

СТІЙКІСТЬ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ АВТОНОМНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ

Н.Д. Красношاپка*, канд. техн. наук, М.В. Пушкар**, канд. техн. наук,
М.В. Печеник***, канд. техн. наук, Д.О. Головешкін****, В.В. Кипиченко*****
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03057, Україна.
E-mail: n.krasnoshapka@gmail.com.

В роботі представлено результати дослідження умов стійкості автономних асинхронних генераторів із самозбудженням. Використано математичну модель системи генерування с аналітичним описом залежності індуктивності намагнічування від величини струму, яка дає змогу уникнути ітераційної процедури та масштабувати залежність для визначення індуктивності намагнічування для асинхронних машин різної потужності. Проведено дослідження впливу індуктивності навантаження на стійкість системи генерування за різних швидкостях обертання. Показано, що збільшення величини індуктивності збільшує і запас стійкості системи в зоні самозбудження. Розглянуто питання стійкості системи в межах зони самозбудження асинхронного генератора за різних швидкостях обертання в залежності від величини ємності конденсаторів самозбудження. Показано, що за малих швидкостях обертання може не бути режиму стійкої роботи в зоні самозбудження незалежно від величини ємності конденсаторів в колі статора двигуна. Наведений метод визначення стійкості режимів системи генерування буде корисним як у процесі проектування нових систем, так і модифікації та налаштуванні вже існуючих. Бібл. 9, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний генератор, самозбудження, стійкість робочих режимів.

Вступ. Автономні системи енергозабезпечення широко застосовують для живлення споживачів під час виникнення аварійних ситуацій або у разі неможливості підключення до загальних систем енергопостачання. Перспективним є застосування асинхронних генераторів особливо в діапазоні середніх і великих потужностей, коли вони мають техніко-економічні переваги перед синхронними генераторами з постійними магнітами. Однак аналіз робочих характеристик таких систем генерування є складною задачею, тому що математичний опис повинен враховувати як нелінійність самої асинхронної машини, так і залежність умов стійкої роботи від цілого ряду параметрів системи генерування і навантаження, яке може змінюватися в процесі роботи.

Найбільш поширені методи дослідження базуються на ітераційній процедурі визначення параметрів схеми заміщення [1], що пов'язано із нелінійністю кривої намагнічування асинхронної машини [2]. Відомо [3], що такий підхід не дає змоги отримати аналітичні залежності для дослідження як робочих режимів системи генерування, так і границь самозбудження асинхронного генератора, що суттєво ускладнює проектування та налагодження систем генерування з асинхронними генераторами.

Однією з важливих умов для вирішення цієї задачі є наявність універсальних аналітичних залежностей, які описуватимуть криву намагнічування будь-якого асинхронного двигуна [4].

Метою даної роботи є дослідження стійкості робочих режимів автономної системи генерування з асинхронним генератором із самозбудженням через зміну величини індуктивності навантаження, швидкості обертання та ємності конденсаторів самозбудження задля визначення шляхів її підвищення.

Дослідження стійкості робочих режимів. Розглянемо систему генерування, в якій послідовно із статорною обмоткою асинхронного генератора підключено активно-індуктивне навантаження (рис. 1). Таке представлення навантаження відповідає переважній більшості реальних споживачів електричної енергії [5]. Збудження асинхронного генератора здійснюється за допомогою конденсаторів C , підключених до обмотки статора генератора за схемою «зірка».

Будемо вважати систему генерування симетричною – величини активних, індуктивних та ємнісних опорів у всіх фазах однакові.

© Красношاپка Н.Д., Пушкар М.В., Печеник М.В., Головешкін Д.О., Кипиченко В.В., 2024
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-5449-2691>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9576-6433>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-4527-1125>;**** <https://orcid.org/0009-0002-3110-0082>;
***** <https://orcid.org/0009-0001-5460-6644>

Розглянемо математичну модель системи генерування в обертовій системі координат $d-q$. Електромагнітні процеси в навантаженні описуються диференціальними рівняннями в векторній формі

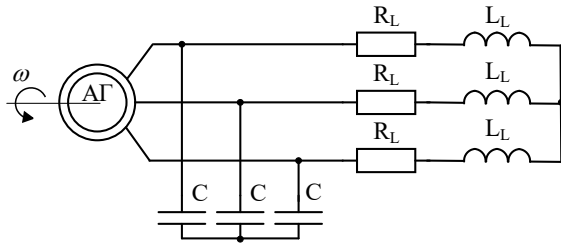


Рис. 1

$$-C \frac{d\mathbf{U}_S}{dt} = \mathbf{i}_S + \mathbf{i}_L + \omega_e C \mathcal{J} \mathbf{U}_S;$$

$$Y_L L_L \frac{d\mathbf{i}_L}{dt} = Y_L \mathbf{U}_S - \mathbf{i}_L - \omega_e Y_L L_L \mathcal{J} \mathbf{i}_L,$$

де i_L – струм навантаження; $Y_L = 1/R_L$ – провідність активної складової навантаження, L_L – індуктивність навантаження, C – ємність конденсатора самозбудження; ω_e – швидкість обертання системи координат.

Знехтуємо насиченням індуктивностей розсіювання обмоток статора $L_{\sigma S}$ та ротора $L_{\sigma R}$. Взаємну індуктивність між обмотками статора та ротора, яка також називається індуктивністю намагнічування генератора L_M , представимо нелінійною статичною залежністю від амплітуди струму намагнічування i_M $L_M = f(i_M)$ [6]

$$i_M = \sqrt{i_{Md}^2 + i_{Mq}^2}; \quad i_{Md} = i_{Sd} + i_{Rd}; \quad i_{Mq} = i_{Sq} + i_{Rq},$$

де $i_{Sd}, i_{Sq}, i_{Rd}, i_{Rq}, i_{Md}, i_{Mq}$ – проекції струмів статора, ротора та намагнічування на осі d та q відповідно.

Математична модель асинхронного генератора в обертовій системі координат $d-q$ може бути представлена в формі нелінійного матричного диференціального рівняння [7]

$$\mathbf{E} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F} \mathbf{X},$$

де $\mathbf{X} = [U_{Sd} \ i_{Sd} \ i_{Rd} \ i_{Ld} \ U_{Sq} \ i_{Sq} \ i_{Rq} \ i_{Lq}]^T$ – вектор стану системи; U_{Sd}, U_{Sq} – проекції напруги статора на осі d та q ; i_{Ld}, i_{Lq} – проекції струму навантаження на осі d та q ;

$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_d & \mathbf{E}_{dq} \\ \mathbf{E}_{dq} & \mathbf{E}_q \end{bmatrix}$ та $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & -\mathbf{F}_2 \\ \mathbf{F}_2 & \mathbf{F}_1 \end{bmatrix}$ – матриці, елементи яких визначаються параметрами системи генерування:

$$\mathbf{E}_d = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{Md} & L_{Md} & 0 \\ 0 & L_{Md} & L_{\sigma R} + L_{Md} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_L L_L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_q = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{Mq} & L_{Mq} & 0 \\ 0 & L_{Mq} & L_{\sigma R} + L_{Mq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_L L_L \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_{dq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{Mdq} & L_{Mdq} & 0 \\ 0 & L_{Mdq} & L_{Mdq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_R & 0 \\ Y_L & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} C\omega_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e(L_{\sigma S} + L_M) & -\omega_e L_M & 0 \\ 0 & (n_p \omega - \omega_e)L_M & (n_p \omega - \omega_e)(L_{\sigma R} + L_M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_e Y_L L_L \end{bmatrix},$$

де ω_e – швидкість обертання системи координат; ω – швидкість обертання ротора генератора; n_p – число пар полюсів асинхронного генератора; $L_{Md} = L_M + (L - L_M)i_{Md}^2 / i_M^2$, $L_{Mq} = L_M + (L - L_M)i_{Mq}^2 / i_M^2$, $L_{Mdq} = (L - L_M)i_{Md}i_{Mq} / i_M^2$. Індекси d та q означають проекції струму i_M на одну з осей системи координат $d-q$, а також залежність індуктивності намагнічування від відповідних проекцій струму. $L = d\Psi_M / di_M = L_M + i_M dL_M / di_M$ – динамічна індуктивність намагнічування.

Матриці \mathbf{E} та \mathbf{F} є нелінійними функціями вектору стану системи генерування внаслідок нелінійності індуктивності намагнічування [8].

Для аналізу стійкості робочих режимів запишемо рівняння системи генерування за малих збурень $\delta\mathbf{X}$ вектора стану $\mathbf{X}=\mathbf{X}^*+\delta\mathbf{X}$, де \mathbf{X}^* – вектор стану в точці рівноваги. В подальшому символ $*$ означатиме, що відповідний вектор або змінна визначаються для точки рівноваги системи генерування.

$$\left(\mathbf{E}^* + \left[\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial\mathbf{X}}\right]^* \delta\mathbf{X}\right)(\dot{\mathbf{X}}^* + \delta\dot{\mathbf{X}}) = \left(\mathbf{F}^* + \left[\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\right]^* \delta\mathbf{X}\right)(\mathbf{X}^* + \delta\mathbf{X}),$$

де $\left[\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial\mathbf{X}}\right]^* \delta\mathbf{X} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial\mathbf{X}_i}\right]^* \delta\mathbf{X}_i$; $\left[\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\right]^* \delta\mathbf{X} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}_i}\right]^* \delta\mathbf{X}_i$.

З урахуванням того, що $\dot{\mathbf{X}}^* = 0$ та $\mathbf{F}^*\mathbf{X}^* = 0$, лінеаризований опис системи генерування в околі точки рівноваги приймає вигляд

$$\mathbf{E}^* \delta\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{F}^* + \delta\mathbf{F}^*) \delta\mathbf{X}.$$

Для визначення матриць \mathbf{E}^* та \mathbf{F}^* замінимо індуктивність намагнічування та проєкції струму i_M на осі d - q значеннями, які відповідають положенню рівноваги. Таким чином, можемо визначити матрицю $\delta\mathbf{F}^*$

$$\delta\mathbf{F}^* = \frac{L^* - L_M^*}{i_M^*} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e^* i_{Mq}^* \\ (\omega_e^* - n_p \omega) i_{Mq}^* \\ 0 \\ 0 \\ -\omega_e^* i_{Md}^* \\ (n_p \omega - \omega_e^*) i_{Md}^* \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{i_{Md}^*}{i_M^*} & \frac{i_{Md}^*}{i_M^*} & 0 & 0 & \frac{i_{Mq}^*}{i_M^*} & \frac{i_{Mq}^*}{i_M^*} & 0 \end{bmatrix},$$

де ω_e^* – кутова швидкість обертання системи координат в околі точки рівноваги.

Умовою стійкості вектору рівноваги є розташування в лівій півплощині системи координат власних значень матриці $\mathbf{A}^* = (\mathbf{E}^*)^{-1}(\mathbf{F}^* + \delta\mathbf{F}^*)$.

Враховуючи, що рівноважний вектор \mathbf{X}^* може бути перетворений в системі координат d - q поворотом на певний кут в інший рівноважний вектор за умови $i_{Md}^* = i_M^*$, $i_{Mq}^* = 0$, то матриці \mathbf{E}^* та \mathbf{F}^* спрощуються шляхом підстановки $L_{Md}^* = L^*$, $L_{Mq}^* = L_M^*$, $L_{Mdq}^* = 0$. Після чого отримаємо

$$\delta\mathbf{F}^* = (L^* - L_M^*) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\omega_e^* \\ n_p \omega - \omega_e^* \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким чином, існує безліч станів рівноваги вектора \mathbf{X}^* , серед яких тільки один відповідатиме заданим ω_e^* та i_M^* .

Але конкретному стану рівноваги відповідає своя величина індуктивності намагнічування, яка визначається її нелінійною залежністю від i_M^* .

Один з найпоширеніших методів визначення залежності $L_M = f(i_M)$ базується на використанні експериментально знятої характеристики холостого ходу відповідної асинхронної машини. В режимі холостого ходу повний опір фази представляє собою суму опорів статора та контура намагнічування в векторній формі. В [7] наведено методику визначення коефіцієнтів апроксимації залежності

$L_M=f(i_M)$ асинхронної машини АИРМ63В4У3, для якої попередньо було експериментально знято характеристику холостого ходу. Номінальні параметри машини: потужність 0,37 кВт; фазна напруга статора 220 В; частота мережі живлення 50 Гц; частота обертання 1450 об/хв. Параметри схеми заміщення взяті для аналогічної машини серії 4А – 4А63В4У3: $R_S=27$ Ом, $R_R=17,9$ Ом, $L_{\sigma S} = L_{\sigma R} = 0,08266$ Гн, $L_M = 0,82$ Гн.

Потрібно врахувати, що проведення такої процедури для різних асинхронних двигунів на етапі проектування системи генерування є складним завданням, яке потребує значних витрат часу та матеріальних ресурсів (для отримання характеристики холостого ходу асинхронної машини необхідно мати пристрій, який дає можливість змінювати величину напруги живлення від нуля і до максимального значення потужністю не менше ніж у досліджуваної машини) [3]. Також необхідно проводити процедуру визначення коефіцієнтів апроксимації залежності індуктивності намагнічування від величини струму.

Для спрощення визначення залежності $L_M=f(i_M)$ двигунів однієї серії за однакових номінальних напруг живлення пропонується використати підхід, викладений в [8] – відома залежність $L_M=f(i_M)$ переводиться у відносні одиниці, а далі здійснюється перерахунок для машини необхідної потужності. В роботі [8] проведено порівняння експериментально визначених границь самозбудження автономної системи генерування з асинхронною машиною АИР112М4У3 (номінальна потужність 5,5 кВт; номінальна фазна напруга статора 220 В; номінальна частота мережі живлення 50 Гц; номінальна частота обертання 1450 об/хв) з результатами математичного моделювання під час перерахунку залежності $L_M=f(i_M)$ машини 4А63В4У3 відповідно до параметрів АИР112М4У3. За суттєвих відмінностей параметрів асинхронних машин, різних напруг живлення, тощо, обов'язково потрібно уточнювати характеристику холостого ходу конкретної машини.

Умовний вигляд залежності $L_M=f(i_M)$, отриманої за допомогою характеристики холостого ходу машини, представлений на рис. 2 [9]. Залежність індуктивності від струму намагнічування може бути поділена на три ділянки. На першій – зростаючій частині – величина індуктивності намагнічування збільшується від початкового значення L_{M0} до L_{MAX} . Індуктивність L_{MAX} відповідає лінійній ненасиченій частині кривої намагнічування асинхронної машини. На цій ділянці можливий тільки нестійкий стан, тобто може відбутися як генерація, так і колапс напруги [9]. На другій ділянці – до зони насичення магнітної системи – індуктивність залишається незмінною, рівною L_{MAX} . Третя ділянка відповідає зоні насичення асинхронної машини, індуктивність намагнічування зменшується – спадна ділянка залежності $L_M=f(i_M)$. На другій і третій ділянках за $L_{M0} < L_M < L_{MAX}$ можливе як тригерне, так і спонтанне самозбудження асинхронного генератора, а на третій ділянці за умови, що $L_{M0} > L_M$, буде відбуватися спонтанне самозбудження [9].

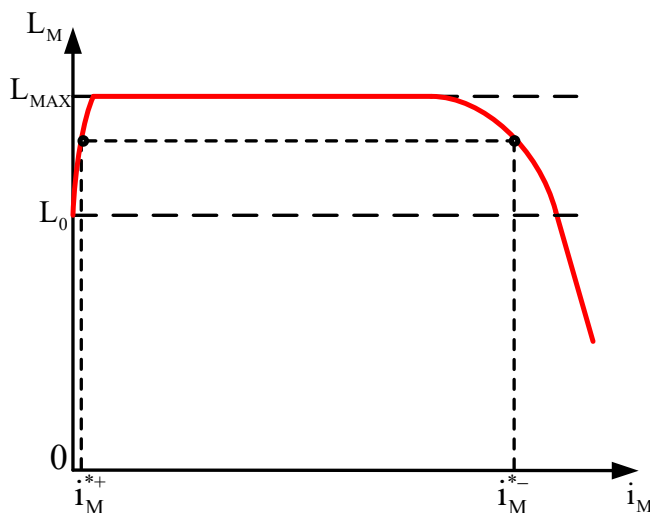


Рис. 2

З використанням даного підходу були проведені дослідження власних значень матриці A^* автономної системи генерування з асинхронною машиною АИРМ63В4У3 за різних параметрах навантаження та швидкостях обертання в середині меж самозбудження. За ненульової величини індуктивності навантаження отримуємо 8 власних значень. З них завжди одне нульове, яке не впливає на стійкість робочих режимів через нелінійність індуктивності намагнічування, що обумовлює і нелінійність самої системи генерування, а шість – пари комплексних чисел з від'ємними дійсними частинами. Ці значення відповідають умовам стійкості та суттєво не змінюються у разі зміни швидкості обертання. Ще одне власне значення – ненульове дійсне. Саме воно буде найбільше впливати на

стійкість режимів роботи, бо знаходиться близько до уявної осі. У випадку чисто активного навантаження власних значень буде шість: нульове, чотири комплексні з від'ємними дійсними частинами і одне дійсне ненульове.

Дослідимо залежність ненульового дійсного власного значення від швидкості обертання асинхронної машини.

Виходячи із виконання умов самозбудження асинхронного генератора власні значення для стійкого режиму роботи відповідають спадній частині залежності $L_M=f(i_M)$ i_M^{*-} , а нестійкого – зростаючій i_M^{*+} [9]. Причому значення цих струмів також будуть залежати від швидкості обертання. На рис. 3 наведено залежності власного значення від швидкості обертання за різних величин індуктивності навантаження, а також наведено величини струмів намагнічування i_M^{*-} та i_M^{*+} . Для зручності відображення на одному рисунку значення струму i_M^{*-} поділено на 0,01, так як він набагато більше струму початкової зростаючої частини залежності $L_M=f(i_M)$ i_M^{*+} .

Власні значення розраховано за однакових величинах активного опору навантаження 500 Ом ($Y_L=1/500 \text{ Ом}^{-1}$) і ємності конденсаторів самозбудження (22 мкФ) та трьох варіантах індуктивності навантаження; 0 Гн (чисто активне навантаження рис. 3, а), 0,33 Гн (рис. 3, б), 0,66 Гн (рис. 3, в).

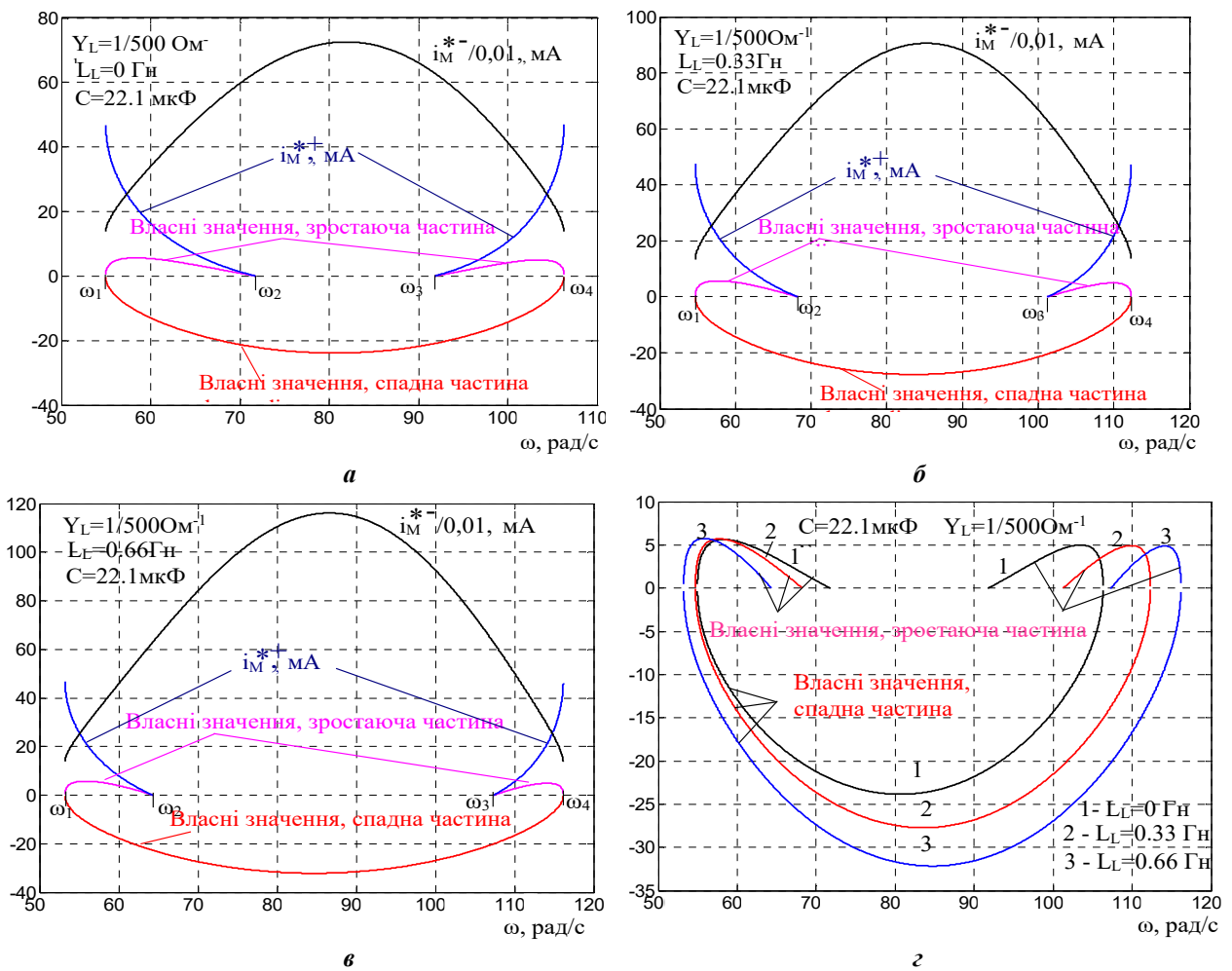


Рис. 3

Як видно з графіків, в діапазоні швидкостей $\omega_1 < \omega < \omega_2$ та $\omega_3 < \omega < \omega_4$ існують по два власні значення – одне з них буде нестійким (додатні значення, що відповідають зростаючій частині залежності $L_M=f(i_M)$), а друге – стійким (спадна частина $L_M=f(i_M)$, від’ємне значення). У даних діапазонах швидкостей можуть виникнути як збудження генератора, так і колапс напруги.

В діапазоні швидкостей $\omega_2 < \omega < \omega_3$ маємо одне від’ємне дійсне власне значення. Це відповідає умовам стійкості та означає, що самозбудження асинхронного генератора можливе і буде відбуватися за будь-якого малого залишкового магнітного потоку. Збільшення індуктивності навантаження буде призводити до розширення діапазону швидкостей обертання від ω_2 до ω_3 . Це означає підвищення стійкості робочих режимів і режимів самозбудження. На рис. 3, г зображено зведені графіки власних

значень для трьох варіантів індуктивності навантаження, що розглядаються. Можна побачити, що збільшення величини індуктивності навантаження мало впливає на меншу швидкість діапазону стійкої роботи ω_2 , зсуваючи в напрямку більших швидкостей праву межу ω_3 . Також збільшується за модулем і сама величина власного значення, підвищуючи запас стійкості системи генерування. Максимальний запас стійкості буде мати місце в діапазоні швидкостей обертання від 80 до 85 рад/с для заданих індуктивностей навантаження. Менше значення швидкості обертання відповідає чисто активному навантаженню. За індуктивностях навантажень 0,33 Гн та 0,66 Гн швидкості обертання, які відповідають найменшій величині власного значення, мало відрізняються.

Проаналізуємо вплив величини швидкості обертання асинхронного генератора на умови стійкості системи за різних величинах ємності конденсаторів самозбудження і незмінних параметрах навантаження: величина активного опору навантаження 500 Ом ($Y_L=1/500 \text{ Ом}^{-1}$), індуктивність навантаження 0,33 Гн, швидкості обертання асинхронного генератора 57 (рис. 4, а) та 75 рад/с (рис. 4, б).

За швидкості обертання 57 рад/с можливі два варіанти власного значення – як на зростаючій, так і на спадній частині залежності $L_M=f(i_M)$, тобто і нестійкій, і стійкій режими роботи в усьому діапазоні зміни величини ємностей конденсаторів самозбудження.

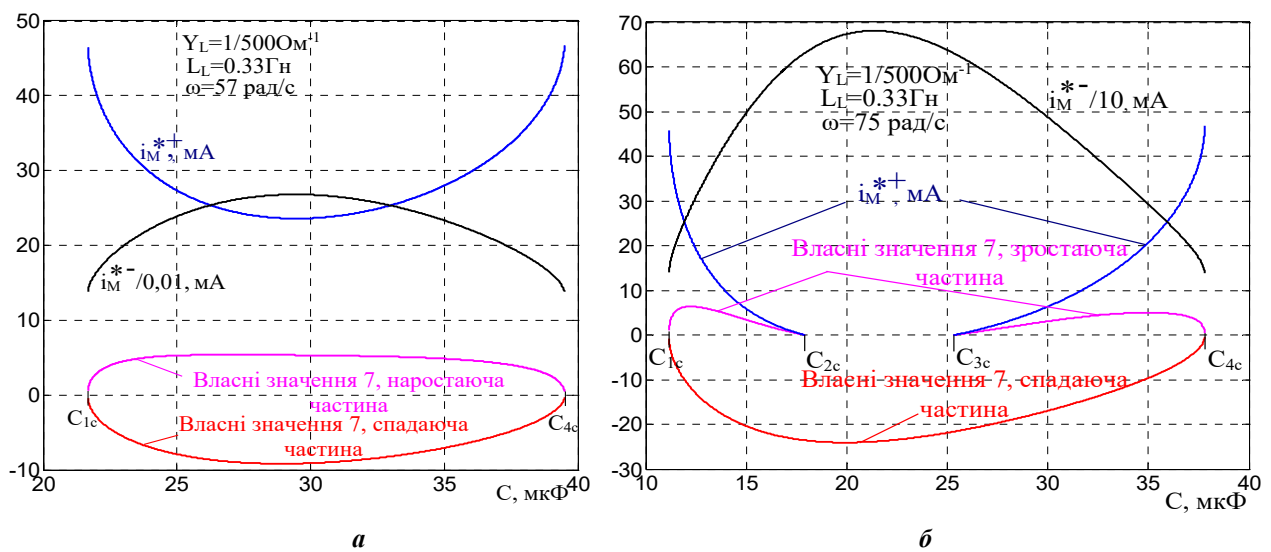


Рис. 4

Тобто за швидкості обертання 57 рад/с та заданих параметрах навантаження спонтанне самозбудження системи генерування неможливе незалежно від величини ємності конденсаторів самозбудження, що також відповідає і результатам, наведеним на рис. 3, б. Через збільшення швидкості обертання до 75 рад/с з'являється зона тільки з одним від'ємним дійсним власним значенням в діапазоні ємностей від C_2 до C_3 (рис. 4, б). Причому проявляється явна асиметрія графіків – зона стійкої роботи із спонтанним самозбудженням зсувана в область менших значень ємності. Найбільший запас стійкості спостерігається за ємності конденсаторів самозбудження біля 20 мкФ, а за збільшенні до 25 мкФ запас зменшується. Таким чином, стійка робота і спонтанне самозбудження у разі невеликих швидкостях обертання можуть виявитися неможливими незалежно від величини ємності конденсаторів самозбудження. Стійка робота системи генерування може бути забезпечена тільки в певному діапазоні швидкостей обертання, які залежать від параметрів навантаження.

Висновки. Запропоновано підхід, який дає можливість здійснювати аналітичне дослідження стійкості режимів роботи асинхронних генераторів з конденсаторним самозбудженням. Проведені дослідження показали, що найбільший вплив на стійкість роботи автономної системи генерування має ненульове дійсне власне значення матриці A^* . Індуктивність навантаження має суттєвий вплив на запас стійкості системи генерування, який буде збільшуватися через збільшення її величини. В той же час величина швидкості обертання, на якій досягається максимальний запас стійкості за однакової ємності конденсаторів самозбудження та активному опорі навантаження мало залежить від величини індуктивності навантаження. Стійка робота системи генерування забезпечується в певному діапазоні швидкостей обертання – в так званих границях або зонах самозбудження генератора. Індуктивність навантаження мало впливає на нижній діапазон швидкостей, на яких можливе самозбудження. Проте

збільшення цієї індуктивності призводить і до зростання швидкостей обертання, за яких забезпечується самозбудження генератора та його стійка робота. Цей підхід може бути використаний для аналізу стійкості автономних систем генерації та її підвищення під час роботи з різними величинами навантаження в границях самозбудження генератора.

STABILITY OF OPERATING MODES OF AUTONOMOUS SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS

N.D. Krasnoshapka, M.V. Pushkar, M.V. Pechenik, D.O. Goloveshkin, V.V. Kipichenko
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: n.krasnoshapka@gmail.com.

The paper presents the results of investigation the stability conditions of self-excited induction generators. A mathematical model of the generating system with an analytical description of the dependence of the magnetization inductance on the current is used. It allows to avoid the iterative procedure and to scale the dependence to determine the magnetization inductance for induction machines of different types and power. The influence of the load inductance on the stability of the generating system at different rotational speeds is investigated. It is shown that an increase in the inductance value increases the system stability margins in the self-excitation zone. Also this article deals with the issues of system stability within the self-excitation zone of an induction generator at different rotational speeds depending on the value of the capacitance of self-excitation capacitors. It is depicted that at low rotational speeds there may not exist a stable operation mode in the self-excitation zone regardless of the value of the capacitance in the motor stator circuit. This method of determination the stability of the operation modes of the generation system will be useful both for the design of new systems and for the modification and adjustment of existing ones. References 9, figures 4.

Key words: induction generator, self-excitation, stability of operating modes.

1. Naqvi S.F.A. Mathematical Modeling & MATLAB Simulation of STATCOM Based Profile Controller for Self Excited Induction Generator. IEEE 12th International Conference on *Communication Systems and Network Technologies* (CSNT), Bhopal, India, 08–09 April 2023. Pp. 975–982. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSNT57126.2023.10134635>.
2. Alonge F., Cirrione M., Pucci M., Sferlazza A. A Nonlinear Observer for Rotor Flux Estimation of Induction Motor Considering the Estimated Magnetization Characteristic. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. No 6. Pp. 5952–5965. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2710940>.
3. Korol S., Buryan S., Pushkar M., Ostroverkhov M. Investigation the maximal values of flux and stator current of autonomous induction generator. IEEE First Ukraine Conference on *Electrical and Computer Engineering* (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 29 May – 02 June 2017. Pp. 560–563. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100302>.
4. Mrrouh M., Frappe E., Jibai A.-K. Hybrid Identification Method of Magnetic Saturation in an Asynchronous Motor. IEEE 8th *Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference* (SPEC/COBEP), Florianopolis, Brazil, 26–29 November 2023. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEC56436.2023.10408486>.
5. Voliansky R., Statsenko O., Sergienko O., Zhelinskyi M., Sinkevych O., Volianska N. Chua's Circuit with Nonlinear Energy Storages and Its Synchronization. IEEE International Conference on *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics* (UkrMiCo), Kyiv, Ukraine, 13–18 November 2023. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380417>.
6. Kiselychnyk O.I., Peresada S.M., Pechenik M.V., Pushkar M.V. The processes of self-excitation in stand-alone compound excited induction generators. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 3. Pp. 33–39. (Ukr)
7. Pushkar M., Krasnoshapka N., Pechenik M., Burian S., Zemlianukhina H. Approximation of Magnetizing Inductance Curve of Self-excited Induction Generator for Investigation of Steady-state Operation Modes. IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems* (ESS), Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. Pp. 301–305. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160143>.
8. Pushkar M.V., Krasnoshapka N.D. Construction of self-excitation boundaries of asynchronous generators using the universal magnetization curve. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*. 2018. No 28. Pp. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.28.104.2018.05>. (Ukr)
9. Bodson M., Kiselychnyk O. Nonlinear dynamic model and stability analysis of self-excited induction generators. Proceedings of the *American Control Conference*, San Francisco, CA, USA, 29 June – 01 July 2011. Pp. 4574–4579. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2011.5991253>.

Надійшла 27.02.2024
Остаточний варіант 08.05.2024