

УДК 621.38

**ЗАКРЫТАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ ТОКА**

И.К. Мешковский, В.Е. Стригалева, С.А. Тараканов

Рассматривается способ увеличения точности волоконно-оптического интерферометрического датчика тока в большом диапазоне измеряемых токов путем использования закрытой схемы обработки сигнала, а также способ контроля работы модулятора путем введения второй обратной связи в схеме обработки.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик тока, волоконная интерференционная схема, модулятор двулучепреломления, закрытая схема обработки сигнала.

Введение

В настоящее время эффект Фарадея является наиболее удобным для использования в волоконно-оптическом датчике тока (ВОДТ). В датчике такого типа информацию о силе тока несет свет, который проходит волоконно-оптический контур, охватывающий контролируемый проводник. Такое устройство обеспечивает ВОДТ высокую точность, электроизолированность, малые массогабаритные показатели, а также удобство

установки и эксплуатации. Задачей исследования явилось повышение точности и расширение динамического диапазона ВОДТ.

Интерференционный ВОДТ по схеме с обратным отражением

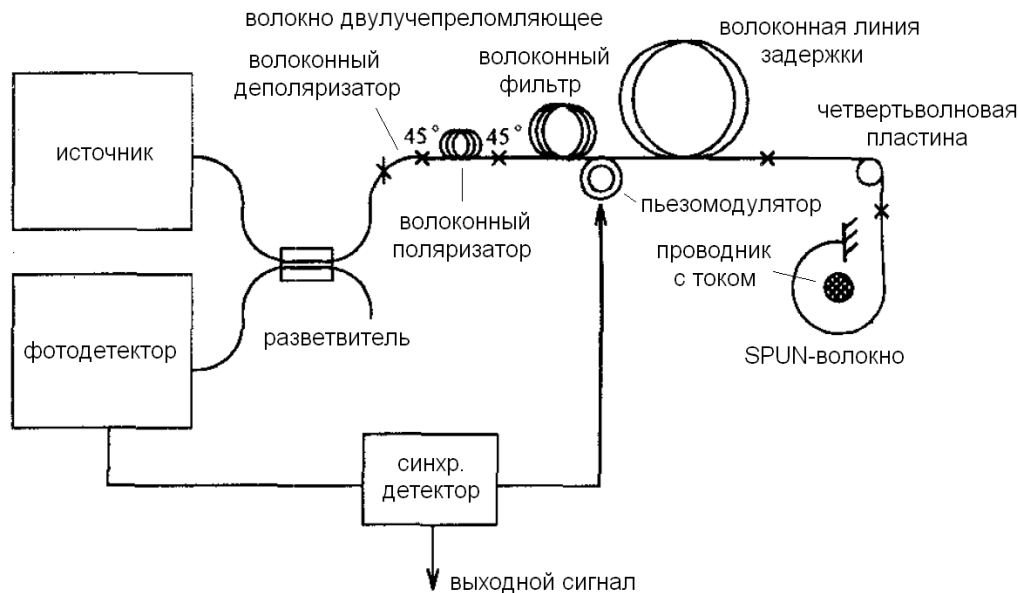


Рис. 1. Конфигурация ВОДТ по схеме с обратным отражением

Рассмотрим наиболее перспективную конфигурацию ВОДТ, построенную на основе волоконного интерферометра с обратным отражением (рис. 1) [1–4]. Разница фаз интерферирующих волн $\Delta\Phi_\phi$ в таком датчике прямо пропорциональна протекающему току I :

$$\Delta\Phi_\phi = 4VNI,$$

где V – постоянная Верде, N – количество витков волокна вокруг проводника. Эта разница фаз измеряется следующим образом. Свет от источника излучения проходит через деполаризатор, который снимает остаточную поляризацию излучения. Далее в поляризаторе свет преобразуется в линейно-поляризованный, а за ним разделяется на две волны, равные по амплитуде, направляемые по быстрой и медленной оптическим осям двулучепреломляющего волокна. В фильтре эти волны разводятся по времени, чтобы предотвратить последствия преобразования мод, и попадают на пьезомодулятор двулучепреломления, обеспечивающий работу интерферометра в квадратурном режиме. После этого они проходят линию задержки, что обеспечивает приемлемую собственную частоту контура, на которой «успевает» работать пьезомодулятор. В четвертьволновой пластине волны преобразуются в противоположно циркулярно-поляризованные. В результате действия магнитного поля на специальное SPUN-волокно, в котором оси двулучепреломления скручены вдоль направления распространения света, в чувствительной части датчика левоциркулярная и правоциркулярная волны получают относительный фазовый сдвиг. Отражившись от зеркала, волны проходят чувствительную часть в обратную сторону, фазовый сдвиг между ними удваивается. После прохода четвертьволновой пластины волны обратно преобразуются в линейно-поляризованные, при этом та волна, которая проходила датчик по быстрой оси двулучепреломляющего волокна, направляется в медленную ось, и наоборот. Волны проходят следующие три элемента в обратном порядке и интерферируют на входе поляризатора. Таким образом, достигается взаимность распространения двух волн в датчике, т.е. они проходят абсо-

лотно одинаковые пути. Результат интерференции фиксируется на фотодетекторе и с помощью синхронного детектора преобразуется в выходной сигнал датчика.

Интерферирующие волны в волоконном интерферометре с обратным отражением все время находятся относительно близко в пространстве, что делает датчик очень стабильным по отношению к внешним воздействиям, таким как изменение температуры и вибрации. В то же время при гармонической модуляции отклик интерферометра представляет собой синусоидальную функцию, что ограничивает диапазон измеряемых токов и не позволяет получить линейную зависимость выходного сигнала от тока.

Закрытая схема обработки сигнала

Для преодоления недостатков схемы ВОДТ с обратным отражением предлагается использовать закрытую схему обработки сигнала, аналогичную используемой в волоконной гироскопии [4]. Сигнал о силе тока используется как сигнал ошибки, с помощью которого создается обратная связь в системе в виде введения дополнительной разности фаз $\Delta\Phi_{oc}$, компенсирующей вызванную магнитным полем разность фаз. Суммарная разность фаз удерживается в нуле, что обеспечивает большую точность и динамический диапазон, так как система всегда работает в точке с максимальной чувствительностью. В закрытой схеме измеряемым сигналом становится сигнал обратной связи, что приводит к линейной зависимости с большой стабильностью, потому что этот сигнал обратной связи не зависит от пришедшей на фотодетектор оптической мощности и коэффициента усиления регистрирующего каскада.

Пьезомодулятор на необходимой частоте может обеспечить только гармоническую модуляцию сигнала, поэтому предлагается вместо него использовать модулятор двулучепреломления на основе канального волновода в ниобате лития (рис. 2). Используется X-срез кристалла ниобата лития, двулучепреломляющие волокна пристыковываются к кристаллу таким образом, чтобы быстрые оси волокна совпадали с быстрой осью волновода. Разница фаз вносится за счет отличия электрооптических коэффициентов для быстрой и медленной осей волновода в ниобате. Такой модулятор обладает достаточным быстродействием и позволяет подавать на него сигналы обратной связи необходимой формы.

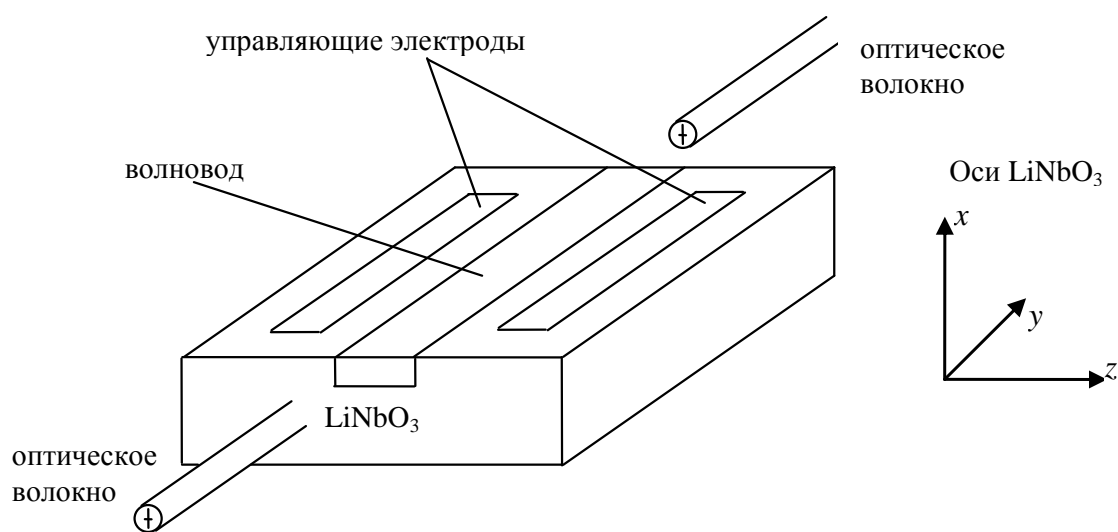


Рис. 2. Волоконно-оптический фазовый модулятор двулучепреломления на ниобате лития

Для введения компенсирующей разницы фаз удобно использовать линейно увеличивающееся напряжение, подаваемое на управляющие электроды интегрально-оптического модулятора. В ВОДГ по схеме с обратным отражением интерферирующие волны проходят через модулятор дважды, и разница фаз $\Delta\Phi_M$ между ними увеличивается с задержкой ΔT . Таким образом, компенсирующую разницу фаз $\Delta\Phi_{oc}$ можно регулировать скоростью нарастания напряжения во времени T . Нарастание фазы $\Delta\Phi_M$ не может быть бесконечным, и на практике используется пилообразная модуляция со сбросом пилы $\Phi_{сб}$ на 2π (рис. 3).

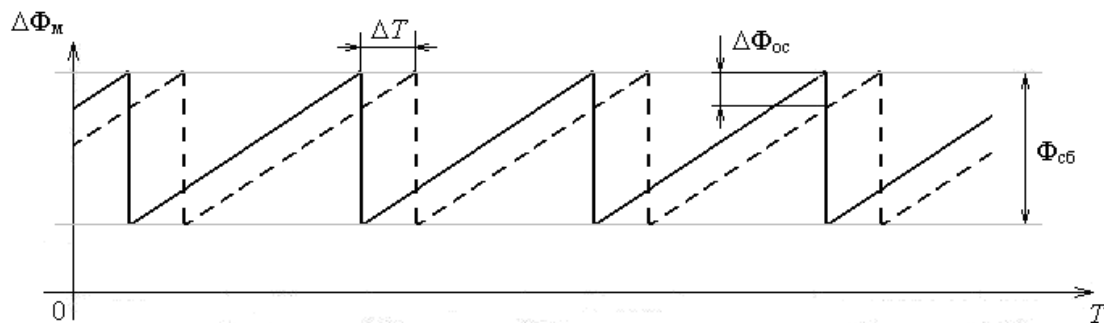


Рис. 3. Аналоговая пилообразная модуляция

Аналоговая фазовая модуляция очень удобна, но требует высокой линейности и скорости работы модулятора, с ней невозможно синхронизировать модуляцию, обеспечивающую квадратурный режим работы интерферометра. Трудности преодолеваются с помощью цифровой реализации пилообразной модуляции. Вместо линейного нарастания фазы цифровая пилообразная модуляция создает фазовые приращения $\Delta\Phi_{oc}$ длительностью ΔT , соответствующей времени прохода сигнала по интерферометру, и соответствующие сбросы ступенчатой пилы. Эти фазовые приращения и сбросы легко синхронизировать с квадратурной прямоугольной фазовой модуляцией (рис. 4). Блок обработки в таком случае выполняется на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), логической схемы и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Логическая схема строится на основе программируемой логической интегральной схемы.

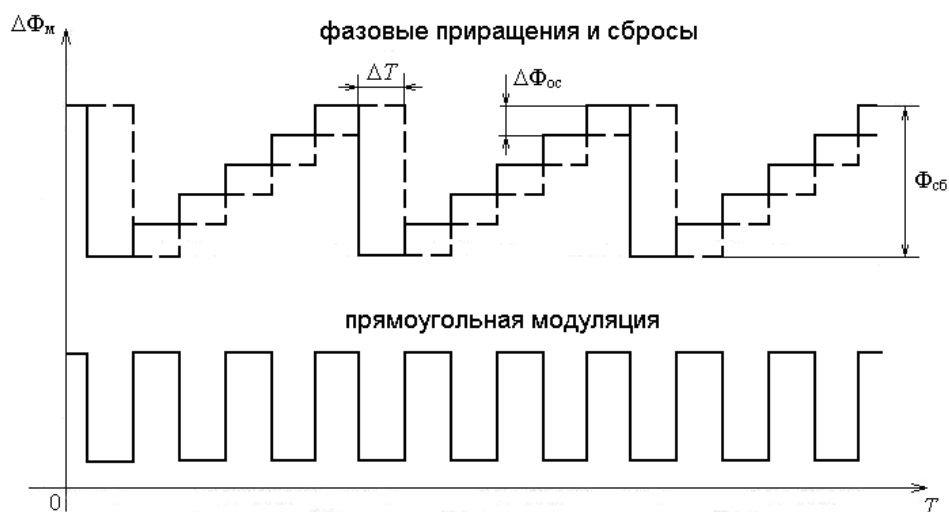


Рис. 4. Цифровая пилообразная модуляция, синхронизированная с прямоугольной

Цифровая пилообразная модуляция удобна еще и тем, что можно ввести вторую обратную связь, контролирующую работу модулятора, так как модулируемая им фаза зависит не только от управляющего напряжения на выходе ЦАП, но и от внешних условий (температуры, вибрации и т. п.). При отклонении сброса пилы от 2π появляется дополнительное изменение сигнала на фотоприемнике в моменты сброса. Логическая схема подстраивает итоговый сигнал, подаваемый на ЦАП, и через некоторое время величина сброса приводится к нужному значению.

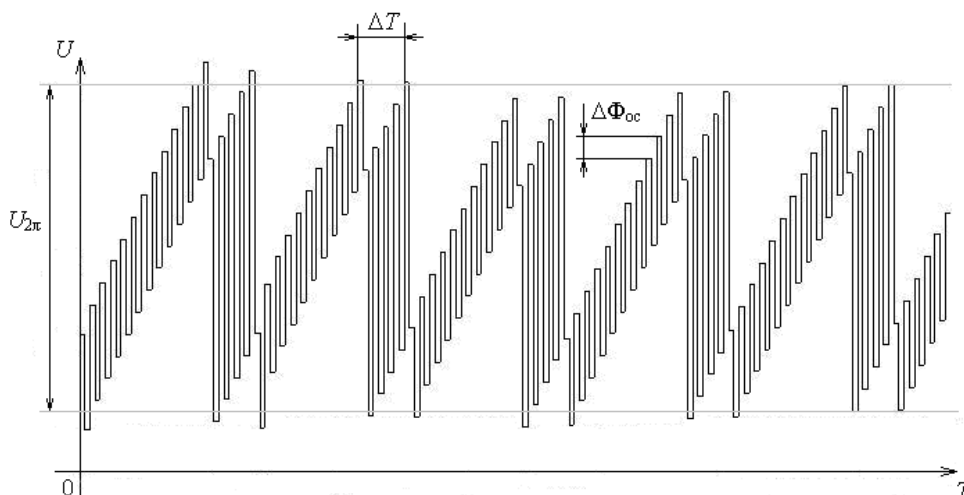


Рис. 5. Результат работы модели пилообразной цифровой модуляции

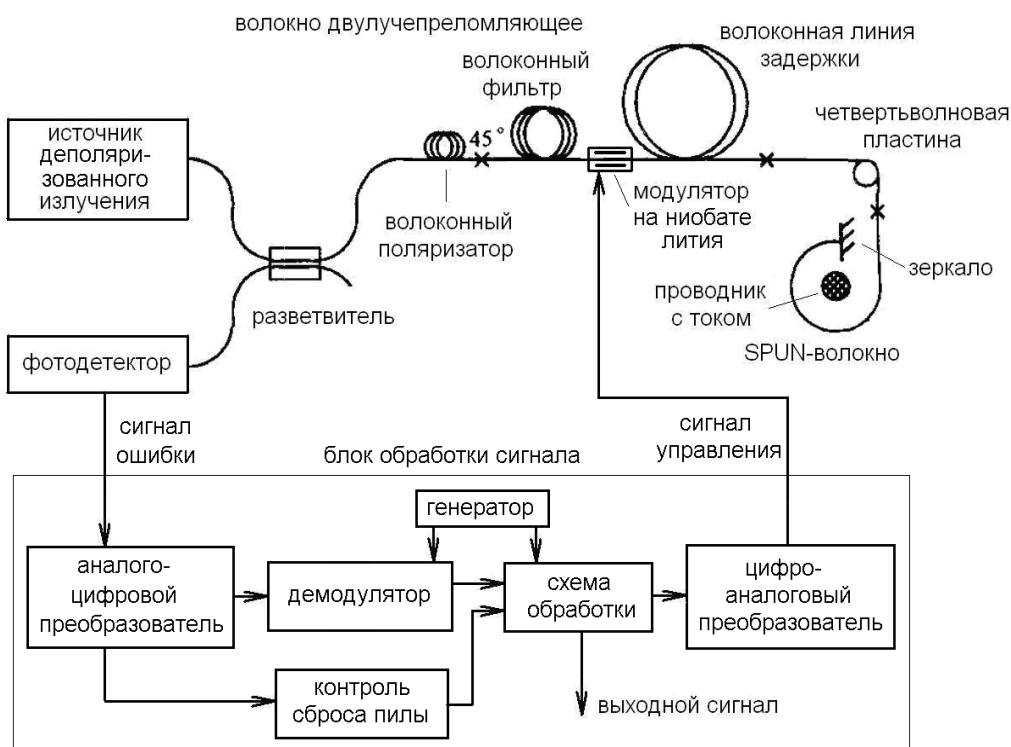


Рис. 6. Конфигурация ВОДТ по схеме с обратным отражением с источником деполаризованного излучения, закрытой схемой обработки сигнала и контролем работы модулятора

Для проверки работы такой схемы была создана модель работы закрытой схемы обработки с двумя петлями обратной связи. На рис. 5 представлен график изменения управляющего напряжения на модуляторе во времени, на нем показан процесс приведения первоначального отклоненного сброса пилы к значению $U_{2\pi}$, соответствующему по фазе 2π . В настоящее время вместо применения деполяризатора удобнее заменить в ВОДТ обычный источник излучения на источник, свет которого практически деполяризован. На рис. 6 показан, с учетом последнего, ВОДТ по схеме с обратным отражением и двумя петлями обратной связи.

Заключение

В работе рассмотрены способ повышения точности волоконно-оптического датчика тока в большом диапазоне измеряемых токов и увеличения линейности выходного сигнала посредством введения первой обратной связи в схеме обработки сигнала, а также способ улучшения работы модулятора в различных эксплуатационных условиях с помощью второй обратной связи.

Литература

1. Dong X., Chu C.B., Kong K.H., Chiang K.S. Phase Drift Compensation for Electric Current Sensor Employing a Twisted Fiber or a Spun Highly Birefringent Fiber // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – V. 6. – № 5. – P. 803–809.
2. Blake J., Tantaswadi P., de Carvalho R.T. In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – V. 11. – № 1. – P. 116–121.
3. Bohnert K., Brändle H., Brunzel M.G., Gabus P., Guggenbach P. Highly Accurate Fiber-Optic DC Current Sensor for the Electrowinning Industry // IEEE Transactions on industry applications. – 2007. – V. 43. – № 1. – P. 180–187.
4. Kurosawa K., Shirakawa K., Kikuchi T. Development of Optical Fiber Current Sensors and Their Applications // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. – Dalian, China, 2005.
5. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. – London: Artech House, 1992.

<i>Мешковский Игорь Касьянович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, igorkm@spb.runnet.ru
<i>Стригалева Владимир Евгеньевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, кандидат физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой, vstrglv@mail.ru
<i>Тараканов Сергей Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, младший научный сотрудник, netforever@mail.ru