

УДК 621.313.332

### ПРОЦЕСИ САМОЗБУДЖЕННЯ В АВТОНОМНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРАХ ЗІ ЗМІШАНИМ САМОЗБУДЖЕННЯМ

О.І.Кіселичник<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.М.Пересада<sup>2</sup>, докт.техн.наук, М.В.Печеник<sup>2</sup>, канд.техн.наук,  
М.В.Пушкар<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Університет Ворвіка, Ковентрі, Великобританія, CV4 7AL,

<sup>2</sup> – Національний технічний університет України «КПІ»,

пр. Перемоги 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*Представлено аналітичні залежності для границь самозбудження трифазного автономного асинхронного генератора при змішаному збудженні для схем довгого та короткого шунта. Порівняно графіки границь самозбудження при різних випадках змішаного та паралельному включенні конденсаторних батарей. Показано, що використання схем змішаного самозбудження покращує властивості самозбудження та розширює границі, в яких самозбудження асинхронного генератора є можливим, але існують випадки, коли нижня границя самозбудження може зужуватися, що зменшує діапазон швидкостей, при яких можлива стійка робота генератора. Бібл. 9, рис. 8.*

**Ключові слова:** асинхронний генератор, самозбудження, регулювання напруги, змішане підключення, конденсаторна батарея.

**Вступ.** Асинхронні генератори з самозбудженням знайшли широке застосування в автономних електрогенеруючих установках для віддалених районів без електромереж, а також як резервні і переносні системи електрозабезпечення. Вони приводяться в рух вітро- чи гідротурбінами або за допомогою двигунів внутрішнього згорання. Основними перевагами асинхронних генераторів з самозбудженням є їхня відносно невисока вартість, надійність та простота обслуговування, а також природний самозахист від короткого замикання, а недоліком – залежність амплітуди та частоти генерованої напруги не лише від робочих умов (швидкості обертання вала генератора та ємності конденсаторів збудження), а й від параметрів навантаження, що обмежує варіанти використання таких установок. Розробники пропонують різноманітні підходи до керування напругою асинхронних генераторів із самозбудженням. Серед найбільш розповсюджених – використання так званих електронних регуляторів навантаження [1]. Ідея полягає в тому, що паралельно з основним додається баластне навантаження, величина якого змінюється електронним регулятором таким чином, щоб загальне навантаження генератора залишалось сталим. Недоліками підходу є необхідність розсіювання енергії, що знижує ККД, та відхилення частоти та напруги від заданих значень при зміні швидкості чи типу навантаження. Іншими поширеними варіантами керування є методи на базі керованих ємностей збудження: компенсатори реактивної потужності [2] та статичні синхронні компенсатори [3]. У першому випадку до ємностей збудження паралельно підключаються конденсатори, ємність яких регулюється ключами з ШІМ регулюванням, у другому ефект плавного регулювання ємностей досягається за рахунок ШІМ керованого інвертора з конденсатором постійного струму. В обох випадках зміна ємності незначно впливає на частоту, але дозволяє керувати амплітудою напруги. В усіх випадках використання електроніки з ШІМ модуляцією система генерування ускладнюється, що збільшує вартість її реалізації та обслуговування, а також призводить до появи електромагнітних збурень, що є інколи неприйнятним для специфічних споживачів, як то літаки, радари та ін.

Тому практичне значення все ще зберігають схеми параметричного регулювання напруги. Найбільш поширений підхід полягає у використанні додаткових послідовних конденсаторів збудження поряд з паралельними [4]. Ідея полягає в тому, що при зміні навантаження змінюється частота генерованої напруги і, як результат, опір послідовних конденсаторів, що дозволяє певною мірою зменшити просідання напруги при збільшенні навантаження. Питання дослідження впливу послідовних конденсаторів на зміну напруги достатньо повно представлені у наукових публікаціях [4–7].

Проте, вплив таких конфігурацій на умови самозбудження (границі самозбудження) в літературі не аналізується.

Метою даної роботи є отримання аналітичних залежностей для границь самозбудження асинхронного генератора з паралельно-послідовним з'єднанням конденсаторів та їхнє порівняння з варіантом чисто паралельного збудження.

**Матеріали досліджень.** Розглянемо наступні конфігурації. Якщо послідовні конденсатори включено між паралельними конденсаторами та навантаженням, як показано на рис. 1, а, то таке підключення називається схемою “короткого шунта” (short-shunt), якщо ж конденсатори підключено між генератором та паралельними конденсаторами, як показано на рис. 1, б, то таке підключення називається схемою “довгого шунта” (long-shunt).

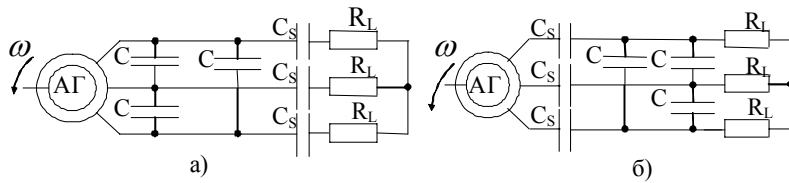


Рис. 1

Фрагмент схеми заміщення фази асинхронного генератора для випадку “короткого шунта” матиме вигляд, показаний на рисунку 2, а. На рис. 2, б представлено відповідний фрагмент для “довгого шунта”.

Виходячи з першого та другого законів Кірхгофа, запишемо рівняння для відповідних фрагментів у двофазній моделі асинхронного генератора в довільній ортогональній системі координат F-G:

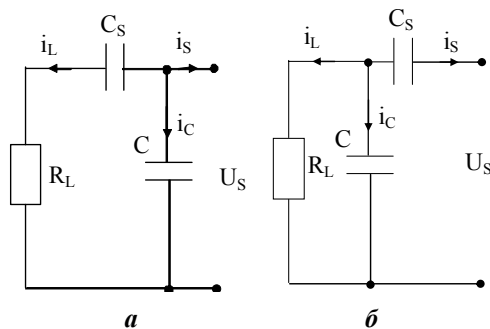


Рис. 2

– для короткого шунта

$$-C \frac{dU_S}{dt} = i_S + i_L + \omega_e C J U_S, \quad (1)$$

$$-R_L C \frac{di_L}{dt} = i_S + \left(1 + \frac{C}{C_S}\right) i_L + \omega_e C R_L J i_L,$$

– для довгого шунта

$$-C \frac{dU_S}{dt} = \left(1 + \frac{C}{C_S}\right) i_S + i_L + \omega_e C J U_S, \quad (2)$$

$$-R_L C \frac{di_L}{dt} = i_S + i_L + \omega_e C R_L J i_L,$$

де  $i_S = [i_{SF} \ i_{SG}]^T$ ,  $i_L = [i_{LF} \ i_{LG}]^T$  – вектори струмів статора та навантаження в системі координат F-G,  $U_S = [U_{SF} \ U_{SG}]^T$  – вектор напруги статора в системі координат F-G,  $R_L$  – активний опір навантаження,  $C$  – ємність паралельних конденсаторів,  $C_S$  – ємність послідовних конденсаторів,  $\omega_e$  – кутова швидкість обертання системи координат F-G,  $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ .

Уніфікуємо математичний опис для обох випадків наступним чином:

$$-C \frac{dU_S}{dt} = a_S i_S + i_L + \omega_e C J U_S, \quad -R_L C \frac{di_L}{dt} = i_S + b_L i_L + \omega_e C R_L J i_L, \quad (3)$$

де  $a_S = 1$  та  $b_L = 1 + C/C_S$  – для короткого шунта, а  $a_S = 1 + C/C_S$  та  $b_L = 1$  – для довгого шунта.

Повний двофазовий опис асинхронного генератора зі змішаним самозбудженням включає систему рівнянь (3), а також два векторні диференціальні рівняння для статорного та роторного кіл в системі координат F-G

$$\frac{d\Psi_S}{dt} = U_S - R_S i_S - \omega_e J \Psi_S, \quad \frac{d\Psi_R}{dt} = -R_R i_R + (n_p \omega - \omega_e) J \Psi_R, \quad (4)$$

де  $\Psi_S = [\Psi_{SF} \ \Psi_{SG}]^T$ ,  $\Psi_R = [\Psi_{RF} \ \Psi_{RG}]^T$  – вектори потокозчеплень статора і ротора,  $i_R = [i_{RF} \ i_{RG}]^T$  – вектор струму ротора,  $R_S$  та  $R_R$  – опори статора та ротора,  $n_p$  – число пар полюсів,  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора генератора. Індокси F та G визначають компоненти, які належать до обертової системи координат F-G. Перехід від векторів у нерухомій системі координат статора А-В до системи F-G проводиться так

$$\begin{pmatrix} i_{SF} \\ i_{SG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{SA} \\ i_{SB} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де  $i_{SA}, i_{SB}$  – А і В компоненти вектора струму статора, а  $\theta_e$  – кут між системами координат F і G та А і В. Для векторів, асоційованих з ротором  $\theta_e$ , замінюється на  $\theta_e - n_p \theta$ , де  $\theta$  – кутове положення ротора. Кутові швидкості визначаються як  $\omega_e = d\theta_e/dt$  та  $\omega = d\theta/dt$ .

Потокозчеплення статора та ротора визначаються рівняннями

$$\Psi_S = L_{\sigma S} i_S + L_M (i_S + i_R), \quad \Psi_R = L_{\sigma R} i_R + L_M (i_S + i_R), \quad (6)$$

де  $L_{\sigma S}$  та  $L_{\sigma R}$  – індуктивності розсіювання обмоток статора та ротора відповідно, а  $L_M$  – взаємоддуктивність статора та ротора (індуктивність намагнічування). Індуктивність намагнічування є нелінійною статичною функцією амплітуди струму намагнічування  $L_M = f(i_M)$ , яка обчислюється наступним чином:

$$i_M = \sqrt{i_{MF}^2 + i_{MG}^2}, \quad i_{MF} = i_{SF} + i_{RF}, \quad i_{MG} = i_{SG} + i_{RG}. \quad (7)$$

Після диференціювання потокозчеплень (6) за часом з урахуванням нелінійності  $L_M$  та підстановки відповідних похідних у (4), модель генератора прийме форму неявного нелінійного матричного диференціального рівняння

$$E\dot{X} = FX, \quad (8)$$

$$\text{де } E = \begin{bmatrix} E_F & E_{FG} \\ E_{FG} & E_G \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_1 & -F_2 \\ F_2 & F_1 \end{bmatrix}, \quad E_F = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{MF} & L_{MF} & 0 \\ 0 & L_{MF} & L_{\sigma R} + L_{MF} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_L C \end{bmatrix},$$

$$E_G = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{MG} & L_{MG} & 0 \\ 0 & L_{MG} & L_{\sigma R} + L_{MG} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_L C \end{bmatrix}, \quad E_{FG} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{MFG} & L_{MFG} & 0 \\ 0 & L_{MFG} & L_{MFG} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & a_S & 0 & 1 \\ 1 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_R & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b_L \end{bmatrix}, \quad F_2 = \begin{bmatrix} C\omega_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e(L_{\sigma S} + L_M) & -\omega_e L_M & 0 \\ 0 & (n_p \omega - \omega_e)L_M & (n_p \omega - \omega_e)(L_{\sigma R} + L_M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C\omega_e R_L \end{bmatrix},$$

$$X = [U_{SF} \quad i_{SF} \quad i_{RF} \quad i_{LF} \quad U_{SG} \quad i_{SG} \quad i_{RG} \quad i_{LG}]^T, \quad L_{MF} = L_M + (L - L_M)i_{MF}^2 / i_M^2, \\ L_{MG} = L_M + (L - L_M)i_{MG}^2 / i_M^2, \quad L_{MFG} = (L - L_M)i_{MF}i_{MG} / i_M^2.$$

У цій моделі  $L = d\Psi_M / di_M = L_M + i_M dL_M / di_M$  позначає динамічну індуктивність намагнічування (похідну модуля потокозчеплення намагнічування за модулем струму намагнічування). Індуктивність намагнічування та динамічна індуктивність намагнічування є рівними для електричних машин з лінійною магнітною системою. Матриці  $E$  та  $F$  є нелінійними функціями вектора стану  $X$  через нелінійності  $L_M, L_{MF}, L_{MG}$ , та  $L_{MFG}$ .

Границі самозбудження генератора (границі стійкості робочих режимів) визначимо аналітично згідно з методикою, розробленою у [8]. У статичному режимі рівняння (8) набуде вигляду

$$F^* X^* = 0, \quad (9)$$

де  $F^*$  є функцією  $F$ , обчисленою в стані рівноваги  $X^*$ .

Ненульовий розв'язок рівняння  $X^*$  існує лише при  $\det F^* = 0$ , за якої необхідно знайти відповідні статичні значення кутової частоти  $\omega_e^*$  та індуктивності намагнічування  $L_M^*$ . Розв'язок суттєво спрощується при представленні статичної моделі через комплексні змінні [8]

$$(F_1^* + jF_2^*)Z^* = 0, \quad (10)$$

де  $Z^* = X_1^* + jX_2^*$ , а  $X^* = [X_1^* \quad X_2^*]^T$ .

Існування ненульового вектора  $Z^*$  можливе лише тоді, коли  $\det(F_1^* + jF_2^*) = 0$ . Згідно з (8)

$$F_1^* + jF_2^* = \begin{bmatrix} jC\omega_e^* & a_S & 0 & 1 \\ 1 & -R_S - j\omega_e^*(L_{\sigma S} + L_M^*) & -j\omega_e^*L_M^* & 0 \\ 0 & j(n_p\omega - \omega_e^*)L_M^* & -R_R + j(n_p\omega - \omega_e^*)(L_{\sigma R} + L_M^*) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b_L + jC\omega_e^*R_L \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Тоді дійсна та уявна частини  $\det(F_1^* + jF_2^*) = 0$  визначаються наступним чином:

$$\operatorname{Re}(\det(F_1^* + jF_2^*)) = k_1L_M^* + k_2 = 0, \quad \operatorname{Im}(\det(F_1^* + jF_2^*)) = k_3L_M^* + k_4 = 0, \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} k_1 &= -b_L\omega_e^{*2}CR_R - \omega_e^*(\omega_e^* - n_p\omega)(b_LCR_S - C^2\omega_e^{*2}R_L(L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) + CR_La_S), \\ k_2 &= -R_R(1 - b_La_S) - \omega_e^{*2}(R_Rb_LCL_{\sigma S} + C^2R_SR_RR_L) - \\ &\quad - \omega_e^*(\omega_e^* - n_p\omega)(b_LCR_SL_{\sigma R} - C^2\omega_e^{*2}R_LL_{\sigma S}L_{\sigma R} + CR_La_SL_{\sigma R}), \\ k_3 &= -C^2\omega_e^{*3}R_LR_R - (\omega_e^* - n_p\omega)(1 + C^2\omega_e^{*2}R_LR_S + b_LC\omega_e^{*2}(L_{\sigma S} + L_{\sigma R}) - b_La_S), \\ k_4 &= b_LC\omega_e^*R_SR_R + C\omega_e^*R_LR_Ra_S - C^2\omega_e^{*3}R_LR_RL_{\sigma S} - \\ &\quad - (\omega_e^* - n_p\omega)(L_{\sigma R} + C^2\omega_e^{*2}R_LR_SL_{\sigma R} + b_LC\omega_e^{*2}L_{\sigma S}L_{\sigma R} - b_La_SL_{\sigma R}). \end{aligned}$$

Система рівнянь (12) описує статичні характеристики генератора. Проте відомо, що границі самозбудження асинхронного генератора відповідають ненасиченому (максимальному) значенню індуктивності намагнічування [8]. При  $L_M^* = L_{MAX}$  система (12) є математичним описом границь самозбудження. Виключаючи з рівнянь (12)  $\omega_e^* - n_p\omega$ , представимо границі самозбудження у вигляді полінома шостого порядку

$$g_1\omega_e^{*6} + g_2\omega_e^{*4} + g_3\omega_e^{*2} + g_4 = 0, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{де } g_1 &= C^4R_L^2L_S^*(L_S^*L_R^* - L_M^{*2}) > 0, \quad g_2 = (L_S^*L_R^* - L_M^{*2})C^2(b_L^2L_S^* - R_L^2a_S C) + C^3R_L^2L_R^*(R_S^2C - L_S^*a_S), \\ g_2 &= (L_S^*L_R^* - L_M^{*2})C^2(b_L^2L_S^* - R_L^2a_S C) + C^3R_L^2L_R^*(R_S^2C - L_S^*a_S), \\ g_3 &= C^2L_R^*(b_LR_S + a_S R_L)^2 + C(1 - b_La_S)(b_L(2L_S^*L_R^* - L_M^{*2}) + 2CR_S R_L L_R^*), \\ g_4 &= L_R^*(1 - b_La_S)^2 > 0, \quad L_M^* = L_{MAX}, \quad L_S^* = L_{MAX} + L_{\sigma S}, \quad L_R^* = L_{MAX} + L_{\sigma R}. \end{aligned}$$

Отриманий поліном є кубічним рівнянням відносно  $\omega_e^{*2}$ . Для конкретних значень паралельної та послідовної ємностей збудження, а також опору навантаження, якщо існують два додатних розв'язки рівняння, то вони визначають мінімальну та максимальну можливі кутові частоти генерованої напруги  $\omega_{e,\min}^*$  та  $\omega_{e,\max}^*$ . Підставивши останні у будь-яке з рівнянь системи (12), отримаємо відповідні мінімальну та максимальну швидкості  $\omega_{\min}$  та  $\omega_{\max}$ , при яких зберігається самозбудження для прийнятих ємностей і навантаження. У випадку першого рівняння вираз для критичних швидкостей буде наступним:

$$\omega = \frac{1}{n_p} \left( \omega_e^* - \frac{\omega_e^* CR_R (b_LR_S + a_S R_L - C\omega_e^{*2} R_L L_S^*)}{C\omega_e^{*2} (CR_L R_S L_R^* + b_L (L_S^* L_R^* - L_M^{*2})) + L_R^* (1 - b_L a_S)} \right). \quad (14)$$

На основі отриманих розв'язків можливо побудувати різні варіанти границь самозбудження. Найбільш поширений – це залежність критичних швидкостей від ємності паралельного збудження при заданих величинах навантаження та ємності послідовного збудження.

У випадку лише паралельного збудження  $a_S = 1$  та  $b_L = 1$ . Тоді побудова границі зводиться до розв'язку квадратного рівняння відносно  $\omega_e^{*2}$  [9], оскільки коефіцієнти полінома змінюються наступним чином:

$$\begin{aligned} g_1 &= C^2L_S^*(L_S^*L_R^* - L_M^{*2}) > 0, & g_2 &= Y_L^2L_S^*(L_S^*L_R^* - L_M^{*2}) + C^2L_R^*R_S^2 - C(2L_S^*L_R^* - L_M^{*2}), \\ g_3 &= L_R^*(Y_LR_S + 1)^2 > 0, & g_4 &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Відповідне рівняння для обчислення критичних швидкостей спроститься до вигляду

$$\omega = \frac{1}{n_p} \left( \omega_e^* - \frac{Y_L R_S R_R - \omega_e^{*2} C R_R L_S^* + R_R}{\omega_e^* (Y_L (L_S^* L_R^* - L_M^2) + R_S L_R^* C)} \right). \quad (16)$$

Аналіз границь самозбудження проведено для трифазного асинхронного генератора (асинхронний двигун АИРМ63В4У3) потужністю 370 Вт з номінальною напругою 380 В та частотою 50 Гц. Номінальна швидкість обертання становить 1450 об/хв. Наступні параметри генератора було отримано експериментально:  $R_S=27$  Ом,  $R_R=17,9$  Ом,  $L_{\sigma S}=L_{\sigma R}=0,08266$  Гн,  $n_p=2$ ,  $L_{MAX}=1,03115$  Гн.

На рис. 3 та 4 показані границі самозбудження генератора при підключенні його по схемі короткого шунта, при опорі навантаження 200 Ом та при різних значеннях ємностей послідовних конденсаторів.

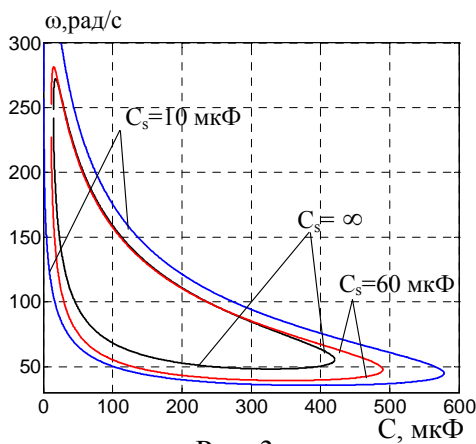


Рис. 3

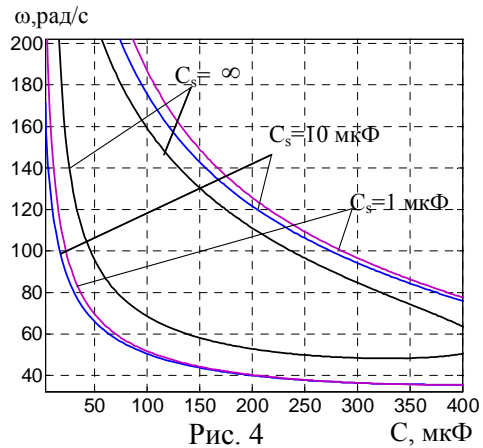


Рис. 4

Як видно з рис. 3, зменшення ємності послідовних конденсаторів розширює границю самозбудження генератора. Випадок нескінченної послідовної ємності відповідає чисто паралельному збудженню. Тому для фіксованої паралельної ємності зменшення послідовної призводить до нижчих критичних швидкостей. Це пояснюється тим, що зменшення ємності послідовних конденсаторів призводить, з одного боку, до збільшення загального опору навантаження, а з іншого – зменшує сумарну ємність збудження, тобто звужує границі. Це означає, що для певних величин послідовної ємності можливі випадки, коли нижча критична швидкість збільшується зі зменшенням послідовної ємності, як показано на рис. 4, де існує точка перетину кривих при  $C_s=1$  мкФ та  $C_s=10$  мкФ.

Дослідження впливу зміни опору навантаження на границі при короткому шунті було проведено для випадку  $C_s=60$  мкФ. Результати розрахунків показали, що границі зі збільшеним опором навантаження охоплюють повністю границі для меншого опору, що підтверджує загальновідомий факт для випадку паралельного збудження. Проте, зі зменшенням послідовної ємності можливі випадки, коли характеристики для різних опорів перетинаються, що проілюстровано на рис. 5 при  $C_s=10$  мкФ.

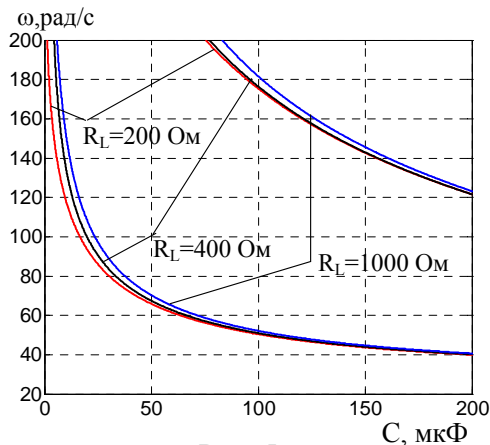


Рис. 5

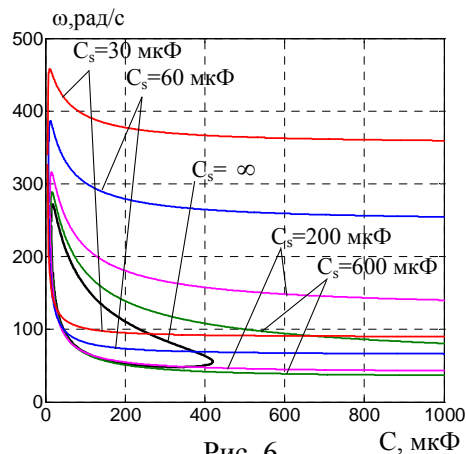


Рис. 6

Тобто, при збільшенні опору навантаження нижня критична швидкість може "неочікувано" збільшитися, звужуючи можливий діапазон робочих точок.

На рис. 6 показано границі самозбудження для випадку підключення

чення генератора за схемою довгого шунта при опорі навантаження 200 Ом та при різних значеннях ємностей послідовних конденсаторів. Як видно з рисунку, введення додаткових послідовних конденсаторів суттєво розширює границі самозбудження. Проте, зменшення ємності цих конденсаторів викликає збільшення нижніх критичних швидкостей. Ці ефекти обумовлені, як і в випадку короткого шунта, фактичним збільшенням опорів навантаження та зменшенням загальної ємності збудження при зменшенні величини ємності послідовних конденсаторів.

Дослідження впливу навантаження на границі самозбудження при довгому шунті було проведено при наступних ємностях послідовних конденсаторів: 30, 60 та 600 мкФ. Для цих випадків, як і очікувалося, границі для менших опорів навантаження цілком знаходяться всередині границь для більших опорів. При менших значеннях послідовних ємностей, аналогічно як і для короткого шунта, можливі точки перетину границь з різними опорами. Так на рис. 7 показано "нехарактерний" випадок при 20 мкФ, коли границя для найменшого опорів навантаження (найбільшого навантаження генератора) виявилася найнижчою.

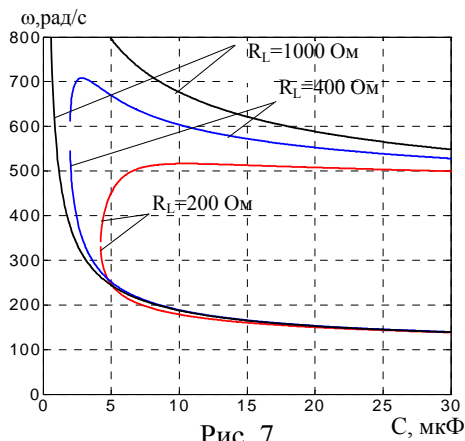


Рис. 7

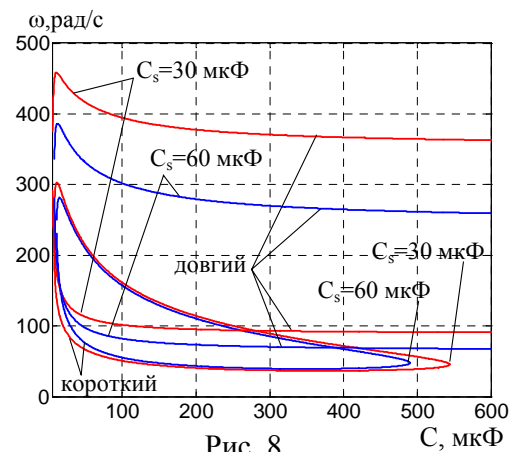


Рис. 8

Рис. 8 демонструє порівняння границь при короткому та довгому шунтах для двох значень послідовних ємностей 30 та 60 мкФ. Конфігурація довгого шунта забезпечує ширші границі самозбудження, проте вони суттєво зсуваються вгору за швидкістю. Очевидно, що самозбудження генератора при короткому шунті можна забезпечувати при швидкостях, нижчих за критичні значення, необхідні при довгому шунті. Оскільки для генерування напруги частотою 50 Гц необхідна приблизна швидкість 150 рад/с, то при невеликих значеннях ємності паралельних конденсаторів робочі точки знаходяться далі від границі самозбудження для короткого шунта, ніж для довгого шунта. З одного боку, це дає більший запас стійкості, проте з іншого – більше насичення магнітної системи генератора. Остаточний висновок щодо конфігурації можливо зробити лише після додаткового порівняння характеристик регулювання напруги.

**Висновки.** Отримані аналітичні залежності для границь самозбудження асинхронного генератора дають змогу проаналізувати вплив послідовних ємностей на процеси самозбудження. В результаті аналізу встановлено, що при введенні додаткових послідовних ємностей границі розширюються, у порівнянні із випадком паралельного збудження АГ, але існують певні критичні значення ємностей послідовного конденсатора, які призводять до звуження нижніх границь самозбудження. Також встановлено, що конфігурація довгого шунта забезпечує ширші границі самозбудження, проте вони суттєво зсуваються вгору за швидкістю. З іншого боку, самозбудження генератора при короткому шунті можна досягти при швидкостях, нижчих за критичні значення, ніж ті, при яких можливе самозбудження для випадку підключення генератора по схемі довгого шунта.

## ПРОЦЕССЫ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ СО СМЕШАННЫМ САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

О.И.Киселичник<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.М.Пересада<sup>2</sup>, докт.техн.наук, Н.В.Печеник<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Н.В.Пушкар<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Университет Ворвика, Ковентри, Великобритания, CV4 7AL,

<sup>2</sup> – Национальный технический университет Украины «КПИ»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*Представлены аналитические зависимости для границ самовозбуждения трёхфазного автономного асинхронного генератора при смешанном возбуждении для схем длинного и короткого шунта. Проведено сравнение графиков границ самовозбуждения при разных случаях смешанного и параллельном включении конденсаторных батарей. Показано, что использование схем смешанного самовозбуждения улучшает свойства самовозбуждения и расширяет границы, при которых самовозбуждение является возможным, но существуют случаи, при которых нижняя граница самовозбуждения может сужаться, что приводит к уменьшению диапазона скоростей, при которых возможна устойчивая работа генератора. Библ. 9, рис. 8.*

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, самовозбуждение, регулирование напряжения, смешанное подключение, конденсаторная батарея.

## THE PROCESSES OF SELF-EXCITATION IN STAND-ALONE COMPOUND EXCITED INDUCTION GENERATORS

O.Kiselychnyk<sup>1</sup>, S. Peresada<sup>2</sup>, M.Pechenik<sup>2</sup>, M.Pushkar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Warwick, Coventry, United Kingdom, CV47AL,

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine “KPI”,

Peremohy ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*The analytical dependences for the boundaries of the self-excitation of three-phase stand-alone induction generator with compound excitation for long and short shunt schemes are presented. The comparison of the self-excitation boundaries for different cases of compound and parallel connection of capacitor banks was carried out. It is shown that the use of compound self-excitation improves the properties of self-excitation, and extends the boundaries where self-excitation is possible, but there are cases in which the lower boundary of the self-excitation can be narrowed, leading to a decrease of the speed range in which stable operation of induction generator is possible. References 9, figures 8.*

**Keywords:** induction generator, self-excitation, voltage control, short-shunt, long-shunt, capacitor bank.

1. Singh B., Murthy S.S., Gupta S. Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator // IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution. – 2004. – Vol. 151. – No.1. – Pp. 51–60.
2. Ahmed T., Noro O., Hiraki E., Nakaoka M. Terminal voltage regulation characteristics by static VAR compensator for a three-phase self-excited induction generator // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2004. – Vol. 40. – No. 4. – Pp. 978–988.
3. Singh B., Murthy S.S., Gupta S. Analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2004. – Vol. 19. – No. 4. – Pp. 783–790.
4. Singh B., Shridhar L., Jha C.S. Improvements in the performance of self-excited induction generator through series compensation // IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution. – 1999. – Vol. 146. – No. 6. – Pp. 602–608.
5. Khan M.F., Khan M.R., Iqbal A. Performance analysis of shunt, short shunt and long shunt self excited induction generator: Analysis of shunt, short shunt and long shunt SEIG // Proc. of IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bengaluru, 16-19 Dec. 2012. – Pp. 1–6.
6. Li Wang, Ching-Huei Lee. Long-shunt and short-shunt connections on dynamic performance of a SEIG feeding an induction motor load // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2000. – Vol.15. – No.1. – Pp. 1–7.
7. Singh, B., Singh, M., Tandon, A.K. Transient performance of series-compensated three-phase self-excited induction generator feeding dynamic loads // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2010. – Vol.46. – No.4. – Pp. 1271–1280.
8. Bodson M., Kiselychnyk O. Analysis of triggered self-excitation in induction generators and experimental validation // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2012. – Vol.27. – No.2. – Pp. 238–249.
9. Kiselychnyk O., Wang J., Bodson M., Pushkar M. Steady-state and dynamic characteristics of self-excited induction generators with resistive-inductive loads // Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, Italy, 18-20 June 2014. – Pp. 625–630.

Надійшла 20.01.2015