

ПОБУДОВА ГРАНИЦЬ САМОЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ УНІВЕРСАЛЬНОЇ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ

М. В. Пушкар, Н. Д. Красношарпа

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»*

Анотація. Розглядаються питання дослідження режимів роботи автономних систем генерації з асинхронними генераторами із самозбудженням. Запропонований алгоритм врахування нелінійності кривої намагнічування без попереднього експериментального визначення її параметрів за результатами дослідження холостого ходу даної асинхронної машини.

Ключові слова: автономна система генерації, асинхронний генератор, крива намагнічування.

Вступ

Розвиток сучасних технологій вимагає забезпечення надійного живлення споживачів електричною енергією. У випадках відключення електропостачання або для живлення віддалених споживачів найчастіше використовуються автономні генератори електричної енергії.

В діапазоні малих потужностей (приблизно до 3 кВт) економічні показники синхронних машин з постійними магнітами та асинхронних із короткозамкненим ротором приблизно однакові, проте із збільшенням потужності стрімко зростає вартість синхронних машин. Асинхронні машини із короткозамкненим ротором, починаючи з потужностей близько 5 кВт, суттєво дешевші, ніж синхронні з постійними магнітами, а максимальні значення потужностей двигунів досягають мегаватних значень. Тому в автономних системах генерації (особливо при відсутності жорстких вимог відносно масогабаритних розмірів установки) більш перспективними є асинхронні генератори із короткозамкненим ротором. Дані системи мають високу надійність, відносно невелику вартість та не потребують додаткових джерел енергії для збудження.

Проте, як відомо, на відміну від синхронних машин, вихідні напруга і частота асинхронного генератора залежать від швидкості обертання та величини навантаження. Іншим складним питанням, яке виникає при проектуванні та експлуатації даних систем генерації, є визначення умов виникнення самозбудження генератора. Для початку процесу самозбудження повинні бути узгоджені величини навантаження, швидкості обертання та ємності конденсаторів самозбудження. Тому, при проектуванні автономних систем генерації, обов'язково визначають зони стійкої роботи, в яких буде забезпечений процес самоз-

будження асинхронної машини.

Так як асинхронна машина є складним нелінійним елементом, то аналітичне дослідження автономних систем генерації є доволі складною задачею. Процес самозбудження асинхронної машини пов'язаний із ступенем насичення її магнітної системи. Нехтування нелінійністю кривої намагнічування не дозволяє отримати достовірний опис електромеханічних процесів.

Як свідчать публікації [1,2], при дослідженні асинхронних генераторів для врахування нелінійності магнітної системи машини часто застосовують експериментальні криві холостого ходу. Такий підхід дозволяє достатньо точно врахувати вплив намагнічування на роботу конкретної асинхронної машини. Суттєвим недоліком такого підходу є складність проведення самого дослідження холостого ходу, яке вимагає наявності регульованого джерела живлення постійної (номінальної) частоти із можливістю зміни напруги статора як вище, так і нижче номінального значення.

Подібні регулятори напруги мають достатньо високу вартість, а для двигунів великої потужності практична реалізація даного експерименту взагалі є проблематичною. Тому для розробки універсальної методики з проектування автономних систем генерації з асинхронними машинами з короткозамкненим ротором із самозбудженням, необхідно розробити математичний опис електромеханічних процесів, який дозволить уникнути використання експериментальної кривої намагнічування для кожного окремого генератора.

Метою роботи є розробка математичного апарату для врахування намагнічування асинхронної машини з короткозамкненим ротором без експериментального зняття її характеристики холостого ходу.

Матеріали досліджень

Розглянемо відому математична модель електричного перетворення енергії в двофазному асинхронному генераторі в системі координат $F-G$, яка обертається з довільною швидкістю [3]:

$$\frac{d\Psi_S}{dt} = U_S - R_S i_S - \omega_e J \Psi_S, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_R}{dt} = -R_R i_R + (n_p \omega - \omega_e) J \Psi_R, \quad (2)$$

де $\Psi_S = [\Psi_{SF} \quad \Psi_{SG}]^T$, $\Psi_R = [\Psi_{RF} \quad \Psi_{RG}]^T$ – вектори потокозчеплення статора і ротора, $i_S = [i_{SF} \quad i_{SG}]^T$, $i_R = [i_{RF} \quad i_{RG}]^T$ – вектори струмів статора і ротора в обертовій системі координат ($F-G$); $U_S = [U_{SF} \quad U_{SG}]^T$ – вектор напруги статора; R_S і R_R – активні опори статора і ротора, n_p – число пар полюсів, ω – кутова швидкість ротора, ω_e – кутова швидкість системи координат $F-G$. Прийнемо, що система координат $F-G$ обертається із швидкістю обертання вектора напруги статора асинхронної машини. Тоді ω_e буде дорівнювати швидкості обертання магнітного поля статорної обмотки генератора.

Потокозчеплення статора і ротора дорівнюють:

$$\Psi_S = L_{\sigma S} + L_M (i_S + i_R)$$

$$\Psi_R = L_{\sigma R} + L_M (i_S + i_R)$$

де $L_{\sigma S}$ і $L_{\sigma R}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора, L_M – взаємна індуктивність статора і ротора (індуктивність намагнічування). Знехтуємо насиченням індуктивності розсіювання, а індуктивність намагнічування представимо нелінійною функцією струму намагнічування:

$$L_M = \Psi_M / i_M,$$

де Ψ_M – амплітуда основного магнітного потокозчеплення; i_M – струм намагнічування.

Тоді

$$\frac{d\Psi_S}{dt} = L_{\sigma S} \frac{di_S}{dt} + \frac{dL_M}{dt} (i_S + i_R) + L_M \frac{d(i_S + i_R)}{dt};$$

$$\frac{d\Psi_R}{dt} = L_{\sigma R} \frac{di_R}{dt} + \frac{dL_M}{dt} (i_S + i_R) + L_M \frac{d(i_S + i_R)}{dt}.$$

Так як залежність $\frac{dL_M}{dt}$ невідома, то розглянемо її у вигляді:

$$\frac{dL_M}{dt} = \frac{dL_M}{di_M} \cdot \frac{di_M}{dt}.$$

Звідки

$$\frac{dL_M}{di_M} = \frac{d(\Psi_M / i_M)}{di_M} = \frac{L - L_M}{i_M},$$

де $L = d\Psi_M / di_M = L_M + i_M dL_M / di_M$ – динамічна індуктивність намагнічування.

Таким чином, для врахування нелінійності кривої намагнічування необхідно мати залежність $L_M(i_M)$.

Як відомо, найчастіше в практичних розрахунках криву намагнічування отримують за результатами дослідження холостого ходу машини. При знятті характеристики холостого ходу, враховуючи явище гістерезису, спочатку поступово збільшують напругу на статорі асинхронної машини, а потім зменшують.

За результатами експерименту визначають величину повного опору машини Z :

$$Z = \frac{U}{I},$$

де U та I – напруга та струм холостого ходу відповідно.

Також величину повного опору розраховують за схемою заміщення асинхронної машини:

$$Z = \sqrt{R_S^2 + (2\pi f_n (L_{\sigma S} + L_M))^2},$$

де f_n – частота напруги живлення.

Звідки індуктивність намагнічування визначиться за формулою:

$$L_M = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_S^2}}{2\pi f_n} - L_{\sigma S}. \quad (3)$$

Для використання в подальших розрахунках отриману експериментальну залежність $L_M(i_M)$ апроксимують за певним законом [4].

Даний спосіб є досить точним, якщо є можливість зняти характеристику холостого ходу потрібної електричної машини, але, як відмічалося раніше, даний експеримент пов'язаний із суттєвими технічними складнощами реалізації регульованого джерела напруги. Іншою проблемою є визначення коефіцієнтів апроксимуючої залежності для кожного окремого двигуна.

ЕРС асинхронної машини прямо пропорційна величині магнітного потоку. Таким чином, для різних двигунів з однаковою фазною напругою заданому значенню напруги холостого ходу будуть відповідати значення струму намагнічу-

вання, які пропорційні їх потужності. Тобто, в такому випадку, збільшенню потужності двигуна буде відповідати «розтягування» характеристики холостого ходу вздовж осі струму.

При розрахунках характеристик асинхронних машин також можуть використовуватись характеристика холостого ходу та крива намагнічування, побудовані у відносних одиницях, які можуть бути застосовані для більшості двигунів певного типу [5]. В роботах [6–7] приведені результати досліджень, в яких використовуються характеристики холостого ходу асинхронних машин у відносних одиницях для розрахунку режимів роботи та визначення величини втрат в сталі.

Використаємо аналогічний підхід для дослідження процесів в автономній системі генерації з асинхронним генератором із самозбудженням. В роботах [3–4] описано методику апроксимації експериментально знятої характеристики холостого ходу асинхронного двигуна АИРМ63В4У3. Дана машина має наступні паспортні дані: номінальна потужність 0,37 кВт; номінальна фазна напруга статора 220 В, номінальна частота мережі живлення 50 Гц, номінальна частота обертання 1450 об/хв. Через неможливість точного визначення параметрів схеми заміщення візьмемо їх з довідника [8] для аналогічного двигуна серії 4А: $R_S=27$ Ом, $R_R=17,9$ Ом, $L_{\sigma S} = L_{\sigma R} = 0,08266$ Гн, $L_M = 0,82$ Гн.

Для спрощення подальшого аналізу у співвідношенні (3) знехтуємо падінням напруги на активному та індуктивному опорах кола статора, які суттєво менші опору контуру намагнічування. Тоді величина індуктивності намагнічування порівнюватиме:

$$L_M = \frac{U}{2\pi f_n I}. \quad (4)$$

Для переведення апроксимованої залежності $L_M = f(i_M)$ у відносні одиниці, струм намагнічування поділимо на величину струму холостого ходу машини (I_{S0}) при номінальній напрузі (для даного двигуна $I_{S0} = 0,85$ А). В якості базового значення індуктивності намагнічування L_n приймемо значення L_n , що відповідатиме номінальній фазній напрузі статора $U_{Sn} = 220$ В (обмотки даного двигуна з'єднані за схемою «зірка») та номінальному струму холостого ходу:

$$L_n = \frac{U_{Sn}}{2\pi f_n I_{S0}}. \quad (5)$$

$$\text{Тоді } L_M^* = \frac{L_M}{L_n}, \quad i_M^* = \frac{i_M}{I_{S0}},$$

де L_M^* та i_M^* – індуктивність та струм намагнічування у відносних одиницях.

Для подальшого використання отриманої залежності в математичній моделі системи автономної генерації з асинхронним генератором із самозбудженням необхідно здійснювати перехід до абсолютних значень із врахуванням величини струму холостого ходу (I_{S01}) того двигуна, дослідження якого проводиться:

$$i_M = i_M^* \cdot I_{S01};$$

$$L_M = L_M^* \cdot L_{n1};$$

$$L_{n1} = \frac{U_{Sn}}{2\pi f_n I_{S01}}.$$

Для перевірки зроблених припущень застосуємо дану методику для визначення зони самозбудження автономної системи генерації із асинхронною машиною АИР112М4У3 з наступними паспортними даними: номінальна потужність 5,5 кВт; номінальна фазна напруга статора 220 В, номінальна частота мережі живлення 50 Гц, номінальна частота обертання 1450 об/хв. Промодельюємо двофазну модель автономної системи генерації із самозбудженням за допомогою включених паралельно до обмотки статора конденсаторів при роботі на активне навантаження. Зона самозбудження описується відомим рівнянням [3], яке отримане із загального математичного опису системи (рівняння (1)–(2)) [9]:

$$f_1 \omega_e^4 + f_2 \omega_e^2 + f_3 = 0, \quad (6)$$

де

$$f_1 = C^2 L_S (L_S L_R - L_M^2) > 0, \quad f_3 = L_R (Y_L R_S + 1)^2 > 0,$$

$$f_2 = Y_L^2 L_S (L_S L_R - L_M^2) + C^2 R_S^2 L_R - C(2L_S L_R - L_M^2),$$

$$L_S = L_{\sigma S} + L_M, \quad L_R = L_{\sigma R} + L_M.$$

В рівняннях використанні наступні позначення: C – ємність конденсаторів самозбудження; Y_L – провідність активного навантаження; L_S , L_R – індуктивності статора і ротора.

Рівняння (6) має четвертий порядок відносно кутової швидкості поля статора ω_e та є біквадратним відносно ω_e^2 , тому умова існування дійсних коренів:

$$f_2 < -2\sqrt{f_1 f_3}. \quad (7)$$

При виконанні умови (7) рівняння (6) матиме два дійсні кореня, які позначимо, як $\omega_{e.min}$ та $\omega_{e.max}$.

Швидкість обертання генератора, при якій можливе самозбудження, визначимо відповідно до [9]

$$\omega = \frac{1}{n_p} \left(\omega_e - \frac{Y_L R_S R_R - \omega_e^2 C R_R L_S + R_R}{\omega_e (Y_L (L_S L_R - L_M^2) + R_S L_R C)} \right). \quad (8)$$

Підставляючи в рівняння (8) значення $\omega_{e.min}$ та $\omega_{e.max}$, можна знайти відповідні ним швидкості обертання ротора ω_{min} та ω_{max} , які визначають межі зони, в якій може виникнути самозбудження при заданих величинах навантаження та ємності конденсаторів самозбудження (це так звана «зона самозбудження генератора»).

З іншого боку, рівняння (6) може бути розв'язано відносно величини ємності конденсаторів самозбудження C при заданій величині ω_e :

$$g_1 C^2 - g_2 C + g_3 = 0, \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} g_1 &= L_S (L_S L_R - L_M^2) \omega_e^4 + R_S^2 L_R \omega_e^2 > 0, \\ g_2 &= (2L_S L_R - L_M^2) \omega_e^2 > 0, \\ g_3 &= Y_L^2 (L_S (L_S L_R - L_M^2) \omega_e^2 + R_S^2 L_R) + \\ &+ 2L_R R_S Y_L + L_R > 0. \end{aligned}$$

Рівняння (9) буде мати дійсні корені C_{min} та C_{max} при виконанні умови

$$g_2 > 2\sqrt{g_1 g_3}. \quad (10)$$

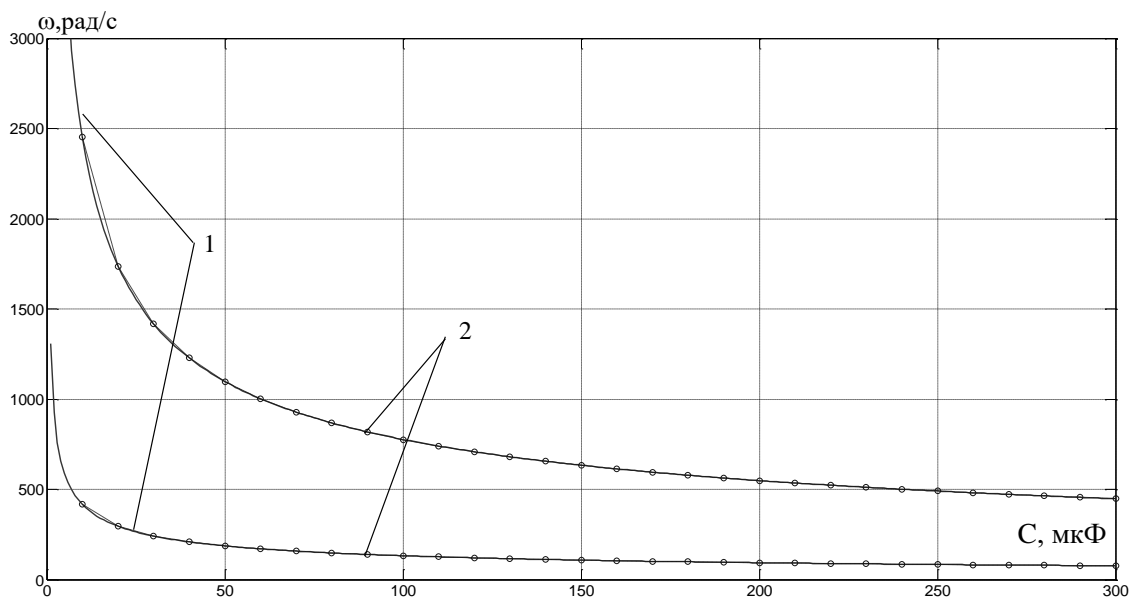


Рис. 1. Границі самозбудження асинхронного генератора при $Y_L = 0$

Підставивши отримані значення C_{min} та C_{max} в рівняння (8), знаходимо відповідні ним величини швидкостей ω_{min} та ω_{max} .

На рисунках 1–3 представлені результати визначення зони самозбудження для автономної системи генерації з асинхронним генератором із самозбудженням потужністю 5,5 кВт.

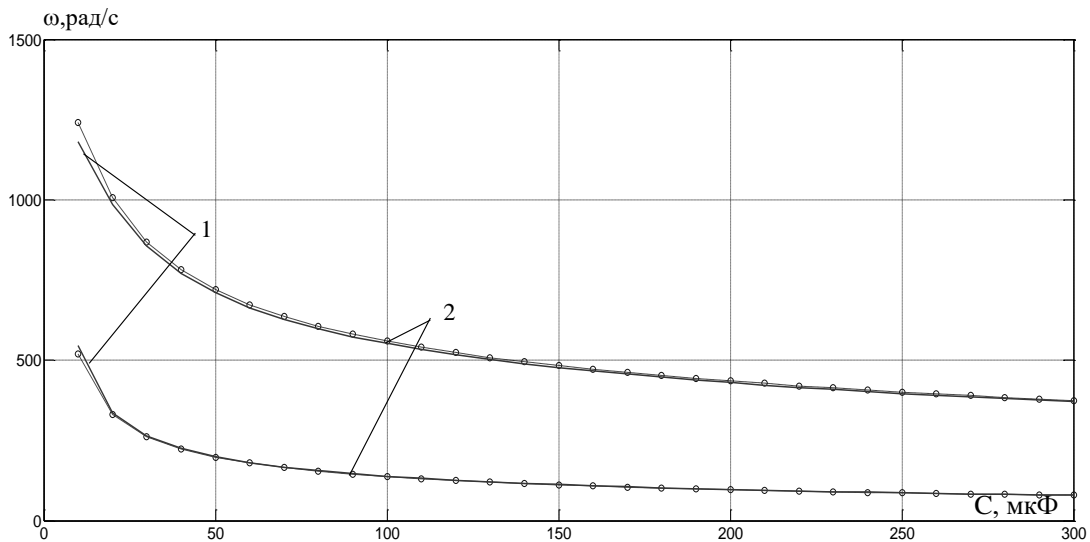
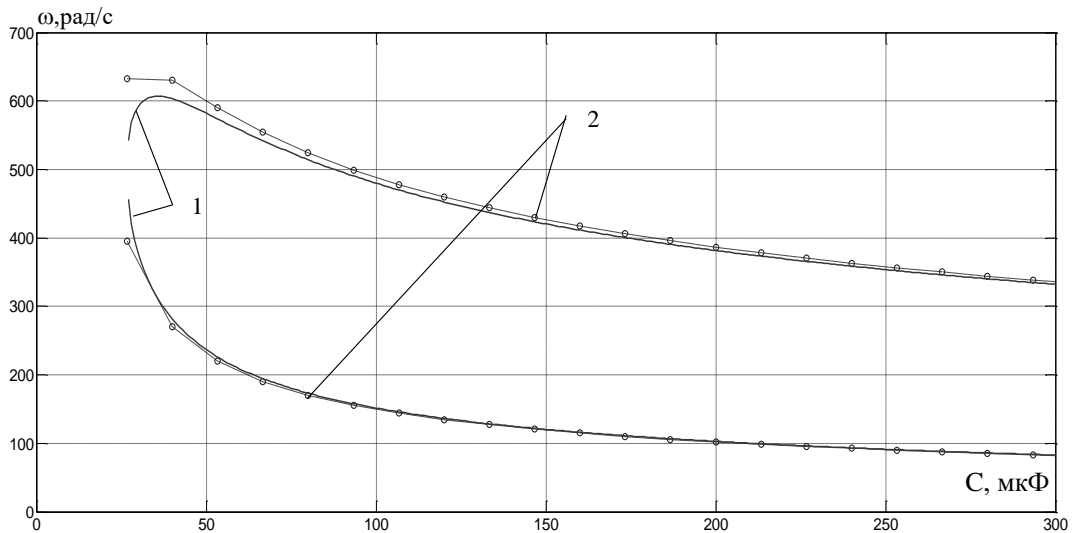
Дослідження проводились на моделях двох типів: 1) із використанням експериментально знятої характеристики холостого ходу даної електричної машини (лінія 1, суцільна, без маркерів); 2) при застосуванні апроксимованої кривої намагнічування у відносних одиницях, яка була попередньо визначена за результатами дослідження холостого ходу асинхронної машини АИРМ63В4У3 потужністю 0,37 кВт (лінія 2, пунктирна, з маркерами).

Дослідження проводились для трьох видів активного навантаження: без навантаження $Y_L = 0$ (рис. 1), з провідністю навантаження $Y_L = 1/60$ См (рис. 2) та $Y_L = 1/30$ См (рис. 3).

Аналіз отриманих результатів показує, що результати моделювання за обома моделями практично повністю збігаються. Похибка дещо збільшується при зростанні величини провідності активного навантаження Y_L .

Висновки

Отримані результати показали, що при проведенні досліджень автономних систем генерації з асинхронними генераторами із самозбудженням для врахування нелінійності кривої намагнічування можливе застосування апроксимованої

Рис. 2. Границі самозбудження асинхронного генератора при $Y_L = 1/60 \text{ См}$ Рис. 3. Границі самозбудження асинхронного генератора при $Y_L = 1/30 \text{ См}$

залежності у відносних одиницях, яка була отримана за результатами експериментального дослідження режиму холостого ходу іншої асинхронної машини даної серії при однакових номінальних напругах на фазах статора. Такий підхід дозволяє суттєво спростити як процес проектування нових автономних систем генерації, так і дослідження вже існуючих.

Список використаної літератури

1. A. Kishore, G.S. Kumar, "Dynamic modeling and analysis of three phase self-excited induction generator using generalized state space approach" [Text], Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM, 2006, pp. 1459 – 1466.
2. V. Sandeep, S. S. Murthy and B. Singh, "A comparative study on approaches to curve fitting of magnetization characteristics for induction generators" [Text], 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bengaluru, 2012, pp. 1–6.
3. Kiselychnyk, O., Wang, J., Bodson, M., Pushkar, M. "Steady-state and dynamic characteristics of self-excited induction generators with resistive-inductive loads" [Text], Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, Italy, 18-20 June 2014, pp. 625–630
4. M. Pushkar, N. Krasnoshapka, M. Pechenik, V. Bovkunovych, "Method of approximation the magnetizing inductance curves of self-excited induction generators" [Text], 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 395–398.
5. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С. Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

6. Ченчевой, В. В. Природа аномального роста потерь в электротехнической стали в режиме глубокого насыщения [Текст] / В. В. Ченчевой, Д. И. Родькин, В. О. Огарь // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (25). – С. 76–94.

7. Родькин, Д. И. Об определении потерь в стали асинхронного двигателя при глубоком ее насыщении [Текст] / Д. И. Родькин, В. В. Ченчевой, В. О. Огарь // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 75–85.

8. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник [Текст] / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

9. Bodson, M. Analytic conditions for spontaneous self-excitation in induction generators [Text] / M. Bodson, O. Kiselychnyk // Proc. of the American Control Conference, Baltimore, MD. – 2010. – P. 2527–2532.

References

1. A. Kishore, G.S. Kumar (2006), “Dynamic modeling and analysis of three phase self-excited induction generator using generalized state space approach”, Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM, pp. 1459–1466.

2. V. Sandeep, S. S. Murthy and B. Singh (2012), “A comparative study on approaches to curve fitting of magnetization characteristics for induction generators”, 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bengaluru, pp. 1–6.

3. Kiselychnyk, O., Wang, J., Bodson, M., Pushkar M. (2014), “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

4. M. Pushkar, N. Krasnoshapka, M. Pechenik, V. Bovkunovych (2017), “Method of approximation the magnetizing inductance curves of self-excited induction generators”, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, pp. 395–398.

5. Veshenevskiy, S. N. (1977), Characteristics of motors in the electric drive [Harakteristiki dvigateley v elektroprivode], Moscow, Russian Federation, Energiya, 432 p.

6. Chencheyov, V., Rodkin, D., Ogar, V. (2014), The Nature Of The Abnormal Growth Of Losses In Electrical Steel In Deep Of The Saturation Mode [Priroda anomalnogo rosta poter v elektrotehnicheskoy stali v rezhime glubokogo nasyschenia]. Elektromehanichni i energozberigaiuchi systemy. Schokvartalniy naukovo-vyrobnychiy zurnal – Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal, Kremenchuk, № 1/2014 (25), pp.76–94.

7. Rodkin, D. I., Chencheyov, V. V., Ogar, V. O. (2013), Determination of the iron loss of induction motor with its deep saturation [Ob opredelenii poter v stali asinhronnogo dvigatelja pri glubokom ee nasyschenii], Elektromehanichni i energozberigaiuchi systemy. Schokvartalniy naukovo-vyrobnychiy zurnal – Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal, Kremenchuk, № 2/2013 (22), pp.75–85.

8. Kravchik, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I., and Sobolevskaya, E.A. (1982), Induction Motors Series 4A. Directory [Asinhronnie dvigateli serii 4A. Spravochnik] Moscow, Russian Federation, Energoatomizdat, 504 p.

9. Bodson, M. (2010), Analytic conditions for spontaneous self-excitation in induction generators/ M. Bodson, O. Kiselychnyk // Proc. of the American Control Conference, Baltimore, MD. P. 2527–2532.

BUILDING THE SELF-EXCITATION BOUNDARIES OF INDUCTION GENERATORS USING UNIVERSAL MAGNETIZING INDUCTANCE CURVE

M. Pushkar, N. Krasnoshapka

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract. Self-excited Induction generators are widely-spread in autonomous electrical power generating systems and do not need external power sources for their excitation. Thus generated voltage magnitude and frequency values depend on the rotor angular speed, value of load and the value of excitation capacitors. That is why for the design of new generating systems with self-excited induction generators it is necessary to obtain its self-excitation boundaries. The self-excited induction generator is a complex nonlinear system. A necessary condition for obtaining a reliable mathematical description of the processes of electromechanical energy conversion in autonomous generation systems is the inclusion of the magnetic system

saturation of self-excited induction generator. The aim of the work is to obtain a mathematical description of the processes of electromechanical energy conversion in self-excited induction generator without using the experimental idling characteristic. The paper proposes a method for taking into account the saturation of the magnetic system of the generator by using the approximated dependence of the magnetization curve in relative units obtained for a generator of a similar series for identical phase voltages. The paper compares the results of calculating the self-excitation boundaries for an induction generator with a power of 5.5 kW when operating without load and with two values of the active load. In the first case, a mathematical model was used, using the experimentally-sampled idle speed characteristic of this generator. The second series of calculations were carried out using an approximated magnetization curve of self-excited induction generator with a power of 0.37 kW with conversion to relative units. Comparison of the results shows a high accuracy of coincidence of the self-excitation boundaries. The error increases somewhat with the increase in the active load admittance. This approach avoids the experimental determination of characteristics for a wide range of generators.

Keywords autonomous generating system, induction generator, magnetizing curve.

ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЦ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Н. В. Пушкар, Н. Д. Красношарпа

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Аннотация. Рассматриваются вопросы исследования режимов работы автономных систем генерирования с асинхронными генераторами с самовозбуждением. Предложен алгоритм учета нелинейности кривой намагничивания без предварительного экспериментального определения ее параметров по результатам опыта холостого хода данной асинхронной машины.

Ключевые слова: автономная система генерирования, асинхронный генератор, кривая намагничивания

Отримано 23.03.2018



Пушкар Микола Васильович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації електромеханічних систем і електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: m.pushkar@kpi.ua, тел. +38-044 204-83-56.

Mykola Pushkar, Ph.D. Engineering, Senior Lecturer of Department of Automation of electromechanical systems and electrical drives, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: m.pushkar@kpi.ua, phone +38-044 204-83-56.

ORCID ID 0000-0002-9576-6433



Красношарпа Наталія Дмитрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем і електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: n.krasnoshapka@gmail.com, тел +38-044 204-83-56.

Nataliya Krasnoshapka, Ph.D. Engineering, Associate Professor of Department of Automation of electromechanical systems and electrical drives, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: n.krasnoshapka@gmail.com, phone +38-044 204-83-56.

ORCID ID 0000-0002-5449-2691