

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-7>

УДК 621.317

ЗАЙЦЕВ Євген

Інститут електродинаміки НАН України
<https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>
zaitsev@i.ua

БЕРЕЗНИЧЕНКО Вікторія

Інститут електродинаміки НАН України
<https://orcid.org/0000-0002-9961-1703>
vika.bereznichenko@i.ua

ЗАКУСИЛО Сергій

Інститут електродинаміки НАН України
<https://orcid.org/0000-0002-9193-8920>
sergy_zakusilo@i.ua

МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ СТАЦІОНАРНИХ СКЛАДОВИХ СИГНАЛІВ З ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ БИТТЯ ВАЛІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Критичне значення для виробництва, передавання та розподілу електричної енергії має стабільна робота енергетичного обладнання, оскільки вихід з ладу будь-якої її частини може призвести до серйозних порушень в енергосистемі, впливаючи на її надійність та якість електроенергії. Важливим завданням є своєчасний моніторинг технічного стану критично важливих вузлів, оскільки внутрішні фізико-хімічні, термічні та механічні процеси можуть призвести до дефектів у конструкції генераторів. Приблизно половина поломок генеруючих машин пов'язана із проблемами перекоосу та розбалансування. Підвищені навантаження на опори та зношування підшипників є наслідками цих дефектів, що погіршує працездатність гідроагрегатів. Системи вібраційного контролю переважно використовують акселерометри, але їхня ефективність обмежена, оскільки вони не дають можливості точно виявити місця виникнення дефектів.

Представлено переваги одночасного вимірювання параметрів биття вала та вібраційних сигналів для отримання більш детальної інформації для діагностики. Показано, що встановлення сенсорів поблизу вузлів гідроагрегату дозволяє отримувати сигнали, необхідні для оцінки стану, а аналіз вихідних сигналів ємнісних вимірювачів забезпечує високу точність моніторингу, що, в свою чергу, підвищує ефективність управління технічним станом гідрогенераторів. Визначено, що такий аналіз можливий при проведенні досліджень на комп'ютерних моделях, основою яких є моделі вимірювальних сигналів. Розроблено моделі вихідного сигналу ємнісних вимірювачів биття валів для проведення аналізу факторів, що сприяють дефекти в гідрогенераторах.

Ключові слова: гідрогенератор, ємнісний вимірювач, стаціонарна складова, контроль, модель, моніторинг та технічна діагностика

ZAITSEV Ievgen, BEREZNYCHENKO Viktoriia, ZAKUSILO Sergy
The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

MODEL FOR ANALYSIS STATIONARY COMPONENTS OF SIGNALS FROM CAPACITIVE RUNOUT SHAFT SENSORS FOR LARGE HYDROGENERATORS

The stable operation of power equipment is of critical importance for the production, transmission and distribution of electric energy, since the failure of any part of it can lead to serious disturbances in the power system, affecting its reliability and power quality. An important task is the timely monitoring of the technical condition of critical nodes, since internal chemical, thermal and mechanical processes can lead to defects in the design of generators. About half of the breakdowns of generating machines are related to skewing and unbalancing problems. Increased loads on supports and wear of bearings are the consequences of these defects, which impairs the performance of hydraulic units. Vibration control systems mainly use accelerometers, but their effectiveness is limited because they do not allow accurate detection of defects.

The advantages of simultaneous measurement of shaft runout parameters and vibration signals for obtaining more detailed information for diagnosis are presented. Shown that the installation of sensors near the nodes of the hydro unit allows receiving the signals necessary for condition assessment, and the analysis of output signals of capacitive meters ensures high monitoring accuracy, which, in turn, increases the efficiency of managing the technical condition of hydro generators. It was determined that such an analysis is possible when conducting research on computer models, the basis of which are models of measurement signals. Models of the output signal of capacitive shaft runout meters have developed for the analysis of factors contributing to defects in hydro generators.

Keywords: hydrogenerator, capacitive sensor, stationary component, control, model, monitoring and technical diagnostics.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Забезпечення стабільної та ефективної роботи енергосистеми значною мірою залежить від роботи енергетичного обладнання (ЕО), яке використовується для виробництва, передавання та розподілу електричної енергії. Вихід з ладу будь-якого ЕО призводить до повного або часткового порушення роботи

енергосистеми, тим самим безпосередньо впливаючи на її надійність та стійкість, якість електроенергії в мережі та можливість забезпечення балансів виробітку та споживання електроенергії.

У цьому разі забезпечення працездатності, можливостей зберігати та відновлювати свої основні функції в екстремальних умовах, не допускаючи негативних соціальних та економічних наслідків є важливим завданням, ефективне вирішення якого значною мірою залежить від ефективності вчасного забезпечення контролю та моніторингу технічного стану ЕО та його критично-важливих вузлів. Це викликано тим, що окрім зовнішніх факторів стихійної природи, в елементах конструкції генераторів протікає цілий ряд фізико-хімічних, термічних і механічних внутрішніх процесів, які з плином часу призводять до початку розвитку дефектів в обертових та не обертових елементах конструкції машини. Так, приблизно 50% всіх поломок генеруючих машин пов'язано з дефектами, які викликані перекосами, неспіввісністю, розбалансуванням або розцентруванням валу гідроагрегату відносно інших його вузлів [1,2]. Наявність цих дефектів призводить до підвищених навантажень на опори та зношування підшипників, в результаті чого відбувається підвищення допустимого рівня биття валу гідроагрегату [3] і як наслідок підвищення вібрації та шуму гідроагрегату й зниження його працездатності та надійності [4]. Контроль вібрації у більшості випадків на гідрогенераторах забезпечується лише системами вібраційного контролю на основі штатних засобів контролю (зазвичай лише акселерометрів). Такий підхід дозволяє оцінювати поточний технічний стан об'єкту контролю за параметрами інформаційних сигналів отриманих з первинних вимірювальних перетворювачів, у випадку використання акселерометрів такими параметрами є амплітуди та частоти вібраційних сигналів.

Використання тільки сигналів вібросенсорів під час оцінки механічних параметрів не дає 100% ефективності та можливості виявлення місця виникнення дефекту. Так, наприклад, якщо найбільша складова вібрації припадає на частоту обертання валу (1X), то проблема полягає в дисбалансі ротора. Неспіввісність викликає вібрацію на подвоєній частоті обертання валу (2X). Однак у багатьох випадках 1-кратна вібрація виникає не через дисбаланс ротора. А інші параметри будуть вказувати на зсув валу задовго до того, як виникне подвійна частота вібрації. в [5] описані випадки коли зсув чи биття валу не викликало зміну частотного спектру, такі випадки особливо є характерними для тихохідних гідроагрегатів. До таких випадків відноситься наявність овальності циліндричних ділянок вала, яка може виникати з різних причин у процесі виготовлення та експлуатації ротора.

Тому для підвищення правильності ідентифікації дійсної причини виникнення або розвитку дефекту гідрогенератора пов'язаного з його обертовими елементами одночасно та синхронно вимірюють параметри радіального й торцевого биття поверхні валу та сигнали з вібросенсорів, щоб дозволить забезпечити отримання додаткової контрольно-діагностичної інформації.

Для отримання контрольно-діагностичної інформації вимірювачі параметрів биття валів та вібросенсори встановлюються на кількох рівнях поблизу валу гідрогенератора у відповідності до точок описаних в стандартах ISO 19283:2020 [6], ISO 20816-5, ISO 13373-7 та інші. Розташування вимірювачів в декількох перетинах [6-12] дозволяє забезпечити контроль биття вала в різних режимах роботи гідроагрегату та отримати відповідні сигнали биття валу. Такий контроль здійснюють поблизу напрямних підшипників генератора і турбіни. Встановлюється 4-6 сенсорів на агрегат, по 2 сенсора з кутром 90° на кожен з підшипників гідроагрегату. Крім встановлення пари вимірювачів в безпосередній близькості до генераторного та турбінного підшипника, за значної довжини валу, можуть встановлюватися вимірювачі і біля проміжного підшипника.

Безконтактні сенсори вимірювання параметрів биття валів можуть бути реалізовані на основі різних методів, серед яких найбільш оптимальними є безконтактні методи на основі електроємнісного перетворення [3]. Вимірювачі побудовані на основі ємнісних первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) дозволяють забезпечити високу точність і роздільну здатність вимірювання, довготривалу стабільність характеристик, а також можуть працювати в умовах дії електромагнітних полів та мають відносно невисоку вартість.

Аналіз вихідних сигналів ємнісних сенсорів биття валів залежить від зміни фізичних процесів в вузлах генератора і характеризує його технічний стан, адже сигнал биття валу виникає через нерівності, ексцентриситет, незбалансованість або інші механічні дефекти. Тобто, досліджуючи характеристики сигналу биття з урахуванням конструктивних особливостей і дії зовнішніх чинників, можна забезпечити підвищення ефективності оцінки стану гідрогенератора в цілому.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

У зв'язку з чим основною метою даної статті є розробка моделі стаціонарної складової вихідного сигналу ємнісних вимірювачів параметрів для проведення аналізу чинників, що породжують виникнення дефектів в гідрогенераторах.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Форма та частотний склад сигналів на виході ємнісних вимірювачів параметрів биття валів гідроагрегатів визначаються багатьма процесами та передачею сил від джерела дефекту до місця

розміщення сенсору. Дефект на ранній стадії свого зародження утворюється у більшості випадків, через зміну експлуатаційного стану, параметрів та конструкції вузла, що у свою чергу призводить до зміни параметрів внутрішніх процесів, які виникають в гідрогенераторах під час їхньої експлуатації. Ці процеси призводять до виникнення коливань, деформацій та переміщень в об'єкті. При цьому в наслідок наявності взаємодії дефектного вузла з іншими вузлами машини, на виході сенсорів утворюють інформаційні сигнали, які в обертових системах мають періодичні складові різних частот від усіх можливих джерел збурень, які мають залежність від обертової частоти гідрогенератора.

В загальному вигляді інформаційний сигнал з виходу ємнісного сенсору биття $C_X(d,t)$ встановленого на корпусі напрямного підшипника є пропорційним зміні відстані $d(t)$ між поверхнею електродів сенсора та заземленою поверхнею валу у визначений момент часу t , тобто:

$$C_X(d,t) = f(d(t)) \quad (1)$$

Для перетворення ємності $C_X(d,t)$ у відповідне значення електричної величини, наприклад напруги, використовують різні типи вторинних вимірювальних перетворювачів (ВВП). З метою зменшення дії зовнішніх факторів та зменшення масогабаритних параметрів вимірювачів їх ВВП, розмішують в безпосередній близькості до чутливих елементів сенсорів в спільному корпусі утворюючи таким чином ємнісний вимірювач [13].

У ідеальному випадку ВВП забезпечує лінійне перетворення значення ємності у вихідну напругу:

$$U(d,t) = k \cdot (C_X(d,t) + C_{offset}) \quad (2)$$

де C_{offset} – константа, що залежить від схеми вторинного вимірювального перетворювача, k – коефіцієнт перетворення ВВП.

В реальності інформаційний сигнал на виході ВВП ємнісного вимірювача має нестационарний характер, тобто є поліперіодичним нестационарним випадковим процесом. Цей процес формується гармонічними складовими, які мають пряму залежність від періоду обертання гідроагрегату, а також від наявних дефектів валу та його поверхні. Тому сигнал на виході ВВП крім основної гармоніки обертової частоти та кратній їй гармоніки, також може містити інші гармонійні складові, які залежать від режиму роботи генератору [14] та додаткові імпульсні компоненти, що можуть виникати через дефекти та шуми різної природи походження. Приклад сигналу з виходу вимірювача параметрів биття валу наведено на рис.1.

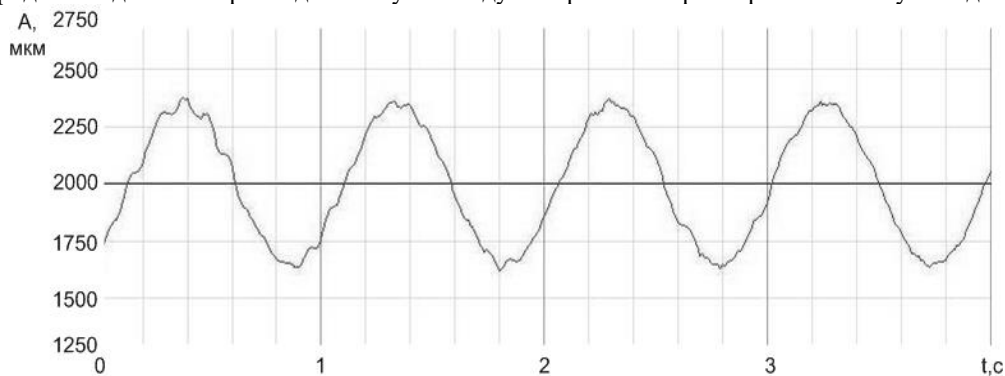


Рис.1 Приклад сигналу на виході ВВП вимірювача параметрів биття

У реальному випадку сигнал з виходу ємнісного вимірювача може бути представлений наступною функцією:

$$C_X(t,d) = s(t,d) + \xi(t,d) + \varepsilon_{noise}(t), \quad (3)$$

де s - детермінована складова сигналу биття; ξ - нестационарна складова процесу сигналу биття; ε_{noise} - шумова складова сигналу биття.

Тоді вираз (2) з урахуванням (3) буде мати вигляд (рис. 1):

$$U(d,t) = k \cdot (s(t,d) + \xi(t,d) + \varepsilon_{noise}(t) + C_{offset}) \quad (4)$$

Як видно із виразу (4) сигнал на виході ВВП ємнісного вимірювача параметрів биття валів потужних генераторів має детерміновані $s(t)$, нестационарні $\xi(t)$, а також шумові компоненти, які характеризують стан об'єкту [15, 16]. Детерміновані $s(t)$ та нестационарні $\xi(t)$ компоненти в такій моделі є незалежними, тобто їхній коефіцієнт кореляції Пірсона дорівнює 0. У цьому разі детермінована складова $s(t)$ є періодичною функцією математична модель, якої має вигляд:

$$s(t) = s(t \pm nT), \quad (5)$$

де T – період; n - загальна кількість гармонійних складових, $n \in \{1, 2, 3 \dots\}$.

Періодичний сигнал (5) може бути представлений шляхом розкладання в ряд Фур'є у вигляді ряду елементарних гармонійних складових, які формують детерміновану гармонійну складову сигнал процесу биття валу, наступним чином:

$$\begin{aligned} s(t, d) &= \frac{d_0}{2} + d_1 \cos(j\omega_1 t + \varphi_1) + d_2 \cos(j\omega_2 t + \varphi_2) + \dots + d_n \cos(j\omega_n + \varphi_n) = \\ &= \frac{d_0}{2} + \sum_{i_s=1}^n d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t + \varphi_{i_s}) \end{aligned}, \quad (6)$$

де $i_s = 1 \dots n_s$ - номер гармонійної складової сигналу биття, $i_s, n_s \in \{1, 2, 3 \dots\}$; d_0 - постійна складова, яка пропорційна постійній складовій відстані від електродів сенсора до поверхні валу; d_{i_s} - амплітуда i -ї гармонічної складової, є пропорційна відстані від електродів сенсора до поверхні валу, яка виникає у результаті наявності періодичних процесів, які призводять до зміни просторового положення поверхні валу відносно поверхні електродів сенсору; $\omega_{i_s} = 2\pi f_{i_s}$ - кутова частота (рад/с) i -ї гармонічної складової; φ - початкова фаза i_s -ї складової сигналу биття.

Сигнал $s(t, d)$ може бути амплітудно модульованим через наявність низькочастотної, високочастотної або іншої гармоніки, кутова частота якої ω_m відповідає частоті детермінованого коливання, спричиненого наявністю дефекта у конструктивному елементі генератора на відрізок часу спостереження $t > 0$:

$$s(t, d) = (1 + k_m \sin(\omega_m t)) \left(\frac{d_0}{2} + \sum_{i_s=1}^n d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t + \varphi_{i_s}) \right), \quad (7)$$

де k_m - коефіцієнт модуляції.

У разі наявності множини дефектів вираз (6.1) буде мати вигляд:

$$s(t, d) = \left(1 + \sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m} \sin(\omega_{i_m} t) \right) \left(\frac{d_0}{2} + \sum_{i_s=1}^{n_s} d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t + \varphi_{i_s}) \right), \quad (8)$$

де k_{i_m} - коефіцієнт модуляції i_m -го коливання; $i_m = 1 \dots n_m$ - номер модуляційного коливання, $i_m, n_m \in \{1, 2, 3 \dots\}$.

Для звуження кількості ймовірних частот гармонійних компонентів, які формують детерміновану складову сигналу, необхідно детально проаналізувати природу виникнення вібрацій, що спричиняються гідравлічними, механічними силами та силами магнітного тяжіння. Адже, у генераторі в процесі його роботи можуть відбуватися коливання не тільки на основній частоті, але й на кратних частотах, тобто на гармоніках, а також на частотах, пов'язаних із механічними резонансами конструкції, дією електромагнітних сил та динамічними невідповідностями. Такі коливання можуть виникати внаслідок різних факторів, таких як механічні дефекти конструкції, невідповідність ротора, зношені підшипники, або ж особливості роботи системи збудження. Крім того, можливі вібрації, що виникають в результаті нерівномірного зносу елементів механізму або через структурні особливості конструкції. Ці фактори можуть значно впливати на спектральний склад сигналу, збільшуючи кількість його складових, що зменшує точність вимірювань. Тому розуміння природи цих коливань і врахування всіх можливих джерел вібрацій є ключовими для забезпечення коректного аналізу та інтерпретації отриманих даних.

Коливання викликані гідравлічними силами передбачувано призводять до виникнення коливань з частотами, кратними частоті:

$$f_z = n_{GA} \cdot z / 60, \quad (9)$$

де n_{GA} – частота обертання генератора; z – кількість лопатей робочого колеса або лопаток.

Основними причинами механічних коливань є відцентрові сили, які виникають через невірноваження обертових мас, а також пружних сил, що виникають через порушення геометрії конструктивних елементів (викривлення валу, деформації ротора, розточення статора та інше).

Відцентрова сила невірноваження обертових мас визначається наступним чином

$$F_{UB} = m \cdot \omega_R^2 \cdot d_O = m \cdot d_O \cdot (2\pi f_R)^2, \quad (10)$$

де m – невірноважена маса; $\omega_R = 2\pi f_R$ – кутова частота обертання; d_O – відстань від центру вісі невірноваження до вісі обертання.

Частота обертання вектора відцентрової сили невірноваження F_{UB} є рівною частоті обертання:

$$f_R = n_{GA} / 60, \quad (11)$$

Пружні сили, у свою чергу, під час порушенні геометрії валопроводів можуть містити змінні складові коливань з частотами f_R та $2f_R$.

Для гідрогенераторів вертикальної конструкції, в яких використовується опорного багато-сегментний підшипник, в наслідок нерівності поверхні сегментів, виходу системи змащування з ладу, перекосу валу та тощо призводять до появи коливань з частотами, кратними частоті:

$$f_{Foot} = n_{GA} \cdot k / 60, \quad (12)$$

де k – кількість сегментів підшипника.

Враховуючи те, що сигналу $U(t_i, d_i)$ є неперервною функцією в межах часу кратному періоду оберту ротора T_r , тобто задовольняє умовам Діріхле. У цьому випадку кожен елемент сигналу $U(t_i, d_i)$, можна апроксимувати лінійною комбінацією тригонометричних функцій:

$$U(t_i, d_i) = a_{n,i} \cdot k_{C,i} \cdot \left(\frac{b_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} b_n \cdot \cos(2\pi \cdot k f_i \cdot t_i) \\ + c_n \cdot \sin(2\pi \cdot k f_i \cdot t_i) \end{array} \right) \right) \quad (13)$$

де b_0, b_n, c_n - коефіцієнти Фур'є, які обчислюються наступним чином [17]:

$$b_0 = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} U_{\sigma}(t) dt, \quad b = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} U_{\sigma}(t) \cdot \cos \frac{2\pi kt}{T_r} dt, \quad c = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} U_{\sigma}(t) \cdot \sin \frac{2\pi kt}{T_r} dt$$

З метою спрощення запису і забезпечення компактності введемо нові змінні

$$\begin{aligned} b_n &= A_n \cdot \cos \theta_n \\ c_n &= A_n \cdot \sin \theta_n, \\ b_0 &= A_0 \end{aligned} \quad (14)$$

Підставивши (6) в (5), отримаємо:

$$\begin{aligned} U(t_i, d_i) &= a_{n,i} \cdot k_{C,i} \cdot \left(\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} A_n \cdot \cos \theta_n \cdot \cos(2\pi \cdot k f_i \cdot t_i) + \\ + A_n \cdot \sin \theta_n \cdot \sin(2\pi \cdot k f_i \cdot t_i) \end{array} \right) \right) = \\ &= a_{n,i} \cdot k_{C,i} \cdot \left(\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cdot \cos(2\pi \cdot k f_i \cdot t_i - \theta_n) \right) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Амплітуди та фази спектральних складових сигналів биття, визначаються як:

$$A_n = \sqrt{b_n^2 + c_n^2}$$

$$\theta_n = \arctg\left(\frac{c_n}{b_n}\right) \quad (16)$$

З урахуванням того, що функція (4) вихідного сигналу ВВП є дискретним сигналом вирази для обчислення коефіцієнтів b_0 , b , c з урахуванням розкладу інтегральних виразів за формулами трапецій та просторово-часової залежності значень d_0, d_1, \dots, d_i від моментів часу t_0, t_1, \dots, t_i в яких вони визначені, отримаємо:

$$b_0 = \frac{1}{T_r} \cdot \sum_{i=i_0}^{i_0+N_r-1} \left[(U(t_i, d_i) + U(t_{i+1}, d_{i+1})) \cdot (t_{i+1} - t_i) \right],$$

$$c_n = \frac{1}{T_r} \cdot \sum_{i=i_0}^{i_0+N_r-1} \left[\begin{array}{l} U(t_i, d_i) \cdot \sin(2\pi \cdot kf_i \cdot t_i) \\ + U(t_{i+1}, d_{i+1}) \cdot \sin(2\pi \cdot kf_i \cdot t_i) \end{array} \right] \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad (17)$$

$$b_n = \frac{1}{T_r} \cdot \sum_{i=i_0}^{i_0+N_r-1} \left[\begin{array}{l} U(t_i, d_i) \cdot \cos(2\pi \cdot kf_i \cdot t_i) \\ + U(t_{i+1}, d_{i+1}) \cdot \cos(2\pi \cdot kf_i \cdot t_i) \end{array} \right] \cdot (t_{i+1} - t_i)$$

Використання значень b_0 , b_n , c_n та формули (17) дозволяє встановити рівень та значення гармонійних складових основних складових частот коливань сигналу биття. Це дозволяє забезпечити оцінку отриманих значень як за окремими гармоніками використовуючи фільтри, так і за сумарним розмахом вібропереміщення та спектральним діапазоном з їхніми граничними значеннями, що встановлюються на основі стандартів, досвіду експлуатації, а також рекомендацій заводів-виробників гідротурбіни та гідрогенератора [6,18].

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Використання отриманих співвідношень для визначення інформаційних складових сигналів биття в контрольних точках дозволяють значно розширити можливості системи діагностування, що забезпечує створення умов для виконання більш глибокої оцінки працездатності гідроагрегатів за рахунок збільшення кількості параметрів, а також підвищення ймовірності вірної ідентифікації наявності або розвитку дефектів пов'язаних з биттям валу.

Результати аналізу системи діагностування отриманих інформаційних складових сигналів биття можуть бути використані під час проведення балансування вала, мінімізації динамічного дисбалансу обумовленого технологічними похибками виготовлення і складання, усунення ушкоджень, виявленні осьових деформацій вала, які можуть виникати в ході експлуатації гідроагрегату, наприклад через зношеність опорних та направляючих підшипників.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» Шифр «ПАРАМЕТР-Д», реєстраційний номер (0122U000136)).

Література

1. Рубаненко О.О., Янович В.П., Гунько І.О. Дослідження причин пошкодження синхронних генераторів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. №5(277). С. 176-179.
2. Елькінд Ю.М. Контроль вібрації потужних гідрогенераторів. *Енергія*, 1979. 168 с.
3. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Відносна та абсолютна радіальна вібрація вала вертикального гідроагрегата. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3-4. С. 36–39.
4. Елькінд Ю.М. Контроль вібрації потужних гідрогенераторів. *Енергія*. 1979. 168
5. Алексеев Б.А. Визначення стану (діагностика) великих гідроагрегатів. ЕНАС. 1998. 133 с.
6. ISO 19283:2020 Condition monitoring and diagnostics of machines — Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
7. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.

8. Белоглазов А.В. Глазырин Г.В. Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2008. № 3(53). С. 79-84.
9. XY Measurements for radial position and dynamic motion in hydro turbine generators. *Orbit*. 2010. Vol. 30, № 1. P. 32-39.
10. Ungureanu G., Covaciu F., Balaj A., Ciulbea C. Vibration monitoring system of hydro electric turbine-generator sets. Proc. 2002 IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Vol. 11, Clui-Napoca, Romania, May 23-25, 2002. Pp. 382-385.
11. Школьник В.Э. Измерение радиального биения цилиндрических поверхностей вала ротора электрических машин. *Сборник «Электросила»*. 2001. №40. С. 60-66.
12. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. vol. 22(1634). 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041634>
13. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 57. С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081>
14. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. In: *Power systems research and operation: Selected problems / editors: Kyrylenko O., Zharkin A. and other*. Springer, 2021, P. 71-98. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_4
15. Sribulov M. *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples/Netherlands*.: Springer – 2010. 233 p
16. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б., Мацько І.Й. Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження обертових систем. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2011. № 2. с. 134-140
17. Poularikas A.D. *The Transforms and Applications Handbook*. USA : Boca Raton, 2000. 1233 p.
18. Vogl, G. , Weiss, B. and Donmez, M. (2014), Standards for prognostics and health management (PHM) techniques within manufacturing operations, Annual Conference of the PHM Society, 6(1), 2014, Fort Worth, TX. DOI <https://doi.org/10.36001/phmconf.2014.v6i1.2503>

References

1. Rubanenko O.O., Yanovych V.P., Gunko I.O. Investigation of the causes of damage to synchronous generators. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. 2019. No. 5(277). С. 176-179.
2. Elkind Yu.M. Vibration control of powerful hydrogen generators. *Energy*, 1979. 168 p.
3. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Berezhnychenko V.O. Relative and absolute radial vibration of the shaft of the vertical unit. *Hydropower Ukraine*. 2019. No 3-4. Pp. 36–39. (Ukr).
4. Elkind Y.M. Vibration control of powerful hydrogen generators. *Energy*. 1979. 168
5. Alekseev B.A. Determining the status (diagnostics) of large hydro generators. *ENAS*, 1998. 133 p.
6. ISO 19283:2020 Condition monitoring and diagnostics of machines — Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
7. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M. Gruboj O.P. Monitoring of the status of powerful hydro and turbo generators using capacitive meter for the parameters of mechanical defects. *IED NANU Publ.*, 2011. 242 p. (Ukr).
8. Beloglazov A.V. Glazyrin G.V. Development of tools for monitoring the hydraulic unit's hammer shaft. *Collection of scientific works of the National Technical University*. 2008. No. 3(53). P. 79-84.
9. XY Measurements for radial position and dynamic motion in hydro turbine generators. *Orbit*. 2010. Vol. 30, № 1. P. 32-39.
10. Ungureanu G., Covaciu F., Balaj A., Ciulbea C. Vibration monitoring system of hydro electric turbine-generator sets. Proc. 2002 IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Vol. 11, Clui-Napoca, Romania, May 23-25, 2002. Pp. 382-385.
11. Schoolboy V.E. Measurement of the radial runout of the cylindrical surfaces of the rotor shaft of electric machines. *Collection "Electrosyla"*. 2001. No. 40. P. 60-66.
12. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. vol. 22(1634). 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041634>
13. Berezhnychenko V., Zaitsev Ie. Non-contact capacitive sensor for powerful electrical machine shafts ron-out control systems. *The Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the NAN Ukrainy*. 2020. Vol. 57. Pp. 81–88. [HTTPS://DOI.ORG/10.15407/publishing2020.57.081](https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081)
14. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. In: *Power systems research and operation: Selected problems / editors: Kyrylenko O., Zharkin A. and other*. Springer, 2021, P. 71-98. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_4
15. Sribulov M. *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples/Netherlands*.: Springer – 2010. 233 p
16. Yavorskyi I.M., Drabych P.P., Kravets I.B., Matsko I.Y. Methods of vibration diagnostics of the initial stages of damage to rotating systems. *Physical and chemical mechanics of materials*. 2011. No. 2. p. 134-140
17. Poularikas A.D. *The Transforms and Applications Handbook*. USA: Boca Raton, 2000. 1233 p.
18. Vogl, G. , Weiss, B. and Donmez, M. (2014), Standards for Prognostics and Health Management (PHM) Techniques within Manufacturing Operations, Annual Conference of the PHM Society, 6(1), 2014, Fort Worth, TX. DOI <https://doi.org/10.36001/phmconf.2014.v6i1.2503>