

ОПТИЧНІ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ

Буйновський В.В., магістрант, Кирик В.В., д.т.н., проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

Вступ. Більше ста років в електроенергетиці для високовольтного вимірювання змінного струму застосовують електромагнітні вимірювальні трансформатори струму (ТС). Принцип роботи, яких заснований на відкритому Фарадеєм законі електромагнітної індукції. Іншим відкритим явищем Фарадеєм є поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла в постійному магнітному полі [1]. Це явище стало першим доказом прямого зв'язку електромагнітних та оптичних явищ.

Мета роботи: розгляд в електроенергетиці оптичних трансформаторів струму (ОТС), їх конструкції і характеристики, переваги і недоліки над електромагнітними аналогами, принцип роботи, розгляд конструктивних елементів та їх застосування, порівняння ОПС і ОТС між собою.

Матеріали і результати досліджень. Перші роботи зі створення оптичних датчиків струму на основі ефекту Фарадея проводилися в СРСР, ще на початку 70-х років минулого століття. Тоді ж у світі створили промислове оптичне волокно (ОВ), яке намагалися застосовувати не лише для дистанційної передачі оптичних сигналів, але, і в якості чутливого елемента волоконно-оптичних датчиків струму, які використовують ефект Фарадея. Але тоді технологія ще не дозріла для створення конкурентоспроможних промислових зразків вимірювальних трансформаторів струму (ОТС).

В нас час розробкою оптичних датчиків займається ряд компаній, серед яких виділимо канадську компанію NxtPhase Corporation, шведську фірму PowerSense, американські фірми Airak, OptiSenseNetwork та FieldMetrics.

Основні переваги ОТС в порівнянні з їх електромагнітними аналогами полягають в наступному:

- можливість масштабного вимірювання та перетворення змінного (до 100 кА) та постійного або імпульсного (до 600 кА) струму різних рівнів напруги (до 800 кВ);

- оптико-електронне малоінерційне перетворення світлових сигналів із відсутністю явищ гістерезису, залишкового намагнічування та магнітного насичення, які є характерними для електромагнітних аналогів і обмежують їх динамічний діапазон і точність вимірювань;

- великий динамічний діапазон ($0,1-200\% I_{1ном}$) і висока точність ($0,1-0,2\%$) для вимірювань та захисту струмових ланцюгів, що досягається за допомогою використання поляризованих світлових сигналів та їх цифрової обробки;

- широка смуга пропускання сигналів (не менше 6 кГц), що дозволяє виконувати повний аналіз не лише кількості, але і якості електроенергії в частині гармонік (до 100 гармонік) та перехідних процесів (для захисту);

- можливість інтеграції в вимірювальні та інформаційні системи з використанням різних інтерфейсів - аналогових, дискретних та цифрових;

- висока стійкість до електромагнітних перешкод, що дозволяє встановлювати вироби в складній електромагнітній обстановці без її попереднього аналізу і корекції;
- довговічність, довготривала стабільність та висока повторюваність метрологічних параметрів виробів;
- низька чутливість до вібрацій і змін температури;
- малі масо-габаритні параметри.

Застосовувати ОТС найбільш ефективно в середньо та високовольтних електричних мережах. Це пояснюється тим, що найбільш складні питання забезпечення ізоляції вирішуються автоматично за рахунок фізичної природи перетворювача, так як елементи оптичного волокна являються діелектриками. Тому легко забезпечується гальванічна розв'язка вимірювального та високовольтного кола, підвищується безпека при експлуатації даних приборів.

Конструкція і характеристики ОТС. Типова схема ОТС містить чутливий елемент у вигляді декількох витків оптичного волокна, поміщених в жорстку захисну оболонку із немагнітного матеріалу - струмову головку, і електронно-оптичний блок (ЕОБ), що сполучається з чутливим елементом безпосередньо або через оптичний крос (рис. 1) [6-8].

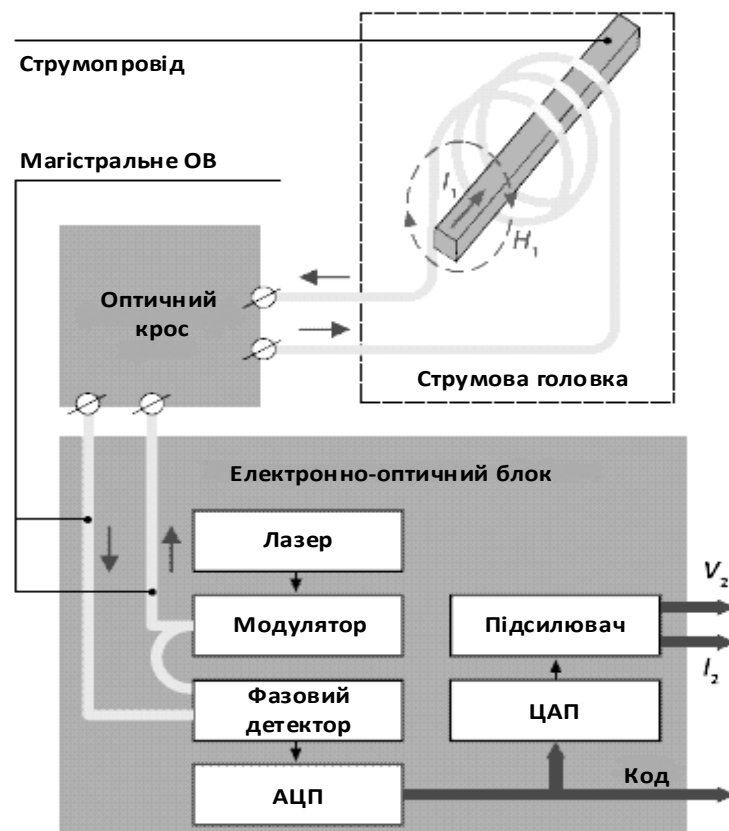


Рисунок 1 – Спрощена структурна схема оптичного ТС

ЕОБ генерує за допомогою вбудованого лазера і модулятора на своєму оптичному виході монохроматичний циркулярно поляризований світловий сигнал, що направляється по ОВ, який підтримує поляризацію, на вхід чутливого елемента. В чутливому елементі площина поляризації сигналу піддається під впливом магнітного поля H_1 струму I_1 відповідного повороту на

кут Фарадея, і з виходу чутливого елемента світловий сигнал надходить на оптичний вхід ЕОБ, де на фазовому детекторі з нього формується електричний вимірювальний сигнал.

Далі цей сигнал через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) надходить у вигляді цифрового коду певної розрядності на дискретний інтерфейсний вихід ЕОБ і через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) на підсилювач, де формуються нормовані аналогові вихідні сигнали у вигляді напруги або струму для видачі на аналоговий інтерфейс ЕОБ. Таким чином, вимірювальна інформація може бути отримана на виході ЕОБ для подальшого використання.

У тому випадку, коли чутливий елемент за технологічними вимогами, наприклад, на високовольтних підстанціях, повинен бути дистанційно (до 1 км) віддалений від ЕОБ, для підключення чутливого елемента додатково використовується магістральний ОВ, що зберігає поляризацію, і кросовий блок (кабельний бокс), що включає його до ОВ чутливого елемента.

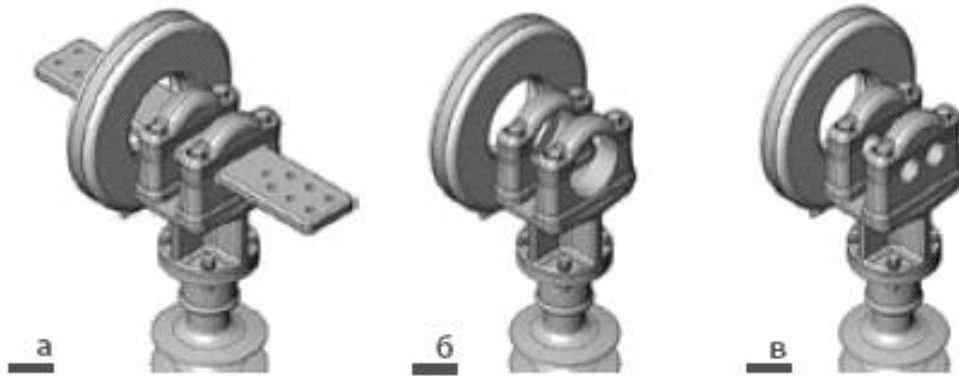
Склад обладнання і функції, які повинен виконувати ЕОБ, залежать від виробника і карти замовлення виробу. Зокрема, ЕОБ, що містить вбудований годинник, мікропроцесор і пам'ять, здатний перетворювати в реальному часі поточні цифрові коди АЦП в іменовані цифрові результати вимірювань основної та похідної гармоніки вимірюваного струму, накопичувати їх в пам'яті за різні інтервали часу і видавати результати вимірювань через цифровий інтерфейс в цифрову обчислювальну мережу об'єкта або суб'єкта обліку. Тим самим ОТС або ОПС, на відміну від їх електромагнітних аналогів, легко можна включати в ті чи інші цифрові системи (наприклад, цифрові підстанції відповідно до стандарту [9]), минаючи проміжне використання вимірювальних приладів.

Конструкція струмових головок для ОТС залежить від конструкції високовольтних шин на об'єкті обліку, з якими ці головки повинні сполучатися. На рис. 2 наведені три варіанти струмових головок одного з провідних світових виробників ОТС / ОПС (NxtPhase Corporation) для шин різного виду. У ОТС струмові головки встановлюються на вершині ізоляційних колон, які виконують одночасно функції опори шини з головкою, захисту ОВ від впливів зовнішнього середовища (ОВ проходить всередині колони від головки до кросовому блоку, розміщеному, як правило, в основі колони) і додаткової електричної ізоляції кросового блоку і персоналу, що працює з ОВ біля основи колони. Для забезпечення опорної функції колона виготовляється у вигляді спіралеподібного циліндра необхідної висоти, а для забезпечення його захисної і ізоляційної функцій використовують композитний матеріал (склопластик) з високими ізоляційними і антикорозійними властивостями.

В ОПС замість стандартної струмової головки використовується вимірювальна петля, форма і розмір якої підбираються під ту струмоведучу шину, в якій необхідно виміряти струм. ОПС з такою змінною петлею називають трансформованим.

На відміну від ОТС, що застосовуються на високовольтних підстанціях для вимірювань змінного струму промислової частоти, ОПС використовують, як правило, при вимірюванні великих змінних або постійних струмів в різних

технологічних процесах на енергоємних виробництвах, наприклад, в електрометалургійній або електрохімічній промисловості.



**а) для плоскої шини; б) для одиначної круглої шини;
в) для спарених круглих шин**

Рисунок 2 – Конструкція струмових головок ОТС виробництва
NxtPhase Corporation

Загальні технічні та метрологічні характеристики ОТС і ОПС нормуються тим же стандартом, що і для електромагнітних ТС [10]. Специфічні характеристики ОТС і ОПС, включаючи вимоги до їх конструкції, тестування, точності вимірювання гармоніки (для систем вимірювання, захисту і контролю якості електроенергії), аналогового і цифрового інтерфейсу, нормуються стандартом МЕК [9].

Розглянемо детальніше деякі характерні особливості ОТС та ОПС, які випускаються серійно.

Компанія NxtPhase Corporation випускає:

- високовольтні вимірювальні оптичні перетворювачі струму NXST для вимірювання струму до 4 кА з класом точності 0,5 в мережах 60-750 кВ;
- високовольтні вимірювальні оптичні перетворювачі напруги NXVT для вимірювання в діапазоні 138-500 кВ з класом точності 0,25;
- вимірювальні оптичні перетворювачі, які трансформують NXST-F3, призначені для вимірювання струмів до 100 кА в колах змінного струму і до 600 кА в колах постійного струму, що дає можливість їх використовувати в металургійній та хімічній промисловості.

Компанія FieldMetrics, Inc. заснована в 2001 р. та спеціалізується на розробці та виробництві трьох ліній оптоволоконних датчиків для енергетичних мереж змінного струму напругою 11-36 кВ: MetPod, FiberMetPod, MetPodLite класу точності 0,2. В лінійку MetPod входять комбіновані датчики струму та напруги, які можуть встановлюватися безпосередньо на опорі. Електронний блок з автономним блоком живлення виконаний в єдиній конструкції з датчиками. Зв'язок з пунктом збору та обробки інформації виконується по радіоканалу потужністю до 1 Вт.

FiberMetPod передбачає інтегроване виконання датчика струму та електронного перетворювача оптичного сигналу в цифровий код, розміщені в легкому міцному корпусі. Безпосередньо на корпусі монтується

радіопередавач, який забезпечує безпроводний зв'язок з диспетчерським пунктом.

MetPodLite – датчик струму класу 0,3, полегшеної конструкції, монтується на ізольованій штанзі, підключеній між активним проводом та нейтраллю. Датчики мають більш низьку вартість порівняно з MetPod.

Крім обладнання для контролю параметрів середньовольтних мереж, фірма активно розробляє та впроваджує датчики класу 0,3 для високовольтних мереж. В основі цих датчиків лежить модульний принцип побудови з використанням опорних модулів на 15 кВ, із яких можливо зібрати датчики для мереж до 750 кВ.

Компанія PowerSenseA/S, заснована в 2006 р., запропонувала споживачам лінійку вимірювального обладнання Discos, в яку входять оптоволоконні датчики струму та напруги та комбіновані датчики струму/напруги, призначені для роботи в мережах 36 кВ. Діапазон вимірювання струмів – від 5 А до 20 кА з похибкою 2%, похибка при вимірюванні напруги – 1%. Самі датчики встановлюються на штанзі та оптоволоконному з'єднанні з оптичним модулем, розміщеному на опорі.

Компанія OptisenseNetwork, заснована в 2001 р., спеціалізується на виробництві компактних датчиків струму та напруги, які використовуються в мережах з напругою 35 кВ.

Компанія Airak, Inc. випускає оптоволоконні датчики, які відрізняються найменшими масо-габаритними показниками. Оптоволоконні датчики напруги цієї фірми разом з п'ятиметровими виводами мають масу всього 170 г. Датчик напруги розміщений на спеціальній платформі, яка розміщена на опорі. Стандартний діапазон вимірювання напруги – 5 кВ (із змінною комірки Поккельса діапазон може бути збільшений до 13,8 кВ). Максимальна приведена похибка складає 5%, типова – 1%.

Недоліками датчиків напруги фірми Airak, Inc являються низька точність вимірювання та малий діапазон вимірювання напруги. Істотним недоліком для його застосування являється також температурний діапазон – 0...50°C.

Кращі показники мають датчики струму цієї фірми. Струмовий діапазон для повітряних ліній дозволяє вимірювати струми в діапазоні від 3 А до 1 кА (можливі версії до 15 кА) з похибкою, яка не перевищує 1%. Він працює в діапазоні температур -40...+85°C. Маса цих датчиків не перевищує 570 г, що дозволяє легко змонтувати їх прямо на проводах, не виконуючи роз'єднання лінії.

Компактність та мала маса останнього датчика привертає увагу розробників систем контролю та управління енергетичними системами на неземному, морському та повітряному транспорті. В США в рамках програми по модернізації морського флоту розробляється так звана «повністю електричні» кораблі. Для забезпечення моніторингу та управління усіма системами корабля потрібно близько 10000 електричних датчиків. Таку задачу неможливо вирішити з використанням традиційних датчиків, включаючи датчики Холла. В зв'язку з цим фірма Airak, Inc спеціально для цього розробила надмініатюрні оптоволоконні датчики струму та напруги з похибкою вимірювання 1%.

Представляє інтерес датчик, призначений для вимірювання струму та напруженості магнітного поля при застосуванні в стаціонарному обладнанні. Датчик має масу 28 г та встановлюється на шину. Струми вимірюються в діапазоні від 3 А до 3 кА з похибкою 1%.

Компанія АВВ, Inc. відома, перш за все струмовими датчиками, що використовуються в колах постійного струму, робота яких заснована на ефекті Холла. Перетворювачі такого типу надійні, але дуже складні, а їх маса може досягати 2000 кг. При їх установці також необхідні складні процедури настройки для виключення впливу асиметричного поля та перехресних наводок з розміщених поряд шин. Для рішення цих та других проблем компанія АВВ розробила новий оптоволоконний датчик струму (FiberOpticCurrentSensor, FOCS). Порівняно з датчиками Холла нові датчики мають наступні переваги:

- тривалість встановлення та вводу в експлуатацію вимірюється годинами, а не днями;
- різко знижується складність системи;
- прилади не схильні впливу магнітних полів складних конфігурацій та перехресним наводкам від сусідніх шин;
- збільшується точність (до 10-кратного зменшення похибки);
- широка полоса пропускання забезпечує швидку реакцію на пульсації та нестиковки струмів;
- датчики забезпечують вимірювання постійних струмів як в одному, так і в двох напрямках.

Датчик дозволяє вимірювати струми від 0 до ± 500 кА з похибкою 0,1% в діапазоні частот від 0 до 4 кГц. Маса однієї секції – 5 кг.

Застосування таких датчиків в металургійній та хімічній промисловості може суттєво підвищити ефективність виробництва та дати значний економічний ефект. У виробництві алюмінію, міді, марганцю, цинку, сталі та хлору потрібні дуже великі об'єми електроенергії. Електронні ванни для виробництва алюмінію звичайно живляться постійною напругою 1000 В та споживають струм до декількох сотень кілоампер. Необхідно врахувати, що помилка на 0,1% у вимірюванні струму 500 кА приводить до помилки обліку потужності на 0,5 МВт.

Компанія АВВ, Inc рахується одним із лідерів в розробці і оптоволоконних датчиків для високовольтних електроенергетичних мереж. Магнітооптичні датчики струму (Magneto-OpticCurrentTransformer, МОСТ) цієї компанії може використовуватися в мережах з напругою від 75,5 до 800 кВ для вимірювання струмів до 3,5 кА.

Оптичні датчики напруги звичайно мають більш складну конструкцію. В зв'язку з цим компанія АВВ для вимірювання напруги запропонувала виконувати виміри струму через навантаження з відомим значенням опору, підключену послідовно з датчиком МОСТ. Фізично вказане навантаження реалізоване за допомогою електрооптичного трансформатора напруги EOVT.

Як слідує із запропонованого огляду, клас оптичних датчиків струму та напруги може зайняти суттєве місце в системах моніторингу, контролю та управління в енергетиці, металургійній, хімічній, суднобудівельній та оборонній промисловості.

Висновок. Високовольтні ОТС / ОПС знаходяться на самому початку свого шляху в більшу електроенергетику і промисловість. Занадто очевидні їх достоїнства та переваги перед електромагнітними трансформаторами і перетворювачами.

Важливо, що оптичні технології з самого початку орієнтовані на цифрове представлення результатів вимірювань і на цифрову обробку (представлення результатів у вигляді аналогових або дискретних сигналів зберігається тільки данина традиції). Це означає, що цифрова обробка стає ще ближче до точки вимірювання електроенергії і остаточні результати вимірювання можна буде отримати безпосередньо в ОТС / ОПС, не вдаючись до використання різних додаткових вимірювальних приладів, наприклад, лічильників електроенергії. Цифрові ОТС/ОПС спільно з цифровими оптичними трансформаторами напруги – це майбутнє в обліку електроенергії при високій напрузі і великих струмах.

Перелік посилань

1. Элементарный учебник физики / под ред. акад. Г.С. Ландсберга. Т. 3. М.: Наука, 1952.
2. Яворский В.М., Пинский А.А. Основы физики. Т. 2. М.: Наука, 1972.
3. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Власов М., Сердцев А. Оптические трансформаторы: первый опыт // Энергоэксперт. 2007. №1.
5. Duncan P., Mastro S. Fiber Optic current and potential sensors for naval shipboard use // A publication of the National Electronics Manufacturing Center of Excellence. April 2005/
6. Измерительные комбинированные оптические преобразователи тока и напряжения NXVCT-121/145/245/362/420/550/800: справочник покупателя. Изд. 1-е, 2007.
7. Оптические измерительные преобразователи. – www.tektologic.ru.
8. Власов М., Сердцев А. Высоковольтные оптические преобразователи для систем измерения и анализа качества электрической энергии // Энергорынок, 2006, № 10.
9. IEC 60044-8. Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные трансформаторы тока. – IEC, 2002.
10. www.fieldmetrics.net.
11. www.airak.com.
12. Performance Assessment of Advanced Digital Measurement and Protection Systems. PSERC Publication 06-23. August 2006.
13. Bohnert K., Gabus P., Brandle H. Fiber-Optic Current and Voltage Sensors for High-Voltage Substations // Invited paper at 16th International Conference on Optical Fiber Sensors. October 13-17, 2003, Nara Japan Technical Digest.