

УДК 621.3

**Оптические трансформаторы тока**

Алехнович А. С., Алехнович Д. С.

Научный руководитель – д.т.н., профессор КОРОТКЕВИЧ М. А.

За последнее десятилетие термин «аналоговый» успел стать синонимом к слову «устаревший». С одной стороны, это звучит обидно и даже несправедливо по отношению к надёжной, испытанной годами эксплуатации технике. Однако, если речь заходит о повышении точности средств измерения и интеграции их в единую сеть мониторинга и контроля технологических процессов, то имеющегося у аналоговой аппаратуры потенциала становится явно недостаточно. Одно из решений – оптоволоконные трансформаторы, работа которых основана на эффекте Фарадея, эффекте, открытом в одно время с законом электромагнитной индукции, но ожидавшим, когда появятся технологии, способные его эффективно использовать.

Несмотря на столетний опыт в области создания и эксплуатации электромагнитных ТТ – основных первичных преобразователей для целей РЗА, полностью устранить недостатки, присущие этим трансформаторам, не удалось. Одним из существенных недостатков ТТ является насыщение магнитопровода во время КЗ, сопровождающихся аperiodической составляющей. Использование разомкнутых магнитопроводов снижает насыщение, но при прочих равных условиях снижает и точность как по току, так и по углу.

В настоящее время активно рекламируются оптические трансформаторы тока (ОТТ), работа которых основана на эффекте Фарадея [3]. Несмотря на то, что работы по созданию оптических трансформаторов ведутся более 40 лет [4], первые промышленные образцы, появившиеся в последние годы, слишком дорогие и могут найти применение лишь на высоком и сверхвысоком напряжении (220 кВ и более).

В основе действия оптического ТТ лежит эффект Фарадея магнитооптический эффект (рисунок 1), который заключается в том, что при распространении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света, зависящее от величины этого магнитного поля.

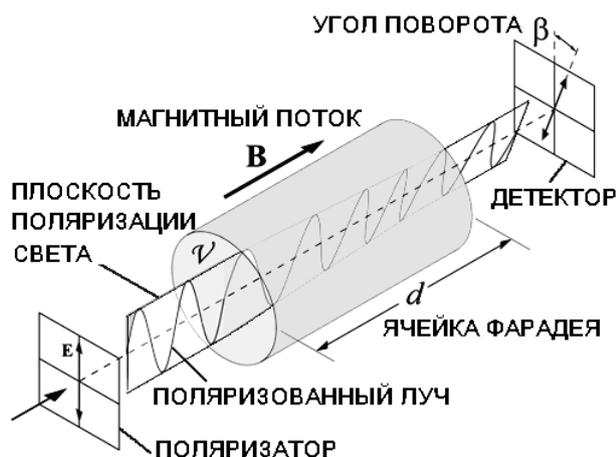


Рисунок 1 – Магнитооптический преобразователь на основе эффекта Фарадея

Чувствительный элемент ТТ установлен на полимерной изоляционной колонке, снабженной поддерживающим изолятором, обеспечивающим спуск гибкого световода на землю. Преобразователь 1 (рисунок 2) входного сигнала в два линейно поляризованных сигнала, которые поступают по оптоволокну, сохраняя поляризацию, на измерительную головку, выполнен на базе светоизлучающего диода. Круговой поляризатор 2 наверху

изоляционной колонки (опорного изолятора) преобразует два линейно поляризованных световых сигнала в сигналы с круговой поляризацией левого и правого вращения. Световые сигналы 3 многократно обходят проводник. Магнитное поле, создаваемое током, протекающим в высоковольтном проводнике, замедляет один сигнал и ускоряет другой (эффект Фарадея). Когда сигналы с круговой поляризацией проходят весь путь вокруг проводника, они отражаются зеркалом 4 и направляются в обратный путь. При этом, направление их поляризации теперь обратно первоначальному. На этом обратном пути эффект удваивается. После этого оба сигнала возвращаются обратно на круговой поляризатор, который снова преобразует их в линейно поляризованные световые пучки. Свет поступает обратно на оптоэлектронный блок внизу колонки по оптическому волокну 6. Разница в скорости распространения этих двух оптических сигналов обуславливает сдвиг по фазе между ними. Поскольку оба сигнала распространяются по идентичным путям, вибрация и изменение температуры воздействуют на них одинаково и поэтому не влияют на точность измерения тока.

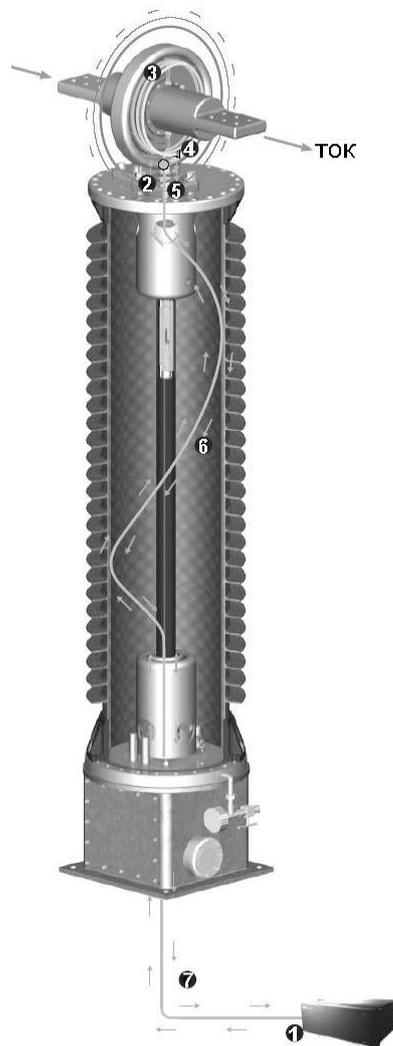


Рисунок 2 – Высоковольтный комбинированный измерительный трансформатор тока компании NxtPhase T&D

Преимущества ЦПС в сравнении с традиционной подстанцией приведены ниже в таблице 1.

Практический интерес также представляет измерительное преобразование тока на основе гальваномагнитных эффектов, используемых в датчиках магнитного поля, позволяющих измерять не только переменный, но и постоянный ток, а также переменный

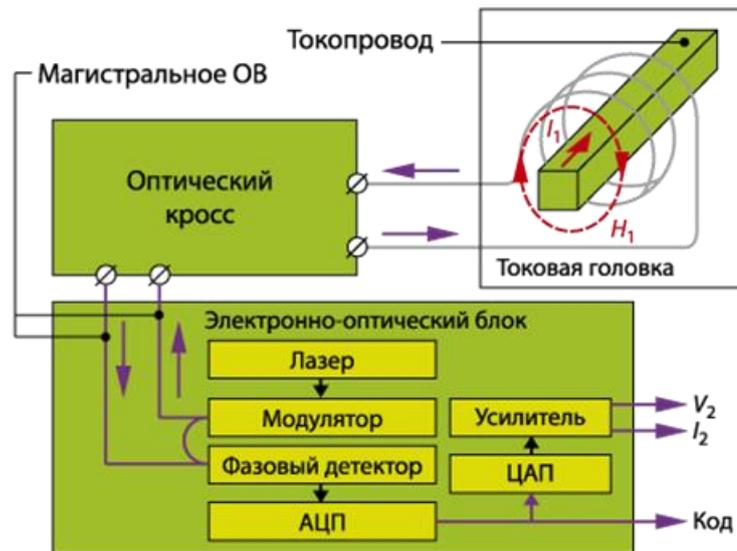
ток, сопровождающийся медленно затухающими аperiodическими составляющими. Измеряемый ток создает магнитное поле, на которое и реагирует датчик. К гальваномагнитным преобразователям относятся датчики Холла, магниторезисторы, магнитодиоды и магнитотранзисторы.

Таблица 1 – Сравнение особенностей традиционных и цифровых подстанций

Традиционная	Цифровая
Потери во вторичных цепях (для всех устройств разные)	Отсутствие потерь при передаче информации
Многokратные АЦ-преобразования (в каждом устройстве)	Однократное АЦ-преобразование (первичное измерение)
Несинхронность измерений	Синхронность измерений
Большое влияние ЭМ-эффектов	Отсутствие влияния ЭМ-эффектов
	Неограниченное тиражирование информации

Таким образом, актуален выбор наиболее перспективных видов первичных измерительных преобразователей тока.

Типичная схема оптического ТТ содержит чувствительный элемент в виде нескольких витков ОВ (оптоволокон), помещенных в жесткую защитную оболочку из немагнитного материала – токовую головку для ОТТ, и электронно-оптический блок (ЭОБ), соединяемый с чувствительным элементом через оптический кросс (рисунок 3).



$V_2$  – потенциальный выход;  $I_2$  – токовый выход; Код – выход АЦП

Рисунок 3 – Упрощенная структурная схема оптического ТТ

ЭОБ генерирует с помощью встроенного лазера и модулятора на своем оптическом выходе монохроматический циркулярно поляризованный световой сигнал, направляемый по поддерживающему поляризации ОВ на вход чувствительного элемента. В чувствительном элементе плоскость поляризации сигнала подвергается под воздействием магнитного поля  $H_1$  тока  $I_1$  соответствующему повороту на угол Фарадея, и с выхода чувствительного элемента световой сигнал поступает на оптический вход ЭОБ, где на фазовом детекторе из него формируется электрический измерительный сигнал.

Далее этот сигнал через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) поступает в виде цифрового кода определенной разрядности на дискретный интерфейсный выход ЭОБ и через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) на усилитель, где формируются нормированные

аналоговые выходные сигналы в виде напряжения или тока для выдачи на аналоговый интерфейс ЭОБ. Таким образом, измерительная информация может быть получена на выходе ЭОБ для дальнейшего использования.

В том случае, когда чувствительный элемент по технологическим требованиям, например на высоковольтных подстанциях, должен быть удален от ЭОБ, для подключения чувствительного элемента дополнительно используется магистральное ОВ, сохраняющее поляризацию, и кроссовый блок (кабельный бокс), подключающий его к ОВ чувствительного элемента.

Преимущества оптических ТТ:

- отсутствие дополнительной изоляционной среды (масло, элегаз и т. д.);
- отсутствие опасности размыкания вторичной обмотки под нагрузкой;
- возможность измерения постоянного и переменного тока;
- отсутствие феррорезонансов;
- возможность подключения неограниченного количества потребителей измерительной информации. Простота и гибкость масштабирования систем;
- низкие затраты на текущую эксплуатацию, отсутствие рисков возникновения перерывов электроснабжения потребителей;
- высокая точность измерений и обеспечение их единства для всех приборов-получателей данных;
- возможность измерения гармонических составляющих до 100 порядка;
- удобство монтажа (масса ТТ в однофазном исполнении на напряжение 245 кВ составляет 50 кг).

Ведущим производителем оптических ТТ является компания АВВ, выпускающие ТТ типа FOCS-FS Цифровой интерфейс FOCS-FS отвечает требованиям Международного стандарта «Коммуникационные сети и системы подстанций» IEC 61850, что позволяет обеспечить взаимодействие с оборудованием других производителей. ТТ FOCS-FS пригодны для современных измерительных устройств на подстанциях напряжением от 245 до 800 кВ.

Кроме индуктивных трансформаторов тока с масляной или элегазовой изоляцией, АВВ еще в 1990-х годах разработало оптические датчики тока, работающие на эффекте Фарадея, где свет используется для определения точной величины тока, создающего магнитное поле. В результате конструкция, независимая от магнитного насыщения, подходит для получения картины переходных процессов, токов КЗ, и переменного тока с постоянной составляющей.

FOCS-FS это трехфазная система датчиков, состоящая из:

- трех полых изоляторов, заполненных азотом при атмосферном давлении, на которых установлены датчики тока;
- одного шкафа, установленного на опорной конструкции центральной фазы и соединяющего по оптоволокну датчики тока и терминалы защит через оптический Ethernet кабель (стандарт IEC61850-9-2LE).

Оптоэлектронный преобразователь, расположенный в шкафу, выполняет следующие функции:

- посылает поляризованный свет к сенсору;
- получает ответный поляризованный свет от сенсора;
- сравнивает сдвиг фаз в поляризованном свете, пропорциональный магнитному полю и первичному току;
- преобразует полученный результат в оптический Ethernet IEC 61850 выход.

Требуемый уровень резервирования обеспечивается соответствующим количеством оптоэлектронных преобразователей используемых в системе.

По запросу возможна комплектация цифровыми преобразователями аналоговых сигналов от трансформаторов напряжения, синхронизирующими данные сигналы с цифровыми сигналами идущими от FOCS-FS и передающими оба сигнала в одном цифровом потоке по стандарту IEC61850-9-2 LE.

В связи с повсеместным внедрением технологии «Цифровая подстанция» классические электромагнитные трансформаторы тока постепенно уступают место более современным оптическим. Целью такой технической политики является повышение технологического и конструктивного уровней строительства объектов электроэнергетики. Данная технология на сегодняшний день актуальна для Республики Беларусь, т. к. на территории страны в конце 2014 года введена в эксплуатацию первая уникальная подстанция напряжением 110 кВ с применением «шины процесса» (один из ключевых компонентов системы РЗА при реализации технологии «цифровая подстанция») и началась реконструкция ПС 330 кВ «Могилев», в рамках которой будут применены прогрессивные технологии, уникальные для отечественной электроэнергетики: отказ от электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) за счет применения оптических ТТ, использование уникальных выключателей-разъединителей а также обеспечение полноценной реализации технологии «цифровая подстанция».

#### Литература

1. Цифровая подстанция // NR Electric Co., Ltd. – URL : <http://www.nrec.com/ru/category/Digital-Substation.html>.
2. Моржин, Ю. И. Цифровая подстанция – важный элемент интеллектуальной энергосистемы / Ю. И. Моржин. – URL : <http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/CPS – intellectual grid element.pdf>.
3. Гавричев, В. Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля : учебное пособие / В. Д. Гавричев, А. Л. Дмитриев. – СПб. : СПбНИУ ИТМО, 2013.
4. Афанасьев, В. В. Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель, И. М. Сирота, Б. С. Стогний. – Л. : Энергоатомиздат. 1989.