



ОПТИЧНА СИСТЕМА ВИМІРУ СТРУМУ В УМОВАХ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Лобода О. І., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

E-mail: oleksandr.loboda@tsatu.edu.ua

Анотація – при створенні пристроїв релейного захисту енергетичних систем в даний час підвищуються вимоги до точності вимірювання електричних параметрів електроенергії: напруги, струму, потужності. Поряд з використанням звичайних електромагнітних трансформаторів струму і напруги, електромеханічних реле, відбувається впровадження мікропроцесорної техніки в автоматизованих системах обліку та контролю електричної енергії, а також додатково виникає необхідність в контролі якості електроенергії. Тому до первинних перетворювачів миттєвих значень струму і напруги як до джерел первинної інформації висувають нові більш жорсткі вимоги.

Застосовувані в даний час електромагнітні вимірювальні трансформатори струму не мають стійкої частотної характеристики, необхідної для повного аналізу якості електроенергії. Крім того, вони мають обмежену електричну міцність і низьку надійність. В якості альтернативи існуючим трансформаторам струму пропонується використовувати безінерційний шунт коаксіального типу з різнорідного матеріалу з подальшою цифровою обробкою миттєвих значень енергетичних параметрів, а в якості ліній передачі інформації запропоновано використовувати волоконно-оптичну лінію зв'язку. Проведено дослідження технічних характеристик існуючих вимірювальних систем на відповідність вимогам, що пред'являються до точності вимірювань, аналізу якості електричної енергії, надійності і робочого частотного діапазону.

Зроблено вибір і розроблена конструкція коаксіального шунта з найбільш підходящими технічними характеристиками для розроблюваної вимірювальної системи і з вибором матеріалу для зовнішнього і внутрішнього циліндрів.

Експериментальні дослідження, виконані за допомогою програмних комплексів: Elcut, Matlab. Запропонована електронно-оптична система вимірювань енергетичних параметрів ліній електропередач високої напруги, за своїми характеристиками перевершує існуючі електромеханічні аналоги. Проведено порівняльний аналіз використовуваних в даний час систем вимірювання на базі електромагнітних трансформаторів струму і запропонованої системи, що розробляється, яка може використовуватися в високовольтних комплексах контролю електроенергії і для сучасних мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики.

Ключові слова – аналого-цифровий перетворювач, коаксіальний, релейний захист, світлодіод, трансформатор струму, цифровий сигнал, шунт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перетворення в електроенергетиці спрямовані на формування конкурентного ринку елект-



роенергії, а також супутні законодавчі акти. У зв'язку з чим підвищилися вимоги до точності обліку електроенергії і, відповідно, розробка високоточних вимірювальних систем стала як ніколи актуальна.

Останні роки також характеризуються швидким розвитком енергетики. Підвищуються номінальна напруга і струми електрообладнання, що встановлюється в енергосистемах. У зв'язку з об'єднанням енергосистем значно збільшуються струми короткого замикання. Тенденції в електроенергетиці в даний час такі, що поряд з існуючими традиційними системами релейного захисту, протиаварійної автоматики, вимірювань і обліку на станціях і підстанціях впроваджуються цифрові (мікропроцесорні) системи релейного захисту і автоматики, АСКОЄ, вимірювання і диспетчеризації. А це призводить до зростання навантаження на вимірювальні трансформатори струму і внаслідок цього до погіршення їх класу точності.

В даний час підвищуються вимоги до точності вимірювання електричних параметрів електроенергії. Широке впровадження мікропроцесорної техніки в системах обліку і контролю електричної енергії, а також необхідність в контролі якості електроенергії висувають нові більш жорсткі вимоги до джерел первинної інформації, якими є датчики миттєвих значень струму і напруги. Застосовувані в даний час електромагнітні вимірювальні трансформатори струму не мають частотну характеристику, що необхідна для повного аналізу якості електроенергії. Крім цього вони мають обмежену електричну міцність і низьку надійність. В якості альтернативи трансформаторів струму пропонується використовувати безінерційний шунт з подальшою цифровою обробкою миттєвих значень струму. Дослідження технічних характеристик існуючих вимірювальних систем на відповідність вимогам, що пред'являються до точності вимірювань, аналізу якості електричної енергії, надійності і робочого частотного діапазону.

Формулювання цілей статті. Провести аналіз характеристик існуючих електромагнітних первинних перетворювачів якості електричної енергії. Визначити альтернативний спосіб виміру електричного струму високовольтних ліній електропередач з використанням елементів волоконної оптики і мікропроцесорних засобів. Визначити помилки існуючих і запропонованих засобів виміру струму.

Виклад основного. В даний час для вимірювання великих струмів використовують переважно електромагнітні трансформатори струму, робота яких основана на явищі і законі електромагнітної індукції. Їх застосування забезпечує гальванічне відділення вимірювальних приладів і реле струму від ланцюгів високої напруги. Від роботи трансформаторів струму залежить точність електричних вимірювань та обліку електроенергії, а також надійність і вірність дії релейного захисту та автоматики при пошкодженнях електрообладнання і



ліній електропередачі, що безпосередньо впливає на безперебійність електропостачання споживачів. Однак наявні вимірювальні системи на базі електромагнітних трансформаторів струму мають ряд недоліків.

Відомо, що звичайний трансформатор струму - це пристрій, призначений для перетворення первинного струму в такий вихідний сигнал, параметри якого функціонально пов'язані з параметрами первинного струму. Трансформатори струму є найбільш вживаними вимірювальними перетворювачами струму.

Електромагнітні трансформатори струму мають такі переваги:

- клас точності - 0,2 - 0,5%;
- простота і надійність трансформаторів струму (ТС) в мережах 6-35 кВ;
- температурна стабільність характеристик ТС.

Незважаючи на всі переваги, існуючі вимірювальні системи на базі електромагнітних трансформаторів струму мають також і ряд недоліків:

- насичення магнітопроводу електромагнітного струму ТТ аперіодичною складовою струму короткого замикання і відсутність передачі інформації про первинний струм в перші періоди аварійного перехідного процесу, коли ця інформація найбільш необхідна системам РЗА для успішної локалізації та ліквідації аварії (похибки трансформації струму електромагнітними ТС досягають в цьому режимі до 90 %);
- не забезпечують необхідної в умовах ринкових відносин точності вимірювання, так як вони створювалися в основному десятки років назад, коли електроенергія не була товаром і до точності її обліку не висувалися високі вимоги;
- низька надійність обумовлена, в першу чергу, обмеженою електричною міцністю ізоляції первинних та вторинних ланцюгів трансформаторів струму;
- низькі електродинамічні властивості, обумовлені електричною інерційністю вимірювального приладу;
- обмежені можливості оцінки якості електричної енергії.

Зі сказаного можна зробити наступний висновок, що, незважаючи на великий досвід в області розробки і експлуатації електромагнітних трансформаторів струму, усунути недоліки притаманні їм не вдалося.

Пошук альтернативного технічного рішення вимірювання струму в високовольтних електроенергетичних установках ведеться давно як в Україні, так і за кордоном. Ці дослідження стали більш актуальними в зв'язку з інтенсивним процесом впровадження мікропроцесо-



рів в системи керування, вимірювання, релейного захисту, протиаварійної автоматики, телемеханіки на станціях і підстанціях.

Розглянемо більш докладно переваги оптоелектронних трансформаторів струму (ОТС):

- природна гальванічна розв'язка первинних і вторинних ланцюгів (чутливий елемент - оптичне волокно - є діелектриком);
- відсутність впливу навантаження вторинних ланцюгів і втрат в них;
- не вимагають заміни / контролю масла або елегазу, регулярного ремонту або перевірки, а лише повірки приладу та його вихідних характеристик;
- малі масові і габаритні параметри;
- можливість інтеграції в вимірювальні та інформаційні системи з використанням різних інтерфейсів - аналогових, дискретних і цифрових;
- клас точності - 0,1 - 0,25%;
- висока пожежна безпека, вибухобезпечність і екологічність, так як не містить мастил, паперу, горючих полімерів і елегазу в високовольтній ізоляції;
- виключена проблема явища ферорезонансу і небезпеки розмикання вторинних струмових ланцюгів.

Однак, незважаючи на велику кількість переваг, ОТС мають ряд недоліків:

- залежність повороту вектору поляризації світла від вібрації, яка сильніше, ніж ефект Фарадея (в вихідному сигналі вибрати корисний сигнал, пропорційний струму від сигналу, пропорційного вібрації - практично неможливо);
- для блоків перетворення оптичного сигналу в електричний - необхідні спеціальні джерела живлення;
- необхідність забезпечення високої точності, надійності і стабільності роботи в часі при зміні робочих температур в широкому діапазоні призводить до значних ускладнень схем і, як наслідок, до втрати конкурентоспроможності особливо в конструкціях на нижчі класи напруги.

На даний момент практично відсутній досвід експлуатації таких перетворювачів струму.

Електронно-оптична система вимірювань параметрів струму ліній високої і надвисокої напруги дозволить позбутися від більшості перерахованих вище недоліків існуючих систем. На рис. 1 представлена її блок-схема. Система складається з двох частин: вимірювальний пристрій і пристрій керування.

Вимірювальний пристрій включає в себе: датчик струму, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), перетворювач коду, кероване джерело світла і перетворювач енергії. Всі елементи вимірювального пристрою розташовують усередині провідних елементів електричних підстанцій.

В якості первинного перетворювача використовується шунт змінного струму, падіння напруги на якому пропорційно струму, що протікає.

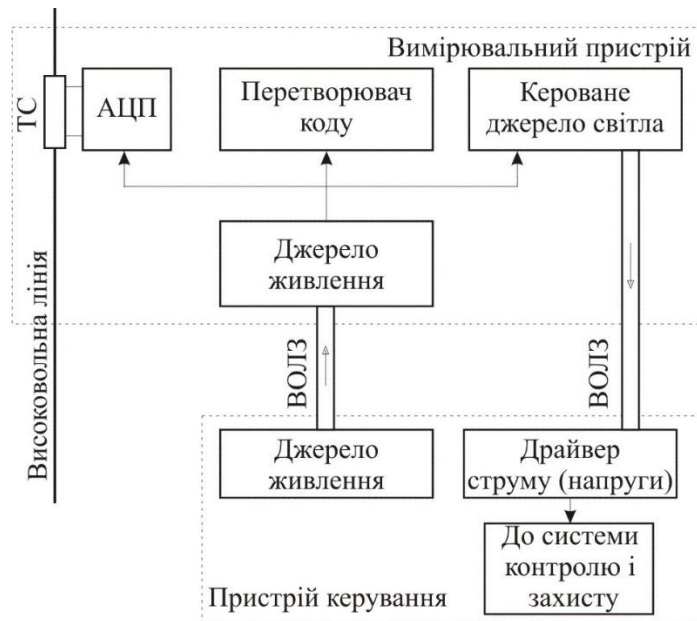


Рис. 1. Блок-схема електронно-оптичної системи виміру струму ліній високої напруги

Так як, найбільший внесок в похибку вимірювань шунтів вносить її індуктивна складова, вибір безіндуктивної конструкції шунта є основоположним завданням.

У нашому випадку для вимірювань передбачається використання трубчастого біфілярного шунту з коаксіальним розташуванням двох циліндричних трубок, який представлений на рис. 2.

За конструкцією коаксіальний шунт складається з двох вкладених один в одного циліндрів, за якими струм протікає в протилежних напрямках. Внутрішній циліндр виготовляють з резистивного матеріалу з великим питомим опором, (манганін, константан), а зовнішній - з меншим (мідь).

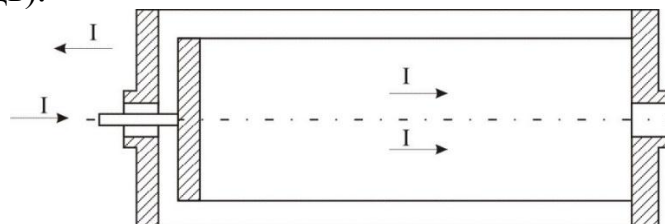


Рис. 2. Загальна конструкція коаксіального шунта



Головною перевагою такого шунта є те, що його власне магнітне і електричне поля зосереджені в просторі між внутрішньою і зовнішньою трубками. Виходячи з того, що всередині і зовні шунта напруженість магнітного поля дорівнює нулю, магнітний зв'язок між резистивною частиною шунта і зовнішніми магнітними полями фактично відсутній, а використання струмовідводів Т1, Т2 і потенційних виводів ПВ коаксіального типу усувають магнітний зв'язок між ними.

Експериментальні дослідження виконані з допомогою програмних комплексів: Elcut, Matlab. Запропоновано електронно-оптична система вимірювань параметрів струму ліній електропередач високої і надвисокої напруги, яка за своїми характеристиками перевершує існуючі аналоги. Проведено порівняльний аналіз використаних в даний час систем вимірювання на базі трансформаторів струму і нової розробленої системи. Розроблена система може використовуватися в високовольтних комплексах контролю електроенергії і для сучасних пристроїв релейного захисту та автоматики на сучасній мікропроцесорній основі. Шунт побудований за такою схемою є нелінійним, тому що при зростанні струму шунт нагрівається і його опір змінюється. Вибір матеріалу з малим температурним коефіцієнтом опору дозволяє зберегти цю нелінійність на низькому рівні.

Іншою вимогою, що пред'являються до матеріалу робочого елемента шунта, є його високий питомий опір. При дуже високих частотах f з'являється ефект витіснення струму на поверхню, при цьому вона сильно розігрівається, а середина залишається холодною. Цей ефект має назву скін-ефект. Глибина проникнення Δ від частоти залежить таким чином:

$$\Delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \mu_0 \lambda}} \quad (1)$$

де f – частота, Гц

μ_0 – магнітна проникливість в вакуумі

μ – відносна магнітна проникливість матеріалу

λ - електрична провідність матеріалу, См/м

В подальшому проведено розрахунки параметрів шунту: визначено опір; товщина робочого елемента шунта за умовами – постійного часу і зведення до мінімуму амплітудних і фазових похибок; радіус робочого елемента; значення струму за умовою електродинамічної стійкості.

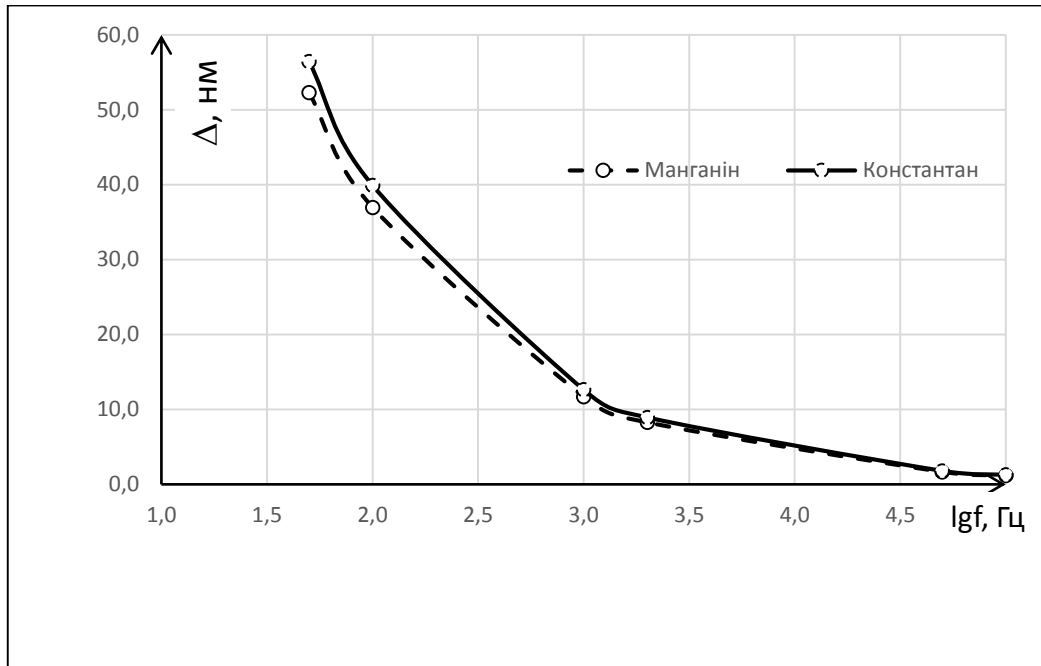


Рис. 3. Скін-ефект для манганіну і константану

Для перевірки моделі коаксіального шунту використовувалася схема заміщення подільника напруги, що представлена на рис. 4. Він має властивості, як омичного, так і ємнісного подільника. На низьких частотах вони працюють як омичні, на середніх і високих - як ємнісні.

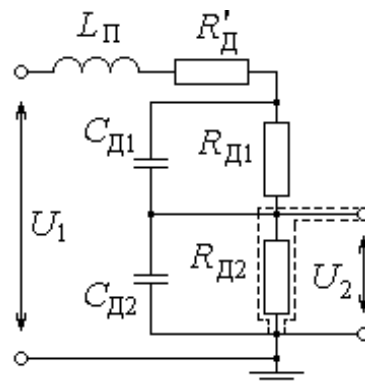


Рис. 5. Схема заміщення змішаного подільника

Основним недоліком біфілярного трубчастого шунта є те, що на високих частотах виникає поверхневий ефект, який призводить до нерівномірного розподілу щільності струму по перетину шунта, тому відбувається зміна активної складової шунта.

Для зменшення впливу паразитних параметрів і ефектів необхідно знижувати товщину внутрішнього циліндра і зменшувати зазор між трубками, що значно мінімізує частотну похибку.

Основний внесок в похибку вимірювання системи вносить похибка вимірювання первинного перетворювача струму. Для характе-



ристики точності шунту змінного струму використовуються фазова і модульна похибки коефіцієнту перетворення шунта.

Фазова похибка Ψ представляє собою кут фазового зсуву між векторами струму і напруги. Ця похибка вважається позитивною, якщо вектор вихідної напруги випереджає вектор вхідного струму. Дана похибка визначається за формулою:

$$\psi = 2\pi f \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_{II} + \tau_M \right). \quad (2)$$

де f - частота,

τ_L - постійна часу шунта від наявності залишкової індуктивності,

τ_C - постійна часу шунта від наявності залишкової ємності,

τ_{II} - постійна часу шунта від впливу поверхневого ефекту,

τ_M - постійна часу шунта від взаємної індуктивності.

Модульна похибка γ це алгебраїчна різниця між модулем повного опору шунта і опором шунта на постійному струмі. Вона визначається за формулою:

$$\gamma = (2\pi f)^2 \left[\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{2,5\tau_{II}^2}{10} + 0,5 \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_{II} + \tau_M \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Розрахунок похибок шунта наведеної конструкції при частоті 50 кГц показав, що відносна похибка по фазі і відносна похибка за амплітудою можуть досягати: 0,01 % і 0,005 % відповідно. Дані значення похибок достатні для того, щоб забезпечити якісний контроль струму.

Миттєве значення напруги шунта, що пропорційне струму подається на АЦП. Він служить для перетворення аналогового сигналу в дискретний код (цифровий сигнал). Перетворення миттєвого значення струму дозволить не втратити інформацію про його реальну величину і проводити вимірювання його параметрів з більшою точністю.

АЦП на своєму виході забезпечує інформацію в паралельному коді. Для передачі інформації по оптичному каналу необхідно паралельний код перетворити в послідовний код. Цю функцію реалізує перетворювач коду.

З перетворювача коду сигнал надходить на кероване джерело світла. В приладі не потрібно робити передачу сигналу на далеку відстань, тому в якості оптичного джерела може бути використаний світлодіод. За його допомогою електричні імпульси перетворюються в світлові імпульси для подальшої передачі по оптоволоконному каналу пристрою керування.

Використання оптоволоконного кабелю (ВОЛЗ) для передачі сигналу в пристрій керування має низку переваг: високу швидкодію,



нечутливість до електромагнітних завад, гнучкість і легкість монтажу, діелектричні властивості.

На приймальній стороні світлові імпульси за допомогою адаптеру струму перетворюються в електричні сигнали з послідовним або паралельним кодуванням.

Потім всі отримані дані надходять в систему обліку і контролю електричної енергії або в пристрої релейного захисту.

Живлення системи здійснюється за допомогою джерела світла, розташованого в пристрої керування, оптоволоконного кабелю для передачі енергії світла і перетворювача світла в електроенергію у вигляді батареї фотоелементів, що знаходяться у вимірювальному пристрою.

Висновки. Розвиток оптичної технології перетворення представляється найбільш перспективним напрямком дослідження, як з наукової точки зору, так і з точки зору економічної ефективності. Результатом розробки є електронно-оптична система вимірювань електричних параметрів ліній високої напруги, що мають високу точність, підвищену надійність, широкий частотний діапазон вимірювань.

Література

1. Шабад М. А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты / М. А. Шабад. – 2-е изд., дополн. – Санкт-Петербург, ПЭИПК, 2000. – 64 с.
2. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
3. Сошинов А. Г. Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения: учеб. пособие. В 2 ч / А. Г. Сошинов, Н. Ю. Шевченко. – ВолгГТУ, Волгоград, 2010.
4. Никитин А. А. Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле / А. А. Никитин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 240 с.
5. Шмидт Д. Оптоэлектронные сенсорные системы / Д. Шмидт, В. Шварц. – М., Мир, 1991. – 93 с.
6. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1998. – 480 с.
7. Poulichet, P., Costa, F., Laboure, E. (2003). High-Frequency Modeling of a Current Transformer by Finite-Element Simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(2).
8. Redfern, M. A., Terry, S. C., Robinson, F. V. P., Bo, Z. Q. (2003). A Laboratory Investigation into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection. *International Conference on Power Systems Transients*. IPST 2003 in New Orleans, USA.



9. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.

10. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси и др.; под ред. Т. Окоси ; пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Лобода А. И.

Аннотация

При создании устройств релейной защиты энергетических систем в настоящее время повышаются требования к точности измерения электрических параметров электроэнергии: напряжения, тока, мощности. Наряду с использованием обычных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, электромеханических реле, происходит внедрение микропроцессорной техники в автоматизированных системах учета и контроля электрической энергии, а также дополнительно возникает необходимость в контроле качества электроэнергии. Поэтому к первичным преобразователям мгновенных значений тока и напряжения как к источникам первичной информации предъявляют новые более жесткие требования.

Применяемые в настоящее время электромагнитные измерительные трансформаторы тока не обладают устойчивой частотной характеристикой, необходимой для полного анализа качества электроэнергии. Кроме того, они обладают ограниченной электрической прочностью и низкой надежностью. В качестве альтернативы существующим трансформаторам тока предлагается использовать безынерционный шунт коаксиального типа из разнородного материала с последующей цифровой обработкой мгновенных значений энергетических параметров, а в качестве линий передачи информации предложено использовать волоконно-оптическую линию связи. Проведено исследование технических характеристик существующих измерительных систем на соответствии требованиям, предъявляемым к точности измерений, анализу качества электрической энергии, надёжности и рабочему частотному диапазону.

Сделан выбор и разработана конструкция коаксиального шунта с наиболее подходящими техническими характеристиками для разрабатываемой измерительной системы и с выбором материала для наружного и внутреннего цилиндров.

Экспериментальные исследования выполнены с помощью программных комплексов: Elcut, Matlab. Предложенная электронно-оптическая система измерений энергетических параметров линий электропередач высокого напряжения по своим характеристикам превосходит существующие электромеханические аналоги. Проведён сравнительный анализ используемых в настоящее время систем измерения на базе электромагнитных трансформаторов тока и предлагаемой разрабатываемой системы, которая может использоваться в высоковольтных комплексах контроля электроэнергии и для современных микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики.



OPTICAL MEASUREMENT SYSTEM UNDER CURRENT POWER LINE HIGH VOLTAGE

A. Loboda

Summary

Nowadays during creating devices for the relay protection of energy systems there are increasing demands on the accuracy of electrical parameter measurement like voltage, current, power. Along with the usage of conventional electromagnetic current and voltage transformers, electromechanical relays, microprocessor technologies are being introduced in automated metering and control systems for electrical energy. Additionally, there is a need for power quality control. Therefore, new requirements that are more stringent are placed on primary converters of instantaneous values of current and voltage as sources of primary information.

The currently used electromagnetic measuring current transformers do not have the stable frequency response necessary for a complete analysis of the electrical power quality. In addition, they have limited electrical strength and low reliability. As an alternative to existing current transformers, it is proposed to use a coaxial type inertialess shunt of dissimilar material, followed by digital processing of instantaneous values of energy parameters, and it is proposed to use a fiber-optic communication line as information transmission lines. A study of the technical characteristics of existing measuring systems was conducted for compliance with the requirements imposed on measurement accuracy, analysis of the quality of electrical energy, reliability and operating frequency range.

A choice was made and a coaxial shunt design was developed with the most suitable technical characteristics for the developed measuring system and with the choice of material for the outer and inner cylinders.

Experimental studies were performed using software systems like Elcut or Matlab. The proposed electro-optical system for measuring the energy parameters of high-voltage power lines surpasses the existing electromechanical counterparts in its characteristics. A comparative analysis of currently with usage of the measurement systems based on electromagnetic current transformers has been carried out and the proposed system being developed and it can be used in high-voltage power control complexes and for modern microprocessor-based devices for relay protection and automation.

Keywords: analog-to-digital converter, coaxial, relay protection, LED, current transformer, digital signal, shunt.