
**СИСТЕМА НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ В АВТОНОМНИХ
ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВКАХ**

Постановка проблеми. Останнім часом у світі все активніше розвивається вітрова енергетика, одним з напрямів якої є малопотужні автономні вітроенергоустановки (ВЕУ), що працюють в умовах низьких середньорічних швидкостей вітру [1]. Саме для таких ВЕУ дуже важливим є баланс між вартістю обладнання та енергетичною ефективністю, адже при невеликій номінальній потужності і високій вартості ВЕУ такий спосіб отримання електроенергії перестає бути вигідним. Через стохастичний характер генерування та споживання енергії в автономних ВЕУ необхідно застосовувати пристрої нагромадження енергії, найчастіше електрохімічні акумуляторні батареї, які мають значну вартість та обмежений термін служби. Тому, з метою прискорення розвитку малої вітроенергетики, постає завдання зниження вартості ВЕУ та підвищення їх енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним зі шляхів здешевлення автономної ВЕУ з одночасним розширенням її функціональних можливостей є застосування теплових акумуляторів, оскільки теплота, як правило, є потрібною для споживачів, що встановлюють малі ВЕУ. На цьому підході можна розробляти як електротеплові, так і чисто теплові автономні ВЕУ. При цьому для акумуляування енергії у вигляді теплоти використовуються дешеві термоелектричні нагрівачі (ТЕН), встановлені у наявні водяні бойлери.

Найефективніші та найнадійніші автономні ВЕУ, призначені для встановлення безпосередньо біля споживачів та орієнтовані на турбулентні і малопотужні вітри, складаються з вітроротора (ВР) з вертикальною віссю обертання та синхронного генератора з постійними магнітами (СППМ) у безредукторному виконанні [2, 3]. Для відбору максимальної енергії від вітру частота обертання ВР для кожної швидкості вітру має бути оптимальною, що забезпечується системою електричного навантаження СППМ, яка з метою енергоефективності повинна одночасно виконувати функцію мінімізації втрат в генераторі [3, 4]. Для навантаження СППМ на ТЕНи вказані задачі залишаються актуальними, що зумовлює необхідність розроблення відповідної системи оптимального керування таким електричним навантаженням.

Цілі статті. Розробити та дослідити енергоефективність системи оптимального симетричного навантаження СППМ автономної ВЕУ на ТЕНи, яка не потребує великих грошових затрат та має високу надійність роботи.

Виклад основного матеріалу. З метою економії затрат, в системі доцільно використати 1-2 групи з трьох однакових ТЕНів, які будуть симетричним резистивним навантаженням для СППМ. Оскільки момент інерції ВР з ротором генератора J_m є значним, то керування підключенням ТЕНів до генератора можна здійснювати з різною періодичністю такими способами: 1) широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) на високій частоті, яка значно перевищує частоту напруги генератора; 2) ШІМ на частоті, близькій і кратній з частотою напруги; 3) вмикання-вимикання навантаження з частотою, значно нижчою напруги генератора.

Перший спосіб забезпечує плавне регулювання навантаження, проте супроводжується або збільшеними втратами в обмотці якоря генератора від вищих гармонік струму, або у випадку їх уникнення – значною вартістю системи через використання коректорів коефіцієнта потужності. Третій спосіб характеризується простотою реалізації, проте через підвищену дискретність вмикання навантаження дещо знижується коефіцієнт використання потужності вітру [5]. Другий спосіб, який в електротермії має назву імпульсного низькочастотного керування, на нашу думку, повинен поєднати переваги двох попередніх [6]. За цим методом ТЕНи вмикаються на час, кратний півперіоду чи періоду напруги живлення, причому, з метою запобігання генерування високочастотних завад, вмикання та вимикання електронних ключів відбувається в моменти переходу відповідної напруги живлення через нуль. За цим методом можна здійснювати ШІМ, частотно-імпульсну модуляцію (ЧІМ) або комбіновану модуляцію.

Особливістю даного застосування імпульсного низькочастотного керування є змінність як напруги живлення, так і її частоти в процесі роботи ВЕУ на вітрах різної швидкості. Як відомо [4], в точці оптимальної потужності частота обертання ВР є прямо пропорційною до швидкості вітру. Тому, якщо задатися з метою спрощення технічної реалізації постійною кількістю періодів напруги генератора в періоді керування, то зі збільшенням швидкості вітру цей період пропорційно зменшуватиметься. Зумовлене цим підвищення швидкодії регулювання забезпечуватиме якість керування, оскільки, як показано в [7], зі збільшенням швидкості вітру механічна стала часу ВЕУ знижується. Таким чином, в подальших дослідженнях використаємо спосіб ШІМ, проте модифікований – не зі сталим періодом комутації, а зі сталою кількістю періодів напруги генератора. Це показано на рис. 1, де період комутації T охоплює k періодів T_c напруги генератора, а час включення ТЕНів – n періодів цієї напруги.

З метою вибору оптимальних параметрів системи імпульсного низькочастотного навантаження СППМ, необхідно побудувати і дослідити математичну модель ВЕУ з цією системою.

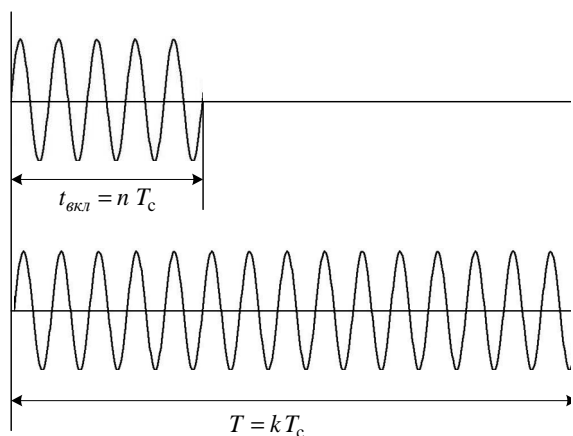


Рис. 1 – Спосіб періодичного навантаження генератора ВЕУ

Електромагнітна потужність генератора $P_{ем}$ при його навантаженні знаходиться як сума активних потужностей в трьох його фазах:

$$P_{ем} = 3I^2(R_H + R_я), \quad (3)$$

де I – діюче значення струму в фазній обмотці якоря генератора; R_H – опір навантаження (ТЕН); $R_я$ – опір обмотки якоря СГПМ.

Значення I відповідає виразу

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_H + R_я)^2 + (\omega L_я)^2}}, \quad (4)$$

де $E = E_m / \sqrt{2} = \omega \Phi_m / \sqrt{2}$ – діюче значення фазної ЕРС генератора; Φ_m – амплітуда потокозчеплення фазної обмотки якоря з магнітним потоком полюса ротора; $\omega = p_{п} \omega_m$ – кругова частота напруги в якорі генератора; $p_{п}$ – кількість пар полюсів СГПМ; $L_я$ – індуктивність обмотки якоря генератора.

За математичною моделлю роботи (1)-(4) побудована програма в середовищі MathCad для ВЕУ з номінальною потужністю 2 кВт, яка досягається при швидкості вітру 10 м/с. Параметри ВР та генератора є такими: $A = 2,32 \text{ м}^2$; $R = 1,08 \text{ м}$; $J_m = 50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $C_p(\lambda) = 1,14 \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) \cdot \exp\left(\frac{-6}{\lambda}\right)$; $M_c = 6 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $R_я = 2,8 \text{ Ом}$; $L_я = 5 \text{ мГн}$; $\Phi_m = 0,4 \text{ Вб}$; $p_{п} = 20$. Оптимальне значення швидкохідності та максимальне значення коефіцієнта потужності для даного ВР є наступними: $C_{p_{max}} = 0,351$ та $\lambda_{opt} = 3,67$. Аналіз комп'ютерних досліджень отриманої математичної моделі показав, що кількість періодів k напруги живлення в періоді комутації впливає лише на дискретність керування. Тому, з метою зниження похибки керування на малих швидкостях вітру (n повинно бути більше 1), вибрано $k = 15$. Для зручності будемо записувати відношення n/k як d . Оскільки ККД генератора при врахуванні лише основних втрат в міді рівний $R_я / (R_H + R_я)$, то необхідно намагатися збільшувати R_H . Значення опору ТЕН вибрано з умови, щоб при максимальній швидкості вітру 10 м/с оптимальне значення n не перевищувало k . Для даної ВЕУ отримано $R_H = 10 \text{ Ом}$. При цьому екстремуми залежності $C_p(V_B, n)$ для усього робочого діапазону швидкостей вітру попадають в діапазон $1 \leq n_{opt} \leq 15$ (рис. 2).

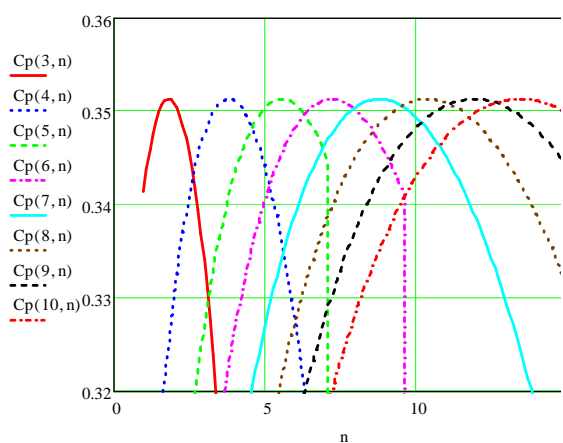


Рис. 2 – Розрахункові залежності $C_p(V_B, n)$

Баланс потужності на валу ВР та генератора при імпульсному низькочастотному навантаженні визначається наступним рівнянням:

$$P_{ВР} - \Delta P_{мех} = P_{ем} \frac{n}{k}. \quad (1)$$

В рівнянні (1) $P_{ВР}$ – механічна потужність ВР під дією вітру зі швидкістю V_B :

$$P_{ВР} = 0,5 \rho A C_p(\lambda) V_B^3, \quad (2)$$

де ρ – густина повітря; A – площа омивання ВР; $C_p(\lambda)$ – коефіцієнт використання потужності вітру; $\lambda = \omega_m R / V_B$ – швидкохідність ВР; ω_m – кутова швидкість; R – радіус ВР.

До втрат механічної потужності на тертя в опорах ВР з генератором $\Delta P_{мех}$ зарахуємо сухе тертя з моментом M_c :

$$\Delta P_{мех} = M_c \omega_m.$$

З математичної моделі отримано також закон оптимального керування ВЕУ

$$n_{opt} = 1,7211 + 0,6073 \omega_m. \quad (5)$$

Використовуючи вираз (5), можна побудувати систему оптимального навантаження генератора ВЕУ шляхом вимірювання кутової швидкості генератора (енкодером у випадку його наявності чи вимірюванням півперіоду

напруги генератора і обчисленням його частоти за допомогою мікроконтролера керування).

На функціональній схемі ВЕУ (рис. 3) обмотка якоря СГПМ навантажується на три однакових ТЕНи R_H . Для їх підключення достатньо використати два електронні ключі K1 і K2 (симістори), що зменшує вартість системи. Для їх комутації в моменти переходу лінійних напруг U_{AB} і U_{AC} через нуль використана система керування, реалізована на давачах напруги ДН_{AB} і ДН_{AC}, ланках фіксації переходу напруг через нуль Ф1, Ф2 та логічних елементах І ЛЕ1, ЛЕ2. Ланки Ф1 і Ф2 в момент переходу відповідних напруг через нуль подають одиничні імпульси на другі логічні входи елементів ЛЕ1 і ЛЕ2, які у випадку наявності сигналу на відкриття ключів на їх перших входах, відкривають відповідні ключі. За частотою імпульсів ланки Ф1 обчислюється кутова швидкість генератора, а за її значенням та виразом (5) – оптимальна кількість періодів навантаження n_{opt} . Лічильник 1 рахує кількість періодів напруги і порівнює їх з k . В момент, коли значення виходу лічильника 1 перевищить k , подається сигнал на R вхід RS-тригера Т, який через логічний елемент ЛЕ3 подасть сигнал дозволу на поступлення імпульсів на вхід лічильника 2. Вихід останнього, в свою чергу, порівнюється з n_{opt} , яке мінюється залежно від частоти обертання генератора. При досягненні лічильником 2 заданого значення n_{opt} , він обнуляється, а тригер Т знімає дозвіл поступлення імпульсів на вхід лічильника 2.

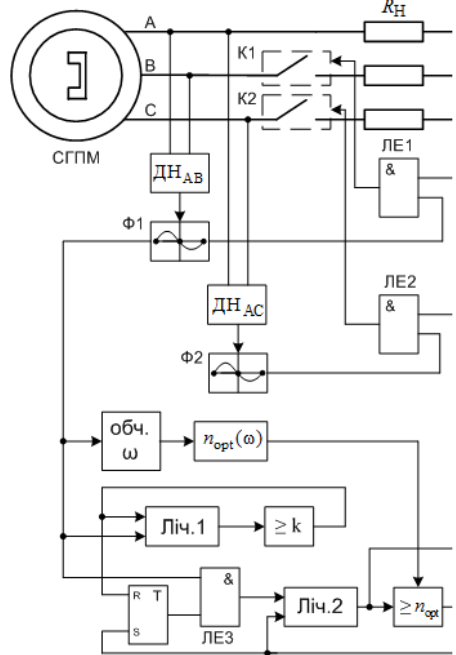


Рис. 3 – Функціональна схема ВЕУ зі системою енергоефективного навантаження на ТЕНи

За функціональною схемою, показаною на рис. 3, побудована комп'ютерна модель ВЕУ з навантаженням СГПМ на ТЕНи. Побудована система оптимального керування належить до систем регулювання за збуренням [8]: для кожної кутової швидкості генератора визначене оптимальне значення n_{opt} забезпечуватиме такий момент навантаження ВР, при якому його частота обертання прямуватиме до оптимального для даної швидкості вітру значення. Проведені комп'ютерні дослідження повністю підтвердили дієвість та ефективність розробленої системи керування роботою ВЕУ.

Результати комп'ютерного симулювання представлено на рис. 4 у вигляді осцилограм основних змінних системи регулювання та навантаження. На приведеному фрагменті, що відображає симулювання на відтинку часу 4...15 с, у момент часу 6 с швидкість вітру скачком змінюється з 5 м/с до 7 м/с. При цьому зростання частоти обертання СГПМ приводить до зменшення періоду лічильника 1, що охоплює $k = 15$ періодів напруги генератора. n зі збільшенням кутової швидкості генератора поступово зростає від 5 до 8, збільшуючи щільність імпульсного керування ключами δ . Це приводить до збільшення як амплітуди моменту навантаження генератора, так і його щільності, а отже, – середнього значення цього моменту до оптимального. Тоді кутова швидкість генератора з ВР теж зростає до оптимального значення, при якому від вітру відбиратиметься максимальна потужність, про що свідчить повернення значення коефіцієнта C_p за 5 с до максимального значення 0,351 на останній осцилограмі.

Порівняно з неперервним керуванням низькочастотне імпульсне керування приводить до збільшення втрат в міді генератора і зниження кількості генерованої енергії на 5...15% при високих швидкостях вітру і 15...30% при низьких. Для зменшення втрат на низьких швидкостях вітру можна використати дві групи ТЕНів з різними опорами та потужностями. На низьких швидкостях вітру працюватиме група з більшим опором, зі збільшенням швидкості вітру навантаження перемикатиметься на групу з меншим опором, а на максимальних швидкостях вмикатимуться дві групи паралельно. Такі комутації можна реалізувати за допомогою контакторів, які перемикатимуться без струму в інтервали відключення навантаження.

Висновок. Розроблено просту і надійну ВЕУ, що виробляє теплову енергію. Застосування низькочастотного імпульсного керування дало змогу за допомогою простих засобів реалізувати систему оптимального навантаження СГПМ шляхом безконтактної комутації ТЕНів. Таку систему бездавачевого керування можна легко реалізувати на дискретних елементах чи найдешевших логічних мікроконтролерах.

Запропонована ВЕУ може також виробляти й електричну енергію, як паралельно з тепловою, так і виключно в міру потреби споживача. Проте розроблення системи оптимального керування при комбінованому генеруванні буде предметом окремого дослідження.

Література.

1. Bianchi F.D. Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design / F.D. Bianchi, H.D. Battista, R.J. Mantz. – London: Springer, 2007. – 206 p.
2. Щур І.З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І. З. Щур, О. Р. Турленко // Вестн. Национ. ун-та "Харьк. политехн. ин-т": «Проблеми автоматизованого електро-привода. Теория и практика.» – Харьков, 2008. – № 30. – С. 418-420.

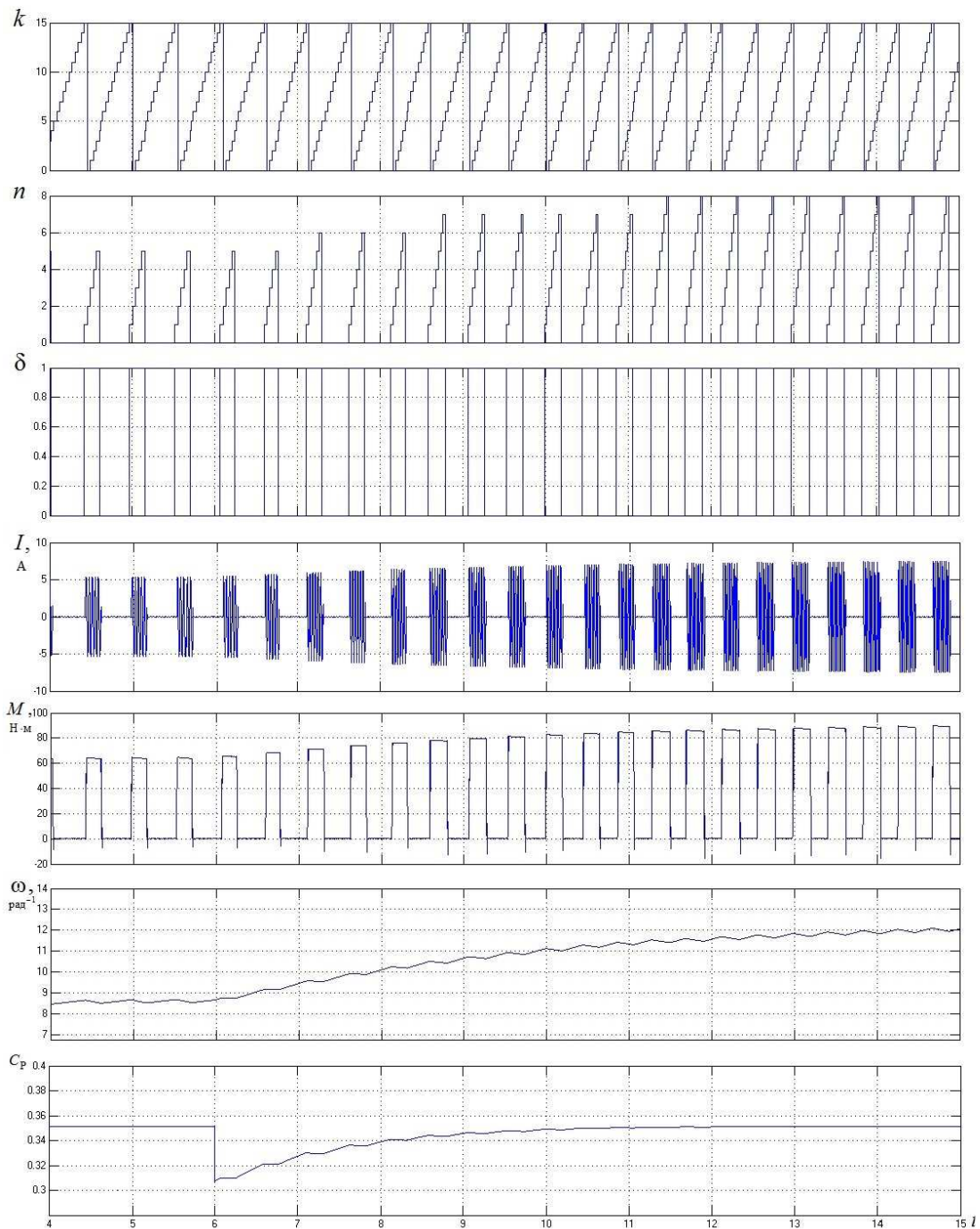


Рис. 4 – Осцилограми змінних k , n , δ , I , M , ω , C_p при зміні постійної швидкості вітру з 5 на 7 м/с

3. Andriollo M. Control strategies for a VAWT driven PM synchronous generator / M. Andriollo, M. De Bortoli, G. Martinelli, A. Morini, A. Tortella // Department of Electrical Engineering. – Proc. Int. Symp. On Power Electronics, Electr. Drives, Automation and Motion. SPEEDAM 2008. – 2008. – P. 804-809.

4. Щур І.З. Енергетична ефективність різних способів відбору потужності від синхронного генератора з постійними магнітами у вітроенергоустановці / І.З.Щур, О.Р.Турленко // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – № 654. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту “Львівська політехніка”, 2009. – С. 272-277.

5. Щур І.З. Автономна вітроенергоустановка з акумулюванням електричної і теплової енергій / І.З. Щур, В.І. Щур // Енергетика і автоматика. – 2012. – №2. – К.: НУБІП. – С. 8-16.

6. Скаржепа В.А. Цифровое управление тиристорными преобразователями / В.А. Скаржепа, К.В. Шелехов. – М.: Энергоатомиздат. Ленинград отд-ние, 1984. – 160 с.

7. Щур І.З. Оптимальне керування вітроустановками різної потужності в умовах турбулентних вітрів / І.З. Щур, В.І. Щур // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – № 736. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту “Львівська політехніка”, 2012. – С. 146-152.

8. Marimoto S. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG / S. Marimoto, H. Nakayama, M. Sanada // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – Vol. 41, no. 1. – P. 60-67.