



УДК 621.7.068

ЗАЙЦЕВ Є.О., канд. техн. наук,

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ

ПРОГРАМНО-МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ РОТОРА ГІДРОГЕНЕРАТОРА ЗА ДАНИМИ СЕНСОРІВ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ

Стаття присвячена розробці математичних моделей, що можуть бути використані при реалізації програмно-математичного забезпечення систем технічної діагностики гідрогенераторів при визначенні деяких механічних дефектів гідрогенераторів на основі даних, що отримані від електронно-оптичних вимірювачів (ЕОВ) повітряного зазору із емісійними сенсорами. Одним із поширених типів механічних дефектів є зміна повітряного зазору, викликана ексцентриситетом ротора. Розглянуто математичні залежності, які описують зміну нерівномірності повітряного зазору в залежності від типу ексцентриситету. Приведені результати моделювання зміни повітряного зазору в місцях розташування ЕОВ (на прикладі геометричних параметрів капсульного гідрогенератора СГК 538/1601-70М).

К л ю ч о в і с л о в а: гідрогенератор, ротор, форма обвідної, вимірювання, годограф, метод найменших квадратів.

Одним із поширеніших механічних дефектів гідрогенераторів є нерівномірність розподілу повітряного зазору між ротором та статором в гідрогенераторі. Така зміна повітряного зазору може виникнути з ряду причин до яких відносять [1, 2]: недоліки в проектуванні, виготовленні, монтажі конструкції й проведенні допоміжних вирівнювань при підгонці елементів машини при збиранні [3], старінні компонентів за час експлуатації, осідання фундаменту, негативному впливу змін температури понад допустимі, а також наявні відцентрові та магнітні сили, які виникають на машині при її експлуатації. Отже, зміна нерівномірності повітряного проміжку гідрогенераторів значною мірою визначає його техніко-економічні показники, поведінку під час введення в ек-

сплуатацію та протягом всього експлуатаційного періоду, адже саме в повітряному зазорі відбувається перетворення механічної обертової енергії в електричну [4–9]. Тому своєчасна ідентифікація зміни розподілу повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора є актуальною задачею забезпечення надійності роботи гідрогенераторів.

Вирішення такої задачі насамперед пов'язано з необхідністю розробки сучасних комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем зі спеціалізованим програмно-математичним забезпеченням й первинними сенсорами [10], адаптованими до умов експлуатації і конструктивних особливостей зони контролю повітряного зазору [11], що можуть бути легко адаптовані до застосування вже існуючих систем технічної діагностики механічних параметрів елект-

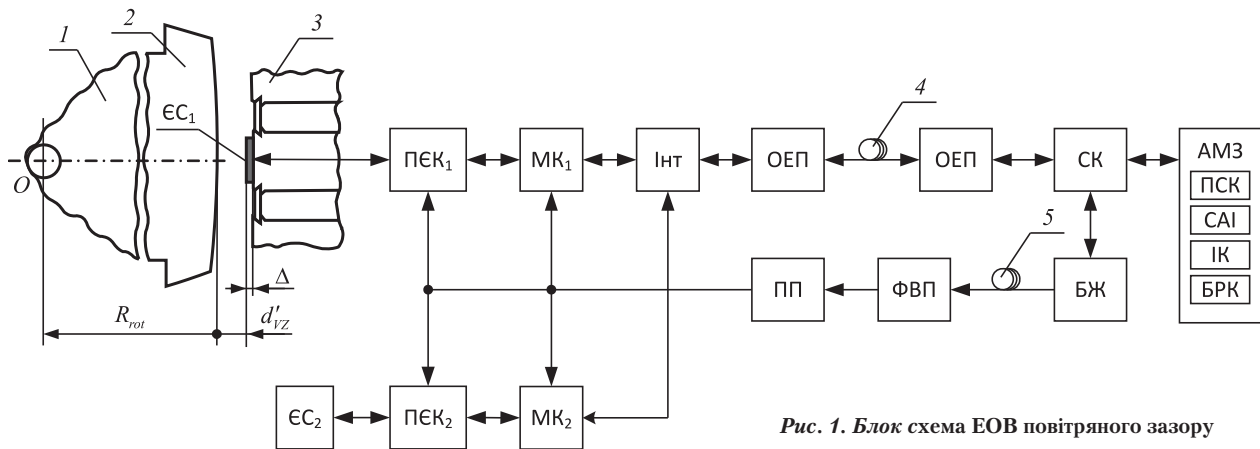


Рис. 1. Блок схема ЕОВ повітряного зазору

ричних машин. При цьому необхідною умовою є врахування вимог до таких інформаційно-вимірювальних систем, які обумовлені насамперед конструктивними особливостями вузла, його поведінки в часі, можливого варіанту розвитку дефекту та його виду, розміщення первинних вимірювачів, а також врахуванням особливостей впливу робочого середовища на вимірювачі в зоні спостереження за вузлом генератора

Перерахованим вимогам відповідають вимірювальні системи, засновані на використанні ЕОВ повітряного зазору, які поєднують в собі переваги використання традиційних сенсорів, волоконно-оптичних та мікроелектронних технологій. У цьому випадку традиційні сенсори, використовуються в якості перетворювачів механічних параметрів в інформаційні сигнали, що із ізольованої зони електричної машини, через волоконно-оптичний канал передаються до засобів обробки, що розміщуються в безпечних зонах.

В якості сенсорів для вимірювання зміни повітряного зазору потужних гідрогенераторів, набули поширення на даний час, сенсори емнісного типу [3, 4, 6, 7, 12, 13]. Як зазначено в [14, 15], за використанням емнісного методу сенсори повітряного зазору, як правило, мають стаціонарне кріплення на розточці осердя статора і розташовані по групах, що кріпляться в площинах перпендикулярних до осі обертання ротора один відносно іншого під кутом 90°.

Можливим варіантом побудови ЕОВ повітряного зазору є блок-схема (Рис. 1), на якій показано фрагмент зазору ГГ із встановленим емнісним сенсором 4 на осерді статора 3 та узагальнену блок-схему апаратно-програмного забезпечення ЕОВ повітряного зазору ГГ. На схемі прийняті наступні позначення: 1 – ротор; 2 – полюс ротора; 3 – осердя статора; 4 – волоконно-оптичний канал передачі інформації; 5 – оптоволоконний джгут волоконно-оптичного каналу передачі живлення; EC_1, EC_2 – емнісні сенсори вимірювачів 1 та 2 відповідно до Рис. 1; PEK_1, PEK_2 – перетворювачі емність цифровий код; MK_1, MK_2 – мікроконтролери; Int – інтерфейс; OEP – оптоелектронний перетворювач інформаційних сигналів; $СК$ – система керування; $БЖМ$ – блок живлення ГЕОВ в ізольованій зоні; $ФВП$ – фотовольтаїчний перетворювач; $ПП$ – під-

вищуючий перетворювач типу DC/DC; AMZ – апаратно-програмні засоби; PCK – програмно-алгоритмічні засоби керування роботою; CAI – система аналізу інформації; $БРК$ – засоби реєстрації інформації; IK – інтерфейс користувача; R_{rot} – радіус обвідної полюсів ротора; d'_{vz} – повітряного зазору; Δ – товщина вимірювача.

Для реалізації програмно-математичних засобів ЕОВ повітряного зазору, розглянемо математичну модель зміни повітряного зазору з урахуванням наступних припущень:

- 1) Всі дефекти та фактори, які впливають на їх виникнення, крім тих, що розглядаються у відповідній моделі, відсутні.
- 2) Відстань між середніми лініями всіх полюсів ротора відносно їх кутового розміщення є рівномірною.
- 3) Розточення статора до появи еліпсності є ідеальним колом, після – правильним еліпсом.
- 4) Вимірювання повітряного зазору здійснюється всіма сенсорами одночасно в момент проходження під кожним із них середньої лінії відповідного полюса ротора.

У цьому разі, отримання первинної вимірювальної інформації від сенсорів ГЕОВ про значення повітряно-

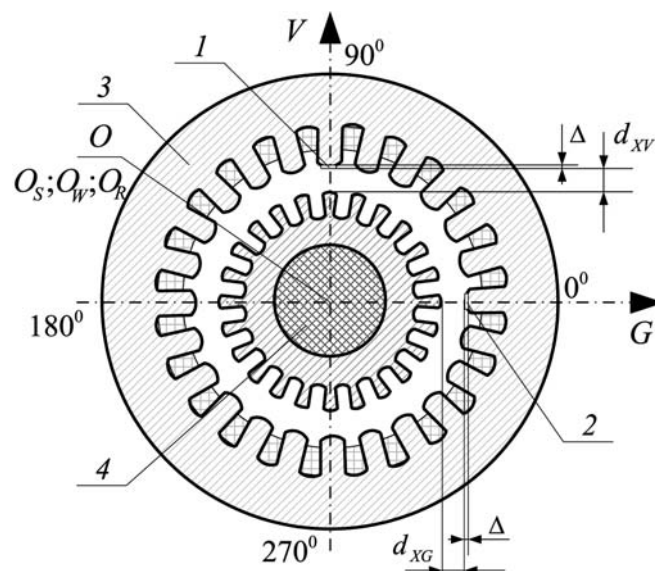


Рис. 2. Поперечний переріз статора і ротора



го зазору для кожного із полюсів ротора відбувається через неперервний проміжок часу t , тобто вимірюється із детермінованим періодом опитування [15, 16]

$$t_D = f(\omega_{rot}, l_{rot}), \quad (1)$$

де ω_{rot} – швидкість обертання ротора; l_{rot} – відстань між центрами полюсів ротора.

Знаючи ω_{rot} та кількість полюсів ротора N , можна визначити мінімальне значення t_D

$$t_D = 2N/\omega_{rot}.$$

Із урахуванням (1) величину повітряного зазору d_{VZ} між умовною лінією полюсів ротора та поверхнею розточки осердя статора гідрогенератора (Рис. 2), визначається як

$$d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n) + \Delta, \quad (2)$$

де $n = 1, \dots, N$ – ціле число; $\theta_n = t_n n / \omega_{rot}$ – кут повороту ротора в системі координат VOG, за час t_n ; $d_X(\theta_n)$ – значення повітряного зазору в момент часу t_n .

З іншої сторони, значення повітряного зазору може бути визначено відповідно до наступного виразу [6]:

$$d_{VZ}(\theta_n) = R_{st}(\theta_n) - R_{rot}(\theta_n), \quad (3)$$

де R_{rot} – радіус обвідної полюсів ротора; R_{st} – радіус розточчення статора.

Тоді, похибка визначення $\delta_{VZ}(\theta_n)$ значення повітряного зазору, що виникає внаслідок дії ексцентриситету [6]

$$\delta_{VZ}(\theta_n) = (d_{VZ}(\theta_n) - d_0) / d_0, \quad (4)$$

де $d_0 = R_{st} - R_{rot}$ – середнє або початкове значення повітряного зазору; R_{rot} – номінальний розрахунковий або середній радіус обвідної полюсів ротора; R_{st} – номінальний розрахунковий або середній радіус розточчення статора.

Значення повітряного зазору між ротором і статором для кожного із положень ротора з кутовою координатою θ визначається за відповідними показами вимірювача 1 в вертикальній площині $d_{XV}(\theta)$ та показами вимірювача 2 в горизонтальній площині $d_{XG}(\theta)$ (Рис. 2). У цьому випадку вираз (3) за умови рівномірного розподілу повітряного зазору, запишеться як

$$d_{VZ}(\theta) = R_{st} - R_{rot} = \sqrt{\left(\frac{R_{rot} + d_{XV}(\theta) + \Delta}{\sin(\theta)}\right)^2 + \left(\frac{R_{rot} + d_{XG}(\theta) + \Delta}{\cos(\theta)}\right)^2} - R_{rot}(\theta), \quad (5)$$

де Δ – товщина частини вимірювача, що знаходиться в повітряному зазорі та кріпиться до статора.

Вираз (5) може бути використаний при розрахунку повітряного зазору для певного кутового положення ротора θ_n . З урахуванням того, що форма ротора може змінюватися, вираз (5) може бути доповнений рівнянням [17]:

$$d_{VZ}(\theta_n) = R_{st} - \sqrt{\left[(R_{rot} + e)f_m(\theta_n)\right]^2 + \left[(R_{rot} - e)f_m(\theta_n)\right]^2}, \quad (6)$$

де e – значення ексцентриситету; $f_m(\theta_n)$ – модуляційна функція, що відповідає за спотворення форми обвідної полюсів ротора.

Враховуючи вираз (2) та (6) [16,18] запишеться як

$$d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n)[1 + f_m(\theta_n)] + \Delta, \quad (7)$$

В ідеальному випадку: $f_m = 0$, $d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n) + \Delta$. В реальних умовах модуляційна функція $f_m \neq 0$ і у цьому разі, запишеться як

$$f_m(\theta_n) = f_{mse}(\theta_n) + f_{mde}(\theta_n) + f_{mp}(\theta_n), \quad (8)$$

де $f_{mse}(\theta_n) = \varepsilon_s \cos(\theta)$ – функція, яка обумовлена значенням статичного ексцентриситету; $f_{mde}(\theta_n) = \varepsilon_{de} \cos(\theta_n - \omega_{me} t_n)$ – функція, яка обумовлена значенням динамічного ексцентриситету; $f_{mp}(\theta_n)$ – модуляційна функція, яка обумовлена нерівномірністю геометричних параметрів полюсів ротора; ω_{me} – модуляційна частота зміни траєкторії центру симетрії руху ротора (Рис. 5).

Складова модуляційної функції $f_{mp}(\theta)$ через нерівномірність геометричних параметрів полюсів ротора, обумовлена тим, що окремі полюси ротора можуть бути встановлені не точно по висоті, зміщуються та нахилиються в процесі експлуатації через нерівномірні деформації. В реальному випадку функція $f_{mp}(\theta)$ має нормальний закон розподілу з щільністю [19]

$$f(d_{VZ}) = \frac{1}{\sigma_{d_{VZ}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(d_{VZ} - m_{d_{VZ}})^2}{2\sigma_{d_{VZ}}^2}\right], \quad (9)$$

де $\sigma_{d_{VZ}}^2$ – дисперсія величини повітряного зазору за цілу кількість обертів ротора відносно точки кріплення сенсору; $m_{d_{VZ}}$ – математичне очікування.

З урахуванням (8)–(9) формула (2) запишеться як

$$d_{VZ}(\theta_n) = d_X(1 + f_{mse}(\theta) + f_{mde}(\theta_n) + f_{mp}(\theta_n)) + \Delta. \quad (10)$$

Формула (10) може бути використана при моделюванні ступеня впливу розглянутих факторів на зміну повітряного зазору та при реалізації програмного забезпечення для ідентифікації типу ексцентриситетом ротора. Як зазначено в [PIMI_2017] під ексцентриситетом ротора розуміють порушення співвісного розташування вісі центра симетрії статора O_s , вісі симетрії ротора O_w і вісі обертання ротора O_R (Рис. 2) [4, 20].

Розрізняють наступні типи ексцентриситету [4, 20]:

- в залежності від зміни в часі просторової орієнтації центрів обертання і мас ротора, а також центра мас статора в поперечному перерізі системи VOG статор-ротор:

а) статичний ексцентриситет, при якому вісі обертання і симетрії ротора співпадають, але мають постійне в часі зміщення відносно вісі симетрії статора;

б) динамічний ексцентриситет (обертювий), при якому вісі обертання і симетрії ротора відносно вісі симетрії статора можуть змінювати взаємне положення в просторі в залежності від кутового положення ротора;





в) змішаний ексцентриситет, при якому існують як статичний, так і динамічний ексцентриситети і траєкторія руху;

- в залежності від просторової орієнтації вісі обертання ротора і вісі статора:

г) радіальний ексцентриситет, при якому вісі ротора й статора залишаються паралельними, але мають постійне радіальне зміщення (детально розглянуто в [4]);

д) кутовий ексцентриситет (або перекик), при якому вісі ротора і статора нахилені одна до одної на деякий постійний кут, причому, в центрі машини вісі не мають радіального зміщення (детально розглянуто в [4]);

е) змішаний ексцентриситет, при якому існують як радіальний, так і кутовий ексцентриситети (детально розглянуто в [4]).

На Рис. 2 зображено поперечний переріз статора і ротора та введені наступні позначення: 1 – вимірювач 1; 2 – вимірювач 2; 3 – статор; 4 – ротор; Δ – товщина вимірювача; O_S – центр симетрії статора; O_W – центр симетрії ротора; O_R – центр обертання ротора; d_{XG} – значення повітряного зазору в горизонтальній площині; O – геометричний центр; d_{XV} – значення повітряного зазору в вертикальній площині.

За статичного ексцентриситету відбувається зміщення центра обертання O_R ротора на постійне значення, центри обертання O_R і мас O_W ротора співпадають. Величина статичного ексцентриситету, визначається вектором $|O_S O_R|$ є фіксованою для всіх кутових положень ротора θ та має напрямок, що характеризується початковим кутом статичного ексцентриситету α_{se} (Рис. 3) [20].

Значення статичного ексцентриситету e_{se} (Рис. 3) може бути визначена як [20]:

$$e_{se} = \frac{|O_S O_R|}{d_{VZes}} = \frac{\sqrt{(x_{O_s} - x_{O_r})^2 + (y_{O_s} - y_{O_r})^2}}{d_{VZes}}, \quad (11)$$

де d_{VZes} – середнє значення повітряного зазору між ротором і статором, що визначене за результатами показів вимірювачів 1 та 2 (Рис. 2) за один повний оберт ротора; $(x_{O_s}; y_{O_s})$ – координати центра вісі статора O_S ; $(x_{O_r}; y_{O_r})$ – координати центра обертання O_R ротора.

У цьому разі з урахуванням (3), (10) та [6, 17] для випадку статичного ексцентриситету зміна значення повітряного зазору в місці кріплення первинного вимірювача може бути описана виразом

$$d_{VZes} = R_{st} - R_{rot} + \sqrt{R_{rot}^2 - (e_{se})^2 \sin^2 \alpha_{se}}, \quad (12)$$

При динамічному ексцентриситеті повітряний зазор навколо ротора є нерівномірний та змінюється в часі в залежності від кутового положення ротора θ . Тобто за динамічного ексцентриситету

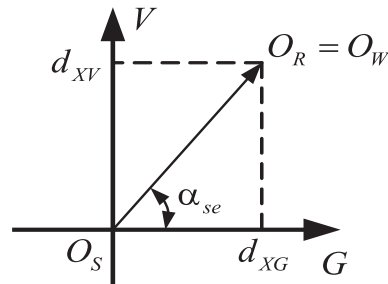


Рис. 3. Вектор напрямлення та кут статичного ексцентриситету

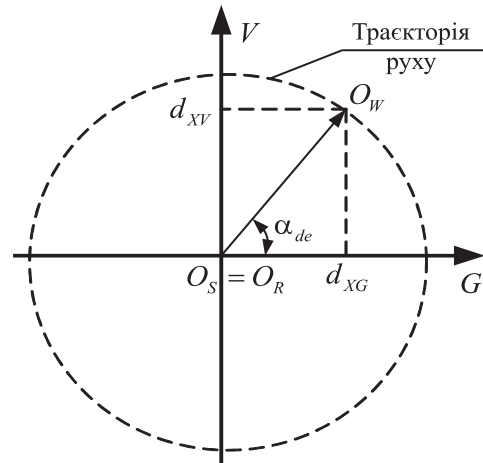


Рис. 4. Вектор напрямлення та кут динамічного ексцентриситету

тету вісь симетричності ротора O_W , в поперечному перерізі системи статора-ротора, змінює своє положення, що залежить від кутового положення ротора θ відносно вісі O_S статора, але вісі O_S статора і вісь обертання ротора O_R співпадають, а центр обертання O_R і мас O_W ротора не співпадають.

Величина динамічного ексцентриситету визначається вектором $|O_S O_W|$, що змінюється в залежності від кутового положення ротора θ та має напрямок, який характеризується кутом динамічного ексцентриситету α_{de} (Рис. 4) [20].

Значення динамічного ексцентриситету e_{de} може бути визначена як [20]:

$$e_{de} = \frac{|O_S O_W|}{d_{VZ}} = \frac{\sqrt{(x_{O_s} - x_{O_w})^2 + (y_{O_s} - y_{O_w})^2}}{d_{VZ}}, \quad (13)$$

де $|O_S O_W|$ – статичний вектор напрямлення зміщення вісі центра обертання ротора з початкового положення

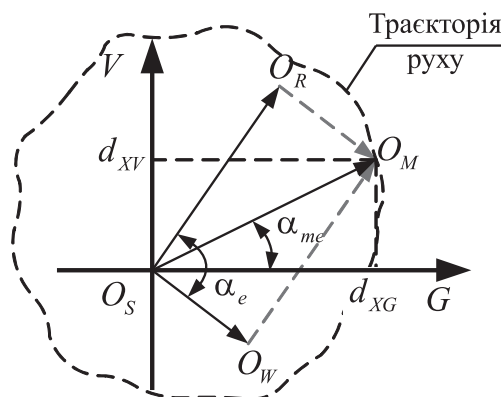


Рис. 5. Вектор напрямлення та кут змішаного ексцентриситету



ження центру симетрії статора; $(x_{O_s}; y_{O_s})$ – координати центру вісі статора O_s ; $(x_{O_w}; y_{O_w})$ – координати центру симетричності O_w ротора.

У цьому разі з урахуванням (3), (10) та [6, 17] для випадку динамічного ексцентриситету

$$d_{VZde}(t) = R_{st} - \sqrt{[(R_{rot} + e_{de})f_{mde}(\theta, t)]^2 + [(R_{rot} - e_{de})f_{mde}(\theta, t)]^2} = R_{st} - \sqrt{[(R_{rot} + e_{de})\sin\alpha_{de}]^2 + [(R_{rot} - e_{de})\sin\alpha_{de}]^2}, \quad (14)$$

При змішаному ексцентриситеті вісь симетрії статора, ротора і вісь обертання ротора зміщуються в результаті дії на центр обертання ротора результуючого вектора статичних і динамічних векторів зміщення. У цьому випадку, розподіл повітряного зазору між ротором і статором, як і в випадку динамічного ексцентриситету, змінюється в часі в залежності від кутового положення ротора. При змішаному ексцентриситеті вісь симетрії ротора, статора і вісь обертання ротора зміщуються, в результаті застосування результуючого вектора статичних і динамічних векторів переносу вісі обертання [17, 20].

Величина змішаного ексцентриситету визначається вектором $|O_s O_M|$, що змінюється в залежності від кутового положення ротора θ та має напрямок, який характеризується кутом змішаного ексцентриситету α_{me} (Рис. 5) [20].

За допомогою геометричного сумування векторів статичного та динамічного ексцентриситетів знаходиться значення змішаного ексцентриситету δ_{me} :

$$e_{me} = \frac{|O_s O_M|}{d_{VZ}} = \left| \frac{O_s O_w}{d_{VZ}} + \frac{O_w O_R}{d_{VZ}} \right| = \frac{\sqrt{(x_{O_w} + x_{O_R})^2 + (y_{O_w} + y_{O_R})^2}}{d_{VZ}} = \frac{\sqrt{e_{se}^2 + e_{de}^2 + 2e_{se}e_{de}\cos\alpha_e}}{d_{VZ}}, \quad (15)$$

де $|O_s O_M|$ – вектор направлення зміщення вісі центра обертання ротора з початкового положення центра симетрії статора (Рис. 5). При змішаному ексцентриситеті $|O_s O_M|$ змінюється в залежності від кутового положення ротора утворюючи траєкторію руху точки O_R (годограф) та характеризується кутом змішаного ексцентриситету α_{me} величина якого залежить від кутового положення ротора θ .

У цьому разі з урахуванням (3) та (10) для випадку змішаного ексцентриситету [6, 17], будемо мати

$$d_{VZme}(t) = R_{st} - \sqrt{R_{rot}^2 - (e_{me} d_{VZ}(\theta_n) \sin(\omega_{me} t + \alpha_{me}))^2 - e_{me} d_{VZ}(t, \theta) \cos(\omega_{me} t + \alpha_{me})}. \quad (16)$$

Практичне використання виразів (12), (14) та (16) при обробці результатів вимірювань ГЕОВ ускладнено, тому їх доцільно записати з урахуванням схеми розміщення ГЕОВ (Рис. 2). Для врахування останнього, запишемо додаткову систему рівнянь скориставшись системою із [4], тоді відповідно до

векторної діаграми представленої на Рис. 3 можна скласти наступні чотири рівняння для випадку статичного ексцентриситету

$$\begin{cases} d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \cos\alpha_{se}, \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \sin\alpha_{se}, \\ d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \cos\alpha_{se}, \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \sin\alpha_{se}, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \cos\alpha_{se}, \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \sin\alpha_{se}, \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \cos\alpha_{se}, \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \sin\alpha_{se}. \end{cases} \quad (18)$$

Вираз (12) із урахуванням виразу (5) та системи (17) або (18), запишеться як

$$d_{VZ}(\theta) = \sqrt{\left(\frac{R_{rot} + d_{XV}(\theta) + \Delta}{\sin(\theta)}\right)^2 + \left(\frac{R_{rot} + d_{XG}(\theta) + \Delta}{\cos(\theta)}\right)^2} - R_{rot} + \sqrt{R_{rot}^2 - \left(\frac{d_{XG}(\theta) - d_{XV}(\theta)}{\cos\alpha_{se} - \sin\alpha_{se}} \sin\alpha_{se}\right)^2}, \quad \alpha_{se} = \arctg \frac{d_{XV}(\theta) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}. \quad (19)$$

У випадку динамічного ексцентриситету e_{de} система рівнянь (18) з урахуванням того, що значення ексцентриситету e_{de} є постійною величиною, а кут динамічного ексцентриситету α_{se} є залежною величиною від θ , запишеться наступним чином

$$\begin{cases} d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \cos\alpha_{de n}, \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \sin\alpha_{de n}, \\ d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \cos\alpha_{de n}, \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \sin\alpha_{de n}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \cos\alpha_{de n}, \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \sin\alpha_{de n}, \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \cos\alpha_{de n}, \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \sin\alpha_{de n}. \end{cases} \quad (21)$$

Тоді вираз (14) із урахуванням виразу (5) та системи (20) або (21), запишеться як

$$d_{VZde}(\theta_n) = R_{st} - \sqrt{\left[\left(R_{rot} + \frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos\alpha_{de n} - \sin\alpha_{de n}} \right) \sin\alpha_{de n} \right]^2 + \left[\left(R_{rot} - \frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos\alpha_{de n} - \sin\alpha_{de n}} \right) \sin\alpha_{de n} \right]^2}, \quad \alpha_{de}(\theta_n) = \arctg \frac{d_{XV}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}. \quad (22)$$

У випадку змішаного циклічного/нециклічного ексцентриситету для виразу (16) з урахуванням (15) будемо мати





$$d_{VZme}(\theta_n) = R_{st} - \sqrt{R_{rot}^2 - \left(\frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos \alpha_{me n} - \sin \alpha_{me n}} d_{VZ}(\theta_n) \times \sin \left(\omega_{me} \theta_n \frac{n}{\omega_{rot}} + \alpha_{me} \right) \right)^2 - \frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos \alpha_{me n} - \sin \alpha_{me n}} d_{VZ}(\theta_n) \cos \left(\omega_{me} \theta_n \frac{n}{\omega_{rot}} + \alpha_{me} \right)}$$

$$\alpha_{me}(\theta_n) = \arctg \frac{d_{XV}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})} \quad (23)$$

На Рис. 6–10 приведено результати моделювання зміни показів ГЕОВ вимірювачів повітряного зазору за повний оберт ротора. Для моделювання використовувалося спеціально розроблене програмне забезпечення в середовищі графічного програмування LabView[21, 22], що може бути використане при реалізації програмного забезпечення систем технічної діагностики. Моделювання виконувалося враховуючи наступні технічних характеристик гідрогенератора СГК 538/160-70М:

- зовнішній діаметр статора – 6100 мм;
- діаметр розточки статора – 4930 мм;
- номінальне значення повітряного зазору $d_{VZ} = 6$ мм;
- максимальне робоче значення повітряного зазору $d_{VZ \max} = 8$ мм;
- мінімальне робоче значення повітряного зазору $d_{VZ \min} = 4$ мм;
- номінальна частота обертання 85,7 об/хв.;
- кількість полюсів ротора 70.

При всіх розрахунках сумарна нерівномірність повітряного зазору відповідно до [23] приймалася не більше 10% від номінального значення повітряного зазору гідрогенератора та вважалась такою, що була викликана розкидом геометричних параметрів полюсів ротора.

Висновок. Розроблені математичні моделі зміни нерівномірності розподілу повітряного зазору в залежності від типу ексцентриситету ротора можуть використовуватися при проектуванні та реалізації програмно-математичного забезпечення систем контролю повітряного зазору в гідрогенераторах при обробці та аналізі результатів в системах технічної діагностики гідрогенераторів при його планових оглядах або під час експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б.А. Алексеев. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 144 с.
2. Обнаружение дефектов гидрогенераторов / [А.Е. Александров, Е.В. Гушин, В.Б. Кулаковский и др.]; под ред. Л.Г. Мамиконянца и Ю.М. Элькинда. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
3. Pollock G.B. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring / G.B. Pollock, I.F. Lyles // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1992. – Vol. 7, № 4. – P. 680–668.
4. Левицький А.С. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів/А.С.Левицький, Г.М. Федоренко, О.П. Грубой/ – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
5. VMTM Air Gap. Capacitive Measuring Chains. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vibrosystm.com/wp-content/uploads/9628-25D1A-103.pdf>. – Переглянуто: 10. 03.2018.

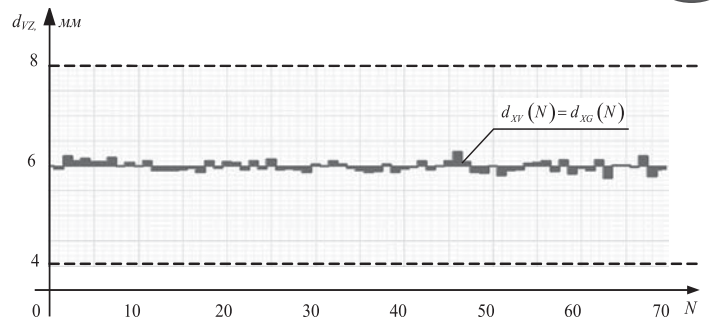


Рис. 6. При наявності нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального значення повітряного зазору d_{VZ}

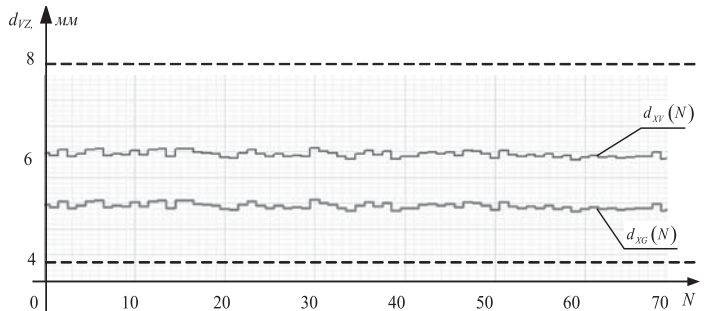


Рис. 7. При наявності статичного ексцентриситету 1 мм ($\alpha_{se} = 180^\circ$) та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального значення повітряного зазору d_{VZ}

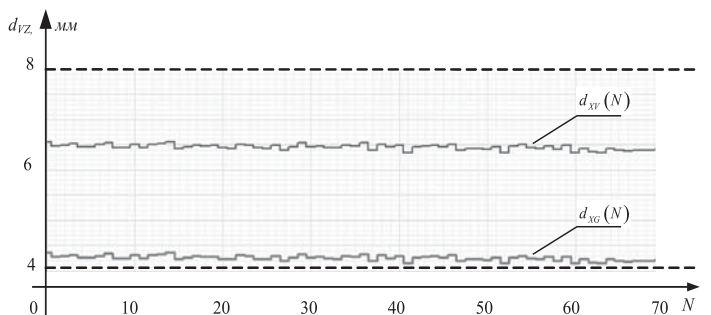


Рис. 8. При наявності статичного ексцентриситету 1,5 мм ($\alpha_{se} = 180^\circ$) та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального значення повітряного зазору d_{VZ}

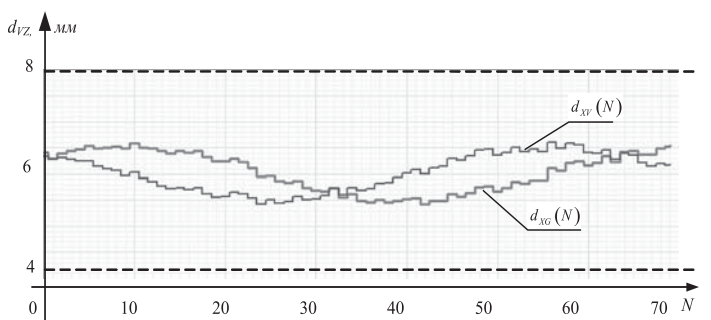


Рис. 9. При наявності динамічного ексцентриситету та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального значення повітряного зазору d_{VZ}

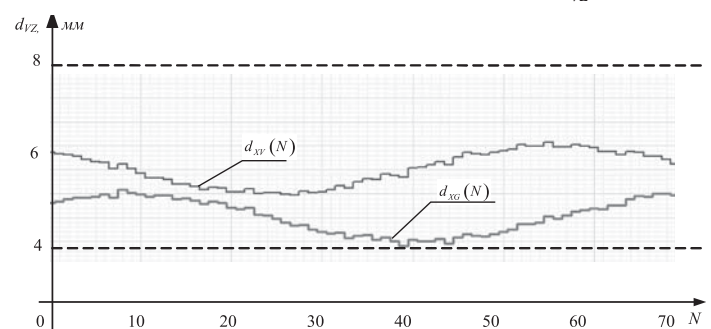


Рис. 10. При наявності змішаного ексцентриситету та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального значення повітряного зазору d_{VZ}



6. *Grischenko M.* Air gap monitoring unit generator to advance vibration diagnostic procedure: Summary of the Doctoral Thesis: Summary of the Doctoral Thesis. Riga: RTU, 2015. — 20 p.

7. *Volkovas V.* Air gap measuring system for purpose of diagnostics and condition monitoring/ V.Volkovas, R.Mikalauskas, M.Eidukeviciute// Thesis conference 3rd International Congress of Technical Diagnostics' 2004 — POLAND, Poznan, 6–9 September 2004. — vol.30, tom 2, pp.169–174.

8. *Федоренко Г.М.* Вплив параметрів повітряного зазору на характеристики гідрогенераторів / Г.М. Федоренко, В.О. Саратов, В. В. Черниш // Гідроенергетика України. — 2005. — № 4. — С. 26–33.

9. *Зайцев Є.О.* Структура гібридного оптично-електронного вимірювача повітряного зазору гідрогенераторів/ Є.О. Зайцев, А.С. Левицький, І.М. Жукинський, Л.В.Архипова, Л.І. Баляцук//Збірник матеріалів XVII Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті", 27–29 вересня 2017 р., м. Київ, Україна. — К.: ТОВ "Календар", 2017. — С. 563–567.

10. *Zaitsev I.O.* Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system/ I.O. Zaitsev, A.S. Levytskyi, V.A. Kromplyas// Proceedings of the International conference on modern electrical and energy system (MEES-17) November 15 – 17, 2017 Kremenchuk, Ukraine – 2017. — P. 288–291.

11. *Патент України* на винахід UA 115924 C2, G01B 7/14, G01D 5/24. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах / Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. — заявник Інститут електродинаміки НАН України. — № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016; публ. 10.01.2018. — Бюл. № 1/2018.

12. *Airgap sensors* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.mc-monitoring.com/sensors/airgap-sensors.html>— Переглянуто: 10. 03.2018.

13 *Air Gap Monitoring SA* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://pdf.directindustry.com/pdf/mc-monitoring/agt-525/163977-644798.html> — Переглянуто: 10. 03.2018.

14. *Зайцев Є.О.* Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів/ Є.О. Зайцев, А.С. Левицький, Б.А. Кромпляс, В.Є. Сидорчук// Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2017. — №24(100) — С.151–161.

15. *Зайцев Е.А.* Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов/ Е.А.Зайцев, А.С.Левицкий , В.Е. Сидорчук //Приборы и методы измерений. — 2017. — Т.8, № 2. — С. 122–130. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

16. *Зайцев Є.О.* Модель зміни повітряного зазору в гідро- та турбогенераторах/ Є.О. Зайцев // Тези доповідей XV Ювілейної Міжнародної науково-практичної конференції "Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем", 22 – 24 листопада 2017 р., м. Дніпро, Україна. — Дніпро: "Ліра", 2017. — С. 77–78.

17. *Kallaste A.* Analysis of the eccentricity in a low speed slotless permanent-magnet wind generator/A. Kallaste, A. Belahcen, A. Kilk, T. Vaimann// Proceedings of 8th International Conference 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability. — Tartu, 2012. — P. 47 – 52.

18. *Besnerais J.Le* Effect of lamination asymmetries on magnetic vibrations and acoustic noise in synchronous machines // 18th International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Oct. 25–28, 2015, Pattaya City, Thailand – 2015. — P. 1729–1733

19. *Муравлев О.П.* Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротора за статор / О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий // Известия Томского политехнического института (Известия ТПИ). — 1966. — Т. 145 : Электрические машины. — С. 121–127.

20. *Toliyat H.A.* Electric machines. Modeling, condition monitoring, and fault diagnosis/ H.A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin-Kelk- Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.— 266 p.

21. *Трэвис Дж.* LabVIEW для всех. Третье издание, переработанное и дополненное/ Трэвис Дж., Кринг Дж. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 880 с.22.

22. *Евдокимов Ю.К.* LabVIEW для радиоинженеров: от виртуальной модели до реального прибора/ Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 400 с.

23. *СОУ-Н* EE 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання — Офіц. вид., приказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. №13. — К. : ОЕП "ГРИФРЕ" : М-во палива та енергетики України, 2007. — 262 с. — (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

© Зайцев Є.О., 2018

