

СТВОРЕННЯ ЄМНІСНОГО ВИМІРЮВАЧА ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРА МІЖ РОТОРОМ ТА СТАТОРОМ У ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ

Наведено основні теоретичні та практичні результати досліджень відділу електричних та магнітних вимірювань стосовно ємнісного вимірювача повітряного зазора між ротором та статором у потужних гідро-генераторах.

Приведены основные теоретические и практические результаты исследований отдела электрических и магнитных измерений, касающиеся емкостного измерителя воздушного зазора между статором и ротором в мощных гидрогенераторах.

Стрімкий розвиток систем контролю та діагностики турбо- і гідрогенераторів (в основному за кордоном) спричинений зростанням одиничної потужності та обсягом встановленого устаткування, а також появою більш широких можливостей контролю з використанням нових засобів вимірювання та обчислювальної техніки. Потреба в удосконаленні методів і засобів контролю швидко зростає завдяки тому, що збільшується кількість обладнання, номінальний термін служби якого закінчився, і при цьому воно перебуває в експлуатації. В більшості промислово розвинених країн на початок 21-го століття частка такого обладнання досягла 50 % і більше.

Застосування дійових систем контролю і діагностики дає змогу при експлуатації потужних машин отримати настільки великий економічний ефект, що є доцільним використання навіть дуже складних засобів вимірювання, обробки даних та видачі результатів контролю.

Контроль гідрогенераторів, серед яких і капсульні, має свою специфіку, яка спричинена рядом суттєвих відмінностей як в конструкції, так і в режимах експлуатації цих великих синхронних машин. Відповідним чином відрізняються також багато засобів контролю.

Одним із найважливіших параметрів гідрогенераторів, який необхідно контролювати, є повітряний зазор між ротором та статором. Наприклад, у капсульних гідрогенераторах типу СГК 538/160-70М, які експлуатуються на Київській та Канівській ГЕС, внаслідок викривлення форми статора й недосконалої форми ротора повітряний зазор може змінюватись як у радіальному, так і в осьовому напрямках у значних межах (20...30 % від номінального значення). Таке відхилення природно неприпустиме. Через значне зменшення повітряного зазора різко зростає навантаження на демпферну обмотку, на яке вона не розрахована. Внаслідок цього може розвинути процес електроконтактної ерозії осердя полюсів, що може призвести до руйнування демпферної системи: розриву стержнів, вигорання сталі осердя та випадання демпферних стержнів із осердя у повітряний зазор та серйозних ушкоджень осердя й обмотки статора.

До актуальних параметрів повітряного зазора між статором і ротором гідрогенератора відносяться максимальні й мінімальні повітряні зазори (між зубцем статора й середньою лінією по довжині полюса), середній і розрахунковий повітряні зазори. Величини повітряних зазорів у гідрогенераторів вертикального виконання – 20...30 мм, а в капсульних – 5...8 мм. Ця величина визначає індуктивні параметри й перевантаженість синхронних генераторів, потужність системи збудження, а також величини втрат у роторі. Величина повітряного зазора також істотно впливає й на ряд інших характеристик генераторів, зокрема на величину торцевих магнітних потоків, втрат у крайніх пакетах осердя і натискних плит статора, на вібраційний стан машини при експлуатації. Таким чином, і тепловий стан гідрогенератора в цілому, і рівень місцевих нагрівань значною мірою визначаються величиною повітряного зазора. Крім того, області припустимих режимів роботи генераторів (за умовами стійкості при недо-збудженні) визначаються також величиною повітряного зазора [1, 3].

Малі розміри полюсних розподілів гідрогенераторів у порівнянні з турбогенераторами спричиняють велике розсіювання їхньої полюсної системи, високі індукції в осердях полюсів і викликають труднощі в розміщенні необхідного обсягу міді обмотки збудження на полюсах. Це змушує вдаватися до зменшення величин повітряних зазорів у гідрогенераторах. На практиці, з урахуванням зазначених факторів, величини повітряних зазорів приймаються приблизно рівними одній тисячній діаметра ротора.

Спотворення форми ротора та статора, що призводить до змін рівномірності повітряного зазора, може призвести до аварій із зачіпленням ротора за статор, руйнуванням обмоток, сталі статора та полюсів. Для гідрогенераторів (при невеликому повітряному зазорі порівняно з діаметром розточення статора) особливо важко домогтися стабільної рівномірності зазора при експлуатації. Створення конструкції, що протистоїть зусиллям магнітного тяжіння при такій конфігурації машини, є одним із найскладніших завдань при розробці гідрогенераторів.

Нерідко спостерігалися uszkodження, спричинені зміною форми або співвісності осердя статора та ротора. Так, найбільші у свій час гідрогенератори ГЕС Grand Coulee IV, що мали повітряний зазор 25 мм при діаметрі ротора 19 м, неодноразово виходили з ладу через зсув активних частин машини. При цьому відбувалося навіть зачіплення ротора за статор [1], що призвело до необхідності їхньої реконструкції зі збільшенням повітряного зазора і підвищенням міцності осердя статора. Серйозні проблеми з деформацією обода ротора були на гідрогенераторах ГЕС Mica Creek (Канада). Ці машини при діаметрі 14 м мають номінальну величину повітряного зазора 20,6 мм [1].

При експлуатації капсульних гідрогенераторів Київської та Канівської ГЕС внаслідок викривлення форми статора і недосконалої форми ротора повітряний зазор між ротором і статором змінювався як у радіальному, так і осьовому напрямках: при номінальному значенні 5 мм місцями його величина не перевищувала 3,5 мм [2]. Через значне зменшення повітряного зазора різко зростало навантаження на демпферну обмотку, на яке вона не була розрахована. Зрештою, це призвело до руйнування демпферної системи: відбувся розрив стержнів, вигорання сталі осердя та випадання демпферних стержнів із осердя у повітряний зазор та суттєві пошкодження осердя й обмотки статора. При реконструкції вказаних гідрогенераторів для запобігання подібним аваріям вжито такі заходи: номінальний повітряний зазор між ротором і статором збільшено до 6 мм, введено регульовальні прокладки під полюси ротора, підвищені вимоги до правильності розточення статора.

Нерівномірність величини повітряного зазора, супроводжувана відхиленням розточення осердя статора та обвідної полюсів ротора від циліндричної форми, може відбутися при монтажі, після нього, а також при експлуатації гідрогенератора. Електромагнітні сили взаємного притягання статора й ротора, так само як перерозподіл внутрішніх напружень, можуть призвести до деформації осердя статора і ротора. Нерівномірне нагрівання пакетів статора й полюсів ротора може також сприяти деформації вузлів гідрогенератора.

Відомо також, що нерівномірність повітряного зазора по висоті і радіусу магнітної системи гідрогенератора є причиною виникнення вібрації статора та ротора й появи додаткових втрат на поверхні полюсів ротора [1].

Відхилення величини повітряного зазора від номінального значення може бути спричинено як недоліками конструкції елементів кріплення, так і порушеннями технології складання гідрогенератора на станції, деградаційними процесами при експлуатації енергоблока під дією електромагнітних і термомеханічних навантажень [1].

Вибір типу приладу для автоматичного вимірювання зазора визначається конструкцією машини, її розмірами, умовами експлуатації, необхідною точністю, надійністю в експлуатації і ціною.

Аналіз закордонних публікацій [1,15,16] показав, що в основному використовуються два типи автоматичних систем: оптична (опто-електронна) і ємнісна. Кожна із цих систем має свої переваги й недоліки. Оптична система більш складна і дорога, але має більш високу

точність вимірювання, що дає можливість виявляти в електричних машинах більш тонкі і більш приховані дефекти.

Найбільш часто застосовуваний метод вимірювання зазора за допомогою електричної ємності, що використовується в сучасних закордонних системах [1,15,16], має суттєві недоліки, а саме: низьку чутливість та низьку точність, а також високу вартість пристрою. Низька чутливість та точність є наслідком малої величини робочої ємності і нелінійності функції перетворення, що потребує введення коригувальних поправок, а отже, призводить до значних апаратно-програмних витрат. Нелінійність виникає через те, що робоча електрична ємність вимірюється між двома компланарними електродами, які розміщені на статорі осердя машини. Ця ємність змінюється зі зміною величини зазора, тобто при наближенні полюса ротора до поверхні електродів, і закон зміни ємності при цьому є принципово нелінійним.

У зв'язку з описаною проблематикою відділом № 5 протягом звітного періоду вирішувалась науково-технічна задача створення більш простого ємнісного вимірювача з покращеними метрологічними характеристиками.

Співробітниками відділу запропоновано новий ємнісний спосіб вимірювання зазора, при якому на відміну від аналога [15, 16] електрична ємність вимірюється між робочим потенціальним електродом, встановленим на зубці статора, та полюсом ротора. У цьому випадку інформативна ємність при тих самих розмірах датчика приблизно на порядок більша від аналога, а ємнісний опір датчика є прямо пропорційним зазору, завдяки чому збільшуються чутливість та точність вимірювання. До того ж немає потреби у введенні коригувальної поправки. На спосіб та пристрій, що його реалізує, було отримано патент України [14].

Первинний перетворювач (датчик). Схема датчика при реалізації запропонованого способу та його установка на зубці статора показані на рис. 1.

Датчик 2, який встановлюється на зубці статора 3, складається з потенціального електрода 2.1, охоронного електрода 2.2 та заземленого електрода 2.3. Він з'єднується з вимірювальним блоком за допомогою кабеля з подвійним екраном, причому

внутрішній екран з'єднаний з охоронним електродом 2.2, а зовнішній – з заземленим електродом 2.3.

У процесі вимірювання з вимірювального блока на потенціальний електрод 2.1 подається змінна напруга. Через електричну ємність конденсатора, утвореного електродами 2.1 та заземленим полюсом ротора 1, корпусом гідрогенератора, заземленим електродом 2.3 і корпусом вимірювального блока протікає ємнісний струм, причому відношення напруги до струму (ємнісний опір) прямо пропорційне зазору d_x між спільною площиною електродів 2.1, 2.2 та 2.3 і полюсом ротора 1. Зазор δ між статором 3 і полюсом ротора 1 визначиться як $\delta = d_x + \Delta$ (рис. 1).

Виготовлений датчик налагоджується в комплекті з вторинним перетворювачем з використанням плоскої поверхні, в той час як реальний полюс ротора має кривизну, що вносить похибку вимірювання. Оці-

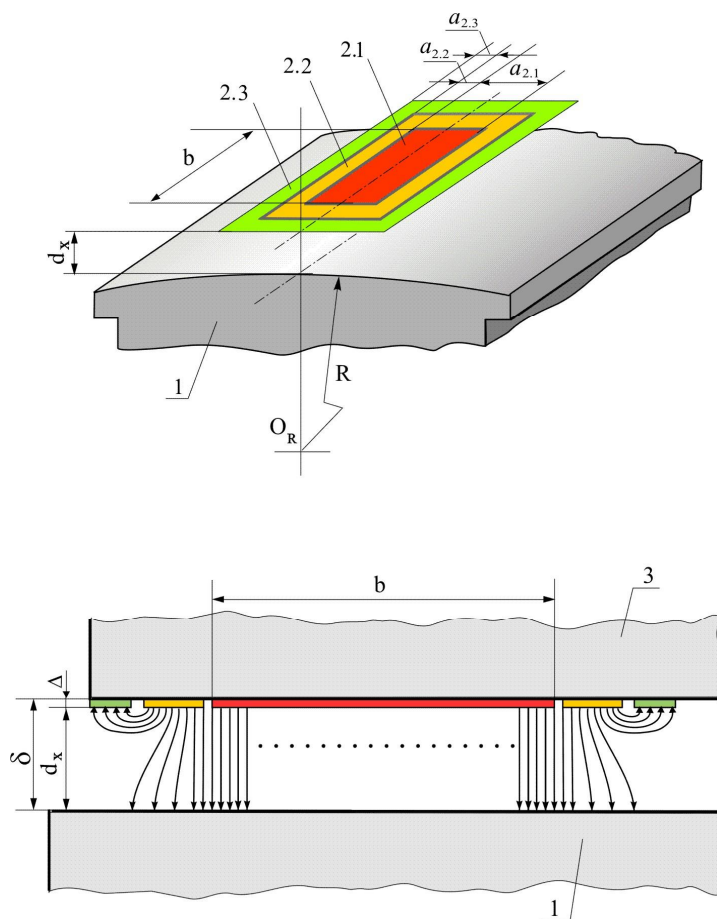


Рис. 1

нимо величину цієї похибки. Для цього проведемо розрахунок залежності $C_x = f(d_x)$ з урахуванням кривизни полюса ротора R [3]. Введемо систему координат XOY (рис. 2) і розглянемо ємність ΔC_i нескінченно малої площі $\Delta x_i \times b$, яка перебуває на відстані x_i від осі Y . Відстань площі від площини електрода 2.1 дорівнює $y_i = d_x + |\Delta y_i|$.

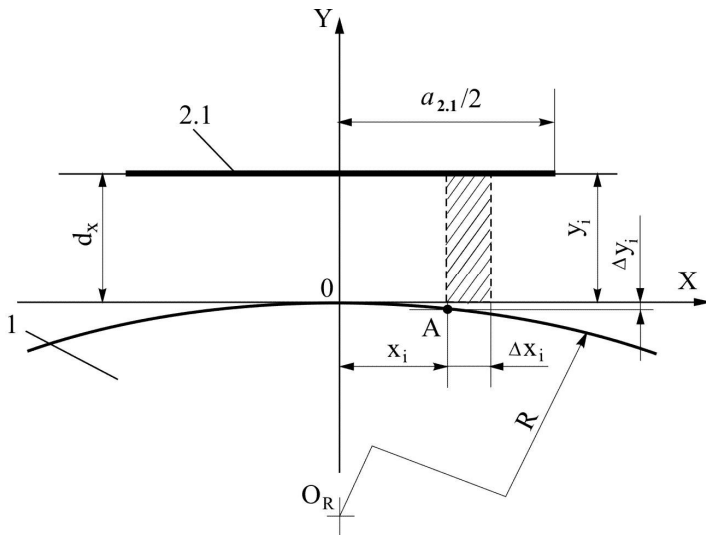


Рис. 2

З урахуванням геометричних співвідношень координата Δy_i визначиться як $|\Delta y_i| = R - \sqrt{R^2 - x_i^2}$, де R – радіус кривизни полюса ротора.

Електрична ємність C_i елементарної площини з розмірами Δx_i , b та Δy_i дорівнює $C_i = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\Delta x_i b}{y_i}$, де ε_0 – діелектрична проникність вакууму; ε – відносна діелектрична проникність середовища.

Тоді

$$C_i = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\Delta x_i b}{d_x + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}}. \quad (1)$$

Повну електричну ємність C_x , враховуючи симетрію відносно осі OY , знайдемо у вигляді

$$C_x = \sum_{i=0}^{\infty} C_i = 2\varepsilon \varepsilon_0 b \int_0^{\frac{a_{2.1}}{2}} \frac{dx}{d_x + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = 2\varepsilon \varepsilon_0 b \left\{ \frac{(d_x + R)}{\sqrt{d_x^2 + 2Rd_x}} \operatorname{arctg} \frac{a_{2.1}}{2\sqrt{d_x^2 + 2Rd_x}} + \sqrt{a^2 + b^2} [F(\varphi, k) - E(\varphi, k)] + \sqrt{\frac{b^2 - y^2}{y^2 + a^2}} \right\}, \quad (2)$$

де $y^2 = d_x^2 + 2Rd_x + x^2$; d_x – величина відстані від площини датчика до полюса ротора; R – величина кривизни полюса ротора; $F(\varphi, k)$ – еліптичний інтеграл першого роду з кутом φ і модулем k ; $E(\varphi, k)$ – еліптичний інтеграл другого роду з кутом φ і модулем k ;

$$\varphi = \arcsin \frac{y}{b} \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{y^2 + a^2}}; \quad k = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

З отриманої формули для ємності складно оцінити функціональну залежність $d_x = f(C_x)$. Тому для оцінки похибки δ_c , зумовленої кривизною полюса, порівняємо результати розрахунку ємності C_x (отримані числовими методами з допомогою персонального комп'ютера) з результатами розрахунку ємності C_{III} конденсатора із плоскопаралельними електродами C_{III} . Обчислимо $\delta_c = 100 \frac{C_x - C_{III}}{C_{III}} \%$, де

$$C_{III} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{a_{2.1} b}{d_x} \quad (3)$$

На рис. 3 показано графіки залежностей $\delta_c = f(d_x)$ для датчиків, які пропонується встановлювати на гідрогенераторі типу СВ 1230-140/56 (крива 1) і для гідрогенератора типу

СГК 538/160-70М (крива 2). Як видно з рисунка, якщо розміри зазорів більші ніж 2 мм, то відхилення δ_c не перевищує 0,3 %. Крім того, при зменшенні зазора ємність C_{III} зростає швидше, і побудований на основі функції $C_{III}(d_x)$ вимірювач буде попереджати про небезпечне зменшення зазора з деяким випередженням. Тому на практиці для попереднього розрахунку передавальної характеристики в більшості випадків можна використати простішу формулу (3) плоскопаралельного конденсатора.

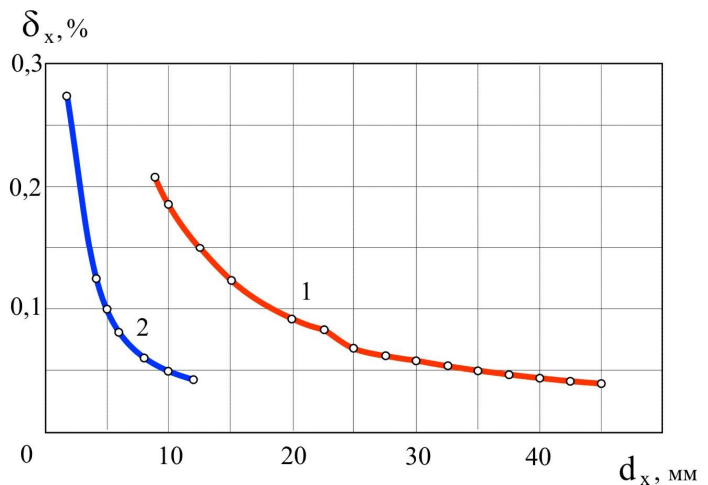


Рис. 3

Розрахунки ємностей датчиків виконано з припущенням, що поверхня полюса ротора є ідеальною за формою і якістю металевою електропровідною поверхнею. У дійсності поверхня полюса – це торець шихтованого пакета, в якому окремі пластини можуть знаходитись вище або нижче середнього рівня. Пластини, що виступають, і будуть визначати фактичний зазор. Його розмір буде трохи відрізнятися від показань приладу, який вимірює інтегральне значення зазора. Крім цього, виміряна реальна ємність буде меншою від розрахункової через наявність шарів ізоляції між окремими пластинами полюса ротора. Тому необхідно визначити поправочний коефіцієнт, що враховує зазначені вище фактори. В даний час у відділі проводяться дослідження з цього напрямку.

Вторинний перетворювач.

На рис. 4 представлено функціональну схему пристрою для вимірювання зазора. Позначення на рисунку: 1 – джерело постійної опорної напруги U_0 ; 2 і 3 – комутатори; 4 – роздільний конденсатор; 5 – трансформатор із поздовжньо-екранованою обмоткою (ТПЕО); 6 – зразковий конденсатор ємністю C_0 ; 7 – генератор імпульсної керуючої напруги; 8 – підсилювач сигналу нерівноваги; 9 – фазочутливий детектор; 10 – інтегратор; 11 – компенсаційний конденсатор ємністю C_K ; 12 – масштабуючий перетворювач напруги; 13 – корпус вторинного перетворювача; 14 – осердя статора електромашини; 15 – з'єднувальний триаксіальний кабель між ємнісним датчиком і вторинним перетворювачем (довжина до 10 м); 16 – полюс ротора електромашини; 17 – заземлений електрод датчика; 18 –

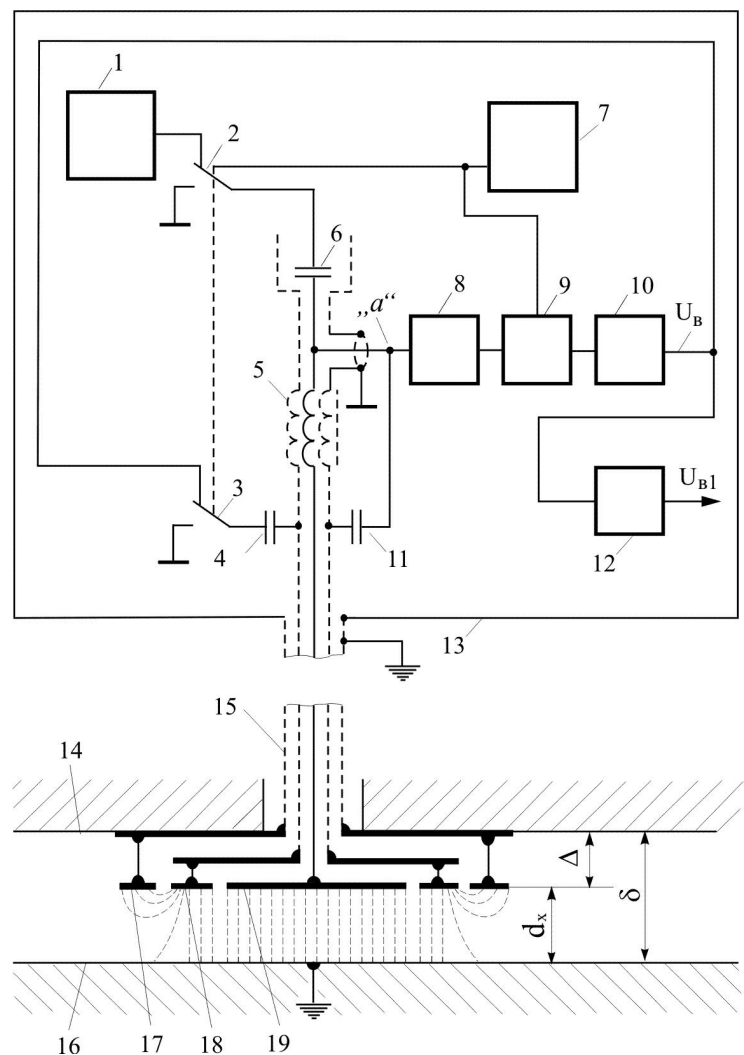


Рис. 4

охоронний (екрануючий) електрод датчика, еквіпотенційний робочому електроду; 19 – робочий електрод ємнісного датчика.

Пристрій працює в такий спосіб. Під дією керуючої напруги генератора 7 обидва комутатори 2 й 3 безперервно, з частотою кілька десятків кілогерц, синхронно перемикаються з одного положення в інше. При цьому на виході комутатора 2 діє імпульсна прямокутна напруга (меандр) U_1 , розмах (подвійна амплітуда) якого дорівнює взірцевій напрузі U_0 ; на виході комутатора 3 діє така ж за формою напруга U_2 з розмахом, рівним постійній напрузі U_B на виході інтегратора 10. Змінна напруга U_1 подається на зразковий конденсатор 6 і викликає протікання через нього струму I_1 . Змінна напруга U_2 через роздільний конденсатор 4, який має досить велику ємність, подається на первинну обмотку трансформатора 5, протилежний кінець якої (верхній за схемою на рисунку) заземлений. Витки цієї обмотки утворені зовнішньою оболонкою екранованого кабеля, намотаного на осердя трансформатора 5. Напруга U_2 трансформується у вторинну обмотку, яка утворена внутрішнім провідником екранованого кабеля. Таким чином, напруга U_2 буде прикладена до ємності C_p між робочим електродом датчика 19 і заземленим полюсом ротора 16. Під дією напруги U_2 через ємність C_p протікає струм I_2 . У результаті на вході підсилювача 8, у точці "а", підсумовуються три струми: струм I_1 через зразковий конденсатор 6, струм I_2 через робочу ємність C_p датчика та струм I_3 через компенсаційний конденсатор 11 (про його призначення йтиметься далі). Система автоматичного зрівноважування, що включає підсилювач 8, фазочутливий детектор (ФЧД) 9 (керуючою напругою для ФЧД служить прямокутна напруга генератора 7) та інтегратор 10, безперервно підтримує пристрій у стані рівноваги, коли потенціал точки "а" дорівнює нулю. У випадку відхилення від цього стану, наприклад, за рахунок зміни зазора d_x і пов'язаної з ним зміни робочої ємності C_p датчика у точці "а" з'являється напруга помилки, що після посилення й синхронного детектування у ФЧД надходить на інтегратор 10 і змінює його вихідну напругу U_B так, що стан рівноваги відновлюється.

Екрануюча оболонка провідника обмотки трансформатора 5, яка є продовженням внутрішнього екрана кабеля 15 вздовж усього провідника до самого датчика, з'єднується з охоронним (екрануючим) електродом 18. Оболонка по всій довжині (включаючи і витки обмотки трансформатора 5) у будь-якому перерізі провідника має потенціал, рівний потенціалу внутрішнього провідника, здійснюючи таким чином його еквіпотенціальний захист. Цим забезпечується відсутність струмів між центральним провідником та іншими елементами пристрою, завдяки чому весь струм робочого електрода 19 доходить до точки підсумовування "а" без змін. Крім того, подача на охоронний електрод такого ж потенціалу, як на електроді 19, сприяє тому, що в робочому зазорі датчика формується однорідне електричне поле з прямими, паралельними одна одній силовими лініями, а еквіпотенціальний екран між верхньою стороною робочого електрода 19 і осердям статора 14 виключає паразитну ємність між ними. Останні з перерахованих факторів призводять до того, що ємність між робочим електродом і ротором строго підпорядковується простій залежності: ємність обернено пропорційна зазору d_x .

Через те, що точка "а" (вхід підсилювача 8) має в урівноваженому пристрої нульовий потенціал, та враховуючи полярності напруг, можна записати

$$I_1 = kU_1C_0; I_2 = -kU_B C_p; I_3 = kU_B C_K, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Сума струмів на вході підсилювача 8 при рівновазі схеми дорівнює нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (5)$$

Звідки

$$U_1 C_0 + U_B C_K \approx U_B C_p, \quad (6)$$

або

$$U_B = U_1 \frac{C_0}{C_P - C_K}. \quad (7)$$

В ідеальному випадку, при 100 %-вому екрануванні внутрішнього провідника обмотки трансформатора 5 і внутрішнього провідника єднального кабеля 15 (наприклад, якщо екран виконаний із суцільного металу і є звичайною трубою, одягненою на ізолюваний внутрішній провідник), компенсаційний конденсатор 11 можна було б виключити з пристрою ($C_K = 0$, і $I_3 = 0$). У реальному пристрої оболонка кабеля, що екранує, являє собою більш-менш щільне обплетення з окремих тонких провідників і має кінцеву, хоч і невелику, так звану електричну прозорість, тобто частина силових ліній електричного поля проходить крізь такий не зовсім ідеальний екран. Внаслідок цього між внутрішнім провідником обмотки трансформатора 5 і землею, а також між внутрішнім провідником сполучного кабеля 15 і землею є деяка паразитна ємність C_{II} . З рисунка видно, що ця ємність включена паралельно інформативній ємності датчика. Тому ємність C_P можна представити як суму двох складових:

$$C_P = C_X + C_{II}, \quad (8)$$

де C_X – інформативна ємність датчика, що визначається лише геометричними розмірами конденсатора датчика. Як відомо, для конденсатора з повітряним діелектриком із плоскими паралельними пластинами електродів при строгій рівномірності поля в зазорі маємо

$$C_X = k_D \frac{S}{d_X}, \quad (9)$$

де k_D – постійний коефіцієнт; S – площа перекриття активних електродів конденсатора; d_X – зазор між електродами.

Зазвичай паразитна ємність C_{II} складає досить невелику частку від C_P , однак може викликати похибку вимірювання, особливо при більших значеннях зазора. Щоб її виключити, введено коло компенсації через конденсатор 11.

Підставивши (6) з урахуванням (9) в (7), отримаємо

$$U_B = U_0 \frac{C_0}{k_D \frac{S}{d_X} + C_{II} - C_K}. \quad (10)$$

Якщо при настроюванні пристрою ємність компенсаційного конденсатора підібрати так, щоб $C_K = C_{II}$, то формула (12) спрощується:

$$U_B = U_0 d_X \frac{C_0}{k_D S} \quad (11)$$

Таким чином, вихідна напруга U_B інтегратора 10 пропорційна величині зазора d_X . Величини U_0, C_0, k_D і S , що входять до складу (13), є константами, утворюючи постійний коефіцієнт пропорційності.

На вихід пристрою сигнал з виходу інтегратора надходить через масштабуючий перетворювач 12, за допомогою якого в процесі настроювання можна змінити масштаб вихідної напруги U_{B1} так, щоб, наприклад, зміна зазора d_X на 1 мм викликала зміну вихідної напруги на 1 В. Крім того, за допомогою перетворювача 12 можна при необхідності врахувати кінцеву товщину Δ ємнісного датчика, тобто, щоб напруга U_{B1} була пропорційна відстані від полюса ротора 16 не до площини електрода 19, а до внутрішньої поверхні розточки статора 14, позначеної на рисунку як δ . Для цього вихідний сигнал підсумовується в перетворювачі 12 з деякою постійною напругою.

Практичні результати досліджень. При створенні ємнісного вимірювача було проведено комплекс теоретичних досліджень [2–6, 9–11, 12], за результатами яких розроблено конструкторську документацію та виготовлено спочатку макет, а згодом експериментальні

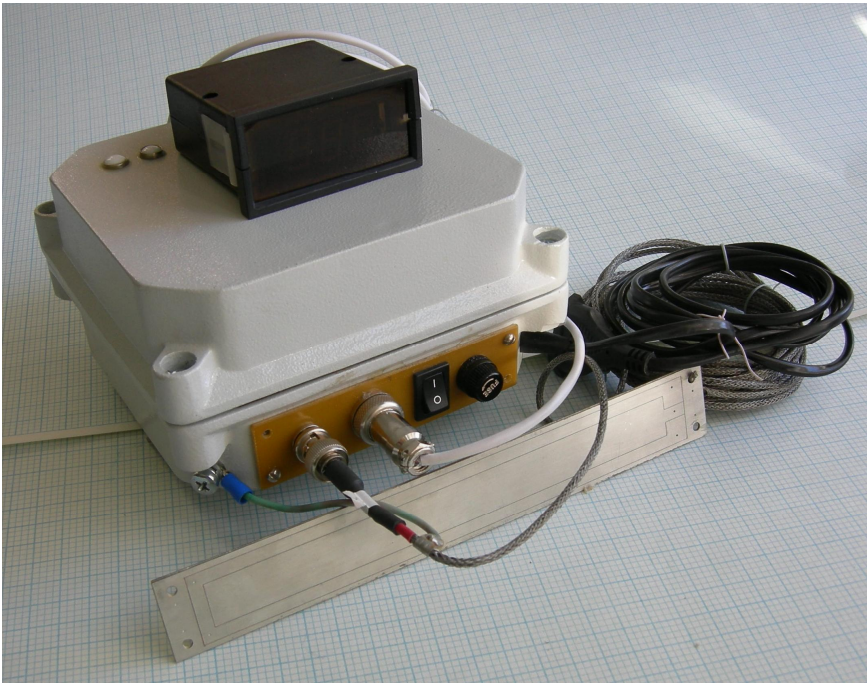


Рис. 5

зразки ємнісного вимірювача зазора, призначеного для застосування на гідрогенераторі типу СКГ 538/160-70М. Вони були передані для застосування на Київській ГЕС ВАТ «Укргідроенерго». На рис. 5 показано даний вимірювач в комплекті з блоком індикації. Проведені лабораторні випробування експериментального зразка вимірювача (з діапазоном вимірювання від 2 до 10 мм) показали, що його похибка не перевищує 0,1 мм на всьому діапазоні.

Слід зазначити, що вторинний перетворювач та блок індикації

є універсальними і можуть бути використані для вимірювання зазора на всіх типах гідрогенераторів. Первинний перетворювач (датчик) проектується для кожного типу гідрогенератора з урахуванням діапазону вимірювання та конструктивних розмірів машини таких, як абсолютна величина зазора та ширина зубця осердя.

Поряд з тим, що ємнісні вимірювачі дають інформацію про поточне значення величини зазора та попереджають про появу критичних аварійних ситуацій, коли зазор зменшується до граничного значення, вони також мають надавати інформацію для систем діагностики, призначення яких за наданою інформацією розпізнати дефект, що з'явився, і визначити його параметри.

У роботах [7, 8, 13], виконаних у відділі, розроблені моделі та методики розрахунків параметрів деяких дефектів гідрогенератора з використанням вимірних величин зазора системою ємнісних датчиків, які розміщуються на розточенні осердя статора. Такими дефектами є неспіввісність ротора та розточення осердя статора (осьовий ексцентриситет), перекіс ротора стосовно розточення осердя (кутовий ексцентриситет) та еліпсність розточення.

Дослідження виконувались згідно з планом робіт за темою «Зазор–ЕМ», яка закінчилась у грудні 2009 р.

Результати досліджень обговорювались на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (13–15 травня 2009 р., м. Кременчук, Полтавська обл.) та круглому столі VII Міжнародного форуму «Паливно-енергетичний комплекс України: Сьогодні та майбутнє» (23–25 вересня 2009 р., Україна, м. Київ).

У подальшому планується провести дослідження ємнісного вимірювача зазора на гідрогенераторі типу СКГ 538/160-70М Київської ГЕС у статичному режимі, що дасть змогу продовжити роботи в даному науковому напрямку і створити вимірювач зазора для роботи в динаміці.

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – М.: Научно-учебный центр ЭНАС, 1998. – 144 с.
2. *Кузьмин В.В., Вакуленко А.Н.* Режимы эксплуатации и наиболее часто встречающиеся повреждения гидрогенераторов ГЭС Днепровского каскада. Влияние параметров воздушного зазора между ротором

- и статором гидрогенератора на надежность его работы // Гидроэнергетика Украины. – 2005. – № 2. – С. 22–30.
3. *Левицький А.С.* Методи та прилади автоматичного вимірювання зазору між ротором і статором в гідро-генераторах // Гідроенергетика України. – 2007. – № 4. – С. 29–35.
 4. *Левицький А.С.* Измерение некоторых диагностических параметров гидрогенераторов с помощью емкостных датчиков // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008.– Вип. 19. – С. 73–75.
 5. *Левицький А.С.* Вимірювання діагностичних параметрів у потужних електричних машинах // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 34–35.
 6. *Левицький А.С., Новик А.І.* Емкостний датчик измерителя воздушного зазора в гидрогенераторах // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 2. – С. 68–71.
 7. *Левицький А.С., Федоренко Г.М.* Визначення параметрів дефектів повітряного зазору в гідрогенераторах за даними датчиків, розмішених на статорі // Гідроенергетика України. – 2008.–№ 1. – С. 30–33.
 8. *Левицький А.С., Федоренко Г.М., Архіпова Л.В.* Визначення параметрів перекоосу ротора в потужних гідрогенераторах // Гідроенергетика України. – 2008. – № 3. – С. 31–34.
 9. *Новик А.І.* Перспективы использования преобразователей с емкостными датчиками для измерения диагностических параметров в энергомашинах // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 76–77.
 10. *Новик А.І., Левицький А.С., Воциньский К.В.* Источники погрешностей емкостного измерителя воздушного зазора в гидрогенераторах // Гідроенергетика України. – 2009. – № 3. – С. 58–60.
 11. *Новик А.І., Левицький А.С., Неболюбов Е.Ю.* Контроль воздушного зазора в мощных гидрогенераторах в процессе эксплуатации // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 66–69.
 12. *Поташник С.І., Воциньский К.В., Левицький А.С., Новик А.І., Федоренко Г.М., Грубой О.П., Шофул А.К.* Ємнісний вимірювач повітряного зазору між статором та ротором в потужних гідрогенераторах // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009.
 13. *Поташник С.І., Левицький А.С., Федоренко Г.М.* Некоторые дефекты капсульных гидрогенераторов и их идентификация с помощью датчиков воздушного зазора // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 24. – С. 67–74.
 14. *Пат. 86524 Україна, МПК G01B 7/14, G01R 27/26.* Спосіб вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в гідрогенераторі та пристрій для його реалізації / С.І. Поташник, К.В. Воциньський, О.П. Грубой, А.С. Левицький, Є.Ю. Неболюбов, А.І. Новік, Г.М. Федоренко, А.К. Шофул. Заявл. 09.11.2007. Опубл. 27.04. 2009, Бюл. № 8.
 15. *Mikalauskas R., Volkovas V.* Air gap modelling and control possibilities in rotary systems // Ultragasas. – 2003. – Nr.1(46). – P. 7–11.
 16. Air Gap Measuring System LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. <http://www.skf.com/files/058406.pdf>.