vec{C}_T & 1 + \lambda_{\sigma f} R_{mf} \end{bmatrix}$$

обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих;

$\Delta \vec{X}_n^{(i)} = [\Delta I_f^{(i)} \quad \Delta \vec{B}_\delta^{(i)} \quad \Delta \Phi_f^{(i)}]^T$ – вектор поправок первинних невідомих на i -тій ітерації;

$\vec{f}^{(i-1)}$ – значення вектора

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} \vec{f}_e \\ \vec{f}_{m1} \\ \vec{f}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \Omega \vec{\psi} + \vec{U} \\ 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta \vec{B}_\delta - \vec{C} F_a - \vec{C} F_f \\ \Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f} (2w_f I_f - F_f) \end{bmatrix}$$

нев'язок, обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих.

Для розрахунку характеристики неробочого ходу необхідно задатися рядом значень E , наприклад, $E = 0; 0, I U_n; 0, 2 U_n; \dots; I, 2 U_n$ (де U_n – номінальна фазна напруга), і для кожного значення E за формулою (2) обчислити вектор \vec{U} напруг та розв'язати нелінійну систему алгебричних рівнянь (1), (3) – (9) методом Ньютона за алгоритмом, аналогічним до описаного вище.

Розрахунок кутової характеристики. Для розрахунку кутової характеристики необхідно задатися значенням фазної напруги U статора, рядом значень кута Θ навантаження і для кожного значення Θ обчислити вектор \vec{U} напруг за формулою (5) [1] та розв'язати систему рівнянь, яка складається з рівняння (2) [1] електричного стану, рівнянь (18) [1], (13) [1] магнітного стану, характеристик (19), (9), (10) [1] намагнічування елементів магнітопроводу ЯСМ та формул (17) [1], (22) [1], (24) [1] для обчислення потоку Φ_a , потокозчеплень та електромагнітного моменту, тобто

$$\omega\Omega\vec{\Psi} + R\vec{I} + \vec{U} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{3wk_{об}}{\pi p} \vec{\Xi}\vec{I} + 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta\vec{B}_\delta - \vec{C}F_a - \vec{C}F_f = 0; \quad (12)$$

$$\Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f}(2w_f I_f - F_f) = 0; \quad (13)$$

$$\vec{F}_z = \vec{F}_z(\vec{B}_\delta); \quad (14)$$

$$F_a = F_a(\Phi_a); \quad (15)$$

$$F_f = F_f(\Phi_f); \quad (16)$$

$$\Phi_a = c_\phi \vec{C}_T \vec{B}_\delta; \quad (17)$$

$$\vec{\psi} = L_\sigma \vec{I} + c_\psi \vec{\Xi}_T \vec{B}_\delta; \quad (18)$$

$$M = -\frac{3}{2} p \vec{\psi}_T \Omega \vec{I}. \quad (19)$$

Розв'язуючи нелінійну систему алгебричних рівнянь (11) – (19) методом Ньютона, отримуємо на i -тій ітерації лінійну систему алгебричних рівнянь

$$Z^{(i-1)} \Delta \vec{X}_n^{(i)} = -\vec{f}^{(i-1)}, \quad (20)$$

де $Z^{(i-1)}$ – значення матриці

$$Z = \begin{bmatrix} \omega\Omega L_\sigma + R & c_\psi \omega\Omega \vec{\Xi}_T & 0 \\ \frac{3wk_{об}}{\pi p} \vec{\Xi} & -\rho_z - \delta' - c_\phi R_{ma} \vec{C}\vec{C}_T & -\vec{C}R_{mf} \\ 0 & -c_\phi \vec{C}_T & I + \lambda_{\sigma f} R_{mf} \end{bmatrix},$$

обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих;

$\Delta \vec{X}_n^{(i)} = \begin{bmatrix} \Delta \vec{I}^{(i)} & \Delta \vec{B}_\delta^{(i)} & \Delta \Phi_f^{(i)} \end{bmatrix}^T$ – вектор поправок первинних невідомих на i -тій ітерації;

$\vec{f}^{(i-1)}$ – значення вектора нев'язок, обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} \vec{f}_e \\ \vec{f}_{m1} \\ \vec{f}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega\Omega\vec{\psi} + R\vec{I} + \vec{U} \\ \frac{3wk_{об}}{\pi p} \vec{\Xi}\vec{I} + 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta\vec{B}_\delta - \vec{C}F_a - \vec{C}F_f \\ \Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f}(2w_f I_f - F_f) \end{bmatrix}.$$

Алгоритм розв'язування нелінійної системи алгебричних рівнянь (11) – (20) аналогічний до алгоритму розрахунку характеристики неробочого ходу.

Розрахунок зовнішньої характеристики. Для розрахунку зовнішньої характеристики необхідно задатися значеннями коефіцієнта $\cos \varphi$ потужності й струму I_f збудження, рядом значень струму I фази статора і для кожного значення I розв'язати нелінійну систему алгебричних рівнянь (25) – (36) [1].

Розв'язуючи нелінійну систему алгебричних рівнянь (25) – (36) [1] методом Ньютона, отримуємо на i -тій ітерації лінійну систему алгебричних рівнянь

$$Z^{(i-1)} \Delta \vec{X}_n^{(i)} = -\vec{f}^{(i-1)}, \quad (21)$$

де $Z^{(i-1)}$ – значення матриці

$$Z = \begin{bmatrix} \check{I}_z \check{D}(\Theta) & c_\psi \omega\Omega \vec{\Xi}_T & 0 & (\omega\Omega L_\sigma + R) I \check{I}_z \check{S}_{d/da}(\alpha) + U \check{I}_z \check{D}_{d/da}(\Theta) \\ 0 & -\rho_z - \delta' - c_\phi R_{ma} \vec{C}\vec{C}_T & -\vec{C}R_{mf} & \frac{3wk_{об}}{\pi p} I \check{E} \check{I}_z \check{S}_{d/da}(\alpha) \\ 0 & -c_\phi \vec{C}_T & I + \lambda_{\sigma f} R_{mf} & 0 \\ I \cos \varphi - \check{I}_r \check{I}_z \check{D}(\Theta) & 0 & 0 & -I \check{U}_T \check{I}_z \check{S}_{d/da}(\alpha) - U \check{I}_r \check{I}_z \check{D}_{d/da}(\Theta) \end{bmatrix}$$

обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих;

$\Delta \vec{X}_n^{(i)} = \begin{bmatrix} \Delta U^{(i)} & \Delta \vec{B}_\delta^{(i)} & \Delta \Phi_f^{(i)} & \Delta \Theta^{(i)} \end{bmatrix}^T$ – вектор поправок первинних невідомих на i -тій ітерації;

$\vec{f}^{(i-1)}$ – значення вектора

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} \vec{f}_e \\ \vec{f}_{m1} \\ \vec{f}_{m2} \\ \vec{f}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega\Omega\vec{\psi} + R\vec{I} + \vec{U} \\ \frac{3wk_{об}}{\pi p} \vec{\Xi}\vec{I} + 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta\vec{B}_\delta - \vec{C}F_a - \vec{C}F_f \\ \Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f}(2w_f I_f - F_f) \\ UI \cos \varphi - \check{U}_T \check{I} \end{bmatrix}$$

нев'язок, обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих.

Розрахунок регулювальної характеристики. Для розрахунку регулювальної характеристики необхідно задатися значеннями коефіцієнта $\cos \varphi$ потужності й напруги U статора, рядом значень струму I фази статора і для кожного значення I розв'язати нелінійну систему алгебричних рівнянь (25) – (36) [1].

Розв'язуючи нелінійну систему алгебричних рівнянь (25) – (36) [1] методом Ньютона, отримуємо на i -тій ітерації лінійну систему алгебричних рівнянь

$$Z^{(i-1)} \Delta \vec{X}_n^{(i)} = -\vec{f}^{(i-1)}, \quad (22)$$

де $Z^{(i-1)}$ – значення матриці

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & c_\psi \omega\Omega \vec{\Xi}_T & 0 & (\omega\Omega L_\sigma + R) I \check{I}_z \check{S}_{d/da}(\alpha) + U \check{I}_z \check{D}_{d/da}(\Theta) \\ 2w_f \vec{C} & -\rho_z - \delta' - c_\phi R_{ma} \vec{C}\vec{C}_T & -\vec{C}R_{mf} & \frac{3wk_{об}}{\pi p} I \check{E} \check{I}_z \check{S}_{d/da}(\alpha) \\ -\lambda_{\sigma f} 2w_f & -c_\phi \vec{C}_T & I + \lambda_{\sigma f} R_{mf} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I \check{U}_T \check{I}_z \check{S}_{d/da}(\alpha) - U \check{I}_r \check{I}_z \check{D}_{d/da}(\Theta) \end{bmatrix}$$

обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих;

$\Delta \vec{X}_n^{(i)} = \begin{bmatrix} \Delta I_f^{(i)} & \Delta \vec{B}_\delta^{(i)} & \Delta \Phi_f^{(i)} & \Delta \Theta^{(i)} \end{bmatrix}^T$ – вектор поправок первинних невідомих на i -тій ітерації;

$\vec{f}^{(i-1)}$ – значення вектора

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} \vec{f}_e \\ \vec{f}_{m1} \\ \vec{f}_{m2} \\ \vec{f}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega\Omega\vec{\psi} + R\vec{I} + \vec{U} \\ \frac{3wk_{об}}{\pi p} \vec{\Xi}\vec{I} + 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta\vec{B}_\delta - \vec{C}F_a - \vec{C}F_f \\ \Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f}(2w_f I_f - F_f) \\ UI \cos \varphi - \check{U}_T \check{I} \end{bmatrix}$$

нев'язок, обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих.

Розрахунок V-подібної характеристики. Розрахунок V-подібної характеристики проводимо, вважаючи $M = const$, оскільки $M = 60P/2\pi n$ і $P = const$ (де n – синхронна швидкість обертання ротора).

Для розрахунку V-подібної характеристики необхідно задатися діючим значенням фазної напруги U статора, рядом значень струму I_f збудження і для кожного значення I_f розв'язати нелінійну систему алгебричних рівнянь

$$\omega\Omega\vec{\Psi} + R\vec{I} + \vec{U} = 0; \tag{23}$$

$$\vec{U} = U \check{1}_2 \vec{D}(\Theta); \tag{24}$$

$$\frac{3wk_{об}}{\pi p} \Xi\vec{I} + 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta\vec{B}_\delta - \vec{C}F_a - \vec{C}F_f = 0; \tag{25}$$

$$\Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f}(2w_f I_f - F_f) = 0; \tag{26}$$

$$\vec{F}_z = \vec{F}_z(\vec{B}_\delta); \tag{27}$$

$$F_a = F_a(\Phi_a); \tag{28}$$

$$F_f = F_f(\Phi_f); \tag{29}$$

$$\Phi_a = c_\Phi \vec{C}_T \vec{B}_\delta; \tag{30}$$

$$\vec{\Psi} = L_\sigma \vec{I} + c_\Psi \Xi_T \vec{B}_\delta; \tag{31}$$

$$M = -\frac{3}{2} p \vec{\Psi}_T \Omega \vec{I}, \tag{32}$$

а діюче значення струму I фази статора обчислити за формулою

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}. \tag{33}$$

Розв'язуючи нелінійну систему алгебричних рівнянь (23) – (32) методом Ньютона, отримуємо на i -тій ітерації лінійну систему алгебричних рівнянь

$$Z^{(i-1)} \Delta \vec{X}_n^{(i)} = -\vec{f}^{(i-1)}, \tag{34}$$

де $Z^{(i-1)}$ – значення матриці Z обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих;

$\Delta \vec{X}_n^{(i)} = [\Delta \vec{I}^{(i)} \quad \Delta \vec{B}_\delta^{(i)} \quad \Delta \Phi_f^{(i)} \quad \Delta \Theta^{(i)}]^T$ – вектор поправок первинних невідомих на i -тій ітерації;

$\vec{f}^{(i-1)}$ – значення вектора

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} \vec{f}_e \\ \vec{f}_{m1} \\ \vec{f}_{m2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega\Omega\vec{\Psi} + R\vec{I} + \vec{U} \\ \frac{3wk_{об}}{\pi p} \Xi\vec{I} + 2w_f I_f \vec{C} - \vec{F}_z - \delta\vec{B}_\delta - \vec{C}F_a - \vec{C}F_f \\ \Phi_f - \Phi_a - \lambda_{\sigma f}(2w_f I_f - F_f) \\ 0 \end{bmatrix}$$

нев'язок, обчислене за $(i-1)$ -им наближенням невідомих.

Результати комп'ютерного моделювання. Дані для розрахунку статичних характеристик (неробочого ходу, кутової, V-подібної, регульовальної і зовнішньої) синхронного безщіткового трифазного генератора **Stamford PI734B** (Великобританія) з дизельним двигуном **YANMAR AY40L-ET** (Японія) наведені у табл. 1, а конструкція зображена на рис. 1.

Таблиця 1 – Технічні показники явнополюсного синхронного генератора Stamford PI734B

Номинальна потужність	1400 кВА
Максимальна потужність	1540 кВА
Тип	синхронний, безщітковий
Вид струму	змінний, трифазний
Система збудження	самозбудження
Напруга	230/400 В
Частота	50 Гц
Коефіцієнт потужності cosφ	0,8
Клас захисту	IP23
Клас ізоляції	H
Кількість полюсів	4
Кількість виводів	12
Діапазон регулювання напруги	+/- 1%
Автоматичний регулятор напруги	AS480

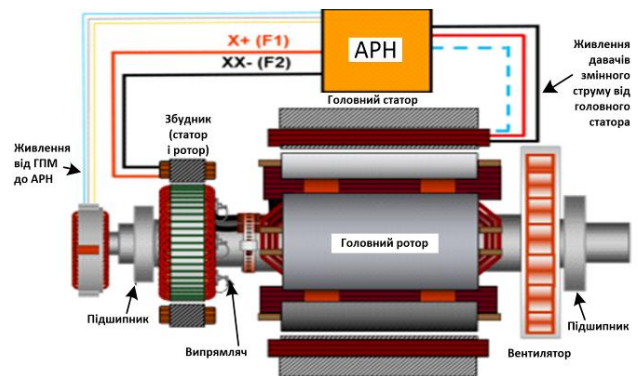


Рис. 1. Конструкція явнополюсного синхронного генератора Stamford PI734B

Генератор змінного струму PI734B збуджується системою збудження від генератора з постійними магнітами (ГПМ). ГПМ має автоматичний регулятор напруги (АРН). Він складається з двох частин: ротора ГПМ та статора ГПМ. Ротор ГПМ встановлений на валу головного ротора генератора, і напруга індуктується в статорі ГПМ під час обертання ротора ГПМ з постійними магнітами. Генерована енергія від статора ГПМ використовується для живлення АРН.

У стандартному генераторі змінного струму АРН живиться від клем генератора. У системах з високими індуктивними навантаженнями, які викликають значний спад напруги статора, перш ніж АРН зможе це компенсувати, АРН коректно не працює, оскільки його вхідна напруга знижується. Це може призвести до ситуацій, коли АРН не в змозі повернути напругу до заданого значення, оскільки напруга на клеммах занадто впала.

Перевага ГПМ полягає у тому, що напруга живлення АРН підтримується майже постійною, що дозволяє АРН швидко відновлювати напругу генератора змінного струму до номінального заданого значення. АРН реагує швидше, зменшуючи перехідні провали напруги, пов'язані з подачею навантаження на генератор змінного струму.

АРН контролює вихідну напругу, вимірюючи напругу з клем генератора та порівнює її зі стабільним опорним значенням. Сигнал різниці напруги потім використовується для регулювання струму збудження

шляхом збільшення або зменшення струму, який подається на статор збудника, що, у свою чергу, призводить до зниження або підвищення напруги на головних клеммах статора.

Система з ГПМ також має перевагу в тому, що для запуску процесу збудження під час пуску не потрібен залишковий магнетизм, тоді як для машин з шунтуванням або з допоміжною обмоткою, якщо залишковий магнетизм втрачено, напруга генератора не наростає.

Але система з ГПМ є дорожчою за шунтуючу або допоміжну систему; вона також збільшує вагу генератора на декілька кілограм, що залежить від потужності. Системи ГПМ розташовуються на задній частині вала генератора і, отже, збільшують його довжину.

Результати розрахунку наведені у табл. 2 – 7 та показані на рис. 2 – 7.

Таблиця 2 – Характеристика неробочого ходу досліджуваного явнопольного синхронного генератора

E^*	в.о.	0,50	0,70	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30
I_f^*	в.о.	0,46	0,65	0,86	1,00	1,23	1,75	2,61

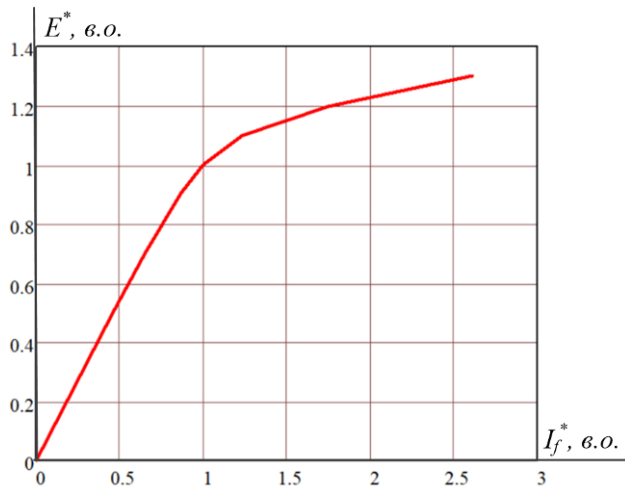


Рис. 2. Характеристика неробочого ходу

Таблиця 3 – Розподіл магнітної індукції при неробочому ході та навантаженні

Кут, рад.	Індукція, Тл		Кут, рад.	Індукція, Тл	
	нероб. хід	навантаж.		нероб. хід	навантаж.
-1.571	-0.013	0.057	0.000	0.807	0.790
-1.451	0.047	0.212	0.136	0.805	0.719
-1.331	0.160	0.501	0.273	0.798	0.640
-1.211	0.283	0.802	0.409	0.785	0.572
-1.091	0.645	1.049	0.545	0.768	0.529
-0.954	0.683	1.034	0.682	0.746	0.509
-0.818	0.718	1.015	0.818	0.718	0.512
-0.682	0.746	0.992	0.954	0.683	0.533
-0.545	0.768	0.965	1.091	0.645	0.567
-0.409	0.785	0.935	1.211	0.283	0.281
-0.273	0.798	0.896	1.331	0.160	0.181
-0.136	0.805	0.849	1.451	0.047	-0.015
0.000	0.807	0.790	1.571	-0.013	-0.118

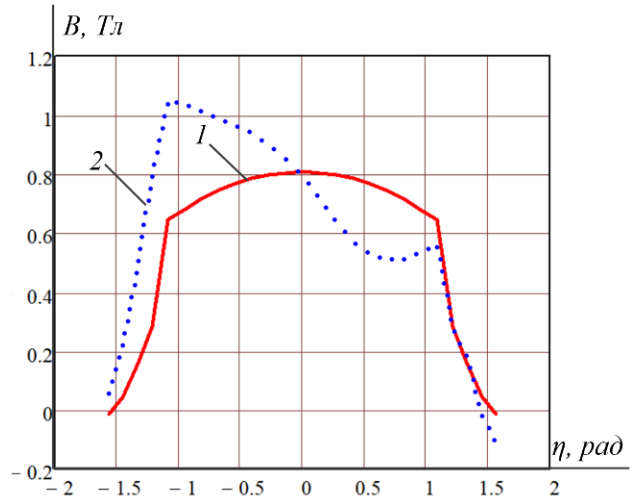


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції при неробочому ході (1) та навантаженні (2)

Таблиця 4 – V-подібні характеристики досліджуваного явнопольного синхронного генератора ($I_f^* = I_f/I_{f0}$, $I^* = I/I_n$)

I_f^* , в.о.	I^* , в.о.	$\cos\phi$	I_f^* , в.о.	I^* , в.о.	$\cos\phi$
при $P=0,50 \cdot P_{ном}$			при $P=0,75 \cdot P_{ном}$		
1,79	0,57	0,70	2,32	0,86	0,70
1,61	0,50	0,80	2,01	0,75	0,80
1,45	0,44	0,90	1,75	0,67	0,90
1,37	0,42	0,95	1,62	0,63	0,95
1,19	0,40	1,00	1,38	0,60	1,00
1,03	0,42	0,95	1,17	0,63	0,95
0,95	0,44	0,90	1,07	0,67	0,90
0,82	0,50	0,80	0,92	0,75	0,80
0,70	0,57	0,70	0,81	0,86	0,70
при $P=P_{ном}$			при $P=1,25 \cdot P_{ном}$		
2,92	1,14	0,70	3,54	1,43	0,70
2,47	1,00	0,80	2,98	1,25	0,80
2,09	0,89	0,90	2,47	1,11	0,90
1,91	0,84	0,95	2,22	1,05	0,95
1,61	0,80	1,00	1,86	1,00	1,00
1,36	0,84	0,95	1,59	1,05	0,95
1,25	0,89	0,90	1,50	1,11	0,90
1,13	1,00	0,80	1,43	1,25	0,80
1,09	1,14	0,70	1,48	1,43	0,70

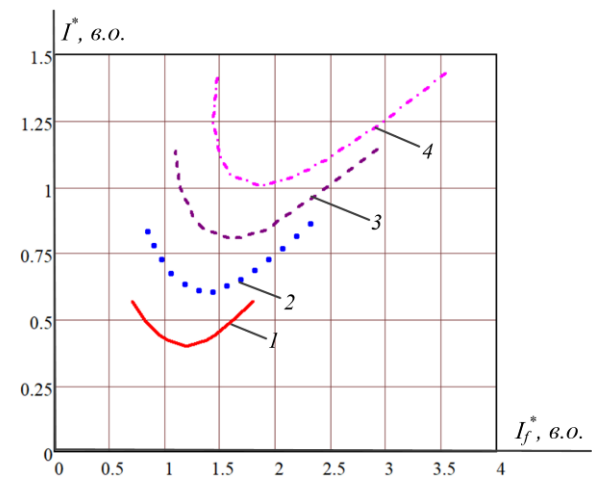


Рис. 4. V-подібні характеристики:
 1 – $P=0,50 \cdot P_{ном}$; 2 – $P=0,75 \cdot P_{ном}$;
 3 – $P=1,00 \cdot P_{ном}$; 4 – $P=1,25 \cdot P_{ном}$;

Таблиця 5 – Кутові характеристики досліджуваного явнopolосного синхронного генератора

θ , ел. град.	$M_{ем}$, в. о.	θ , ел. град.	$M_{ем}$, в. о.
$U=U_{ном}$ та $I_f=1,00 \cdot I_{fном}$			
4,81	0,289	64,88	2,072
14,42	0,773	69,68	2,075
24,03	1,214	88,90	1,971
33,64	1,586	108,10	1,743
43,25	1,844	127,30	1,418
52,86	1,989	146,60	0,988
62,47	2,064	175,40	0,189
$U=U_{ном}$ та $I_f=0,50 \cdot I_{fном}$			
4,81	0,153	64,88	1,107
14,42	0,443	84,10	1,020
24,03	0,695	103,30	0,865
33,64	0,895	122,50	0,668
43,25	1,026	141,80	0,445
52,86	1,094	161,00	0,216
60,07	1,110	180,20	0,009
$U=U_{ном}$ та $I_f=1,50 \cdot I_{fном}$			
4,81	0,412	67,28	3,063
14,42	1,067	72,08	3,067
24,03	1,649	91,31	2,932
33,64	2,157	110,50	2,608
43,25	2,572	129,80	2,122
52,86	2,874	149,00	1,470
62,47	3,040	177,80	0,217

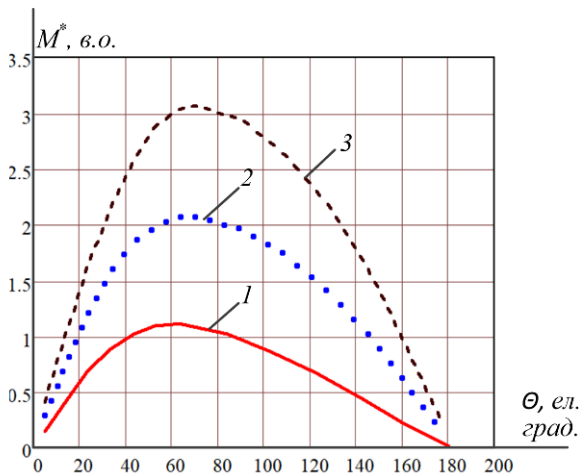


Рис. 5. Кутові характеристики:
1 – $I_f=0,50 \cdot I_{fном}$; 2 – $I_f=1,0 \cdot I_{fном}$; 3 – $I_f=1,50 \cdot I_{fном}$

Таблиця 6 – Регулювальні характеристики досліджуваного явнopolосного синхронного генератора

I_f^* , в.о.	I^* , в.о.	I_f^* , в.о.	I^* , в.о.	I_f^* , в.о.	I^* , в.о.
при $U_1^*=1$, $\cos\varphi=0,8$ ($\varphi>0$)		при $U_1^*=1$, $\cos\varphi=1,0$ ($\varphi=0$);		при $U_1^*=1$, $\cos\varphi=0,8$ ($\varphi<0$)	
1,00	0,00	0,92	0,00	0,78	0,00
1,61	0,50	1,19	0,40	0,82	0,50
2,01	0,75	1,38	0,60	0,92	0,75
2,47	1,00	1,61	0,80	1,13	1,00
2,98	1,25	1,86	1,00	1,43	1,25

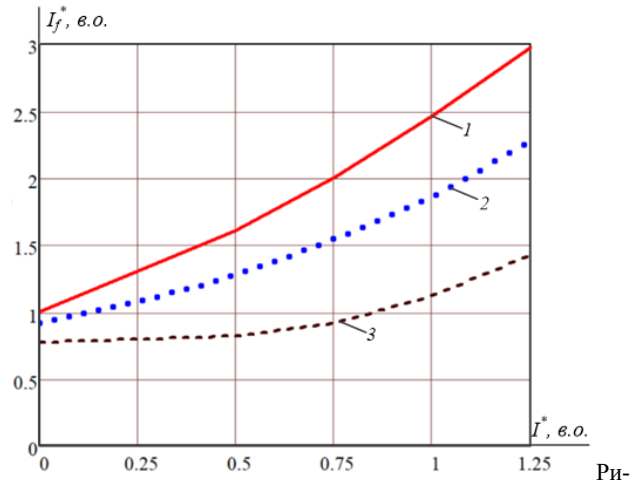


Рис. 6. Регулювальні характеристики:
1 – $U_1^*=1$, $\cos\varphi=0,8$ ($\varphi>0$); 2 – $U_1^*=1$, $\cos\varphi=1,0$ ($\varphi=0$);
3 – $U_1^*=1$, $\cos\varphi=0,8$ ($\varphi<0$);

Таблиця 7 – Зовнішня характеристика досліджуваного явнopolосного синхронного генератора

$I_f^* = I_{fn}^* = 2,47$ в.о., $\cos\varphi = \cos\varphi_n = 0,8$								
U^*	в.о.	1,27	1,25	1,21	1,17	1,10	1,00	0,87
I^*	в.о.	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20

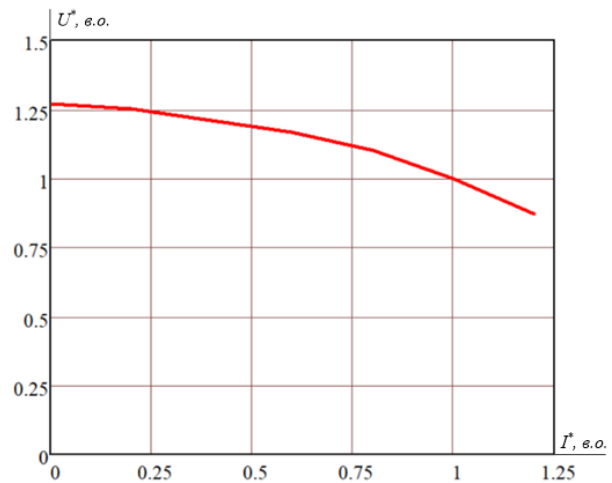


Рис. 7. Зовнішня характеристика

Висновки. Розроблена математична модель розрахунку статичних характеристик (неробочого ходу, кутової, V-подібної, регулювальної і зовнішньої).

Проведені дослідження за допомогою математичної моделі, комп'ютерної програми для синхронного безщіткового трифазного генератора **Stamford PI734B** (Великобританія) з дизельним двигуном **YANMAR AY40L-ET** (Японія), показали високу адекватність математичної моделі.

Отримані результати комп'ютерного моделювання доцільно використовувати як науковцями, які займаються дослідженням електричних машин так і спеціалістами, які займаються експлуатацією та проектуванням електричних машин.

Список літератури

1. Хай М., Хай В., & Харчишин, Б. (2024). Математична модель розрахунку усталеного режиму і статичних характеристик

- явнополюсних синхронних машин. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 1 (11), 52–59. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.10>.
- Хай, М., & Харчишин, Б. (2022). Вплив параметрів пускової обмотки на пускові властивості явнополюсного синхронного двигуна. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8)), 25–31. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.05>.
 - Хай, М., & Харчишин, Б. (2023). Математична модель розрахунку та оптимізації обмотки збудження явнополюсної синхронної машини. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9)), 31–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.05>.
 - Хай, М., Ковальчук, А., & Харчишин, Б. (2025). Оптимізаційні задачі електромеханіки та їх розв'язування методом покоординатного пошуку. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (13)), 63–70. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.13>
 - Куцик А.С. Об'єктно-орієнтована математична модель синхронної машини // Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 120–129.
 - Boldea I. The electric generators handbook. Synchronous generators / I. Boldea, CRC/Taylor & Francis. 2006. – 444 с.
 - Excitation systems solutions – Siemens AG Power Generation, 2003 15 p http://www.siemens.com.tr/i/content/3882_1_ExcitationSystemsPortfolio.pdf.
 - M. Semeniuk and V. Tutka Modeling and Analysis of Processes in Synchronous Generator with PWM Controlled Excitation System / Conference of Young Scientists Electric Power Engineering and Control Systems, EPECS-2015, Lviv, Ukraine, 2015, pp.186-188.
 - Yuan, T.; Yang, N.; Zhang, W.; Cao, W.; Xing, N.; Tan, Z.; Li, G. Improved Synchronous Machine Rotor Design for the Easy Assembly of Excitation Coils Based on Surrogate Optimization. Energies 2018, 11, 1311.
 - IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. IEEE Std 1110-2002. 2003. 72 p.
 - Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html#f3-2404629>.
 - IEC 60034-4-1:2018 Rotating electrical machines - Part 4-1: Methods for determining electrically excited synchronous machine quantities from tests.
 - yavnopolyusnykh synkhronnykh mashyn. Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka, 1 (11), 52–59. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.10>.
 - Khai, M., & Kharchyshyn, B. (2022). Vplyv parametriv puskovoyi obmotky na puskovi vlastyvyosti yavnopolyusnoho synkhronnoho dvyhuna. Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka, (2 (8)), 25–31. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.05>.
 - Khai, M., & Kharchyshyn, B. (2023). Mathematical model for salient-pole synchronous motor field-coil calculation and optimization. Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka, (1 (9)), 31–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.05>.
 - Khai, M., Kovalchuk, A., & Kharchyshyn, B. (2025). Optimization problems in electromechanics and their solution using the coordinate search method. Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka, 1 (13), 63–70. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.13>.
 - Kutsyk A.S. Ob'yektno-oriyentovana matematychna model' synkhronnoyi mashyny // Teoretychna elektrotehnika. – 2005. – Vyp. 58. – Pp. 120–129.
 - Boldea I. The electric generators handbook. Synchronous generators / I. Boldea, CRC/Taylor & Francis. 2006. – 444 с.
 - Excitation systems solutions – Siemens AG Power Generation, 2003 15 p http://www.siemens.com.tr/i/content/3882_1_ExcitationSystemsPortfolio.pdf.
 - M. Semeniuk and V. Tutka Modeling and Analysis of Processes in Synchronous Generator with PWM Controlled Excitation System / Conference of Young Scientists Electric Power Engineering and Control Systems, EPECS-2015, Lviv, Ukraine, 2015, pp.186-188.
 - Yuan, T.; Yang, N.; Zhang, W.; Cao, W.; Xing, N.; Tan, Z.; Li, G. Improved Synchronous Machine Rotor Design for the Easy Assembly of Excitation Coils Based on Surrogate Optimization. Energies 2018, 11, 1311.
 - IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. IEEE Std 1110-2002. 2003. 72 p.
 - Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html#f3-2404629>.
 - IEC 60034-4-1:2018 Rotating electrical machines - Part 4-1: Methods for determining electrically excited synchronous machine quantities from tests.

References (transliterated)

- Khai M., Khai V., & Kharchyshyn, B. (2024). Matematychna model' rozrakhunku ustalenooho rezhymu i statychnykh kharakterystyk

Надійшла (Received) 05.03.2026
 Прийнята (Accepted) 21.03.2026
 Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Хай Василь Михайлович (Khai Vasyl Mykhailovych) – аспірант, Національний університет «Львівська політехніка»; e-mail: vasyl.m.khai@lpnu.ua.