

О. В. КЛЮЄВ

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0003-4542-3317

О. О. ЯЩУК

здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0007-3841-8997

УМОВИ САМОЗБУДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Для споживачів електроенергії невеликої потужності доцільніше використовувати асинхронні генератори (АГ) як джерела електроживлення, оскільки вони найбільш відповідають вимогам, що висуваються споживачами: висока якість вихідної напруги, мала маса, відносно низька ціна, висока надійність, простота конструкції та обслуговування. Асинхронний генератор з конденсаторним самозбудженням (АСГ) характеризується тим, що його обмотки не під'єднані до джерел живлення. Тому статичний режим роботи такого генератора описується системою однорідних алгебраїчних рівнянь в осях координат, орієнтованих за вектором потокозчеплення в повітряному зазорі асинхронної машини (АМ). Математичним виразом електромагнітних автоколиваний у статорі АСГ є наявність нетривіальних розв'язків системи однорідних рівнянь моделі статички генератора, що можливе лише за умови рівності головного визначника системи рівнянь нулю. Розкриваючи цей визначник і прирівнюючи його до нуля з урахуванням залежності реактивних опорів схеми заміщення АСГ від частоти струму статора, отримуємо алгебраїчне рівняння відносно кругової частоти обертання поля генератора. Розв'язавши це рівняння, можна визначити залежність кругової частоти автоколиваний струму і напруги АСГ від величини ємності конденсаторів збудження. Визначник, який є комплексним числом, прирівнюється до нуля, і з умови рівності нулю його дійсної та уявної частин знаходиться математичний вираз умови від'ємності ковзання АСГ під час віддачі ним активної потужності у навантаження. Також, використовуючи описаний підхід, визначається частота електромагнітних коливаний у статорі АСГ відносно базової кругової частоти мережі. Із умови від'ємності ковзання визначається мінімальна ємність конденсаторів збудження на фазу, нижче якої автоколивальний режим не досягається, а корені характеристичного рівняння статорного кола є комплексно-спряженими, але зміщені в ліву півплощину комплексної площини коренів.

Ключові слова: асинхронна машина; асинхронний генератор із самозбудженням; конденсатори збудження; кругова частота поля; мінімальна ємність конденсатора.

O. V. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0000-0003-4542-3317

O. O. YASHCHUK

Postgraduate Student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske
ORCID: 0009-0007-3841-8997

SELF-EXCITATION CONDITIONS OF CAPACITOR INDUCTION GENERATORS

For low-power electricity consumers, it is more practical to use asynchronous generators (AG) as power supply sources, since they best meet the requirements of users: high output voltage quality, low weight, relatively low cost, high reliability, and simplicity of design and maintenance. An asynchronous generator with capacitive self-excitation (SEIG) is characterized by the fact that its windings are not connected to external power sources. Therefore, the steady-state operation of such a generator is described by a system of homogeneous algebraic equations in coordinate axes

oriented along the flux linkage vector in the air gap of the asynchronous machine (AM). The mathematical expression of the electromagnetic self-oscillations in the stator of the SEIG is the existence of nontrivial solutions to the system of homogeneous equations of the generator's steady-state model, which is possible only when the main determinant of the system equals zero. By expanding this determinant and setting it to zero, taking into account the dependence of the reactive impedances of the SEIG equivalent circuit on the stator current frequency, an algebraic equation is obtained with respect to the angular frequency of the generator field rotation. By solving this equation, one can determine the relationship between the angular frequency of self-oscillations of current and voltage in the SEIG and the capacitance of the excitation capacitors. The determinant, being a complex number, is set to zero, and from the condition that both its real and imaginary parts equal zero, a mathematical expression is derived for the condition of negative slip of the SEIG during the delivery of active power to the load. Using the described approach, the frequency of electromagnetic oscillations in the SEIG stator is also determined relative to the base angular frequency of the power network. From the condition of negative slip, the minimum capacitance of excitation capacitors per phase is obtained—below this value, the self-oscillating mode cannot be achieved, and the roots of the stator circuit characteristic equation become complex conjugates shifted into the left half-plane of the complex root plane.

Key words: asynchronous machine, self-excited induction generator, excitation capacitors, angular field frequency, minimum capacitor capacitance.

Постановка проблеми

Для того щоб асинхронна машина могла працювати в генераторному режимі їй необхідно забезпечити збудження й обертання за рахунок витрати механічної енергії приводного двигуна. Робота АМ у генераторному режимі, у залежності від способу збудження може бути здійснена в двох варіантах: генератора з незалежним збудженням; самозбудного генератора.

При роботі АМ як генератора з незалежним збудженням, необхідний для неї струм, що намагнічує, надходить з мережі, у яку асинхронний генератор віддає свою активну потужність. Це можливо тільки при наявності мережі, на яку асинхронний генератор працює паралельно. Після того як забезпечене збудження машини, необхідно до вала її ротора прикласти зовнішній обертаючий момент із таким розрахунком, щоб кількість обертів ротора була більше синхронної і ковзання стало негативним. Тоді активні складові струмів ротора і статора змінять свій напрям на зворотній, у порівнянні з роботою в руховому режимі, і АМ почне віддавати в мережу активну потужність при постійній напрузі мережі. Виробниче значення роботи АМ у генераторному режимі з незалежним збудженням зв'язано з питаннями рекуперації енергії в мережу, від якої живиться АМ у руховому режимі.

Самозбудження АМ можливо здійснити від залишкового магнітного поля машини за допомогою ємності, включеної на затискачі статора АМ. Збудження АГ за рахунок ємності та залишкового магнетизму дає можливість використовувати повною мірою конструктивну простоту і надійність АМ, що знайшли своє найкраще вираження в короткозамкненому виконанні ротора, і одержати генератор гранично простий у конструктивному й експлуатаційному відношенні. Першим імпульсом для створення струму, що намагнічує, є ЕРС, що індукується в статорній обмотці АГ за рахунок залишкового потоку магнітопроводу електричної машини.

Асинхронні самозбуджувані генератори (АСГ) широко застосовуються як автономні джерела електричної енергії. Основні напрями їх використання охоплюють електростанції малої потужності, системи енергопостачання мобільних об'єктів, установок вітрової та малої гідроенергетики, а також автономні джерела живлення споживачів підвищеної частоти. Поширення АСГ пояснюється можливістю їх реалізації на основі стандартних серійних асинхронних машин із короткозамкненим ротором, що істотно знижує їх вартість. Асинхронний генератор з конденсаторним збудженням представляє резонансну систему, що генерує вільні електричні коливання, частота яких залежить від навантаження і може змінюватися відносно електричної частоти генератора на холостому ході на 10-15%, навіть за умови сталості частоти обертання ротора.

Створення високоякісних малогабаритних металоперевих і особливо плівкових конденсаторів, високий розвиток техніки регулювання на основі використання мікропроцесорних і оптронних елементів представляють широкі можливості для практичного використання простих, надійних і технологічних асинхронних машин при ємнісному самозбудженні. АСГ мають низку особливих властивостей, що відрізняють їх від інших типів машин, використовуваних у генераторному режимі: простота конструкції, висока надійність, міцність і стійкість до відцентрових навантажень, відсутність електричних контактів, найкращі питомі масогабаритні та вартісні показники, можливість одержання мінімальних співвідношень між радіальними й аксіальними габаритними розмірами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [1] розглядається схема заміщення АСГ з активно-індуктивним навантаженням. Для стаціонарного режиму була розрахована потреба АСГ у реактивній потужності, визначене значення реактивного опору навантаження, при якій споживана генератором реактивна потужність стає мінімальною. Досліджувалися умови самозбудження генератора під навантаженням. Побудовано графіки залежності мінімальної ємності конденсаторів від швидкості ротора і величини повного опору навантаження. У статті [2] за допомогою методу власних чисел визначена мінімальна і максимальна ємність збудження, необхідні для автономного однофазного асинхронного

генератора, що використовує трифазну машину. Перевага запропонованого методу полягає в його простоті, оскільки вдається уникнути складної процедури розв'язання полінома високого порядку. Значення ємності, отримані запропонованим методом, були зрівняні зі значеннями, отриманими традиційним методом, і підтверджені експериментально для перевірки вірогідності і точності запропонованого підходу. У [3] для стабілізації вихідної напруги АСГ незалежно від навантаження або швидкості обертання вала первинного двигуна використовуються перемикачі у вигляді IGBT-транзисторів, що підключаються паралельно фіксованим конденсаторам збудження. Побудовано залежності ємності конденсаторів збудження від потужності навантаження при стабілізації напруги на затискачах статора генератора. У [4] розглядається визначення оптимальних значень конденсаторів, необхідних для одержання максимальної вихідної потужності однофазного самозбудного асинхронного генератора, створеного на основі трифазної машини, що працює на індуктивне і ємнісне навантаження. У статті представлені залежності максимальної вихідної потужності від коефіцієнта потужності індуктивного і ємнісного навантажень та швидкості обертання АСГ. У статті [5] представлена методика розрахунку ємності конденсаторів, необхідної для самозбудження асинхронного генератора, що заснована на визначенні коренів характеристичного рівняння статорного кола АМ.

Формулювання мети дослідження

У розглянутих літературних джерелах схема заміщення асинхронного генератора використовувалася як вихідна модель для того, щоб одержати, а потім досліджувати статичні характеристики АСГ, що характеризують його експлуатаційні або енергетичні показники. У даній статті ставиться задача на основі схеми заміщення АСГ як автономного чотириполюсника одержати за параметрами і змінними режиму умови самозбудження конденсаторних асинхронних генераторів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Рівняння АМ для генераторного режиму представлені в [6]. Для АМ з короткозамкненим ротором в ортогональних осях u, v , що обертаються з деякою швидкістю ω_k , рівняння генератора з підключеними до статора конденсаторами мають наступний вигляд:

$$-\bar{U}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_s, \quad 0 = R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r, \quad \bar{U}_s = \frac{1}{C} \int \bar{I}_s dt. \quad (1)$$

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r, \quad \bar{\Psi}_r = L_m \bar{I}_s + L_r \bar{I}_r. \quad (2)$$

У статистиці трансформаторні ЕРС дорівнюють нулю, а $\omega_k = \omega_\square$, де ω_\square – кругова частота обертання поля в повітряному зазорі АМ. Рівняннями (1), (2) можна описати електромагнітні процеси в асинхронному генераторі з конденсаторним самозбудженням (АСГ). У статистиці рівняння рівноваги напруг (1) записуються так:

$$-\bar{U}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_c \bar{\Psi}_s, \quad 0 = R_r \bar{I}_r + j\omega_c s \bar{\Psi}_r, \quad \bar{U}_s = \frac{\bar{I}_s}{j\omega_c C}. \quad (3)$$

Після підстановки в (3) виразів потокозчеплень (2) і перетворень одержимо наступну систему рівнянь

$$\left(R_s + j\omega_c L_s - \frac{j}{\omega_c C} \right) \bar{I}_s + j\omega_c L_m \bar{I}_r = 0; \quad j\omega_c s L_m \bar{I}_s + (R_r + j\omega_c s L_r) \bar{I}_r = 0, \quad (4)$$

де $s = (\omega_c - \omega) / \omega_c$ – ковзання.

Перейдемо в системі рівнянь (4) від індуктивностей до реактивних опорів і будемо мати

$$\left[R_s + j(X_s - X_c) \right] \bar{I}_s + jX_m \bar{I}_r = 0; \quad jsX_m \bar{I}_s + (R_r + jsX_r) \bar{I}_r = 0, \quad (5)$$

де $X_m = \omega_c L_m$, $X_s = \omega_c L_s$, $X_r = \omega_c L_r$ – реактивні опори контуру намагнічування, статора і ротора відповідно; $X_c = \frac{1}{\omega_c C}$ – реактивний опір конденсаторів, підключених до статора генератора.

Система однорідних алгебраїчних рівнянь (4) має нетривіальне розв'язання ($\bar{I}_s = \bar{I}_r = 0$), якщо головний визначник цієї системи дорівнює нулю

$$\begin{vmatrix} R_s + j\left(\omega_c L_s - \frac{1}{\omega_c C}\right) & j\omega_c L_m \\ j\omega_c s L_m & R_r + j\omega_c s L_r \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

З виразу (6) знайдемо умови самозбудження АСГ і частоту струму ω_\square в статорі генератора. У результаті розкриття визначника одержимо

$$R_s R_r \omega_c C - L_r s \omega_c (\omega_c^2 L_s C - 1) + \omega_c^3 L_m^2 C s + j [\omega_c^2 L_r R_s C s + R_r (\omega_c^2 L_s C - 1)] = 0. \quad (7)$$

Комплексне число дорівнює нулю, якщо дійсна і уявна частини одночасно дорівнюють нулю. З чого на основі (7) можна записати:

$$R_s R_r C - L_r s (\omega_c^2 L_s C - 1) + \omega_c^3 L_m^2 C s = 0; \quad \omega_c^2 L_r R_s C s + R_r (\omega_c^2 L_s C - 1) = 0. \quad (8)$$

З другого рівняння системи (8) виражаємо ковзання

$$s = \frac{R_r (1 - \omega_c^2 L_s C)}{\omega_c^2 L_r R_s C} \quad (9)$$

і підставляємо в перше рівняння системи (8), після перетворення якого приходимо до наступного біквадратного рівняння відносно кругової частоти струму статора генератора

$$L_s^2 C^2 (L_s L_r - L_m^2) \omega_c^4 - (2L_s^2 L_r C - R_s^2 C^2 L_s L_r - L_m^2 L_s C) \omega_c^2 + L_s L_r = 0. \quad (10)$$

Фізично реалізованим значенням частоти є наступний корінь рівняння (10):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2L_s L_r - R_s^2 C L_r - L_m^2 - \sqrt{L_m^4 + 2R_s^2 L_m^2 C L_r + R_s^4 C^2 L_r^2 - 4R_s^2 L_r^2 L_s C}}{2L_s C (L_s L_r - L_m^2)}}. \quad (11)$$

З першого рівняння системи (5) виразимо струм ротора

$$\vec{I}_r = -\frac{[R_s + j(X_s - X_c)] \vec{I}_s}{j X_m}, \quad (12)$$

і підставимо його в друге рівняння системи (5). У підсумку одержимо вираз

$$-s X_m^2 - R_r R_s + X_r s (X_s - X_c) - j [R_r (X_s - X_c) + s X_r R_s] = 0, \quad (13)$$

за яким можна записати систему двох рівнянь

$$-s X_m^2 - R_r R_s + X_r s (X_s - X_c) = 0; \quad R_r (X_s - X_c) + s X_r R_s = 0. \quad (14)$$

З другого рівняння знаходимо різницю реактивних опорів

$$X_s - X_c = -\frac{s X_r R_s}{R_r}, \quad (15)$$

підставляємо її в перше рівняння (14) і після перетворень одержимо

$$R_r R_s + X_r^2 \frac{R_s}{R_r} s^2 = -s X_m^2. \quad (16)$$

З запису квадратного рівняння (16) відносно ковзання видно, що якщо це рівняння має дійсні корені, то вони можуть бути тільки негативними. Таким чином, вираз (16) указує на те, що конденсаторне самозбудження асинхронного генератора можливо тільки при негативних ковзаннях ($s < 0$), тобто коли кутова швидкість обертання ротора АМ перевищує кругову частоту обертання поля в повітряному зазорі ($\omega > \omega_{\square}$). Кутову швидкість обертання вала ω можна знайти після визначення з (11) кругової частоти обертання поля в повітряному зазорі АСГ ω_{\square} і ковзання s з рівняння (16).

Для аналізу властивостей АСГ, що працює на холостому ході при широкій зміні швидкості його обертання, необхідно врахувати зміну реактивних опорів машини, що має місце при цьому режимі роботи. Як відомо, реактивні опори машини залежать від частоти електричних коливань, що змінюється при зміні швидкості обертання ротора АСГ. При руховому режимі АМ її параметри співвідносяться з відомою частотою мережі, від якої вона живиться. У розглянутому випадку роботи АСГ частота виникаючих електричних коливань не відома і вимагає визначення. Крім того, частота буде змінюватися разом зі зміною швидкості обертання ротора АСГ. Тому зручніше віднести параметри АСГ до якої-небудь визначеної частоти, прийнятої за вихідну, а перерахування їх на дійсну частоту роботи введенням визначеного коефіцієнта. За вихідну приймемо частоту мережі $f_0 = 50 \text{ Гц}$, на яку розрахована АМ при роботі двигуном і при якій легко визначаються її параметри експериментальним шляхом.

Введемо позначення: $f_0, \omega_0 = 2\pi f_0$ – частота і кругова частота мережі, прийнята за базу; $f_c, \omega_c = 2\pi f_c$ – частота і кругова частота струму статора АСГ; ω – кутова швидкість ротора. Коефіцієнт відносної частоти приймемо наступним

$$F = f_c / f_0 = \omega_c / \omega_0. \quad (17)$$

Реактивні опори при зміні частоти струму будуть визначатися через паспортні параметри АМ за наступними формулами:

$$X_{\mu} = X_{\mu 0} F, X_{s\sigma} = X_{s\sigma 0} F, X_{r\sigma} = X_{r\sigma 0} F, X_c = X_{c0} / F. \quad (18)$$

Рівняння сталого режиму АСГ складемо за його схемою заміщення, представленою на рисунку 1. Відповідно до законів Кірхгофа записана наступна система рівнянь:

$$\vec{I}_{\mu} = \vec{I}_s + \vec{I}_r; \left(R_s + jX_{s\sigma 0} F - j\frac{X_{c0}}{F} \right) \vec{I}_s + jX_{\mu 0} F \vec{I}_{\mu} = 0; \left(\frac{R_r}{s} + jX_{r\sigma 0} F \right) \vec{I}_r + jX_{\mu 0} F \vec{I}_{\mu} = 0. \quad (19)$$

Система рівнянь (19) перетворюється до наступної системи двох однорідних рівнянь відносно струмів статора і ротора

$$\left(R_s + jX_{s\sigma 0} F - j\frac{X_{c0}}{F} \right) \vec{I}_s + jX_{\mu 0} F \vec{I}_r = 0; jX_{\mu 0} s F \vec{I}_s + (R_r + jX_{r\sigma 0} F) \vec{I}_r = 0, \quad (20)$$

де $X_{s0} = X_{\mu 0} + X_{s\sigma 0}$, $X_{r0} = X_{\mu 0} + X_{r\sigma 0}$ – повні реактивні опори статора і ротора відповідно при базовій частоті.

Відносну частоту можна визначити з умов самозбудження, що запишуться в наступному вигляді

$$\begin{vmatrix} R_s + j(X_{s0} F - X_{c0} / F) & jX_{\mu 0} F \\ jX_{\mu 0} F s & R_r + jX_{r0} F s \end{vmatrix} = [R_s + j(X_{s0} F - X_{c0} / F)](R_r + jX_{r0} F s) + X_{\mu 0}^2 F^2 s = 0. \quad (21)$$

Рівність нулю комплексного числа (21) запишеться у вигляді системи двох рівнянь

$$R_s R_r - X_{r0} X_{s0} F^2 s + X_{r0} X_{c0} s + X_{\mu 0}^2 F^2 s = 0; R_s X_{r0} F s + R_r X_{s0} F - R_r X_{c0} / F = 0. \quad (22)$$

З другого рівняння виражаємо ковзання

$$s = \frac{R_r (X_{c0} - X_{s0} F^2)}{R_s X_{r0} F^2} \quad (23)$$

і підставляємо його в перше рівняння системи (22). Після перетворень отримуємо наступне біквдратне рівняння для відносної частоти

$$X_{s0} (X_{s0} X_{r0} - X_{\mu 0}^2) F^4 - (2X_{r0} X_{s0} X_{c0} - R_s^2 X_{r0} - X_{\mu 0}^2 X_{c0}) F^2 + X_{r0} X_{c0}^2 = 0. \quad (24)$$

Дійсний корінь, що має фізичний сенс, дорівнює

$$F = \sqrt{\frac{2X_{r0} X_{s0} X_{c0} - R_s^2 X_{r0} - X_{\mu 0}^2 X_{c0} - \sqrt{X_{\mu 0}^4 X_{c0}^2 + 2R_s^2 X_{r0} X_{c0} X_{\mu 0}^2 + R_s^4 X_{r0}^2 - 4X_{r0} R_s^2 X_{s0} X_{c0}}}{2X_{s0} (X_{s0} X_{r0} - X_{\mu 0}^2)}} \quad (25)$$

Якщо прийняти $R_s = 0$, оскільки активний опір статора для АМ середньої і великої потужності істотно менше повних реактивних опорів, то одержимо наближене значення відносної частоти

$$F = \sqrt{X_{c0} / X_{s0}}. \quad (26)$$

Якщо підставити (26) у (23), то одержимо нульове ковзання. При $R_s \neq 0$ відносна частота, визначена за (25), трохи більше величини (26) і ковзання (23) приймає негативні значення. Якщо в (11) покласти $R_s = 0$, то приходимо до значення $\omega_c = 1 / \sqrt{CL_s}$, що виходить також з виразу (26), якщо в ньому реактивні опори записати через індуктивності і ємності.

У генераторному режимі ковзання негативне, що, як випливає з (23), досягається за умови

$$X_{c0} - X_{s0} F^2 < 0 \Rightarrow \frac{1}{\omega_0 C} < X_{s0} F^2 \Rightarrow C > C_{\min} = \frac{1}{X_{s0} F^2 \omega_0}. \quad (27)$$

Для реалізації процесу конденсаторного самозбудження асинхронного генератора ємності конденсаторів, що підключаються до статора, повинні бути більше розраховані за формулою (27). Таким чином, з умови можливості конденсаторного самозбудження ($s < 0$) визначається мінімальне значення ємності конденсаторів \square_{\min} , нижче якого самозбудження не відбувається. Якщо $X_{c0} \rightarrow 0$ ($\square \rightarrow \infty$), то $F \rightarrow 0$ ($\omega_{\square} \rightarrow 0$), що випливає з формул (11) і (25). Тому для режиму холостого ходу АСГ відсутня верхня межа ємності конденсаторів збудження.

Для проведення розрахунків прийнята АМ типу 4А112М4У3 з наступними паспортними даними: $P_n = 5.5 \text{ кВт}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_{sl} = 380 \text{ В}$. Параметри схеми заміщення узяті з довідника для АМ серії 4А.

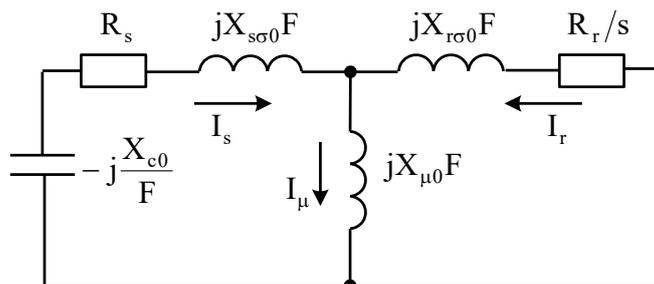


Рис. 1. Схема заміщення фази АСГ при холостому ході

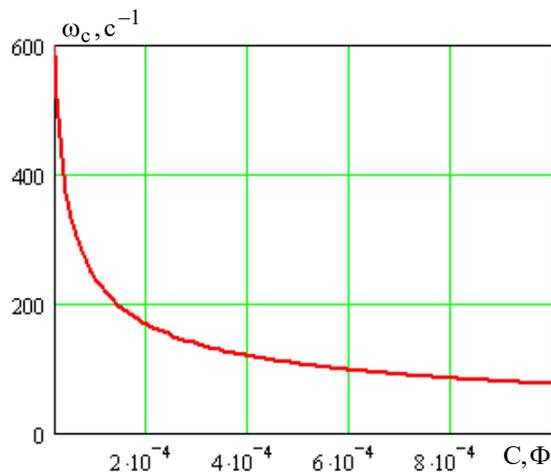


Рис. 2. Залежність кругової частоти струму статора АСГ від ємності конденсаторів збудження на фазу

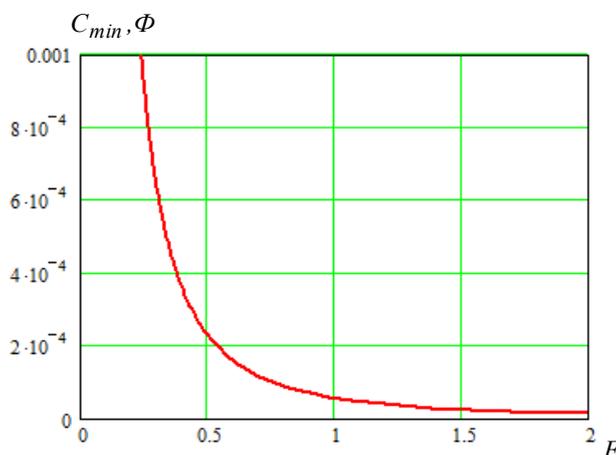


Рис. 3. Залежність мінімальної ємності конденсаторів на фазу від відносної частоти струму статора

За формулою (11) розраховувалися значення кругової частоти струму статора АСГ як функції ємності конденсаторів збудження в діапазоні $20 \div 1000 \text{ мкФ}$. Відлік ємності проводиться від її мінімально можливого значення. Як випливає з проведеного вище аналізу, вісь абсцис є горизонтальною асимптотою. Якщо за формулою (25) побудувати графік залежності відносної частоти струму статора від величини ємності конденсаторів, то цей графік буде цілком збігатися з кривою на рисунку 2 через масштабний множник кругової частоти мережі ω_0 . Обчислена за (25) відносна частота F підставлялася у формулу (27) і визначалися мінімальні значення ємності конденсаторів, нижче яких самозбудження неможливе. Результати цього розрахунку представлені у вигляді графіка на рисунку 3. З цього графіка випливає, що при швидкостях обертання ротора вище кругової частоти мережі

для самозбудження АСГ потрібна невелика ємність конденсаторів, не більш 50 мкФ при потужності АМ 5.5 кВт. При кутових швидкостях обертання ротора нижче половини кругової частоти мережі необхідна для самозбудження ємність починає швидко зростати і для швидкості $0.25\omega_0$ досягає 1000 мкФ.

Висновки

У статті від диференціальних рівнянь АСГ перейшли до його рівнянь статички, які записані через струми. З умови існування нетривіального розв'язання системи однорідних алгебраїчних рівнянь отримана формула, яка дозволяє знайти кругову частоту обертання поля в повітряному зазорі АСГ через його параметри. З цієї ж системи рівнянь знайдена величина ковзання, від'ємність якого є режимною умовою виникнення самозбудження. Складено схему заміщення АСГ для режиму холостого ходу, у якій реактansi є функціями частоти струму статора. Схема заміщення АСГ розглянута як автономний чотириполюсник, у якому можливі автоколивання при рівності його головного визначника нулю. Ця умова дозволила скласти алгебраїчне рівняння, у результаті розв'язання якого отримана формула для визначення відносної частоти струму статора генератора через реактansi схеми заміщення. Із забезпечення від'ємності ковзання отримана формула для розрахунку мінімально необхідної на фазу ємності конденсаторів, що служить умовою самозбудження АСГ за параметрами.

Список використаної літератури

1. Choudhary R., Saket R.K. A critical review on the self-excitation process and steady state analysis of an SEIG driven by wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Volume 47. P. 344–353. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1211-1219
2. Mahato S.N., Singh S.P., Sharma M.P. Excitation capacitance required for self excited single phase induction generator using three phase machine. *Energy Conversion and Management*. 2008. Volume 49. P. 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.007>
3. Al-Saffar M.A., Eui-Cheol Nho, Lipo T.A. Controlled shunt capacitor self-excited induction generator. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*. 1998. P. 1486-1490. DOI: 10.1109/IAS.1998.730338
4. Mahato S. N., Singh S. P., Sharma M. P. Capacitors Required for Maximum Power of a Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine. *IEEE transactions on energy conversion*. 2008. Volume 23. No.2, P. 372-381. DOI: 10.1109/TEC.2007.914394
5. Fadi Ouafia, Abbou Ahmed. Elaboration of the Minimum Capacitor for an Isolated Self Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine. *ICCSRE: International Conference of Computer Science and Renewable Energies*. 2018. P. 264-270, DOI: 10.5220/0009774302640270
6. Ключев О.В. Побудова і дослідження статичних характеристик асинхронізованого генератора. *The Norwegian Journal of development of the international science*. 2024. No.132. P. 123-128. DOI: 10.5281/zenodo.11200351

References

1. Choudhary, R., & Saket, R.K. (2015). A critical review on the self-excitation process and steady state analysis of an SEIG driven by wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 47. P. 344–353. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1211-1219
2. Mahato, S.N., Singh, S.P., & Sharma, M.P. (2008). Excitation capacitance required for self excited single phase induction generator using three phase machine. *Energy Conversion and Management*. Volume 49. P. 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.007>
3. Al-Saffar, M.A., Eui-Cheol Nho, & Lipo, T.A. (1998). Controlled shunt capacitor self-excited induction generator. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*. P. 1486-1490. DOI: 10.1109/IAS.1998.730338
4. Mahato, S. N., Singh, S. P., & Sharma, M. P. (2008). Capacitors Required for Maximum Power of a Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine. *IEEE transactions on energy conversion*. Volume 23. No.2, P. 372-381. DOI: 10.1109/TEC.2007.914394
5. Fadi Ouafia, & Abbou Ahmed. (2018). Elaboration of the Minimum Capacitor for an Isolated Self Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine. *ICCSRE: International Conference of Computer Science and Renewable Energies*. P. 264-270, DOI: 10.5220/0009774302640270
6. Kliuiev O.V. (2024). Pobudova i doslidzhennia statychnykh kharakterystyk asynkhronizovanoho heneratora. *The Norwegian Journal of development of the international science*. No.132. P. 123-128. DOI: 10.5281/zenodo.11200351 (in Ukrainian)

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025