

УДК 620.92

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2019.4.6>

Д.М. СТЕПАНЧИКОВ

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0001-5027-2213

БЕЗСЕНСОРНИЙ ДІАГНОСТИЧНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ РОЗБАЛАНСУВАННЯ ВІТРОТУРБИНИ

Відновлювальні джерела енергії привертають до себе значну увагу внаслідок останньої енергетичної кризи та необхідності отримувати екологічно чисту енергію. Енергія вітру є одним з найважливіших відновлювальних джерел енергії. Енергія вітру перетворюється у електричну енергію за допомогою обертання лопатей, з'єднаних з генератором. Для отримання більшої кількості електричної енергії на виході, повітряна турбіна має бути великих розмірів. Внаслідок великих геометричних розмірів конструкції турбіни будуть обов'язково траплятися її періодичні відмови. Повітряні турбіни звичайно функціонують у змінних умовах з поривами турбулентного вітру, який змінюється за величиною і напрямом. Це створює у вузлах повітряної турбіни динамічні навантаження, викликаючи втому, розбалансування вала/лопати, аеродинамічну асиметрію та інші негативні наслідки. Тому повітряні турбіни повинні перевірятися під час роботи для підвищення безпеки, мінімізації часу простою і забезпечення максимального потенціалу генерування вихідної потужності. У статті моделюються та досліджуються дефекти розбалансування лопати, аеродинамічної асиметрії, застосовується метод виявлення таких дефектів, який ґрунтується на реєстрації електричних сигналів фазного струму статора генератора. Сигнали струму статора використовуються у існуючих системах керування повітряних турбін, тому ніяких сенсорів та інших пристроїв для збору даних не потрібно. Динаміка повітряної турбіни моделюється для трьох різних сценаріїв: нормальний режим роботи, розбалансування вала/лопати та аеродинамічна асиметрія. Розбалансування лопати моделюється шляхом зміни маси однієї лопати, а аеродинамічна асиметрія моделюється зміною кута повороту однієї лопати. Результати моделювання реєструються у часовій області і потім перетворюються у частотну область з використанням швидкого перетворення Фур'є та метода спектральної густини потужності. Показано, що запропонований метод можна застосовувати для ідентифікації дефектів розбалансування повітряної турбіни, а також для їх класифікації за частотною локалізацією та величиною амплітуди сигналу.

Ключові слова: метод виявлення дефектів, дефект розбалансування, аеродинамічна асиметрія, метод спектральної густини, повітряна турбіна.

Д.М. СТЕПАНЧИКОВ

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0001-5027-2213

БЕССЕНСОРНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ РАЗБАЛАНСИРОВКИ ВЕТРОТУРБИНЫ

Возобновляемые источники энергии привлекают много внимания вследствие последнего энергетического кризиса и необходимости получать экологически чистую энергию. Энергия ветра является одним из главных возобновляемых источников энергии. Энергия ветра преобразуется в электрическую энергию с помощью вращения лопастей, соединенных с генератором. Для получения большей электрической энергии на выходе, воздушная турбина должна быть больших размеров. Вследствие больших размеров турбины будут неизбежно происходить ее периодические отказы. Воздушные турбины обычно функционируют в изменяющихся условиях с порывами турбулентного ветра, переменными по величине и направлению. Это подвергает узлы воздушной турбины динамическим нагрузкам, вызывая усталость, разбалансировку вала/лопасти, аэродинамическую асимметрию, и другие нежелательные последствия. Поэтому воздушные турбины должны проверяться во время работы, чтобы улучшить безопасность, минимизировать время простоя, и дать максимальный потенциал генерирования выходной мощности. В статье моделируются и исследуются дефекты разбалансировки лопасти воздушной турбины, аэродинамической асимметрии и применяется метод обнаружения таких дефектов, основанный на регистрации сигналов фазного тока статора генератора. Сигналы тока статора используются в существующих системах управления воздушных турбин, поэтому никаких дополнительных сенсоров или устройств для сбора данных не требуется. Динамика воздушной турбины смоделирована для трех различных сценариев: нормальный режим работы, разбалансировка вала/лопасти и аэродинамическая асимметрия. Разбалансировка лопасти моделируется с помощью изменения массы одной лопасти, тогда как аэродинамическая асимметрия

моделируется изменением угла поворота одной лопасти. Результаты моделирования регистрируются во временной области и затем преобразуются в частотную область при использовании быстрого преобразования Фурье и метода спектральной плотности мощности. Показано, что предложенный подход применим для идентификации дефектов разбалансировки воздушной турбины, а также для их классификации по частотной локализации и уровню амплитуды сигнала.

Ключевые слова: методы обнаружения дефектов, дефект разбалансировки, аэродинамическая асимметрия, метод спектральной плотности, воздушная турбина.

D.M. STEPANCHIKOV
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-5027-2213

SENSORLESS DIAGNOSTIC METHOD FOR WIND TURBINE IMBALANCE FAULTS DETECTION

Renewable energy sources have gained much attention due to the recent energy crisis and the urge to get clean energy. Wind energy is one of the important renewable energy resources. The wind energy is converted into electrical energy using rotating blades which are connected to the generator. To harvest more electrical yield, the wind turbine must be bigger. Due to its large structure, periodic failures are inevitable. Wind turbines usually operate in varying conditions with turbulent wind gusts that change in magnitude and direction frequently. This causes wind turbine components to be exposed to dynamic loads, causing fatigue, shaft/blade imbalance, aerodynamic asymmetry, and other undesirable loading conditions. Therefore wind turbines must be checked during work to enhance security, to minimize down time, and to give a maximum potential output power generation. In this paper, the imbalance fault of the wind turbine blade, aerodynamic asymmetry and fault detection method based on one phase generator stator current signals have been modeled and studied. Stator current signals are used in existing wind turbine generator control systems, therefore no additional sensors or data acquisition devices are needed. The dynamics of a wind turbine generator are modeled in three different scenarios, i.e., normal operating conditions, blade imbalance, and aerodynamic asymmetry. The blade imbalance is simulated by scaling the mass of one blade, whereas the aerodynamic asymmetry is simulated by adjusting the pitch of one blade. The simulation results recorded in the time-domain and then transformed into the frequency-domain by using both the Fast Fourier Transform and the power spectrum density (PSD)-based method. It is showed that the proposed approach to be able to identifying the wind turbine imbalance faults, and also to classifying them from frequency localization and amplitude value of signal.

Keywords: fault detection methods, imbalance fault, aerodynamic asymmetry, power spectral density (PSD), wind turbine.

Постановка проблеми

Швидкий розвиток вітроенергетики супроводжується багатьма проблемами і задачами, серед яких головними є відносно низькі надійність, коефіцієнт готовності та рентабельність вітроустановок. Обслуговування великої кількості вітроустановок є значним викликом для сучасної та майбутньої енергетики.

Сучасні вітроенергетичні установки (ВЕУ) складаються з понад 8000 вузлів, мають складну електромеханічну систему з багатокомпонентною структурою. Крім того, ВЕУ звичайно розташовують у віддалених або океанських ділянках, де важкі технологічні умови можуть викликати пошкодження стану і створити додаткові ускладнення для обслуговування ВЕУ. Таким чином, надійність ВЕУ є залежною від стану її окремих компонентів і підсистем, серед яких слід відмітити лопаті і ротор, систему керування кутом повороту, коробку передач і підшипники, генератор, електронні перетворювачі потужності, гальма та інше. Експлуатаційні витрати для берегових та офшорних ВЕУ знаходяться у межах 10÷15% і 20÷35% від загальної вартості генерованої електрики відповідно. Щоб зробити вітроенергетику конкурентоздатною необхідно знизити експлуатаційні витрати та покращити надійність. Самий ефективний спосіб досягнення цієї мети – проведення технічного обслуговування на основі інтерактивного моніторингу стану та виявлення несправностей.

Більшість існуючих оперативних методів моніторингу стану ВЕУ потребують використання додаткових чутливих елементів, які закріплюються на окремих елементах ВЕУ, важко доступні і схильні до відмови. Це може викликати додаткові витрати в системі обслуговування ВЕУ. У цьому сенсі вигідно відрізняються методи моніторингу, які базуються на сигналах струму у колі генератора ВЕУ. Такі методи не потребують чутливих сенсорів, а отже є більш вигідними з точки зору вартості, реалізації і надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість дефектів, які відбуваються у ВЕУ – це несправності коробки передач, гальм, генератора, лопатей, опорної башти та деякі інші [1-3]. Дефекти можна класифікувати за різним рівнем системних реакцій і невідкладності. Наприклад, вони можуть бути застереженням, попередженням або

аварійним сигналом.

Дефекти розбалансування складають значну частину всіх дефектів ВЕУ. Серед таких дефектів основним є розбалансування вала/лопаті. Розбалансування лопаті може бути викликане похибками у виробництві і монтажі, обмерзанням, деформаціями внаслідок старіння, зносом і втотою під час роботи ВЕУ. Вузли і механізми мають тенденцію зміщуватися і зношуватися по-різному у продовж тривалого часу, спричиняючи розбалансування на валу або лопатях при обертанні. Інший загальний дефект розбалансування – аеродинамічна асиметрія, причиною якої можуть бути декілька факторів, включаючи сильний вітровий зсув і похибки у механізмі керування. Якщо кут повороту однієї лопаті буде дещо відрізнятися від двох інших лопатей, то обертальний момент на валу не буде збалансований, що викличе аеродинамічну асиметрію [4-7].

Для детектування дефектів розбалансування ВЕУ раніше використовувались декілька методів обробки сигналів, серед яких класичний метод спектральної густини [8], бікогерентне дослідження [9], частотно-часовий аналіз [10], амплітудна демодуляція [11], інтелектуальний збір даних [12]. Класичний метод спектральної густини і бікогерентне дослідження можуть розпізнати дефекти розбалансування на підставі їх характеристикних частот. Втім така можливість є доступною тільки для стаціонарних сигналів. Частотно-часовий аналіз і амплітудні методи демодуляції можуть дати характеристики дефекту від нестационарних сигналів. Однак вони не можуть чітко відрізнити дефекти розбалансування від інтерференцій, у яких є подібні ознаки у часовій або частотній області. Крім того, ці методи звичайно мають низьку роздільну здатність і потребують значних обчислювальних ресурсів.

Засновані на вимірюваннях струму генератора (не механічні, безсенсорні) методи моніторингу дефектів розбалансування ВЕУ ніяких додаткових сенсорів для збору даних не потребують. Крім того, сигнали струму є достовірними і легкодоступними на землі без відвідування окремих вузлів ВЕУ. Тому такі методи моніторингу несправностей характеризуються значною економічною вигодою і потенціалом, який буде потрібний для вітроенергетичної промисловості.

Проте, існують певні проблеми у використанні сигналів струму для моніторингу дефектів розбалансування. По-перше, характеристичні частоти дефектів розбалансування залежать від частоти обертання вала, яка відома як 1Р частота. Оскільки 1Р частота ВЕУ звичайно змінюється у залежності від швидкості вітру, то це породжує проблему отримання сигнатури дефекту розбалансування від нестационарних струмів статора ВЕУ при використанні традиційних методів спектрального аналізу. Крім того, домінуючий компонент сигналу струму – це компонент його основної частоти. Тому у корисній інформації в сигналах струму є низьке співвідношення сигнал-шум, що суттєво ускладнює моніторинг несправностей ВЕУ. Ці проблеми були усунуті у модифікованому методі спектральної густини потужності (power spectral density або PSD-метод) [4,7]. У запропонованому методі спочатку оцінюють змінну частоту обертання вала ВЕУ за фазовим струмом статора генератора і потім обробляють отриманий частотний сигнал таким чином, що змінні характеристичні частоти дефектів розбалансування стають постійними величинами.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження було доведення принциповою можливістю у межах раніше запропонованого PSD-методу не тільки виявлення дефектів розбалансування ВЕУ, але також їх кількісної ідентифікації за величиною локалізації і амплітудою збудження на базовій частоті обертання ротора.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вал ВЕУ прямої передачі можна описати моделлю з однією масою. Рівняння руху має вид [4]:

$$J \frac{d\omega_r(t)}{dt} = T_t(t) - T_e(t) - D\omega_r(t) \quad (1)$$

$$\omega_r(t) = 2\pi f_r(t) \quad (2)$$

де J – повний момент інерції ВЕУ;
 ω_r – кутова частота обертання вала;
 f_r – частота обертання вала, яка дорівнює 1Р частоті;
 $d\omega_r/dt$ – кутове прискорення;
 T_t – обертальний момент турбіни;
 T_e – обертальний момент генератора;
 D – коефіцієнт затухання.

Оскільки це лінійна модель, яка дає залежність між частотою обертання вала і обертальними моментами ВЕУ, то якщо буде вібрація обертальних моментів, то збудження з тією самою частотою з'явиться у сигналах частоти вала. Вібрація на 3Р частоті, яка є потрібною частотою обертання вала ВЕУ,

генерується ефектом похибки рискання, зсувом вітру або тінню опорної башти. Вібрація на 1Р частоті утворюється дефектами розбалансування, включаючи розбалансування лопаті і аеродинамічну асиметрію. Крім того, ці явища також діють на частоту обертання вала ВЕУ і роблять збудження на відповідних частотах у сигналах вала [4,13,14].

У модифікованому методі спектральної густини потужності (PSD-методі) тільки один фазовий струм статора вимірюється для детектування дефектів розбалансування. Частота обертання вала оцінюється по виміряному сигналу струму. Для ВЕУ прямої передачі залежність між частотою обертання вала f_r і основною частотою f_1 струму статора дається наступним виразом [4]:

$$f_1(t) = p \cdot f_r(t), \tag{3}$$

де p – число пар полюсів генератора.

Визначимо Ω_r як нормовану частоту в одиницях частоти обертання вала або 1Р частотний сигнал, який оцінено за сигналом струму статора. Визначимо f_s як частоту дискретизації струму статора. Залежність між f_r, f_s, Ω_r може бути записана наступним чином

$$\frac{\Omega_r(t)}{2\pi} = \frac{f_r(t)}{f_s} \tag{4}$$

Якщо частота дискретизації f_s буде змінюватися безперервно з $f_r(t)$ щоб зробити праву частину (4) сталою, то $\Omega_r(t)$ буде мати сталі значення. PSD-метод попередньо обробляє частотний сигнал обертання вала ВЕУ для отримання сталої частоти $\Omega_r(t)$ [4,7]. При використанні описаного методу змінна характеристична частота 1Р дефектів розбалансування стає сталою величиною, а її амплітуда може використовуватися у якості сигнатури для чіткого розпізнавання дефектів розбалансування.

Для модельних досліджень ефектів розбалансування була створена динамічна модель ВЕУ прямої передачі на 100 кВт у комбінованому середовищі FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) і Simulink/Matlab. FAST використовується для моделювання аеродинамічної частини ВЕУ, яка містить опорну башту, лопаті, вал, поворотну гондолу. Висота гондoli трилопатної ВЕУ складає 25 м, діаметр лопатей 18 м, частота обертання 45 об/хв (75 Гц). Simulink використовується для моделювання синхронного генератора на постійних магнітах з 48 полюсами та інших електричних частин ВЕУ, а також вітрового навантаження [15].

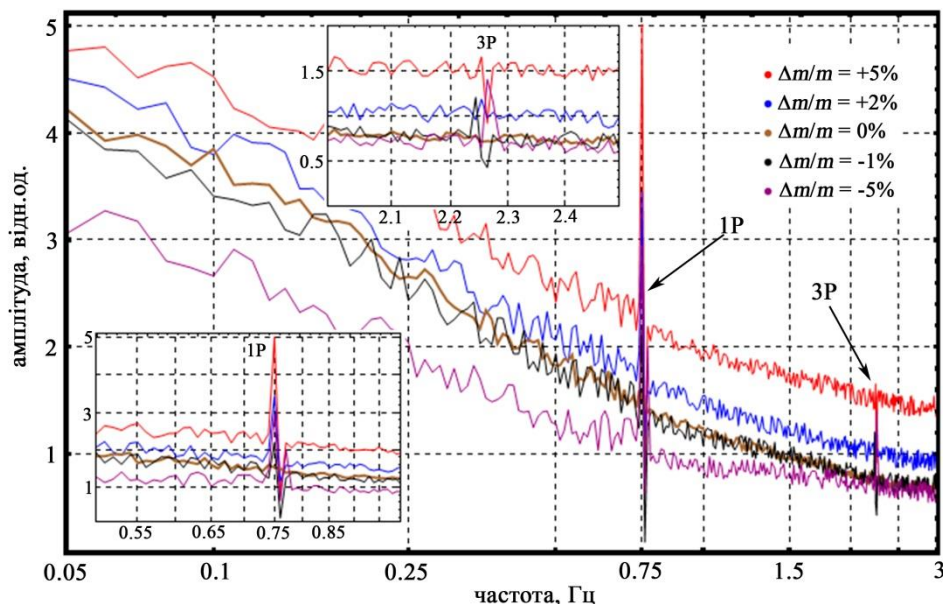


Рис. 1. Порівняння амплітуд спектральної густини потужності для різних сценаріїв розбалансування лопаті і штатного режиму роботи ВЕУ. На вставках показано піки амплітуд збудження на 1Р та 3Р частотах обертання вала

Розбалансування лопаті моделюється масштабуванням маси однієї лопаті, що створює нерівномірний розподіл маси відносно ротора. Моделюються різні сценарії з масою однієї лопаті, яку скоректовано як на зменшення маси у порівнянні з двома іншими лопатями, так і на збільшення. Ступінь зменшення (збільшення) маси однієї лопаті $\Delta m/m$ дається у відсотках. Описані сценарії порівнюються між собою і з роботою ВЕУ у нормальному режимі (так званий базовий або штатний випадок).

Чітко показано, що при сценаріях розбалансування лопаті збудження відбуваються на частотах 1P і 3P (рис.1). Розбалансування викликане ексцентричною масою, яка обертається з частотою 1P. Частота обертання вала діє на розбалансування у лопатях і також вібрує з частотою 1P. Крім того, рис.2 показує, що величина збудження на 1P частоті збільшується із зростанням ступеня розбалансування лопаті. З іншого боку, ніякого збудження не спостерігається на 1P частоті для повітряної турбіни зі штатними лопатями. Вібрація на 3P частоті, яка є потрійною частотою обертання вала ВЕУ, є не такою значною, але також може використовуватися для характеристики дефектів розбалансування.

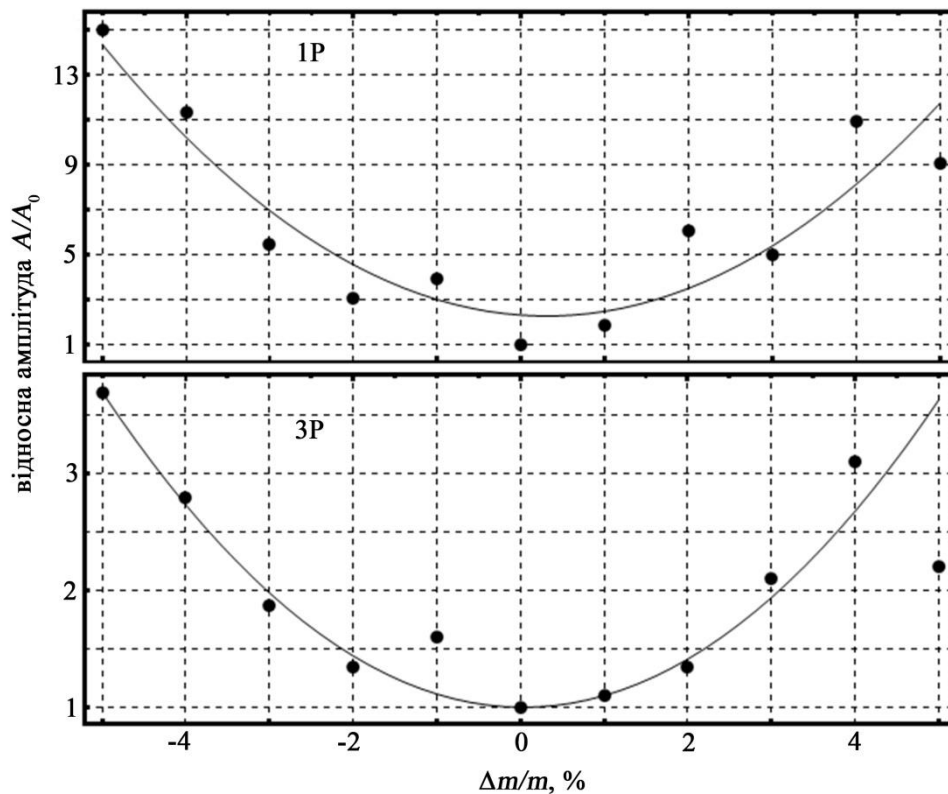


Рис. 2. Порівняння амплітуд спектральної густини потужності для різних сценаріїв розбалансування лопаті і штатного режиму роботи поблизу 1P та 3P частоти. Точки – модельний експеримент, суцільна лінія – квадратична апроксимація

Аналіз розподілу відносних амплітуд вібрацій на 1P та 3P частотах (рис.2, табл.1) дозволяє стверджувати, що величина амплітуди збудження корелює з величиною маси розбалансування $\Delta m/m$. Апроксимація методом найменших квадратів (МНК) цієї кореляції, яка показана на рис.2 суцільною лінією, може бути описана квадратичною залежністю:

$$\delta_T(1P) = 0,43 \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 - 0,26 \frac{\Delta m}{m} + 2,34 \quad (5)$$

$$\delta_T(3P) = 0,11 \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 - 0,007 \frac{\Delta m}{m} + 1,00 \quad (6)$$

де $\delta_T = A/A_0$ – відносна амплітуда розбалансування на частотах 1P і 3P;
 A – абсолютна амплітуда розбалансування;

A_0 – абсолютна амплітуда для штатного випадку;

$\Delta m/m$ – відносна маса розбалансування лопаті у відсотках.

Таблиця 1
Амплітудні характеристики вібрацій на 1Р і 3Р частотах при динамічному розбалансуванні лопаті ВЕУ для модельного експерименту та квадратичної апроксимації

| $\Delta m/m$, % | 1Р частота | | | | 3Р частота | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|
| | Модельний експеримент | | Апроксимація МНК | | Модельний експеримент | | Апроксимація МНК | |
| | A | $\delta_E = A/A_0$ | δ_T | $\Delta = \delta_E - \delta_T$ | A | $\delta_E = A/A_0$ | δ_T | $\Delta = \delta_E - \delta_T$ |
| -5 | 8,25 | 15,00 | 14,33 | 0,67 | 2,77 | 3,70 | 3,70 | 0 |
| -4 | 6,24 | 11,35 | 10,21 | 1,14 | 2,10 | 2,80 | 2,73 | 0,07 |
| -3 | 3,00 | 5,45 | 6,96 | -1,51 | 1,40 | 1,87 | 1,98 | -0,11 |
| -2 | 1,66 | 3,02 | 4,56 | -1,54 | 1,01 | 1,35 | 1,44 | -0,09 |
| -1 | 2,15 | 3,91 | 3,02 | 0,89 | 1,20 | 1,60 | 1,11 | 0,49 |
| 0 | $A_0 = 0,55$ | 1,00 | 2,33 | -1,33 | $A_0 = 0,75$ | 1,00 | 1,00 | 0 |
| 1 | 1,04 | 1,90 | 2,48 | -0,58 | 0,82 | 1,10 | 1,10 | 0 |
| 2 | 3,35 | 6,09 | 3,52 | 2,57 | 1,35 | 1,80 | 1,41 | 0,39 |
| 3 | 2,76 | 5,01 | 5,40 | -0,39 | 1,57 | 2,10 | 1,94 | 0,16 |
| 4 | 5,99 | 10,90 | 8,14 | 2,76 | 2,32 | 3,10 | 2,68 | 0,42 |
| 5 | 5,00 | 9,09 | 11,74 | -2,65 | 1,65 | 2,20 | 3,63 | -1,43 |
| Коефіцієнт детермінації | | | | | | | | |
| | 0,84 | | | | 0,90 | | | |
| Середньоквадратична похибка | | | | | | | | |
| | 1,95 | | | | 0,31 | | | |

Для моделювання дефектів аеродинамічної асиметрії ВЕУ кут повороту однієї лопаті змінюється від -10° до $+10^\circ$ з кроком 2° , у той час як кути повороту двох інших лопатей лишаються незмінними. На рис.3 показано результати застосування модифікованого методу спектральної густини потужності при чотирьох сценаріях аеродинамічної асиметрії разом зі штатним випадком роботи ВЕУ. Збудження з'являються на 1Р і 2Р частотах.

На рис.3 видно, що абсолютна величина збудження на 1Р і 2Р частотах збільшується із зростанням кута повороту лопаті. З іншого боку, ніякого збудження не спостерігається на 1Р і 2Р частотах для повітряної турбіни зі штатними лопатями. Вібрація на 2Р частоті обертання вала ВЕУ також може використовуватися для характеристики дефектів аеродинамічної асиметрії.

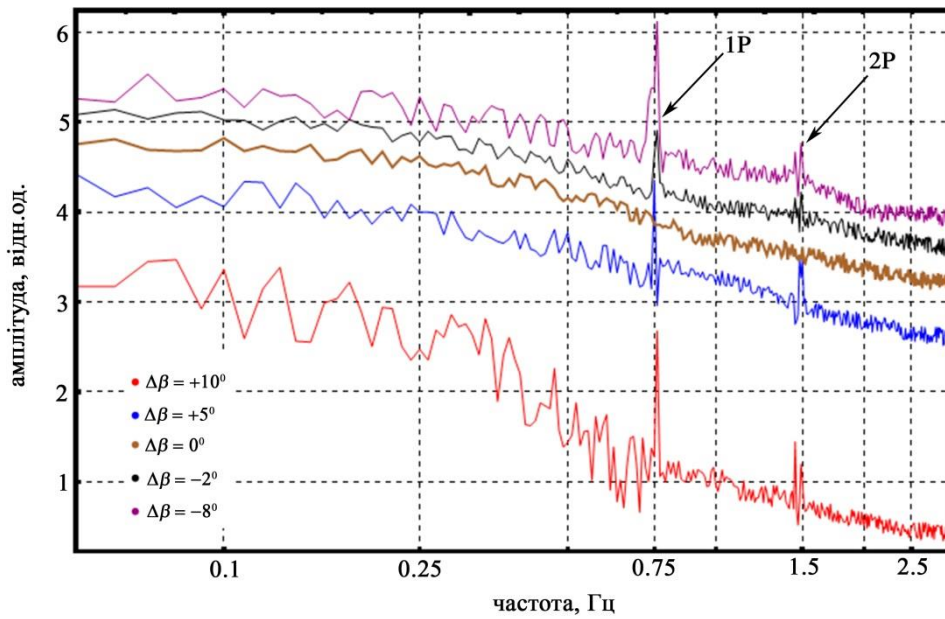


Рис. 3. Порівняння амплітуд спектральної густини потужності для різних сценаріїв аеродинамічної асиметрії і штатного режиму роботи вітроенергетичної установки

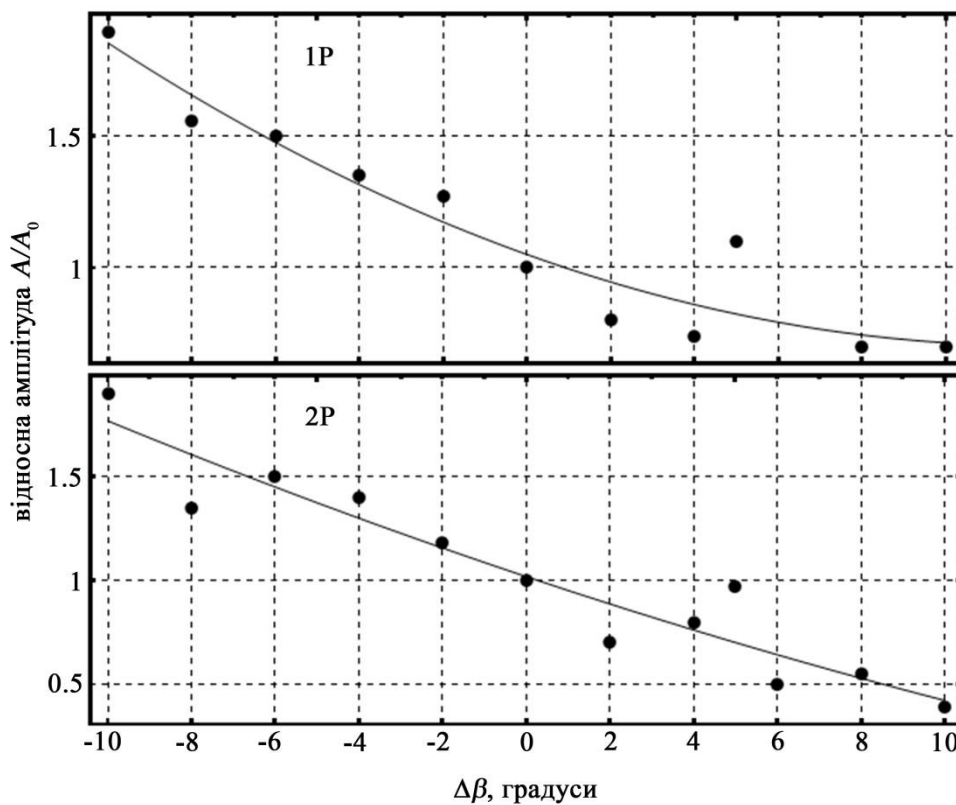


Рис. 4. Порівняння амплітуд спектральної густини потужності для різних сценаріїв аеродинамічної асиметрії і штатного режиму роботи поблизу 1P та 2P частоти. Точки – модельний експеримент, суцільна лінія – квадратична апроксимація

Таблиця 2

Амплітудні характеристики вібрацій на 1P і 2P частотах при аеродинамічній асиметрії ВЕУ для модельного експерименту та квадратичної апроксимації

| $\Delta\beta$, градуси | 1P частота | | | | 2P частота | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|
| | Модельний експеримент | | Апроксимація МНК | | Модельний експеримент | | Апроксимація МНК | |
| | A | $\delta_E = A/A_0$ | δ_T | $\Delta = \delta_E - \delta_T$ | A | $\delta_E = A/A_0$ | δ_T | $\Delta = \delta_E - \delta_T$ |
| -10 | 7,41 | 1,90 | 1,86 | 0,04 | 6,74 | 1,90 | 1,77 | 0,13 |
| -8 | 6,10 | 1,56 | 1,66 | -0,10 | 4,80 | 1,35 | 1,60 | -0,25 |
| -6 | 5,85 | 1,50 | 1,48 | 0,02 | 5,32 | 1,50 | 1,45 | 0,05 |
| -4 | 5,26 | 1,35 | 1,32 | 0,03 | 4,97 | 1,40 | 1,30 | 0,10 |
| -2 | 4,95 | 1,27 | 1,17 | 0,10 | 4,20 | 1,18 | 1,16 | 0,02 |
| 0 | $A_0 = 3,90$ | 1,00 | 1,05 | -0,05 | $A_0 = 3,55$ | 1,00 | 1,02 | -0,02 |
| 2 | 3,12 | 0,80 | 0,95 | -0,15 | 2,48 | 0,70 | 0,89 | -0,19 |
| 4 | 2,89 | 0,74 | 0,86 | -0,12 | 2,84 | 0,80 | 0,76 | 0,04 |
| 5 | 4,30 | 1,10 | 0,82 | 0,28 | 3,45 | 0,97 | 0,70 | 0,27 |
| 6 | 2,73 | 0,70 | 0,74 | -0,04 | 1,77 | 0,50 | 0,64 | -0,14 |
| 8 | 2,75 | 0,70 | 0,71 | -0,01 | 1,95 | 0,55 | 0,53 | 0,02 |
| 10 | 7,41 | 1,90 | 1,86 | 0,04 | 1,40 | 0,39 | 0,42 | -0,03 |
| Коефіцієнт детермінації | | | | | | | | |
| 0,92 | | | | | 0,90 | | | |
| Середньоквадратична похибка | | | | | | | | |
| 0,13 | | | | | 0,16 | | | |

Аналіз розподілу відносних амплітуд вібрацій на 1P і 2P частотах (рис.4, табл.2) дозволяє стверджувати, що величина амплітуди збудження корелює з величиною кута повороту лопаті $\Delta\beta$. Апроксимація методом найменших квадратів цієї кореляції, які показані на рис.4 суцільною лінією і може бути описана квадратичною залежністю:

$$\delta_T(1P) = 0,002\Delta\beta^2 - 0,057\Delta\beta + 1,050 \quad (7)$$

$$\delta_T(2P) = 0,0008\Delta\beta^2 - 0,0671\Delta\beta + 1,0183 \quad (8)$$

де $\Delta\beta$ – зміна кута повороту однієї лопаті у градусах.

Сигнал при збільшенні кута повороту однієї лопаті $\Delta\beta$ знаходиться нижче штатного сигналу роботи ВЕУ, тоді як при зменшенні $\Delta\beta$ перевищує цей сигнал. Це дозволяє класифікувати дефекти по знаку зміни кута повороту однієї лопаті.

Висновки

Проведене модельне дослідження динамічного розбалансування вала/лопаті шляхом зміни маси однієї лопаті показало, що характеристична частота розбалансування вала/лопаті дорівнює базовій частоті обертання ротора ВЕУ. Крім того величина збудження сигналу спектральної густини потужності на базовій частоті залежить від ступеня розбалансування вала/лопаті: для більшого розбалансування маємо більшу величину збудження. Отримано залежність амплітуд вібрацій на базовій та потрійній базовій частотах від маси розбалансування лопаті та їх квадратична апроксимація.

Результати модельного дослідження аеродинамічної асиметрії ВЕУ шляхом зміни кута повороту однієї лопаті показали, що характеристична частота аеродинамічної асиметрії знаходиться біля базової частоти обертання ротора. Чим більше кут повороту однієї лопаті, тим більша амплітуда збудження сигналу на базовій частоті. Отримано залежність амплітуд вібрацій на базовій та подвійній базовій частотах від зміни кута повороту однієї лопаті та їх квадратична апроксимація.

Доведено, що при використанні запропонованого методу дефекти розбалансування ВЕУ можна не тільки знаходити, але й визначати кількісно за величиною локалізації і амплітудою збудження на базовій і кратних до неї частотах обертання ротора.

Список використаної літератури

1. Takoutsing P., Wamkeue R., Ouhrouche M., Slaoui-Hasnaoui F., Tameghe T., Ekemb G. Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges. *Energies*, 2014, V.7(4), pp.2595-2630. doi: 10.3390/en7042595.
2. Joshuva A., Sugumaran V. Fault diagnostic methods for wind turbine: a review. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, V.11(7), pp.4654–4668.
3. Ciang C., Lee J., Bang H. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology*, 2008, V.19, pp.1-20. doi: 10.1088/0957-0233/19/12/122001.
4. Gong X., Qiao W. Imbalance Fault Detection of Direct-Drive Wind Turbines Using Generator Current Signals. *IEEE Trans. Energy Convers*, 2012, V. 27(2), pp. 468–475. doi: 10.1109/tec.2012.2189008.
5. Sattar A., Hussain I., Din Memon T., Karar H., Saeed U. Investigation of Imbalance Faults in Horizontal Axis WTGS through Analysis of Generator Current Signal. *Indian Journal of Science & Technology*, 2016, V9(47), pp.1-12. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i47/108654.
6. Zhao P., Li X., Yang L. Research on Mass Imbalance Fault of Wind Turbine Based on Virtual Prototype. *MATEC Web of Conferences*, 2017, V.95, pp. 06001-06007. doi: 10.1051/mateconf/20179506001.
7. Gong X., Qiao W. Simulation investigation of wind turbine imbalance faults. *IEEE International Conference on Power System Technology*, 2010, pp. 1–7. doi: 10.1109/powercon.2010.5666455.
8. Jiang D., Huang Q., Hong L. Theoretical and experimental study on wind wheel unbalance for a wind turbine. *World Non-GridConnected Wind Power Energy Conf.*, 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/wnwec.2009.5335787.
9. Jeffries W.Q., Chambers J.A., Infield D.G. Experience with bicoherence of electrical power for condition monitoring of wind turbine blades. *IEE Proc.: Vision, Image Signal Process*, 1998, V.145(3), pp. 141–148. doi: 10.1049/ip-vis:19982013.
10. Al Ahmar E., Choqueuse V., Benbouzid M.E.H., Amirat Y., El Assad J., Karam R., Farah S. Advanced signal processing techniques for fault detection and diagnosis of a wind turbine induction generator drive train: A comparative study. in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, 2010, pp. 3576–3581. doi: 10.1109/eccc.2010.5617707.
11. Choqueuse V., Benbouzid M.E.H., Amirat Y., Turri S. Diagnosis of three-phase electrical machines using multidimensional demodulation techniques. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2012, V.59(4), pp. 2014–2023. doi: 10.1109/tie.2011.2160138.
12. Kusiak A., Verma A. A data-driven approach for monitoring blade pitch faults in wind turbines. *IEEE Trans. Sustainable Energy*, 2011, V.2(1), pp. 87–96. doi: 10.1109/tste.2010.2066585.
13. Fadaeinedjad R., Moschopoulos G., Moallem M. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind diesel system. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2009, V.24(1), pp. 102–111. doi: 10.1109/tec.2008.2008941.
14. Gardels D.J., Qiao W., Gong X. Simulation studies on imbalance faults of wind turbines. in *Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting*, 2010, pp. 1–5. doi: 10.1109/pes.2010.5589500.
15. Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J., Gevorgian, V., Girsang, I., and Dhupia, J. Simulation for Wind Turbine Generators – With FAST and MATLAB-Simulink Modules. United States: N. p., 2014. doi:10.2172/1130628.

References

1. Takoutsing P., Wamkeue R., Ouhrouche M., Slaoui-Hasnaoui F., Tameghe T., Ekemb G. Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges. *Energies*, 2014, V.7(4), pp.2595-2630. doi: 10.3390/en7042595.
2. Joshuva A., Sugumaran V. Fault diagnostic methods for wind turbine: a review. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, V.11(7), pp.4654–4668.
3. Ciang C., Lee J., Bang H. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology*, 2008, V.19, pp.1-20. doi: 10.1088/0957-0233/19/12/122001.
4. Gong X., Qiao W. Imbalance Fault Detection of Direct-Drive Wind Turbines Using Generator Current Signals. *IEEE Trans. Energy Convers*, 2012, V. 27(2), pp. 468–475. doi: 10.1109/tec.2012.2189008.
5. Sattar A., Hussain I., Din Memon T., Karar H., Saeed U. Investigation of Imbalance Faults in Horizontal Axis WTGS through Analysis of Generator Current Signal. *Indian Journal of Science & Technology*, 2016, V9(47), pp.1-12. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i47/108654.
6. Zhao P., Li X., Yang L. Research on Mass Imbalance Fault of Wind Turbine Based on Virtual Prototype. *MATEC Web of Conferences*, 2017, V.95, pp. 06001-06007. doi: 10.1051/mateconf/20179506001.

7. Gong X., Qiao W. Simulation investigation of wind turbine imbalance faults. IEEE International Conference on Power System Technology, 2010, pp. 1–7. doi: 10.1109/powercon.2010.5666455.
8. Jiang D., Huang Q., Hong L. Theoretical and experimental study on wind wheel unbalance for a wind turbine. World Non-GridConnected Wind Power Energy Conf., 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/wnwec.2009.5335787.
9. Jeffries W.Q., Chambers J.A., Infield D.G. Experience with bicoherence of electrical power for condition monitoring of wind turbine blades. IEE Proc.: Vision, Image Signal Process, 1998, V.145(3), pp. 141–148. doi: 10.1049/ip-vis:19982013.
10. Al Ahmar E., Choqueuse V., Benbouzid M.E.H., Amirat Y., El Assad J., Karam R., Farah S. Advanced signal processing techniques for fault detection and diagnosis of a wind turbine induction generator drive train: A comparative study. inProc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., 2010, pp. 3576–3581. doi: 10.1109/ecce.2010.5617707.
11. Choqueuse V., Benbouzid M.E.H., Amirat Y., Turri S. Diagnosis of three-phase electrical machines using multidimensional demodulation techniques. IEEE Trans. Ind. Electron., 2012, V.59(4), pp. 2014–2023. doi: 10.1109/tie.2011.2160138.
12. Kusiak A., Verma A. A data-driven approach for monitoring blade pitch faults in wind turbines. IEEE Trans. Sustainable Energy, 2011, V.2(1), pp. 87–96. doi: 10.1109/tste.2010.2066585.
13. Fadaeinedjad R., Moschopoulos G., Moallem M. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind diesel system. IEEE Trans. Energy Convers., 2009, V.24(1), pp. 102–111. doi: 10.1109/tec.2008.2008941.
14. Gardels D.J., Qiao W., Gong X. Simulation studies on imbalance faults of wind turbines. inProc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting, 2010, pp. 1–5. doi: 10.1109/pes.2010.5589500.
15. Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J., Gevorgian, V., Girsang, I., and Dhupia, J. Simulation for Wind Turbine Generators – With FAST and MATLAB-Simulink Modules. United States: N. p., 2014. doi:10.2172/1130628.