



Мы продолжаем серию публикаций, стартовавших в журнале «Цифровая подстанция» №7 и посвященных мифам и «белым пятнам» вокруг темы оптоволоконных трансформаторов. И если первая часть серии была посвящена особенностям их конструкции и эксплуатации, то в данной публикации мы предлагаем вам подробнее узнать о физическом принципе работы оборудования и некоторых интересных технических особенностях. Найдите первую часть материала вы можете в прошлом выпуске нашего журнала, а также на сайте digitalsubstation.com, просто введя в поиске фразу «вся правда об оптоволоконных трансформаторах».

ВСЯ ПРАВДА ОБ ОПТОВОЛОКОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

ОТВЕЧАЕМ НА ВОПРОСЫ И РАЗВЕИВАЕМ МИФЫ. ЧАСТЬ 2

1. Каков физический принцип работы датчика тока (чувствительного элемента)? Рассмотрим на примере с жесткой головой и гибкой петлей и определим, в чем разница.

В основе измерения электрического тока нашим прибором лежит применение эффекта Фарадея в кварцевом световоде.

На рис. 1 можно увидеть, как используется эффект Фарадея для измерения электрического тока. Две световые

волны с правой и левой круговыми поляризациями (серая и зеленая) вводятся в многовитковый волоконный контур, который охватывает проводник с током. Если тока в проводе нет, световые волны распространяются с одинаковой скоростью и на выход приходят с нулевой относительной разностью фаз. При наличии электрического тока в проводнике световод оказывается в продольном магнитном поле протекающего тока. При этом в световоде наводит-

ся циркулярное двулучепреломление и скорость распространения световых волн по контуру становится разной. Соответственно между волнами возникает временная задержка и относительный фазовый сдвиг Φ . Если световод имеет однородную магнитооптическую чувствительность по длине и волоконный контур замкнут (начало и конец чувствительного волокна в контуре совпадают), то связь фазового сдвига и тока выражается простой формулой $\Phi = 2VNI$, где V , N , I соответственно магнитооптическая постоянная кварца, число витков, измеряемый ток. Таким образом, измерив относительный фазовый сдвиг между световыми волнами, мы получим информацию о величине тока. Фазовый сдвиг измеряется с помощью низкокогерентного волоконного интерферометра, входящего в состав нашего прибора. С точки зрения физического принципа действия разницы между жестким чувствительным контуром (жесткой головой) и гибкой петлей нет. Как жесткая голова, так и гибкая петля представляют собой замкнутый волоконный контур (одно- или многovitковый), в который вводятся две световые волны с ортогональными циркулярными поляризациями. Отличие можно увидеть в количестве используемых витков и в нюансах установки на токовую шину. Так, количество волоконных витков чувствительного контура определяется величиной и диапазоном измеряемого электрического тока и классом точности трансформаторов тока электронных оптических (ТТЭО). При этом на практике жесткая голова может иметь от 1 до 100 волоконных витков, а гибкая петля – от 1 до 20 витков.

2. Как формируются на входе чувствительного волоконного контура световые волны с круговыми поляризациями? Что представляет собой низкокогерентный волоконный интерферометр?

Чтобы обеспечить точность измерения параметров электрического тока на уровне 0,2% и «выше» фазовый сдвиг между световыми волнами, индуцированный магнитным полем измеряемого тока в волоконном контуре, необходима погрешность измерений не более нескольких микро радиан в полосе 1 Гц. Это очень высокая точность, и достигается она методом низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии, два отличительных свойства которой — использование низкокогерентного оптического излучения (длина когерентности составляет несколько десятков длин волн) и применение взаимного волоконного интерферометра с близкой к нулю разностью длин оптических путей для рабочих световых волн. Отсюда и возник термин «низкокогерентный волоконный интерферометр». Схема такого устройства показана на рис. 2.

На преобразователь поляризации (7) приходят сформированные волоконным поляризатором (4) две световые волны с ортогональными линейными поляризациями.

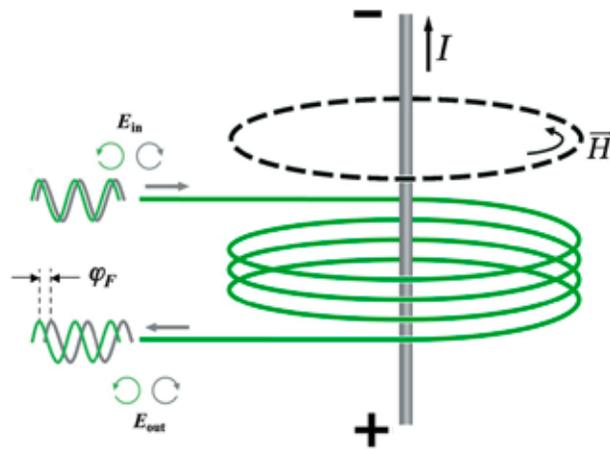
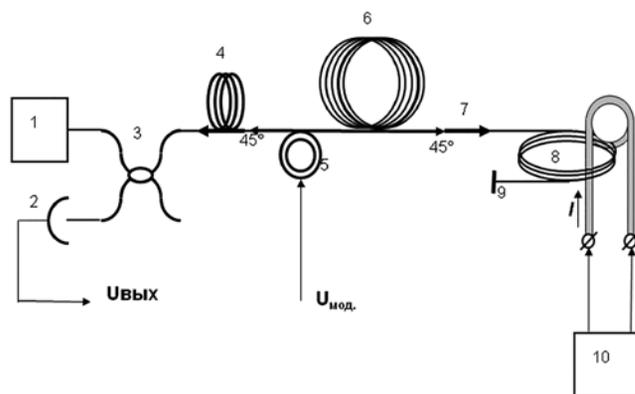


Рис. 1. Физический принцип измерения тока.

С помощью преобразователя поляризации (7) на входе волоконного контура (8) формируются две световые волны с правой и левой круговыми поляризациями, которые, пройдя через чувствительный волоконный контур, зеркально отражаются на его конце (зеркале, 9) и затем проходят путь в обратном направлении. При зеркальном отражении круговые поляризации преобразуются в ортогональные (левая в правую и наоборот), что позволяет скомпенсировать все паразитные взаимные воздействия в чувствительном волоконном контуре, способные повлиять на точность измерения фазового сдвига, обусловленного магнитным полем электрического тока. Аналогичным образом минимизируются паразитные эффекты в оптической части интерферометра от поляризатора (4), где волны интерферируют, до преобразователя поляризации (7) — отличие лишь в том, что здесь при обратном распространении в ортогонально поляризо-



1. Источник низкокогерентного излучения.
2. Фотоприемник.
3. Волоконный ответвитель.
4. Волоконный поляризатор.
5. Пьезоэлектрический волоконный модулятор.
6. Волоконная линия задержки.
7. Волоконный преобразователь поляризации.
8. Магниточувствительный многovitковый волоконный контур.
9. Зеркало.
10. Токовая шина.

Рис. 2. Низкокогерентный волоконный интерферометр.

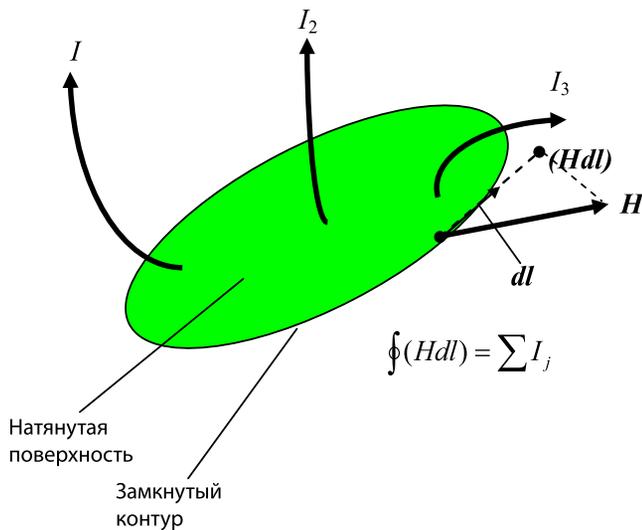


Рис. 3. Графическое пояснение теоремы о циркуляции.

ванные волны преобразуются линейно поляризованные волны. В результате разница оптических путей рабочих волн интерферометра определяется только невзаимным фазовым сдвигом Фарадея, обусловленным измеряемым током, что и обеспечивает требуемую высокую точность измерений.

3. Почему измерительный контур измеряет ток только внутри самого контура и не чувствует внешние поля (в том числе поле Земли) и почему позиционирование токовой шины относительно измерительного контура не влияет на точность измерений?

Свойства нашего контура (нечувствительность к внешним полям, включая поле Земли, и отсутствие влияния позиционирования шины внутри измерительного контура на точность измерений) определяются фундаментальным физическим законом природы, выражаемым одним из уравнений Максвелла, а именно *Теоремой о циркуляции вектора напряженности магнитного поля* по произвольному замкнутому контуру. Суть в следующем. В исходном виде выражение для относительного фазового сдвига между рабочими световыми волнами, наводимого магнитным полем измеряемого тока, выглядит так:

$$\Delta\varphi = 2VN\oint(\vec{H} \cdot d\vec{l}) \quad (1)$$

где V – магнитооптическая постоянная,
 N – число витков,
 $\oint(\vec{H} \cdot d\vec{l})$ – циркуляция вектора напряженности магнитного поля (возбуждаемого измеряемым током) по замкнутому контуру.

Теорема о циркуляции гласит следующее: циркуляция вектора магнитного поля H (возбуждаемого стационарными токами) по произвольному замкнутому контуру (замкнутость имеет ключевое значение) равна

сумме тех токов I_j , которые пересекают поверхность, натянутую на этот контур (рис. 3):

$$\oint(\vec{H} \cdot d\vec{l}) = \sum I_j \quad (2)$$

Эта теорема носит абсолютный характер, то есть если ток пересекает поверхность, натянутую на контур, он делает вклад в циркуляцию (при этом неважно, как расположен токопровод внутри контура). Контур чувствует ток одинаково независимо от положения шины внутри контура.

Если ток не пересекает поверхность, натянутую на контур, то циркуляция равна нулю и $\Delta\varphi$ в формуле (1) равна нулю, следовательно, контур не чувствует ток шины, расположенной снаружи контура. Внешние магнитные поля можно смоделировать внешними токами, не пересекающими поверхность, натянутую на контур. Чувствительность к таким полям нулевая. Вклад в сигнал в этом случае нуль. Магнитное поле Земли – аналогично (магнитное поле Земли создается токами в ядре Земли, которые, естественно, не пересекают поверхность, натянутую на волоконный контур).

Если геометрия замкнутого контура изменяется, например гибкая петля деформируется, это никак не влияет на величину циркуляции, при условии что число и сила токов, пересекающих поверхность, натянутую на этот контур, остается неизменной.

Циркуляция – это интегральная величина, не зависящая от способа, которым создается замкнутый контур. Она вычисляется в виде суммы проекций магнитного поля в точке, где находится элемент $d\vec{l}$, умноженных на длину $|dl|$. Когда деформируется замкнутый контур, магнитные поля в каждой точке могут измениться, но интегральная величина – циркуляция магнитного поля – остается неизменной.

Отсюда выводы, дающие ответы на вопросы:

- Сигнал, измеряемый датчиком тока, пропорционален сумме токов, пересекающих поверхность, натянутую на контур. Все геометрические характеристики остаются в циркуляции магнитного поля.
- Внешние магнитные поля можно смоделировать внешними токами, не пересекающими поверхность, натянутую на контур. Чувствительность к таким токам нулевая. Смоделировав магнитное поле Земли также внешним током, аналогично получим нулевую чувствительность к магнитному полю Земли.
- Перемещение токовой шины в пределах контура не меняет условий теоремы о циркуляции и, соответственно, не влияет на точность измерений: один и тот же ток по-прежнему пересекает ту же самую поверхность, натянутую на контур. Напряженность полей в месте расположения элементов $d\vec{l}$, вообще говоря, меняется при смещении шины, однако циркуляция как интеграл остается неизменной.

4. В чем заключается свойство замыкания оптического контура (т.е. совмещение меток) и как оно может быть физически объяснено? В чем суть замыкания и что произойдет, если не совместить метки друг с другом, например на 10 см? Как близко друг к другу должны быть совмещаемые волокна в области меток, при условии что метки совмещены в плоскости, а витки отстоят друг от друга на 10 см?

Под замкнутым волоконным контуром подразумевается полное совмещение начала и конца чувствительного *strip*-волокна по всем трем координатам (т.е. ось в ось). По двум координатам принципиальных ограничений на совмещение в наших контурах нет. По третьей координате пределом является диаметр волокна (250 мкм) или кабеля (1 см). В этом случае погрешность замыкания можно оценить величиной $d_{\text{вол}}/L_{\text{конт}}$ (жесткая голова) или $D_{\text{каб}}/L_{\text{конт}}$ (гибкая петля), где

$d_{\text{вол}}$ – это диаметр волокна в защитной оболочке,

$D_{\text{каб}}$ – диаметр кабеля гибкой петли,

$L_{\text{конт}}$ – длина контура.

В случае жесткой головы для $L_{\text{конт}} = 100$ м, $d_{\text{вол}} = 250$ мкм погрешность замыкания $2,5 \times 10^{-6}$. Эта величина может быть использована для оценки остаточного влияния позиционирования токовой шины внутри контура жесткой головы на точность измерения. В нашем случае это составит для фиксированной температуры $2,5 \times 10^{-6}$ от величины измеряемого тока. В диапазоне рабочих температур 100 °С при длине контура 100 м зазор изменится на 1 см. Остаточное влияние позиционирования шины возрастет до 10^{-4} от измеряемого тока. Эта величина небольшая (0,01%), т.е. уровень хорошего эталонного трансформатора. Вклад от внешних токов будет составлять 10^{-4} от величины их магнитных полей в области контура. Используя формулу для гибкой петли, можно увидеть, что рассовмещение на 10 см по одной координате друг от друга дает погрешность замыкания 10^{-2} (при полной длине петли 10 м). Это может дать изменение показаний измерения тока до 1% при позиционировании шины внутри контура. Понятно, что это недопустимо. Желательное минимально приемлемое рассовмещение 10^{-3} от длины гибкой петли и $\leq 10^{-4}$ для жесткого измерительного контура.

В реальности замыкание чувствительного волоконного контура происходит путем совмещения волоконной фазовой пластинки, расположенной на входе чувствительного волокна, и зеркала, расположенного на другом конце того же чувствительного волокна. В случае жесткой головы такое совмещение делается при сборке на производстве один раз. Принимаются меры, чтобы из-за механических воздействий замкнутость контура не нарушалась. В случае гибкой петли замыкание контура требуется при каждом новом монтаже петли на объекте.

При этом критерием замкнутости является совмещение меток, нанесенных на внешней стороне волоконного кабеля петли. Совмещение меток фиксируется специальным, очень надежным замком.

5. В чем заключается физическая сущность замыкания оптического контура? Почему именно при совмещении меток пропадает влияние токов с внешней стороны волокна и остается чувствительность к токам, которые находятся внутри замкнутого оптического контура?

Строгий ответ на данные вопросы для замкнутого контура произвольной формы дает одно из уравнений Максвелла (теорема о циркуляции вектора магнитного поля H , возбуждаемого стационарными токами). Можно дать качественное пояснение на примере простого кругового контура.

Разность фаз между волнами правой и левой циркулярной поляризации (сдвиг Фарадея) при прохождении волнами элементарного направленного участка световода (элемента) под воздействием магнитного поля тока определяется скалярным произведением вектора магнитного поля, создаваемого током, на направление этого волоконного элемента. Отсюда знак сдвига Фарадея определяется проекцией вектора магнитного поля, создаваемого током, на направление этого волоконного элемента. Замкнутый круглый контур можно представить в виде суммы подобных направленных элементов, при этом если шина находится внутри контура, то в каждый конкретный момент времени проекция вектора магнитного поля, создаваемого током в шине, на направленный элемент, имеет один и тот же знак для каждого элемента контура. Следовательно, и знак фазового сдвига Фарадея для любого элемента контура один и тот же. Сдвиг Фарадея по всему контуру будет равен просто арифметической сумме элементарных сдвигов Фарадея (ток чувствуется внутри контура).

Для токовой шины вне контура ситуация другая. Для половины элементов, входящих в контур, проекция вектора магнитного поля внешнего тока на элемент оказывается отрицательной, а для другой половины элементов – положительной. Следовательно, одна половина сдвигов Фарадея будет иметь отрицательный знак, а другая половина – положительный. В целом по контуру суммарный сдвиг при этом будет равен алгебраической сумме элементарных сдвигов, половина из которых имеет знак «плюс», а половина «минус». Круговой контур можно так поделить на элементы, что противоположные по знаку элементарные сдвиги при этом будут равны по модулю. В результате все положительные сдвиги компенсируются отрицательными (внешний ток не чувствуется замкнутым контуром). Если контур не полностью замкнут, нулевой баланс нарушается и контур чувствует остаток внешнего тока ●