

УДК 621.311.24

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІТРОУСТАНОВКИ В РЕЖИМІ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕКТРАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВІТРУ ВАН ДЕР ХОВЕНА**В. Г. Черніков**

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: vinodel12@ukr.net

Розглядається робота вітроустановки зі змінною швидкістю обертання вітроколеса. Створено спрощену модель системи регулювання в режимі максимальної потужності. Моделювання роботи вітроустановки проводилось у програмному пакеті Matlab. Оцінювалась здатність системи регулювання вітроустановки підтримувати максимальний коефіцієнт потужності вітроколеса з використанням спектральної моделі швидкості вітру Ван дер Ховена, що враховує спектральну щільність потужності й дозволяє моделювати поведінку вітру за допомогою змішування синусоїд з різною амплітудою, фазою та частотою. Критерієм енергоефективності установки служить відхилення результуючого коефіцієнту потужності вітроколеса від його максимального значення. При оцінюванні енергоефективності враховувались характеристики вітроколеса та особливості побудови системи регулювання. Моделювання проводилось за різними значеннями низькочастотної компоненти швидкості вітру. При моделюванні встановлено, що відхилення коефіцієнта потужності від максимуму не перевищує 0,2 %. Ці результати підтверджують високу ефективність вітроустановки в режимі максимальної потужності за будь-якими вітровими умовами.

Ключові слова: вітроколесо, коефіцієнт потужності, швидкохідність, спектральна щільність, генератор.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕТРОУСТАНОВКИ В РЕЖИМЕ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЕТРА ВАН ДЕР ХОВЕНА**В. Г. Черников**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: vinodel12@ukr.net

Рассматривается работа ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса. Создана упрощенная модель системы регулирования в режиме максимальной мощности. Моделирование работы ветроустановки проводилось в программном пакете Matlab. Оценивалась способность системы регулирования ветроустановки поддерживать максимальный коэффициент мощности ветроколеса с использованием спектральной модели скорости ветра Ван дер Ховена, учитывающая спектральную плотность мощности и позволяющая моделировать поведение ветра при помощи смешивания синусоид с разной амплитудой, фазой и частотой. Критерием энергоэффективности установки служит отклонение результующего коэффициента мощности ветроколеса от его максимального значения. При оценке энергоэффективности учитывались характеристики ветроколеса и особенности построения системы регулирования. Моделирование проводилось при различных значениях низкочастотной компоненты скорости ветра. При моделировании установлено, что отклонение коэффициента мощности от максимума не превышает 0,2 %. Эти результаты подтверждают высокую эффективность ветроустановки в режиме максимальной мощности при любых ветровых условиях.

Ключевые слова: ветроколесо, коэффициент мощности, быстроходность, спектральная плотность, генератор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Сучасні вітрогенераторні установки використовують принцип змінної швидкості обертання, що дозволяє вітроколесу працювати з коефіцієнтом потужності, близьким до максимального. В ідеальному випадку швидкість обертання вітроколеса повинна змінюватись пропорційно швидкості вітру, але підтримка цього принципу в ідеальному вигляді неможлива внаслідок особливості побудови системи регулювання вітроустановки, а також через специфіку поведінки швидкості вітру. Тому доцільно провести оцінку впливу вищезазначених факторів на енергоефективність вітроустановки.

Системи регулювання вітроустановок зі змінною швидкістю обертання складаються з двох контурів: контура регулювання швидкості обертання вітроколеса та контура регулювання моменту. Взаємодія

між контурами повинна забезпечити відбір максимальної потужності від вітру в режимі часткового навантаження генератора [1]. Модель вітру може бути описана спектральною моделлю Ван дер Ховена, в якій швидкість вітру надана як суміш великої кількості синусоїд з різними параметрами. Поєднання моделі вітру з моделлю системи регулювання з метою оцінки якості відбору потужності від вітрового потоку становить інтерес для подальших наукових досліджень.

Метою роботи є проведення кількісної оцінки відхилення коефіцієнта потужності вітроколеса від максимального значення при моделюванні роботи вітроустановки з використанням спектральної моделі швидкості вітру Ван дер Ховена.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Структуру вітроустановки з асинхронним генератором

ром та перетворювачем частоти в статорі [2], а також основні блоки системи регулювання наведено на рис. 1. Така система регулювання дозволяє контролювати чотири основні величини: швидкість обертання вітроколеса за рахунок pitch-кута лопати [3], активну потужність установки за рахунок регулювання моменту генератора засобами активного ви-

прямляча, а також напругу проміжного контура та реактивну потужність установки засобами мережевого інвертора. Розгорнену структуру двоконтурної системи регулювання швидкості обертання вітроколеса та активної потужності вітроустановки наведено на рис. 2 [1].

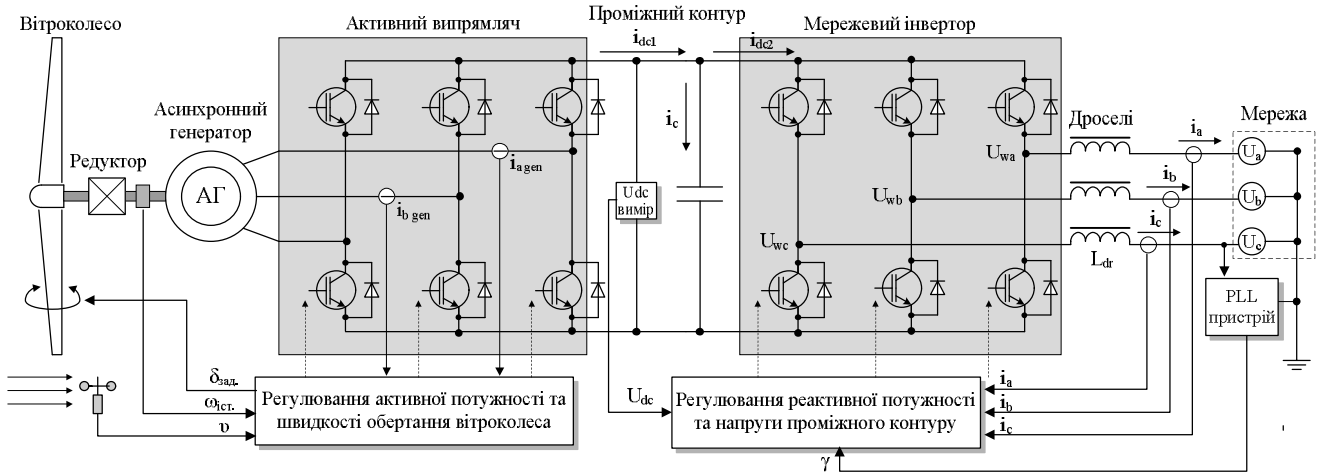


Рисунок 1 – Структура вітроустановки з перетворювачем частоти та основні блоки системи регулювання

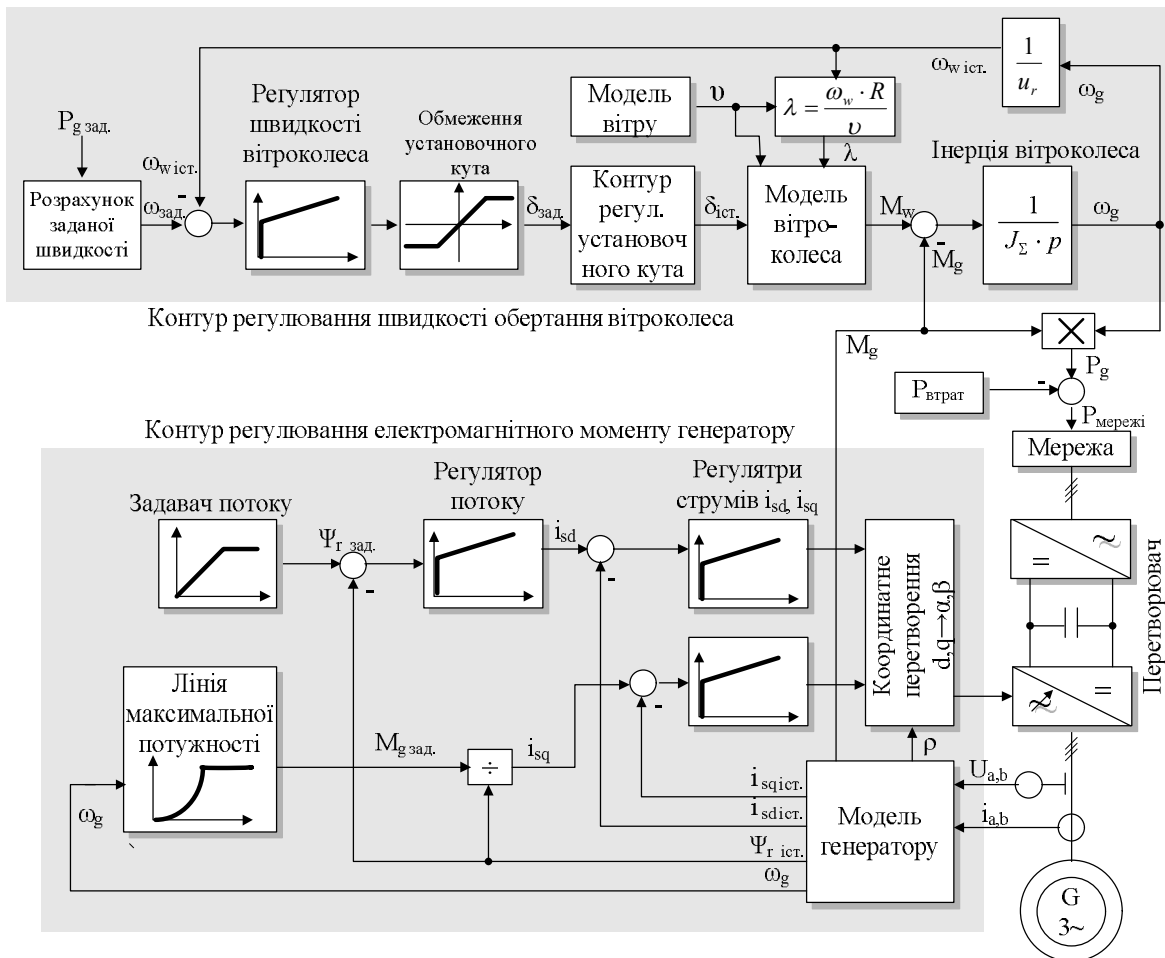


Рисунок 2 – Розгорнена структура двоконтурної системи регулювання вітроустановки

У режимі відбору максимальної потужності регулятор швидкості вітроколеса утримує вихідне значення на рівні нижньої границі обмеження. Це означає, що pitch-кут дорівнює нулю, тобто установочний кут лопати не змінюється й дорівнює оптимальному значенню. Швидкість обертання вітроколеса описується рівнянням обертального руху з урахуванням моментів генератора й вітроколеса та моменту інерції J_{Σ} :

$$M_w - M_g^* = J_{\Sigma} \frac{d\omega_w}{dt}. \quad (1)$$

Завдання моменту генератора розраховується за умови роботи вітроколеса на лінії максимальної потужності згідно з наступним виразом [4]:

$$M_{g_{max}} = \frac{1}{2} \frac{c_{pw_{max}}}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \omega_w^2, \quad (2)$$

де ρ – щільність повітря; $c_{pw_{max}}$ – максимальний коефіцієнт потужності вітроколеса за оптимальною швидкохідністю; R – радіус вітроколеса; λ_{opt} – оптимальна швидкохідність; ω_w – частота обертання вітроколеса.

Регулювання моменту забезпечується системою векторного регулювання (рис. 2), яка дозволяє підтримувати необхідний момент генератора завдяки регулюванню моментоутворюючої компоненти току статора згідно з виразом [5]:

$$M_g = \frac{3}{2} z_p K_R \Psi_R i_{sq}, \quad (3)$$

де z_p – число пар полюсів; K_R – коефіцієнт зв'язку між ротором і статором; Ψ_R – потік ротора; i_{sq} – моментоутворююча компонента току статора.

Таким чином, максимальна потужність генератора, яка відповідає поточній швидкості вітру, забезпечується системою векторного регулювання моменту. Ця система отримує завдання на момент генератора згідно з принципом, який у літературі зазначений як принцип оптимального регулювання активної потужності генератора з використанням значення швидкості обертання вітроколеса [4].

Якщо рівняння (1) помножити на кутову швидкість обертання вітроколеса ω_w та інтегрувати обидві частини, то можна отримати вираз

$$\omega_w = \sqrt{\frac{2}{J_{\Sigma}} \int_0^t (P_w - P_{g_{max}}) dt}, \quad (4)$$

де P_w – потужність вітроколеса; $P_{g_{max}}$ – максимальна потужність генератора.

При цьому потужність вітроколеса розраховується за наступним виразом [6]:

$$P_w = \frac{1}{2} \pi \rho c_{pw}(\lambda) R^2 v^3, \quad (5)$$

де v – швидкість вітру; $c_{pw}(\lambda)$ – коефіцієнт потужності.

Найважливішим елементом розрахунку поточного значення потужності вітроколеса є, безумовно, коефіцієнт потужності $c_{pw}(\lambda)$. Згідно з методикою [7], його залежність від швидкохідності може бути визначена за допомогою наступних розрахунків із використанням

характеристик залежності коефіцієнта підйомної сили та сили опору від кута атаки для профілю NACA 4412.

Для спрощення розрахунків залежності $c_{pw}(\lambda)$ здійснюється для фрагменту лопати на відстані діючого радіуса ($r^*=0,72 R$) від центру обертання й коефіцієнт потужності всього вітроколеса приймається рівним коефіцієнту потужності для діючого радіуса. У процесі розрахунку для кожного кута атаки в діапазоні від -4° до 18° визначається значення коефіцієнта підйомної сили c_a та сили опору c_w . Значення поточного кута притікання β розраховується як сума оптимального установочного кута та поточного кута атаки, тобто $\beta = \delta_{opt} + \alpha$.

Значення оптимального установочного кута визначають за виразом

$$\delta_{opt} = \frac{2}{3} \arctg\left(\frac{R}{\lambda_d r^*}\right) - \alpha_{opt}, \quad (6)$$

де λ_d – розрахункова швидкохідність вітроколеса, α_{opt} – оптимальний кут притікання для вибраного профілю NACA 4412.

Спочатку визначають показник геометричної форми лопати:

$$\vartheta = \frac{t z c_a}{r^*}, \quad (7)$$

де t – ширина лопати на відстані діючого радіуса; z – кількість лопат вітроколеса.

Далі визначають наступні параметри:

– коефіцієнт гальмування потоку в напрямку вітру:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{\vartheta \cos \beta}{8\pi \sin^2 \beta}}; \quad (8)$$

– коефіцієнт гальмування вітрового потоку в напрямку обертання вітроколеса:

$$b = \frac{1}{1 - \frac{\vartheta}{8\pi \cos \beta}}; \quad (9)$$

– значення поточної швидкохідності:

$$\lambda_0 = \frac{R}{r^*} \frac{a}{b \operatorname{tg} \beta}; \quad (10)$$

– значення коефіцієнта потужності вітроколеса з урахуванням вихрових втрат:

$$c_p^* = 4\lambda_0^2 \left(\frac{r^*}{R}\right)^2 a(b-1); \quad (11)$$

– складову ККД вітроколеса, що виникає внаслідок кінцевого значення співвідношення між підйомною силою та силою опору:

$$\eta_F = \frac{1 - \frac{1}{\varepsilon} \operatorname{ctg} \beta}{1 + \frac{1}{\varepsilon} \operatorname{tg} \beta}; \quad (12)$$

– складову ККД вітроколеса, що виникає внаслідок кінцевого числа лопат:

$$\eta_z = \left(1 - \frac{1,39}{z} \sin\left(\frac{2}{3} \arctg \frac{1}{\lambda_0}\right)\right)^2; \quad (13)$$

– результуюче значення коефіцієнта потужності вітроколеса:

$$c_{pw} = c_p^* \eta_F \eta_z \quad (14)$$

Наприкінці кожному значенню швидкохідності, розрахованому за рівнянням (10), ставлять у відповідність результуюче значення коефіцієнта потужності вітроколеса, розраховане за виразом (14).

Приклад залежностей коефіцієнта потужності вітроколеса від швидкохідності, отриманий при використанні запропонованої вище методики, наведений на рис. 3. Сімейство залежностей побудовано для профілю лопати NACA 4412 за різними значеннями розрахункової швидкохідності вітроколеса λ_d від п'яти до восьми [3].

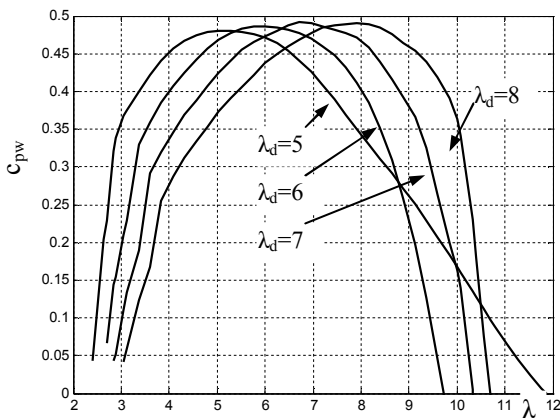


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта потужності вітроколеса від швидкохідності для вітроколес із розрахунковими швидкохідностями $\lambda_d=5, 6, 7, 8$

Як показує рівняння (4), для отримання значення швидкості обертання вітроколеса окрім потужності вітроколеса треба мати значення потужності генератора, яке формується системою векторного регулювання моменту згідно із завданням, розрахованим за виразом (2).

Оскільки момент генератора формується за рахунок моментоутворюючої компоненти току статора (рис. 2), треба враховувати швидкодію контуру регулювання струму в системі векторного регулювання. Оскільки інерційність контуру струму в сучасних перетворювачах вимірюється кількома мілісекундами, можна стверджувати, що вона досить мала порівняно з моментом інерції вітроколеса. Таким чином, інерційністю контуру струму можна знехтувати при розрахунку потужності генератора. Тоді значення активної потужності генератора в режимі відбору максимальної потужності може бути розраховано за виразом, який є прямим наслідком рівняння (2):

$$P_{g \max} = \frac{1}{2} \pi \rho c_{pw \max} R^2 \left(\frac{v_N}{\omega_{wN}} \right)^3 \omega_w^3, \quad (15)$$

де v_N – номінальна швидкість вітру; ω_{wN} – номінальна швидкість обертання вітроколеса; $c_{pw \max}$ – максимальний коефіцієнт потужності вітроколеса, який визначається за рис. 3.

Рівняння (4), (5) та (15) дають змогу побудувати структурну схему моделі, яка дозволяє оцінити вплив змін швидкості вітру на результуючий коефіцієнт потужності вітроколеса в режимі відбору максимальної потужності. Структурну схему моделі наведено на рис. 4. Значення швидкості обертання вітроколеса в цій схемі формується згідно з указаними виразами. Далі на основі значення швидкості обертання вітроколеса та швидкості вітру розраховується поточне значення швидкохідності. Величина швидкохідності та той факт, що в режимі максимальної потужності відхилення установочного кута лопати від оптимального положення $\Delta\delta$ дорівнює нулю, дають змогу на основі залежностей (рис. 3) отримати поточне значення коефіцієнта потужності вітроколеса c_{pw} .

Для оцінки енергоефективності вітроустановки необхідно оцінити співвідношення енергії, яку вітровий потік віддає вітроколесу, та теоретичної енергії вітрового потоку за дослідний період часу.

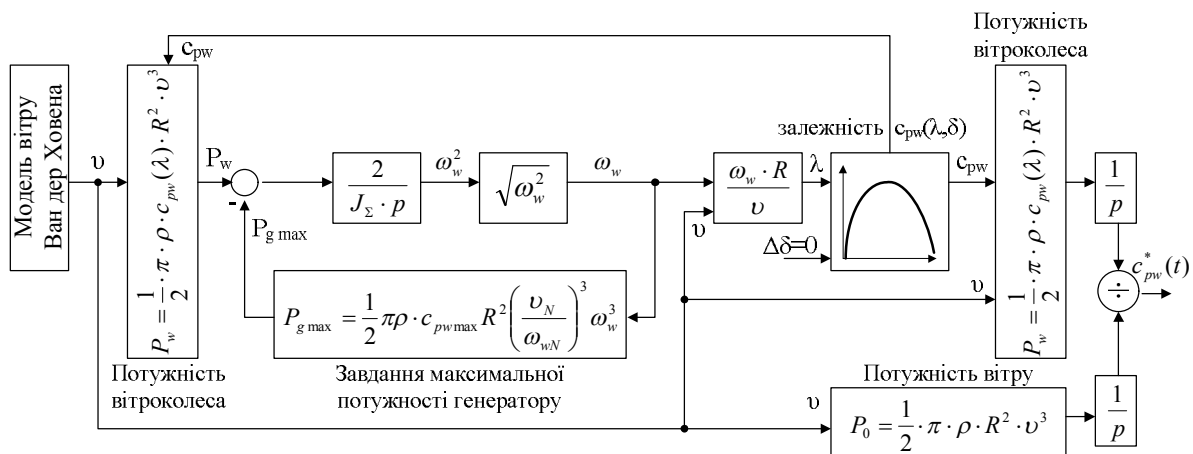


Рисунок 4 – Спрощена структурна схема моделі для оцінки впливу змін швидкості вітру на результуючий коефіцієнт потужності вітроколеса в режимі відбору максимальної потужності

Саме це співвідношення й є показником енерго-ефективності, який можна назвати результирующим коефіцієнтом потужності вітроустановки за дослідний період часу. Для отримання значення цього коефіцієнта можна скористатися наступним рівнянням, у якому значення енергії розраховується як інтеграл від поточної потужності.

$$c_{pw}^* = \frac{E_w}{E_0} = \frac{\int_0^T P_w dt}{\int_0^T P_0 dt}, \quad (16)$$

де E_w – енергія, отримана вітроколесом за період часу T ; E_0 – теоретична енергія вітру за період часу T ; P_0 – миттєве значення теоретичної потужності вітру.

Функціонування наведеної на рис. 4 структури залежить від поведінки швидкості вітру, яка описується моделлю Ван дер Ховена. Суть цієї моделі полягає в тому, що швидкість вітру може бути змодельована як нестационарний випадковий процес, створений накладенням двох компонент: низькочастотної компоненти $v_s(t)$, яку можна вважати постійною протягом 10 хв., та турбулентної компоненти $v_t(t)$ [4]:

$$v(t) = v_s(t) + v_t(t). \quad (17)$$

Турбулентна компонента може бути надана як сума косинусоїд із різними значеннями частоти та фази, амплітуда яких розраховується на основі спектральних функцій Кармана або Каїмала. Ці функції є добутком частоти коливань швидкості вітру f і спектральної щільності потужності $S_{vv}(f)$.

Спектральна щільність потужності, згідно з моделлю Каїмала, розраховується за рівнянням

$$S_{vv}(f) = \frac{4\sigma^2 L_t / v_s}{(1 + 6 f L_t / v_s)^{5/3}}. \quad (18)$$

Значення середньоквадратичного відхилення швидкості вітру σ розраховується згідно з виразом

$$\sigma = \frac{v_s}{\ln(h/z_0)}, \quad (19)$$

де h – висота над землею; z_0 – коефіцієнт нерівності поверхні землі. Значення довжини турбулентності L_t вибирається рівним 150 м для висоти понад 30 м.

Графічне зображення спектральних функцій Кармана та Каїмала $f^* S_{vv}(f)$ наведено на рис. 5.

Значення частоти коливань швидкості вітру ω_i відповідає діапазону $f=10^{-3}-10^0$ Гц, значення фази ϕ_i генерується випадково в діапазоні $(-\pi)-(+\pi)$.

Таким чином, значення турбулентної компоненти швидкості вітру можна розрахувати згідно з виразами

$$v_t(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(\omega_i t + \phi_i); \quad (20)$$

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} ((S_{vv}(\omega_i) + S_{vv}(\omega_{i+1}))) (\omega_{i+1} - \omega_i)}. \quad (21)$$

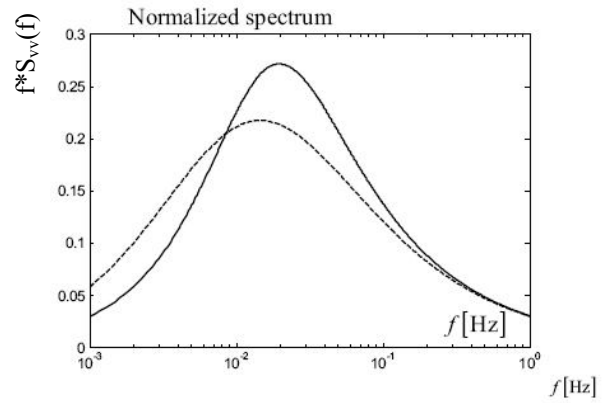


Рисунок 5 – Вигляд спектральних функцій Кармана та Каїмала при $h=30$ м, $z_0=0,01$, $v_s=10$ м/с

Таким чином, на основі наведених рівнянь може бути сформована модель швидкості вітру, структурну схему якої зображено на рис. 6.

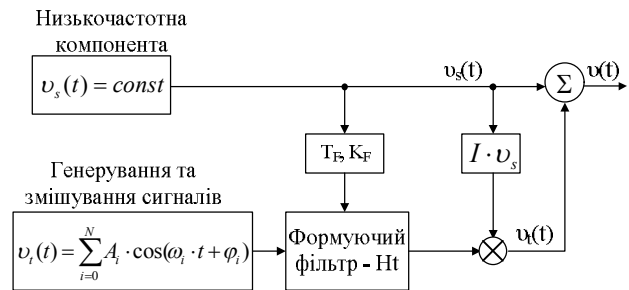


Рисунок 6 – Структурна схема моделі вітру.

У наведеній моделі значення турбулентної компоненти додатково пропускається через формуючий фільтр із наведеною нижче передаточною функцією

$$H_t(p) = K_F \frac{m_1 T_F p + 1}{(T_F p + 1)(m_2 T_F p + 1)}, \quad (22)$$

де $m_1=0,4$; $m_2=0,25$.

Значення коефіцієнту K_F та постійної часу T_F формуючого фільтру можуть бути розраховані за наступними рівняннями

$$T_F = \frac{L_t}{v_s}; \quad K_F = \sqrt{\frac{2\pi}{B(1/2, 1/3)} \frac{T_F}{T_s}}, \quad (23)$$

де B – бета функція; T_s – період дискретності для турбулентної функції (приймається рівним приблизно 10 хв.).

Оскільки значення низькочастотної компоненти швидкості вітру v_s згідно зі спектральною моделлю Ван дер Ховена упродовж 10 хв. можна вважати незмінним, то доцільно провести оцінку результирующего значення коефіцієнта потужності вітроколеса згідно з виразом (16) упродовж десятихвилинного інтервалу. Після скорочення постійних коефіцієнтів у виразах потужностей отримаємо

$$c_{pw}^* = \frac{\int_0^{600} P_w dt}{\int_0^{600} P_0 dt} = \frac{\int_0^{600} c_{pw}(\lambda) v^3 dt}{\int_0^{600} v^3 dt}. \quad (24)$$

Результуюче значення коефіцієнта потужності оцінювалось для двох випадків. По-перше, коли зв'язок між швидкістю обертання вітроколеса та завданням на максимальну потужність генератору встановлювався згідно з виразом (15), тобто система регулювання установки функціонувала згідно з моделлю, наведеною на рис. 4. У цьому випадку результуюче значення коефіцієнта потужності вітроколеса має позначку c_{pw1} . По-друге, для порівняння енергоефективності режиму роботи зі змінною швидкістю обертання вітроколеса з енергоефективністю режиму роботи з постійною швидкістю обертання вітроколеса проводилась також оцінка коефіцієнта потужності при постійному значенні швидкості обертання, яка визначається згідно з наступним рівнянням:

$$\omega_w = \frac{\lambda_d v_s}{R} \quad (25)$$

У разі постійного значення швидкості обертання вітроколеса результуюче значення коефіцієнта потужності має позначку c_{pw2} .

При моделюванні використовувалась характеристика $c_{pw}(\lambda)$ профілю NACA 4412 для розрахункової швидкохідності $\lambda_d=7$ (рис. 3). Момент інерції вітроколеса розраховувався з урахуванням ваги лопати $m_l=12000$ кг та радіусом вітроколеса $R=55$ м [8], що відповідає параметрам вітроустановки Vestas 112. Розрахунок моменту інерції здійснювався за наступним виразом з того припущення, що центр ваги лопати знаходиться приблизно на відстані $0,44R$ від центру обертання:

$$J_\Sigma = J_g + \frac{3m_l(0,44R)^2}{u_r^2}, \quad (26)$$

де J_g – момент інерції генератора; m_l – маса лопати; u_r – передатне число редуктора.

Моделювання проводилось у програмному пакеті Matlab згідно зі структурною схемою, наведеною на рис. 4, з наступними вихідними даними: розрахункова швидкохідність $\lambda_d=7$; значення низькочастотної компоненти швидкості вітру $v_s=10$ м/с. При проведенні моделювання оцінювалась поведінка швидкості вітру та швидкості обертання генератора (рис. 7).

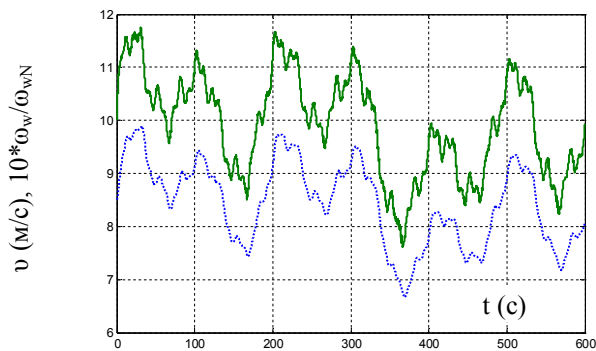


Рисунок 7 – Поведінка швидкості вітру (суцільна лінія) та швидкості обертання вітроколеса (пунктирна лінія)

Рис. 7 демонструє, що характер змін швидкості обертання вітроколеса повторює характер змін швидкості вітру за виключенням тих моментів, коли вітер різко змінюється й швидкість обертання вітроколеса не встигає так швидко змінюватись унаслідок великого моменту інерції, але доля високочастотної складової у швидкості вітру, згідно зі спектральною моделлю Ван дер Ховена, є незначною (рис. 5). Тому ці коливання хоча й призводять до відхилення від розрахункової швидкохідності, все ж таки суттєво не впливають на загальний характер процесу, коли швидкість обертання вітроколеса практично слідує змінам швидкості вітру. Характер змін поточної швидкохідності наведений на рис. 8, який демонструє незначні відхилення швидкохідності від розрахункового значення $\lambda_d=7$.

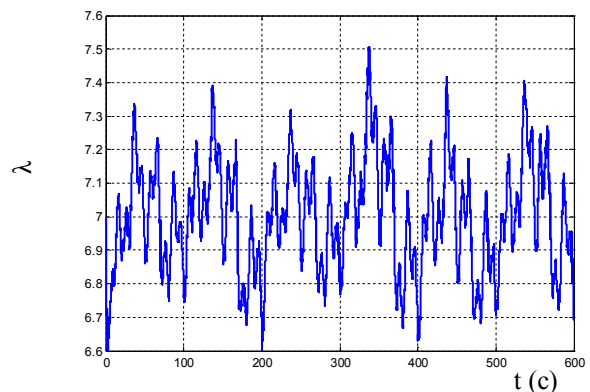


Рисунок 8 – Поведінка поточної швидкохідності вітроколеса

Відхилення швидкохідності від оптимальної призводить до відхилення коефіцієнта потужності вітроколеса від максимального значення. Характер змін коефіцієнта потужності наведений на рис. 9.

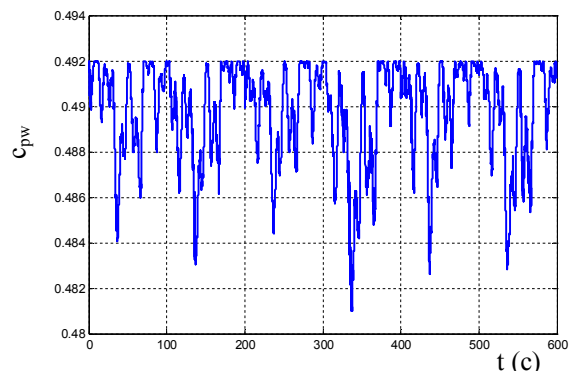


Рисунок 9 – Поведінка коефіцієнта потужності вітроколеса

Для найбільш повного аналізу результатів оцінки енергоефективності вітроустановки моделювання роботи в режимі максимальної потужності проводилось за різними значеннями низькочастотної компоненти швидкості вітру $v_s=4$ м/с, $v_s=7$ м/с, $v_s=10$ м/с. Результати оцінки енергоефективності наведено в табл. 1, де $\Delta\lambda$ – діапазон коливань швидкохідності в режимі максимальної потужності, (рис. 8).

Таблиця 1 – Результати оцінки енергоефективності вітроустановки в режимі максимальної потужності.

	$\lambda_d=7$ ($c_{pw\max}=0,492$)		
v_s м/с	4	7	10
c_{pw1}	0,490	0,490	0,490
c_{pw2}	0,490	0,487	0,481
$\Delta\lambda$	6,9–7,1	6,76–7,26	6,6–7,5

ВИСНОВКИ. Робота системи регулювання в режимі максимальної потужності дозволяє підтримувати коефіцієнт потужності вітроколеса дуже близько до його максимального значення (відхилення від максимуму на 0,2 % при $\lambda_d=7$), що свідчить про високу енергоефективність запропонованої системи. Таке незначне відхилення коефіцієнта потужності від максимального значення обумовлено незначним відхиленням поточної швидкохідності вітроколеса від розрахункової, що у свою чергу пояснюється характером спектральної щільності потужності в моделі вітру Ван дер Ховена. Продемонстровано також підвищену енергоефективність режиму максимальної потужності, який забезпечується завдяки

змінній швидкості обертання вітроколеса порівняно з режимом постійної швидкості обертання вітроколеса (різниця $c_{pw1} - c_{pw2}$ при $\lambda_d=7$ та $v_s=10$ м/с складає 1 %).

ЛІТЕРАТУРА

1. Черніков В.Г. Стабілізація вихідної потужності вітрогенераторних установок з асинхронним генератором засобами системи регулювання // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 2. – С. 265–272.
2. Blaabjerg F. Power Electronics for Modern Wind Turbines. – USA: Morgan & Claypool, 2006. – 19 p.
3. Hau E. Windkraftanlagen Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. – Berlin: Springer, 2008. – 148 p.
4. Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy Systems. – London: Springer, 2008. – 77 p.
5. Riefenstahl U. Elektrische Antriebstechnik. – Leipzig: Teubner Stuttgart, 2000. – 66 p.
6. Burton T. Wind Energy Handbook. – Chichester: Wiley, 2011. – 53 p.
7. Franquesa M. Kleine Windrader. – Berlin: Udo Pfiemer Buchverlag, 1989. – PP. 106–107.
8. Stiebler M. Wind energy systems for electric power generation. – Berlin: Springer, 2008. – 102 p.

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM IN MAXIMAL POWER OPERATION USING VAN DER HOVEN’S SPECTRAL MODEL OF THE WIND SPEED

V. Chernikov

Donetsk National Technical University

vul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: vinodel12@ukr.net

The operation of wind energy units with variable-speed of the wind turbine is considered. The simplified model of the control system in maximum power operation is created. The simulation of the wind energy units operation has been conducted in Matlab. The ability of control system of wind energy units to maintain the maximum power coefficient of wind turbine using Van der Hoven’s spectral model of the wind speed has been estimated. Van der Hoven’s spectral model takes into account power spectral densities and enables the simulation of the wind behaviors by means of mixing of sinusoid with different amplitude, phase and frequency. The criterion of energy efficiency is deviation of the wind turbine power coefficient from its maximum value. Wind turbine characteristics and construction peculiarities of control system have been taken into account while estimating the energy efficiency. The simulation is conducted with different value of the wind speed low frequency components. During the simulation it has been established, that deviation of the wind turbine power coefficient from maximum does not exceed 0,2 %. These results prove the high efficiency of a wind energy unit in the maximum power mode under any wind conditions.

Key words: Wind turbine, power coefficient, tip speed ratio, power spectral density, generator.

REFERENCES

1. Chernikov, V.G. (2013), “Stabilization of output power of wind energy units on the basis of induction generator by means of control system”, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, seriya “Elektrotekhnika i enerhetyka”*, no. 2, pp. 265–272. (in Ukrainian)
2. Blaabjerg, F. (2006), *Power Electronics for Modern Wind Turbines*, Morgan & Claypool, USA.
3. Hau, E. (2008), *Windkraftanlagen Grundlagen, Technik, Einsatz*, Springer, Berlin, Germany.
4. Munteanu, I. (2008), *Optimal Control of Wind Energy Systems*, Springer, London, Great Britain.
5. Riefenstahl, U. (2000), *Elektrische Antriebstechnik*, Teubner Stuttgart, Leipzig, Germany.
6. Burton, T. (2011), *Wind Energy Handbook*, Wiley, Chichester, Great Britain.
7. Franquesa, M. (1989), *Small Wind Turbine*, Udo Pfiemer Buchverlag, Berlin, Germany, pp. 106–107.
8. Stiebler, M. (2008), *Wind energy systems for electric power generation*, Springer, Berlin, Germany.

Стаття надійшла 19.05.2014.