



Средства измерения тока в электрохимическом производстве – необходимость. В традиционных системах измерения силы постоянного тока до 500 кА применяются очень сложные преобразователи тока. Эти преобразователи, обычно построенные на эффекте Холла, оказываются тяжелыми и громоздкими. Приборы, используемые для измерения самых больших токов, могут весить до 2000 кг!

Хотя сегодняшние преобразователи точны и надежны, из-за их сложности требуются сложные и трудоемкие операции по монтажу и вводу в эксплуатацию. Для сведения к минимуму потенциальных ошибок

из-за асимметрии магнитных полей или перекрестных наводок от соседних проводников необходимо принимать особые меры.

Компания АББ на основе оптоволоконных технологий разработала датчик, который оказался настоящим прорывом в области измерения сильных постоянных токов. Этот современный оптоволоконный датчик тока обеспечивает превосходную точность, а его вес, габариты и сложность значительно меньше, чем у традиционных датчиков. Такие датчики кардинально меняют перспективы измерения сильных токов.

# Прорыв в области измерения сильных постоянных токов

Новый оптоволоконный датчик тока FOCS от АББ для электрохимических производств  
Клаус Бонерт  
Петер Гугенбах

Оптоволоконная техника внесла огромный вклад в увеличение пропускной способности всемирных телекоммуникационных сетей и скорости передачи данных в них. Однако очевидно, что телекоммуникации – это не единственная область применения этих технологий. Устройства на основе волоконной оптики можно сейчас обнаружить в самых разных сферах, включая измерительную технику.

Поскольку основные компоненты таких устройств по своей природе являются диэлектриками и практически не подвержены влиянию электромагнитных помех, оптоволоконные датчики идеально подходят для измерения электрических токов и высоких напряжений на электрических подстанциях вместо тяжелых традиционных измерительных трансформаторов.

Компания АББ считается одним из лидеров в разработке этого нового типа оптоволоконных датчиков. На протяжении многих лет компания постоянно развивала технологию в ходе работы с электроэнергетическими компаниями Европы и Северной Америки. Благодаря этому сотрудничеству компания имела возможность хорошо ознакомиться с потребностями своих клиентов.

Сфера применения оптоволоконных датчиков тока, тем не менее, не ограничивается лишь электроэнергетикой. Специалисты АББ убеждены, что оптические датчики тока окажутся очень привлекательными и для электрохимической промышленности.

В этой отрасли заказчикам для управления процессами необходимы высокоточные датчики постоянного тока (с погрешностью в преде-

лах 0,1%). В производстве алюминия, меди, марганца, цинка, стали и хлора требуются огромные объемы электроэнергии. Электролизные ванны для производства алюминия обычно питаются постоянным напряжением 1000 В и потребляют ток до нескольких сот килоампер. Чтобы получить такую мощность в виде постоянного тока от электросети переменного тока, необходимо объединять вместе большое количество выпрямителей.

Компания АББ считается одним из пионеров в области разработки оптоволоконных датчиков для измерения электрических токов и высоких напряжений на подстанциях.

При внедрении оптимизированных процессов предприятия могут экономить электроэнергию и контролировать фактический расход энергии, а значит, с большей точностью управлять процессом. Важность этого вопроса становится особенно очевидной, если учесть, что ошибка на 0,1% в измерении тока 500 кА означает ошибку на 0,5 МВт – этого достаточно, чтобы снабжать дорогой электроэнергией 1000 домов.

### Преобразователи тока на основе эффекта Холла

Традиционно измерение тока в электрохимической промышленности производилось с использованием эффекта Холла<sup>1)</sup>. Высокоточный

преобразователь постоянного тока на эффекте Холла с компенсацией магнитного поля (рис. 1) имеет магнитный сердечник, охватывающий токоведущую шину. Для измерения магнитного поля в зазорах сердечника установлено несколько датчиков Холла. Сигналы от датчиков Холла передаются на усилители тока с высоким коэффициентом усиления, выходной сигнал которых подается на обмотки, окружающие сердечник. Эти катушки генерируют магнитное поле, компенсирующее напряженность поля, созданного первичным током. Сумма вторичных токов, таким образом, пропорциональна первичному.

Преобразователи такого типа, хотя и надежны, очень сложны, а их вес может достигать 2000 кг. При их установке также необходимы сложные процедуры настройки для исключения влияния асимметричного поля и перекрестных наводок с расположенных рядом шин.

Для решения этих и других проблем компания АББ разработала новый оптоволоконный датчик тока (FOCS, Fiber Optic Current Sensor).

### Сравнение датчиков на эффекте Холла и FOCS

По сравнению с преобразователем постоянного тока на эффекте Холла, датчики FOCS от АББ не только обладают лучшими характеристиками и большей универсальностью, но при этом имеют

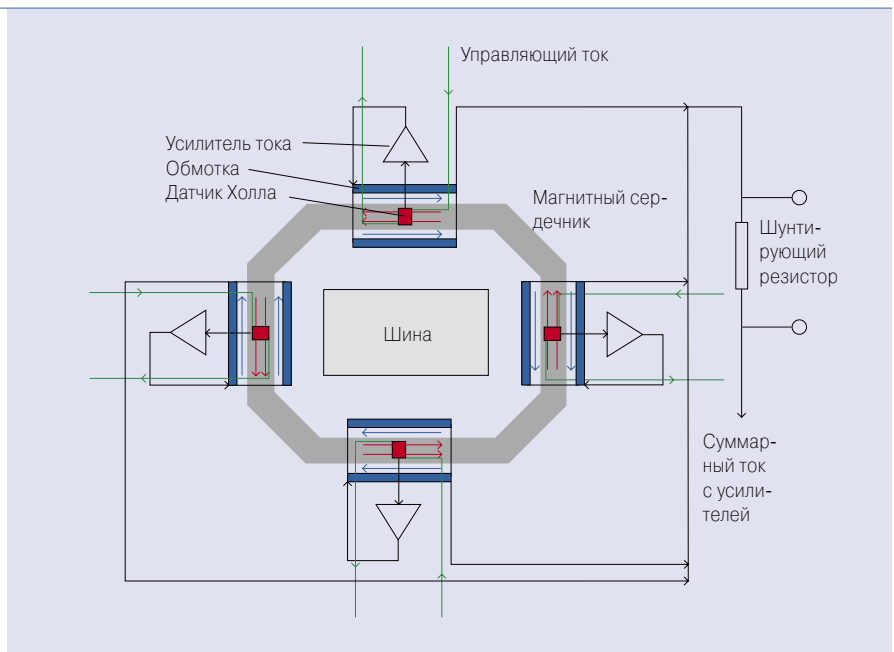
1) Эффект Холла: в присутствии магнитного поля положительные и отрицательные заряды, движущиеся в полупроводнике, отклоняются в противоположных направлениях (под действием силы Лоренца). Разделение зарядов приводит к образованию э.д.с. (т. н. холловской э.д.с.), по величине пропорциональной напряженности магнитного поля.

#### ■ Преобразователь тока на основе эффекта Холла

Два традиционных преобразователя постоянного тока на эффекте Холла на 400 кА



Преобразователь тока на эффекте Холла с компенсацией магнитного потока (принцип действия)



меньшие габариты и вес. Помимо этого, установка и ввод в эксплуатацию упрощаются до предела. В частности, сложные картины магнитных полей от сильных токов соседних шин не оказывают влияния на датчик. Это обеспечивает дополнительную свободу выбора места расположения датчика.

В самом деле, датчики этого типа идеально удовлетворяют требованиям, предъявляемым заказчиками к таким изделиям:

- продолжительность установки и ввода в эксплуатацию измеряется часами, а не днями,
- резко снижается сложность системы,
- устройства не подвержены воздействию магнитных полей сложных конфигураций и перекрестным наводкам от соседних шин,
- повышается точность (до 10-кратного уменьшения погрешности),
- номинальная погрешность соблюдается в широком диапазоне температур,
- стабильность показаний превосходно сохраняется в долгосрочном периоде,
- широкая полоса пропускания обеспечивает быструю реакцию на пульсации и нестационарные токи,
- датчики обеспечивают измерение постоянных токов как в одном, так и в двух направлениях при силе тока до  $\pm 500$  кА (допускается 20% превышения),
- потребление энергии сведено к минимуму.

### Оптоволоконный датчик тока FOCS

Новинка от АББ – оптоволоконный датчик тока FOCS (рис. 2) для сильных постоянных токов – это «побочный продукт» разработки другого датчика, предназначенного для высоковольтных подстанций. В электрохимической промышленности сечение токоведущих шин значительно больше, чем у шин, используемых в высоковольтных системах. С этим были связаны некоторые

новые трудности при разработке подходящей головки датчика.

В датчике применяется эффект Фарадея (см. вставку на стр. 9). Среди основных компонентов датчика, как видно из рис. 3, оптоэлектронный модуль и чувствительное оптоволокно с одним выходом, идущее вокруг проводника тока [1].

### В новом оптоволоконном датчике тока (FOCS) для сильных постоянных токов применяется эффект Фарадея.

В состав оптоэлектронного модуля входит полупроводниковый источник света, цепь детектирования и цифровой сигнальный процессор. Две световые волны с ортогональной линейной поляризацией от источника света посредством промежуточного световода подаются на измерительное волокно. Оптоволоконный фазозадерживающий модуль преобразует линейные волны в волны с левой и правой круговой поляризацией на входе в измерительный световод.

В магнитном поле тока эти световые волны проходят по измерительному световоду с разной скоростью, что приводит, в свою очередь, к разности оптического пути или, что эквивалентно, разности оптических фаз  $\Delta\phi$ . Световые волны отражаются в конце световода и возвращаются по своим оптическим путям в оптоэлектронный модуль. Две полученных световых волны затем интерферируют в цепи детектирования.

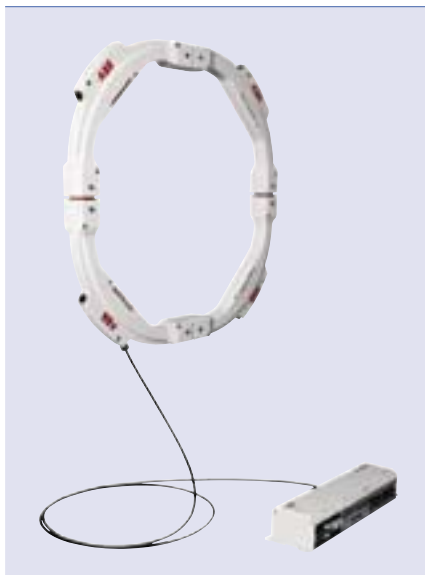
Сигнальный процессор преобразует разность оптических фаз в цифровой сигнал.

Суммарная разность фаз пропорциональна линейному интегралу магнитного поля по замкнутому контуру, описанному измерительным волокном, и является, таким образом, непосредственной мерой электрического тока. Сигнал не зависит от конкретной картины распределения магнитного поля при условии, что количество витков измерительного волокна является целым числом. (При больших токах, характерных для электрохимической промышленности, одного витка оптоволоконка уже достаточно для измерения тока). Система оказывается нечувствительна и к перекрестным наводкам от токов, проходящих вне витка. Ни диаметр, ни форма витка оптоволоконка не имеют значения.

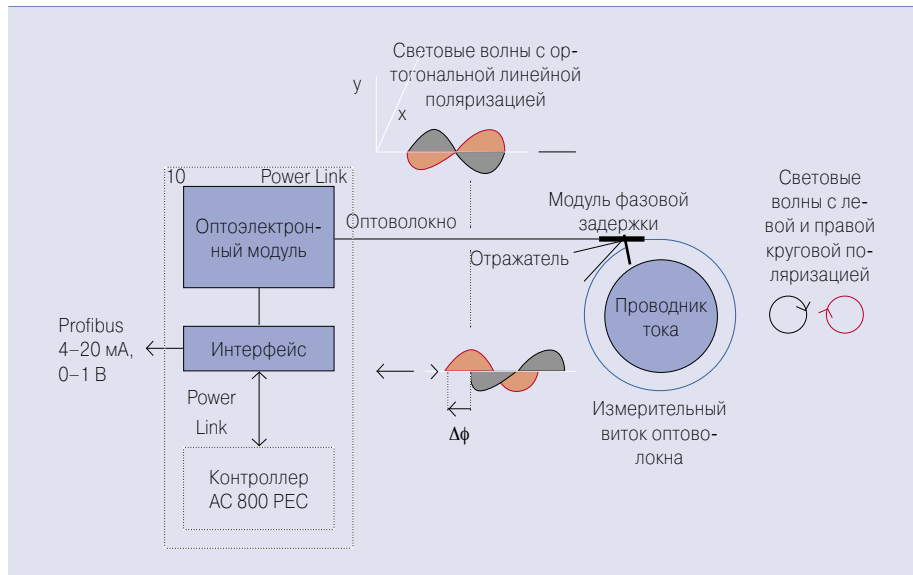
Разность времен прохождения в двух направлениях для световых волн с левой и правой круговой поляризацией составляет от  $10^{-21}$  до  $10^{-15}$  с в зависимости от силы тока. Непосредственное измерение таких величин нецелесообразно, поэтому с высокой точностью измеряется разность оптических путей или фаз, которая является долей длины волны света. Для этого волны подвергаются интерференции, т.е. налагают друг на друга. В зависимости от разности фаз волн, последние интерферируют с усилением или ослаблением. Наименьшая разность пути, которую удается измерить, в 100 раз меньше диаметра атома водорода и соответствует току 0,25 А (при измерении в течение одной секунды на одном витке). В настоящее время максимальный измеряемый ток, при котором разность путей равна целой длине волны, составляет  $\pm 600$  кА ( $\pm 500$  кА + 20% запаса).

Одним из преимуществ использования измерительного витка в режиме с отражением является то, что выходной сигнал датчика не зависит от механических воздействий и вибраций. В режиме с отражением в конце витка световые волны

2 Новый оптоволоконный датчик от АББ



3 Схематичное изображение оптоволоконного датчика АББ для измерения сильных постоянных токов.



меняют состояние поляризации на обратное. В результате противоположные сдвиги фаз, вызванные вибрациями, взаимно компенсируются, а совпадающие по направлению магнитооптические сдвиги по пути волн удваиваются.

#### Головка датчика

Для обеспечения максимальной точности оптоволоконного датчика тока крайне важна укладка измерительного волокна без механических напряжений. Любое напряжение нарушит ход световых волн с круговой поляризацией и, соответственно, измеренную разность фаз. Недопустимо даже возникновение напряжений, связанных с тепловым сокращением защитного покрытия оптоволоконка при низкой температуре.

В связи с этим в АББ была разработана особая технология укладки измерительного волокна в виде гибкой «измерительной ленты» (рис. 4). Этот

метод обеспечивает превосходную точность (погрешность в пределах 0,1%) в диапазоне температур от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а гибкость ленты упрощает транспортировку и установку. Температурная зависимость эффекта Фарадея (в диапазоне  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  отклонение 0,7%) компенсируется в самом приборе противоположным вкладом фазозадерживающего модуля.

Еще одним преимуществом является то, что калибровка датчика, выполненная на заводе, не нарушается при транспортировке и погрузочно-разгрузочных работах, за счет чего на месте после монтажа датчика нет необходимости в какой-либо повторной калибровке.

«Измерительная лента» с измерительным волокном располагается в модульном корпусе головки датчика, состоящей из отдельных сегментов.

Сегменты изготовлены из эпоксидной смолы, армированной волокнистым материалом. Такой корпус можно с легкостью адаптировать под шины различного сечения, меняя длину прямых сегментов (рис. 5), а установку датчика можно вести без замыкания токоведущих шин (рис. 6).

Измерительное волокно «упаковано» в гибкую измерительную ленту, которая упрощает транспортировку и монтаж, а также обеспечивает превосходную точность в широком диапазоне температур.

#### Оптоэлектронный модуль

Технология изготовления оптоэлектронного модуля та же, что и применяемая при создании оптоволоконных гироскопов. Оптические гироскопы заменили свои механические аналоги во многих высокоточных навигационных системах, они уверенно подтвердили свою пригодность для использования в ответственных комплексах в воздухе, на суше и на море.

Встроенный цифровой сигнальный процессор обеспечивает высокую точность и превосходную долговременную стабильность показаний. Кроме того, схема измерения с замкнутым контуром компенсирует сдвиг оптической фазы, вызванный током, в результате чего обеспечивается идеальная линейность во всем динамическом диапазоне.

Оптоэлектронный модуль встроен в контроллер для управления силовыми установками АББ марки AC 800PEC (рис. 7), который может быть установлен на расстоянии до 70 м от головки датчика. Датчик может поставляться как в составе силовых преобразователей от АББ, так и в качестве отдельного устройства. С выхода оптоэлектронного модуля через синхронный интерфейс передается цифровой сигнал с разрешением 24 бит. Он поступает на контроллер AC 800 PEC по высокоскоростному каналу PowerLINK от АББ.

Для автономных систем цифровой сигнал также выдается по протоколу промышленной шины PROFIBUS DP SLAVE. Более того, предусмотрен выход сигналов  $0(4)\text{--}20\text{ мА}$  и  $0(0,2)\text{--}1\text{ В}$ . По запросу заказчика возможна реализация цифровой обработки сигналов, например, регистрации изменений параметров во времени или гармонического анализа. Работоспособность устройства контролируется встроенными блоками самодиагностики, передающими данные на главный контроллер.

Множество инноваций, примененных в датчике FOCS от АББ, отражено более чем в десятке заявленных или уже выданных патентов.

#### Эффект Фарадея

Оптические методы измерения тока обычно основаны на эффекте Фарадея, названном так в честь английского ученого Майкла Фарадея (1791–1867). Эффект Фарадея или магнитооптический эффект – это явление вращения плоскости поляризации линейно поляризованной световой волны, проходящей через среду, например, стеклянный блок, под влиянием магнитного поля. Линейная световая волна может быть также представлена парой совместно распространяющихся световых волн с левой и правой круговой поляризацией. В магнитном поле две волны с круговой поляризацией распространяются с разной скоростью, и тем самым между ними накапливается разность фаз, приводящая к вращению результирующей волны с линейной поляризацией на угол  $\varphi_F$ . В датчике тока свет распространяется по замкнутому контуру, описанному волокном вокруг проводника. В режиме отражения разность фаз описывается следующим выражением:

$$\Delta\varphi_F = 4VN \int \vec{H} \cdot d\vec{s} = 4VN I$$

где:

$V$  – постоянная Верде, зависящая от материала  
 $N$  – степень проявления эффекта Фарадея,  
 $N$  – количество витков, которые свет описывает вокруг проводника,  
 $I$  – сила тока.

Из-за того что путь света замкнут, сигнал зависит только от силы тока и количества витков оптоволоконка, и не зависит от геометрических параметров, таких как диаметр или форма витка.

4 Сегмент корпуса головки датчика. Измерительное волокно встроено в гибкую и прочную измерительную ленту

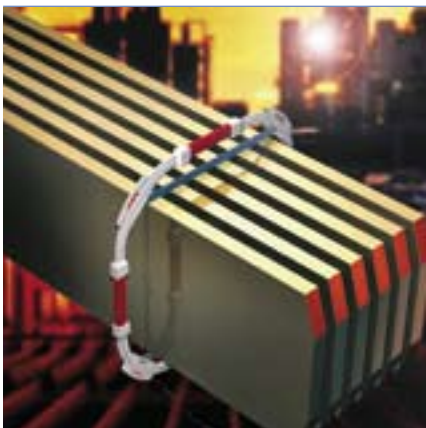


5 Модульный корпус головки датчика легко подгоняется под проводники различного поперечного сечения





6 Корпус головки датчика смонтирован на токоведущих шинах



### Преимущества и характеристики изделия

В сравнении с традиционными преобразователями постоянного тока на эффекте Холла, оптоволоконный датчик обладает рядом преимуществ для заказчиков, в том числе:

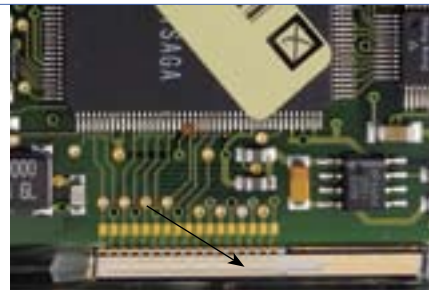
- *Установка датчика производится значительно проще и быстрее.*
- *Нет необходимости в центровке измерительной головки в магнитном поле.* Благодаря этому заказчик получает значительную свободу при установке датчика.
- *Ограничения по месту расположения измерительных головок незначительны.* Легкость монтажа датчика позволяет очень быстро осуществить на предприятии замену действующей измерительной системы.
- В отличие от традиционных преобразователей тока, ошибки, связанные с асимметричным распределением поля и магнитными помехами, компенсируются благодаря самому принципу действия прибора.
- *Головка датчика была существенно упрощена.* Это, в свою очередь, снижает вероятность отказов.
- *Датчик может работать с двунаправленными магнитными полями.* Местное обращение вектора магнитного поля, вызванное сильными токами, протекающими по соседним проводникам, не приводит к погрешностям в измерениях. Более того, датчик сообщает об обратных токах.
- *Широкая полоса пропускания* (частота дискретизации 4 кГц) позволяет восстанавливать переменные составляющие тока, такие как пульсации и кратковременные нестационарные токи, а также обеспечивает очень малое время реагирования системы управления ТП и делает возможным проведение гармонического анализа. Таким образом, датчик открывает новые возможности по сбору данных на сильноточных технологических линиях на постоянном токе.
- *Головка датчика полностью состоит из диэлектрических материалов, а значит,*

7 Контроллер силового преобразователя AC 800 PEC

а) В состав контроллера силового преобразователя AC 800 PEC входит оптоэлектронный модуль датчика. Этот модуль, построенный по технологии изготовления оптических гироскопов, измеряет магнитооптический сдвиг фазы световой волны.



б) Встроенный оптический фазовый модулятор на ниобате лития (показан стрелкой) – основной компонент детектирующей цепи.



*совершенно безопасна.* Электронные схемы обработки сигналов полностью гальванически развязаны от шин.

- *Потребление энергии оптическим датчиком пренебрежимо мало* по сравнению с обычными датчиками, которые потребляют до нескольких киловатт.

Основные характеристики таковы:

- датчики позволяют измерять токи как в одном, так и в двух направлениях при силе тока до  $\pm 500$  кА (допускается превышение на 100 кА),
- погрешность датчика – в пределах  $\pm 0,1\%$  при токах 1 до 120% от максимального,
- частота дискретизации: 4 кГц,
- диапазон рабочих температур головки датчика: от  $-40$  до  $85$  °С, для электроники контроллера: от  $-20$  до  $55$  °С (от 0 до  $65$  °С с модулем PROFIBUS).

### Перспективы применения

Потенциальными сферами применения оптоволоконных датчиков тока АББ являются измерение, управление и защита на высоковольтных подстанциях. За счет небольших размеров и веса датчики могут быть с легкостью встроены в существующее оборудование, такое как автоматические выключатели или вводные изоляторы, с экономией пространства и малыми затратами на монтаж.

Новый датчик также может заинтересовать эксплуатантов систем постоянного тока высокого напряжения (HVDC), применяемых для передачи электроэнергии на большие расстояния. Еще одна многообещающая область применения – железные дороги. Компания АББ уже произвела установку нескольких десятков датчиков, построенных на основе опытной модификации, в защитных схемах подстанций, принадлежащих железным дорогам Италии.

Новый датчик FOCS – это настоящий квантовый скачок в технике измерения тока.

**Клаус Бонерт**

ABB Switzerland Ltd., Corporate Research  
klaus.bohnert@ch.abb.com

**Петер Гугенбах**

ABB Switzerland Ltd., High Power Rectifiers  
peter.guggenbach@ch.abb.com

### Литература

- [1] K. Bohnert, G. Gabus, J. Nehring, H. Brändle: "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor". Journal of Lightwave Technology 20 (2002) 2, 267-276.