

РОБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ПІДМАГНІЧУВАННІ СТОРОННЬОЮ ЄМНІСТЮ

І.Я. Коваленко, асистент, аспірант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
03056, пр-т. Перемоги, 37, м. Київ, Україна.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна.

Вітроенергетика є екологічно чистим та ефективним засобом перетворення механічної енергії вітру на електричну. Вітроагрегати продовжують активно використовуватись до цього часу. Разом з тим проводяться активні роботи з вдосконалення вітрогенерувальних комплексів та підвищення ефективності перетворення енергії вітру на електричну. Одним зі способів підвищення ефективності перетворення енергії вітру на електричну є підмагнічування електрогенератора з постійними магнітами сторонньою статичною ємністю. Розроблено математичну модель для оцінки величини ємності, яку необхідно приєднати до обмотки статора електрогенератора, залежно від ряду умов: величини та характеру навантаження; параметрів електрогенератора; підвищення величини напруги на затискачах; підвищення активної потужності на виході електрогенератора. За результатами розрахунків отримано вираз, що дозволяє оцінити необхідну величину ємності при чисто активному навантаженні.

Для діапазону потужності електрогенератора, що досліджувався, від нуля до номінального значення, величина ємності, яку необхідно приєднати до обмотки якоря електрогенератора з постійними магнітами становить 4,3–32,1 мкФ, що дає змогу забезпечити напругу на затискачах генератора близько номінальної з похибкою $\pm 5\%$. При використанні додаткової підмагнічувальної ємності для підвищення активної потужності генератора спостерігається її приріст на рівні 10–15%. Результати розрахунку необхідної величини сторонньої ємності генератора підтверджують адекватність розробленої моделі та достовірність отриманих результатів, що дозволяє використовувати цю модель для подальших досліджень та оцінки ефективності методів і засобів підвищення ефективності перетворення енергії вітру. Бібл. 7, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: вітроустановка, синхронний генератор, підмагнічувальна ємність, постійні магніти.

OPERATION OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS DURING THE MAGNETIZATION OF A SIDE CAPACITY

I. Kovalenko, assistant, PhD student

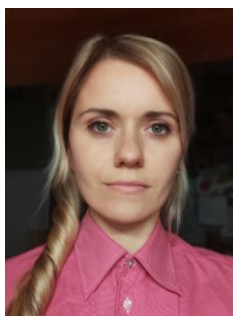
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
03056, 37 Peremohy Av., Kyiv, Ukraine.

Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine,
02094, 20A, Hnat Khotkevich Str., Kyiv, Ukraine

Wind energy is an environmentally friendly and efficient means of converting mechanical wind energy into electricity. Wind turbines continue to be actively used to this day. At the same time, active work is being done to improve wind generating complexes and increase the efficiency of converting wind energy into electricity. One of the ways to increase the efficiency of conversion of wind energy into electricity is to magnetize the generator with permanent magnets by a third-party static capacity. A mathematical model has been developed to estimate the value of the capacitance that must be connected to the stator winding of the generator depending on a number of conditions: the size and nature of the load; parameters of the electric generator; increasing the voltage on the clamps; increasing the active power at the output of the generator. According to the results of the calculations, an expression is obtained that allows to estimate the required value of the capacity at a purely active load. For the power range of the electric generator from 0 to $\approx P_n$ the value of capacity which needs to be connected to a winding of an armature of the electric generator with permanent magnets makes 4,3 – 32,1 μF . This provides a voltage at the terminals of the generator $\approx U_n$ with an error of $\pm 5\%$. When using an additional magnetizing capacity to increase the active power of the generator, there is an increase in power at the level of 10–15%. This is due to the increase in voltage at the generator terminals.

The results of calculating the required value of the external capacity of the generator confirm the adequacy of the developed model and the reliability of the results, which allows to use this model for further research and evaluation of methods and means to improve wind energy conversion efficiency. Bibl. 7, table 3, fig. 5.

Keywords: wind turbine, synchronous generator, magnetizing capacity, permanent magnets.



I.Ya. Kovalenko
I Kovalenko

Відомості про автора: асистентка кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірантка

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність: нетрадиційні джерела енергії

Наукова сфера: відновлювана енергетика

Публікації: 8

ORCID: 0000-0003-1097-2041

Контакти: тел./факс: +38(097)939-96-73

e-mail: 2048141@ukr.net

Author information: assistant of the Department of Renewable Energy Sources of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", PhD student

Education: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky". Specialty - non-traditional energy sources

Research area: renewable energy

Publications: 8

ORCID: 0000-0003-1097-2041

Contacts: tel./fax: + 38(097)939-96-73

e-mail: 2048141@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

E_{δ} – електрорушійна сила, індукована в обмотці якоря основним магнітним потоком;

I_1, U_1 – струм та напруга обмотки якоря;

R_1, X_1 – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки якоря;

R_n, X_n – активний та індуктивний опір навантаження;

I_c, X_c – струм в колі конденсатора та його опір;

F – частота процесів в обмотці статора;

X_m – індуктивний опір взаємоіндукції.

Вступ. На сьогодні синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ) становлять основу автономних генераторів для традиційних і нетрадиційних комплексів та систем перетворення механічної енергії вітру на електричну. Переважною задачею таких систем є стабілізація вихідних параметрів та максимально ефективно перетворення енергії вітрового потоку на електричну. Одним зі способів стабілізації вихідних параметрів є підмагнічування електрогенератора сторонньою ємністю. Однак у цей час питанню щодо розрахунку доцільної величини ємності для того чи іншого типу генератора приділяється недостатньо уваги.

Постановка завдання. Мета роботи полягає в розробці математичної моделі, що дозволяє отримати необхідну величину розрахункової ємності для впливу на ефективно перетворення механічної енергії вітрового потоку на електричну.

Результати досліджень. За основу взято електрогенератор конструкції, параметри та характеристики якого описані в роботах вітчизняних авторів [1, 2]. Для оцінки статичних характеристик системи вітроагрегат–електрогенератор із постійними магнітами доцільно модифікувати розроблену раніше математичну модель в середовищі MATLAB-Simulink.

Для розрахунку величини ємності, яку необхідно приєднати до обмотки якоря СГПМ, використана заступна схема, що наведена на рис.1 [3]. У разі, коли СГПМ працює в автономному режимі, напруга та її частота, визначаються швидкістю обертання привідного ротора (ротора вітроустановки), величиною приєднаної до обмотки якоря ємності та величиною навантаження генератора.

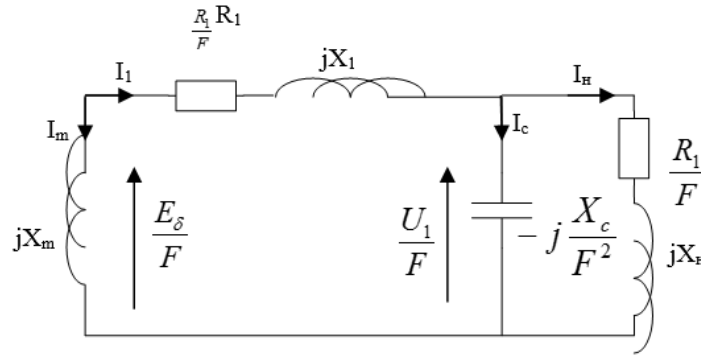


Рис. 1. Заступна схема СГПМ
Fig. 1. Substitute scheme SGPM

На рис. 1 використані позначення: E_δ – ЕРС (електрорушійна сила), індукована в обмотці якоря основним магнітним потоком; I_1 , U_1 – струм і напруга обмотки якоря; R_1 , X_1 – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки якоря; R_n , X_n – активний та індуктивний опір навантаження; I_c , X_c – струм в колі конденсатора та його опір; F – частота струму й напруги в обмотці статора; X_m – індуктивний опір взаємоіндукції, що є еквівалентним магнітним опором взаємоіндукції між потоком постійних магнітів та обмоткою якоря.

Всі індуктивні опори заступної схеми приведені до номінальної частоти обмотки статора F та відносної частоти обертання ротора генератора ω . Також необхідно враховувати, що індуктивний опір намагнічування X_m є змінною величиною, яка залежить від величини E_δ , при номінальній частоті F . Цей процес залежить від параметрів електротехнічної сталі та описується кривою намагнічування, яка математично описується кубічним рівнянням [4–6]:

$$\frac{E_\delta}{F}(X_m) = k_3 \cdot X_m^3 + k_2 \cdot X_m^2 + k_1 \cdot X_m + k_0 \quad (1)$$

У рівнянні (1) коефіцієнти k_0 , k_1 , k_2 та k_3 обчислюються у системі відносних одиниць за відомими алгоритмами [4–6].

Для зручності обчислення необхідної величини розрахункової ємності СГПМ всі опори заступної схеми зводяться до трьох послідовно з'єднаних опорів Z_1 , Z_2 та Z_3 :

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \quad (2)$$

$$Z_2 = jX_m \quad (3)$$

$$Z_3 = \frac{\left(-\frac{jX_c}{F^2}\right)\left(\frac{R_n}{F} + jX_n\right)}{\left(-\frac{jX_c}{F^2}\right) + \left(\frac{R_n}{F} + jX_n\right)} \quad (4)$$

Рівняння (2), (3) та (4) відповідають спрощеній заступній схемі, що наведена на рис. 2.

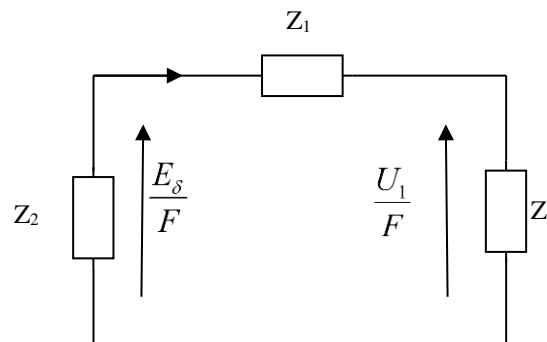


Рис. 2. Спрощена заступна схема СГПМ
Fig. 2. Simplified substitution scheme SGPM

Сумарний опір спрощеної заступної схеми СГПМ (див. рис. 2), відповідно до першого закону Кіргофа, описується таким рівнянням:

$$\begin{aligned} Z_T &= Z_1 + Z_2 + Z_3 \\ I_1 \cdot Z_T &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Після декількох математичних перетворень реальна та уявна частини повного опору Z_T розкладаються у систему з двох поліноміальних виразів:

$$\begin{cases} f_1 = \text{Im}(Z_T) = 0 \\ f_2 = \text{Re}(Z_T) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Функції в системі рівнянь (6) описуються такими виразами:

$$\begin{aligned} f_1 &= a_1 F + a_2 F^2 + a_3 F^3 + a_4 F^4 + a_5 F^5 \\ f_2 &= b_0 + b_1 F + b_2 F^2 + b_3 F^3 + b_4 F^4, \end{aligned}$$

де коефіцієнти в рівнянні (6) a_1 – a_5 та b_1 – b_4 [4–6]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \varepsilon_6 X_C^2 - a_6 R_n^2; \\ a_2 &= -2\varepsilon_3 X_C^2 + R_n^2 a_2 X_C; \\ a_3 &= \varepsilon_3 X_C^2 - \varepsilon_4 X_C + \varepsilon_5; \\ a_4 &= 2(-\varepsilon_1 X_C - R_n^2 a_1); \quad a_5 = \varepsilon_1 X_C + \varepsilon_2; \\ b_0 &= \beta_4 a_5 X_C^2; \quad b_1 = -\delta_1 X_C^2; \\ b_2 &= (R_n a_2 + \delta_2) X_C^2 + (2X_n \delta_3) X_C + \beta_5 a_4; \\ b_3 &= (2X_n \delta_4) X_C - R_n^2 \delta_4; \quad b_4 = -2\delta_5 X_C \end{aligned}$$

Значення всіх коефіцієнтів a_1 – a_6 , ε_1 – ε_6 , β_1 – β_5 та δ_1 – δ_5 визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} a_1 &= X_m^2 X_1; \quad a_2 = X_m^2; \quad a_3 = R_1^2 (1 + X_1); \\ a_4 &= R_1^2 (X_m + X_1); \quad a_5 = R_n^2 (X_m + X_1); \\ a_6 &= (R_n^2 + X_1); \\ \varepsilon_1 &= (-a_2 - 2a_1 X_n); \quad \varepsilon_2 = (a_1 X_n^2 + R_n^2 a_1); \\ \varepsilon_3 &= a_2 X_n + a_1; \quad \varepsilon_4 = [a_6 X_n^2 + (2a_1 X_n) + R_n^2 a_2]; \\ \varepsilon_5 &= R_n^2 (a_4 + a_1); \quad \varepsilon_6 = (a_6 X_n + a_1); \\ \beta_1 &= R_n X_m^2; \quad \beta_2 = R_1 a_2; \quad \beta_3 = R_n^2 R_1; \\ \beta_4 &= R_1^2 R_n; \quad \beta_5 = R_n + R_1; \\ \delta_1 &= (2a_2 \beta_5 + \beta_1); \quad \delta_2 = (\beta_1 + \beta_2); \\ \delta_3 &= (\beta_2 + \beta_3); \\ \delta_4 &= (\beta_1 + 2\beta_2); \quad \delta_5 = (\beta_1 + \beta_2 X_n). \end{aligned}$$

Вираз (6) необхідно розв'язувати для випадку, коли відомі значення індуктивності взаємодукції X_m та невідомих значень опору додаткової ємності X_c при частоті струмів та напруги в обмотці якоря F . Враховуючи вищевикладене, отримаємо такий вираз:

$$f(X) = 0, \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} f &= [f_1 \quad f_2]^T \\ X &= [X_C \quad F]^T \end{aligned}$$

Для розв'язку системи рівнянь (6) використовується алгоритм Ньютона – Рафсона. Даний метод є найбільш простим та ефективним порівняно з іншими методами [7].

Для визначення необхідної величини ємності скористаємося спрощеною заступною схемою (див. рис. 2), згідно з якою напруга на затискачах обмотки статора СГПМ визначається як

$$U_1 = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1} E_\delta \quad (8)$$

Якщо прийняти за основу припущення, що напруга на затискачах обмотки статора генератора повинна бути номінальною, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} f_1 = \text{Im}(Z_T) = 0 \\ f_2 = \text{Re}(Z_T) = 0 \\ f_3 = \left| \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1} \right| \cdot E_\delta - U_{1n} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Для заданого режиму роботи та навантаження обмотки статора напруга обмотки статора залежить від величини ємності конденсатора X_c та від величини наведеної ЕРС в обмотці якоря потоком постійних магнітів (E_δ).

Для оцінки залежності ємності конденсатора C , що приєднується до затискачів обмотки якоря генератора, прийняті такі припущення:

– швидкість вітру приймається постійною;

– швидкість обертання ротора генератора n , а отже, і частота f ЕРС та струмів генератора приймається постійною;

– для спрощення розрахунків приймається чисто активне навантаження генератора: $Z_n=R_n$;

– напруга на затискачах генератора та його параметри приймаються постійними.

Враховуючи згадані вище припущення, умовою для розрахунку ємності в разі шунтового приєднання буде:

$$\left| \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1} \right| \cdot E_\delta - U_{1n} = 0 \quad (10)$$

Опори Z_1 та Z_3 визначаються в такий спосіб:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_3 &= -\frac{jX_c R_n}{R_n - jX_c} \end{aligned} \quad (11)$$

Після перетворень отримуємо вираз:

$$\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} = \frac{-jX_c R_n}{-jX_c R_n + R_1 R_n - jX_c R_1 + jX_1 R_1 + X_1 X_c} \quad (12)$$

Підставивши вираз (12) у вираз (10), отримаємо:

$$X_c = \frac{U_1 R_1 (R_n + jX_1)}{[U_1 X_1 + j(R_n U_1 + R_1 U_1 - R_n E_\delta)]} \quad (13)$$

З виразу (13) визначається необхідна величина ємності конденсатора на одну фазу

шляхом перетворення. Для цього необхідно визначити модуль комплексного числа (13). Після декількох математичних перетворень вираз (13) набуває такого вигляду:

$$X_c = \frac{U_1^2 X_1 R_1 R_n + U_1 R_1 X_1 a}{U_1^2 X_1^2 + a^2} + j \frac{U_1^2 X_1^2 - U_1 R_1 R_n a}{U_1^2 X_1^2 + a^2} \quad (14)$$

З виразу (14) визначається модуль комплексного числа X_c , з якого далі визначається величина додаткової ємності:

$$X_c = \sqrt{\left(\frac{U_1^2 X_1 R_1 R_n + U_1 R_1 X_1 a}{U_1^2 X_1^2 + a^2} \right)^2 + \left(\frac{U_1^2 X_1^2 - U_1 R_1 R_n a}{U_1^2 X_1^2 + a^2} \right)^2}, \quad (15)$$

де $a = R_n U_1 + R_1 U_1 - R_n E_\delta$

З виразу (15) визначається величина додаткової підмагнічувальної ємності згідно з виразом:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (16)$$

Згідно з виразом (15) величина ємності залежить від параметрів обмотки якоря електрогенератора, величини взаємодукції, характеру та величини навантаження. Підставимо параметри досліджуваного генератора та визначимо величину розрахункової ємності при номінальному навантаженні. Параметри генератора та навантаження наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри генератора та навантаження

Table 1. Generator parameters and load parameters

| Параметр | Значення | Одиниці виміру |
|----------|----------|----------------|
| R1 | 8,8 | Ом |
| X1 | 6,9 | Ом |
| U1 | 24 | В |
| Rn | 33,0 | Ом |
| Eδ | 26,4 | В |

$$X_c = \sqrt{\left(\frac{24^2 \cdot 6,9 \cdot 8,8 \cdot 33 + 24 \cdot 8,8 \cdot 6,9 \cdot (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4)}{24^2 6,9^2 + (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4)^2}\right)^2 + \left(\frac{24^2 6,9^2 - 24 \cdot 8,8 \cdot 33 \cdot (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4)}{24^2 6,9^2 + (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4)^2}\right)^2} = 99,21 \text{ Ом}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = 32,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

При постійній швидкості обертання ротора вітроустановки та при заданій величині навантаження генератора розраховується значення ємності, необхідне для підтримки заданої величини напруги. Задаємось відхиленням напруги електрогенератора на його виході в межах +5 %, - 5 % від номінальної. При цьому рівняння (9) необхідно розв'язувати за незмінних

значень вихідної напруги U_{\max} та U_{\min} . Кожна розрахункова величина ємності дозволяє СГПМ працювати у фіксованому діапазоні потужності в межах заданої похибки за вихідною напругою. Розрахункові значення ємності, що забезпечують максимальне значення потужності при зміні навантаження та постійній швидкості вітру 5 м/с, наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Значення додаткової ємності для підтримки $U_1 \approx U_n + 5\%, - 5\%$

Table 2. The value of the additional capacity to support $U_1 \approx U_n + 5\%, - 5\%$

| Діапазон зміни потужності | 0 – P ₀ | P ₀ – P ₁ | P ₁ – P ₂ | P ₃ – P ₄ | P ₅ – P ₆ |
|--|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Діапазон потужності, Вт | 0–17 | 17–36 | 36–58 | 58–77 | 77–86 |
| Ємність збудження (аналітичний метод), мкФ | 4,3 | 8,9 | 15,7 | 26,3 | 32,1 |
| Ємність збудження (моделювання в MATLAB-Simulink), мкФ | 4,056 | 8,72 | 16,5 | 27,17 | 30,68 |

Отже, наведені методичні положення дозволяють розрахувати доцільне значення ємності конденсаторів, що приєднуються до статора електрогенератора при постійній швидкості вітру та постійному навантаженні.

В табл. 3 наведені результати розрахунку величини ємності, що приєднуються до статора генератора, при якій він віддає максимальну потужність за умови, що швидкість вітру постійна, 4 м/с, і постійне навантаження, 33,0 Ом.

Таблиця 3. Залежність максимальної потужності СГПМ від додаткової ємності

Table 3. Dependence of the maximum power of SGPM on additional capacity

| | | | | |
|--------|----|------|------|-------|
| C, мкФ | 0 | 11,3 | 30 | 100 |
| P, Вт | 42 | 52,5 | 50,3 | 30,82 |

Для наочності дані табл. 2, подамо в графічному вигляді (рис. 3).

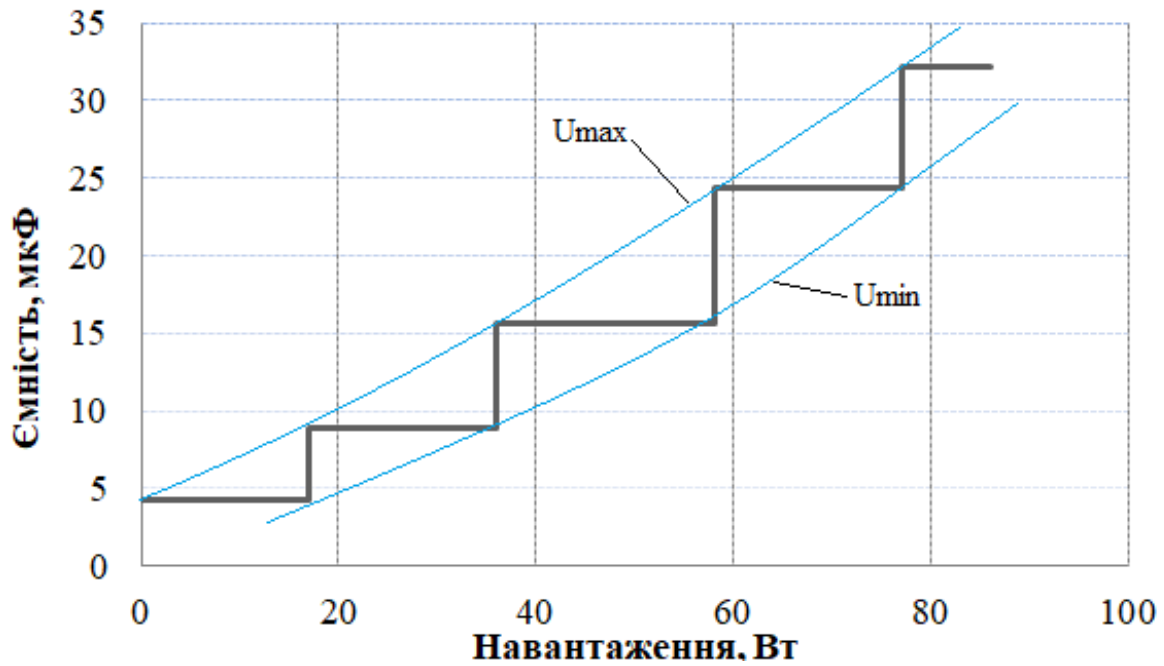


Рис. 3. Залежність ємності від навантаження при постійній напрузі

Fig. 3. Dependence of capacity on load at constant voltage

В такому разі необхідне ступінчасте регулювання вихідної напруги й потужності, що значно здорожує та ускладнює систему. Для оцінки вихідної потужності СГПМ при підмагнічуванні сторонньою ємністю використовується розроблена та описана в попередній роботі модель в системі MATLAB-Simulink [1]. З використанням цієї моделі

проаналізовано залежність вихідної напруги та потужності досліджуваного генератора для швидкості вітру 4 м/с. На рис. 4 наведена залежність вихідної потужності досліджуваного генератора при різних значеннях додаткової ємності та постійної величини активного навантаження.

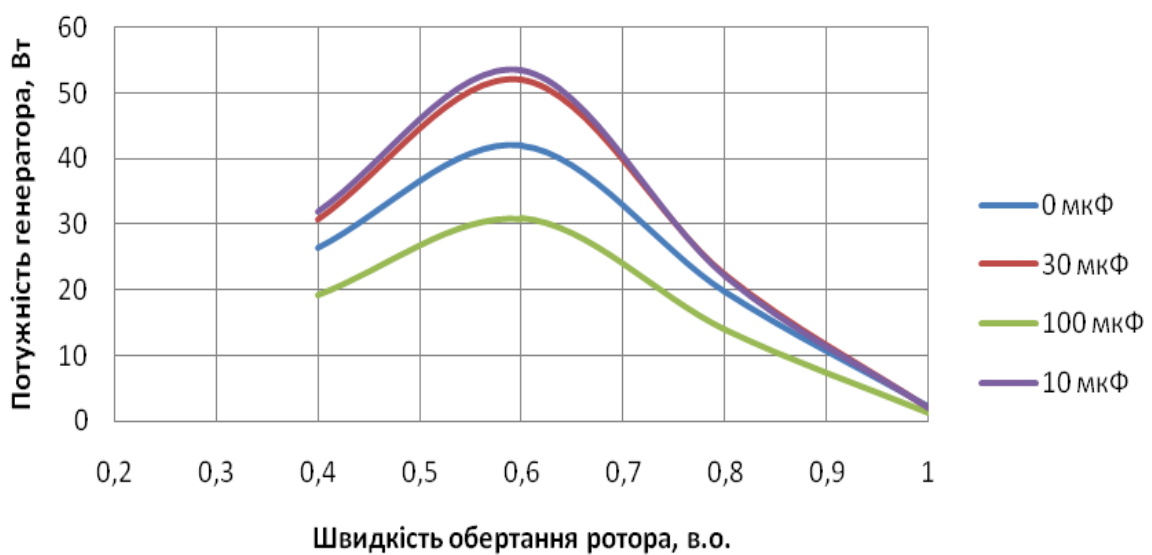


Рис. 4. Залежність потужності СГПМ від швидкості обертання ротора

Fig. 4. Dependence of SGPM power on the rotor speed

Для зручності швидкість обертання ротора подана у в.о. На рис. 4 показано, що максимальне значення потужності генератора, 52 Вт, досягається при значенні ємності 10 мкФ, подальше збільшення ємності понад 30 мкФ призводить до поступового зниження активної потужності до 30 Вт при значенні ємності 100 мФ. Зниження величини активної потужності при

збільшення величини додаткової ємності пояснюється насиченням магнітної системи генератора та збільшенням активних втрат в обмотці якоря, а отже, і падінням ККД.

На рис. 5 наведено залежність напруги на виході генератора при постійному навантаженні 33,0 Ом.

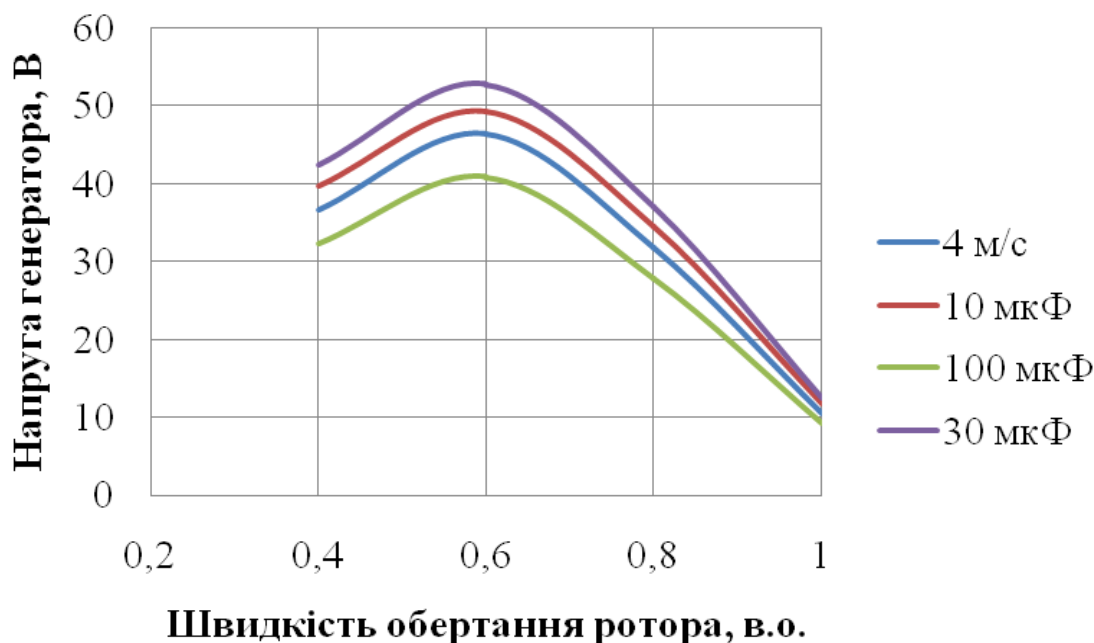


Рис. 5. Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора

Fig. 5. Dependence of the generator voltage on the rotor speed

Максимальне значення напруги на виході генератора, 53 В, спостерігається, коли приєднується підмагнічувальна ємність 30 мкФ, що відповідає заданому навантаженню. В разі приєднання ємності величиною в 10 мкФ напруга має дещо менше значення – 48 В. Це пояснюється тим, що при заданому навантаженні підмагнічувальної потужності конденсатора 10 мкФ не достатньо для компенсації розмагнічувальної реакції якоря. Подальше збільшення підмагнічувальної ємності не приводить до підвищення напруги, оскільки надлишок реактивної потужності перевантажує досліджуваний генератор з подальшим погіршенням всіх експлуатаційних характеристик.

Висновки. 1. Розроблено математичну модель для оцінки величини ємності конденсаторів для впливу на ефективне перетворення механічної енергії вітрового потоку на електричну. Встановлено, що величина ємності залежить від параметрів обмотки якоря електрогенератора, величини взаємодукції, характеру та величини навантаження. Для досліджуваного генератора значення ємності лежать в межах від 4,3–32,1 мкФ для чисто активного навантаження та для діапазону потужності 0–87 Вт.

2. За допомогою розробленої моделі в системі MATLAB-Simulink проведено оцінку впливу додаткової підмагнічувальної ємності на величину потужності та вихідної напруги генератора при зміні швидкості обертання ротора

вітроагрегату та постійній швидкості вітру. Для швидкості вітру 4 м/с при приєднанні ємності 10 мкФ спостерігається робота генератора при максимальній потужності в порівнянні із ємністю 30 мкФ та 100 мкФ. На відміну від ємності 30 мкФ і 100 мкФ, в разі приєднання ємності 10 мкФ для швидкості вітру 4 м/с генератор працює з максимальною потужністю.

1. Головка В.М., Коваленко М.А., Коваленко І.Я. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. Відновлювана енергетика. Київ. 2020. № 4 (62). С. 31–39.

2. Головка В.М., Монахов Є.А., Пономарьов О.І., Коваленко І.Я. Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двосторонньою активною поверхнею для вітроустановок. Відновлювана енергетика. Київ. 2018. № 2 (53). С. 29–37.

3. Бисов А.А. Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами. Текст: непосредственный. Молодой ученый. 2014. № 21 (80). С. 104–108.

4. Haque M.H. Characteristics of a stand-alone induction generator in smallhydroelectric plants. Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC'08. December. 2008. Pp. 42–47.

5. Bajpai P., Dash V. Hybrid renewable energy systems for power generation instand-alone applications: a review. Renew Sustainable Energy Rev. 2012. № 16 (5). Pp. 2926–2939.

6. Chan T.F. Self excited induction generators driven by regulated and unregu-lated turbines. IEEE Trans Energy Convers. 1996. № 11 (2). Pp. 338–343.

7. Chermiti D., Khedher A. A new method voltage and frequency regulation of self excited induction generator operating in stand alone. WSEAS Trans Envi-ron Dev. 2014. № 10. Pp. 150–159.

REFERENCES

1. Holovko V.M., Kovalenko M.A., Kovalenko I.Ya. Matematichne modeljyvannja avtonomnoyi vitroustanovky z synhronnum heneratorom mahnitoelektrychnoho typu. [Mathematical simulation of autonomous wind installation with synchronous magneto-electric type generator]. Vidnovluvana energetika. Kyiv. 2020. No. 4(62). С. 31–39. [in Ukrainian].

2. Holovko V.M., Monakhov Ye.A., Ponomarov O.I., Kovalenko I.Ya. Porivnyannya tradytsiyного heneratora iz postiynymy mahnitamy z tortsevim heneratorom iz dvostoronnoyu aktyvnoyu poverkhneyu dlya vitroustanovok. [Comparison of a traditional generator with permanent magnets with an end generator with a double-sided active surface for wind turbines]. Vidnovluvana energetika. Kyiv. 2018. No. 2(53). Pp. 29–37. [in Ukrainian].

3. Bisov A.A. Matematicheskoye opisaniye sinhronnoho dvihatelja s postojannymi magnitami. [Mathematical description of a permanent magnet synchronous motor]. Molodoyuchonnyy. 2014. No. 21(80). Pp. 104–108. [in Russian].

4. Haque M.H. Characteristics of a stand-alone induction generator in smallhydroelectric plants. Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC'08. December. 2008. Pp. 42–47.

5. Bajpai P., Dash V. Hybrid renewable energy systems for power generation instand-alone applications: a review. Renew Sustainable Energy Rev. 2012. No. 16(5). Pp. 2926–2939.

6. Chan T.F. Self excited induction generators driven by regulated and unregu-lated turbines. IEEE Trans Energy Convers. 1996. No. 11(2). Pp. 338–343.

7. Chermiti D., Khedher A. A new method voltage and frequency regulation of self excited induction generator operating in stand alone. WSEAS Trans Envi-ron Dev. 2014. No. 10. Pp. 150–159.

Стаття надійшла до редакції 15.12.20
Остаточна версія 15.03.21