

ФУТОС

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2433414

### ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТОКА

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010115761

Приоритет изобретения 20 апреля 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 ноября 2011 г.

Срок действия патента истекает 20 апреля 2030 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2010115761/28, 20.04.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
20.04.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.04.2010

(45) Опубликовано: 10.11.2011 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 5106193 A, 21.04.1992. WO 2007033057 A2, 22.03.2007. EP 1597599 A2, 23.11.2005. RU 2086988 C1, 10.08.1997.

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский,  
49, ГОУ ВПО "СПб ГУ ИТМО", ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Мешковский Игорь Касьянович (RU),  
Стригалева Владимир Евгеньевич (RU),  
Тараканов Сергей Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Санкт-Петербургский  
государственный университет  
информационных технологий, механики и  
оптики" (RU)**(54) ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТОКА**

(57) Реферат:

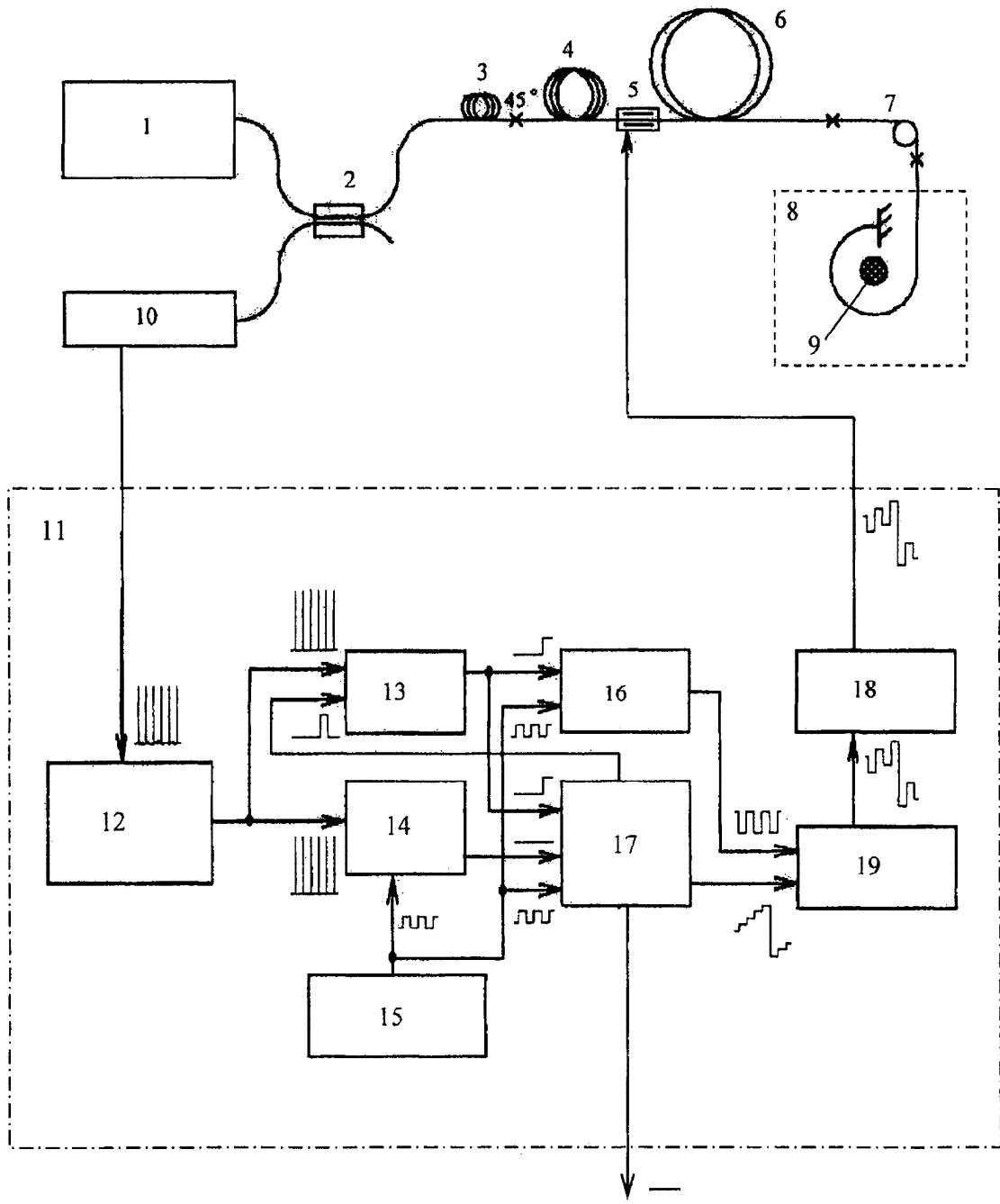
Изобретение относится к области волоконно-оптических измерительных устройств и может быть использовано в интерференционных волоконно-оптических датчиках тока. Волоконно-оптический датчик тока содержит оптически соединенные источник светового излучения, разветвитель, ко второму входу которого через фотодетектор подключен блок обработки сигнала, волоконный поляризатор, волоконный фильтр, модулятор, волоконную линию задержки, четвертьволновую пластину и охватывающую токопровод сенсорную головку, выполненную на основе оптического волокна, поддерживающего циркулярную поляризацию. Блок обработки сигнала содержит опорный генератор, демодулятор, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, сумматор, формирователь ступенчатого пилообразного сигнала, формирователь прямоугольного сигнала и блок сравнения. Сигнальный вход

аналого-цифрового преобразователя образует вход блока обработки сигнала, соединенный с выходом фотодетектора. Выход цифро-аналогового преобразователя образует выход блока обработки сигнала, соединенный с управляющим входом модулятора. Информационный выход формирователя ступенчатого пилообразного сигнала образует информационный выход блока обработки сигнала, являющийся выходом датчика тока. Выход аналого-цифрового преобразователя соединен с сигнальными входами демодулятора и блока сравнения. Выход демодулятора соединен с сигнальным входом формирователя ступенчатого пилообразного сигнала. Выход блока сравнения соединен с корректирующими входами формирователя прямоугольного сигнала и формирователя ступенчатого пилообразного сигнала. Технический результат - повышение точности и расширение диапазона измерений. 2 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 2 4 3 3 4 1 4 C 1

RU 2 4 3 3 4 1 4 C 1

RU 2 4 3 3 4 1 4 C 1



RU 2 4 3 3 4 1 4 C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.  
*G01R 15/24* (2006.01)  
*G02B 6/00* (2006.01)

**(12) ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2010115761/28, 20.04.2010

(24) Effective date for property rights:  
20.04.2010

Priority:

(22) Date of filing: 20.04.2010

(45) Date of publication: 10.11.2011 Bull. 31

Mail address:

197101, Sankt-Peterburg, pr. Kronverkskij, 49,  
GOU VPO "SPb GU ITMO", OIS i NTI

(72) Inventor(s):

**Meshkovskij Igor' Kas'janovich (RU),  
Strigalev Vladimir Evgen'evich (RU),  
Tarakanov Sergej Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovanija "Sankt-  
Peterburgskij gosudarstvennyj universitet  
informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i  
optiki" (RU)**

**(54) FIBRE-OPTIC CURRENT SENSOR**

(57) Abstract:

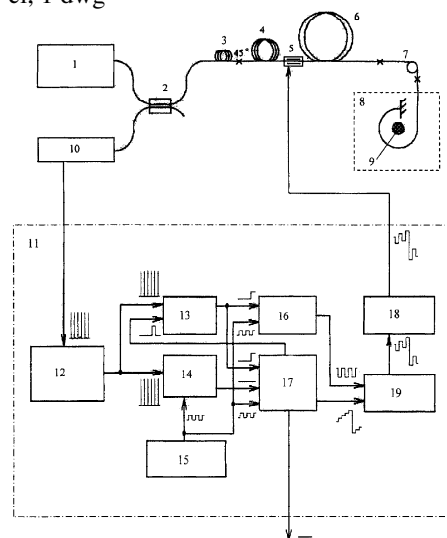
FIELD: physics.

SUBSTANCE: fibre-optic current sensor has optically connected optical radiation source, a splitter, whose second input is connected through a photodetector to a signal processing unit, a fibre polariser, a fibre filter, a modulator, a fibre delay line, a quarter-wave plate and a sensor head around a current conductor, said sensor head being made from optical fibre which supports circular polarisation. The signal processing unit has a reference generator, a demodulator, an analogue-to-digital converter and a digital-to-analogue converter, an adder, a stepped saw-tooth signal former, a square-wave signal former and a comparator unit. The signal input of the analogue-to-digital converter forms the input of the signal processing unit connected to the output of the photodetector. The output of the digital-to-analogue converter forms the output of the signal processing unit connected to the control input of the modulator. The data output of the stepped saw-tooth signal former forms the data output of the signal processing unit which is the output of the current sensor. The output of the analogue-to-digital converter is connected to the signal inputs of the demodulator and

the comparator unit. The output of the demodulator is connected to the signal input of the stepped saw-tooth signal former. The output of the comparator unit is connected to correcting inputs of the square-wave signal former and the stepped saw-tooth signal former.

EFFECT: high accuracy and wide measurement range.

3 cl, 1 dwg



RU 2 4 3 3 4 1 4 C 1

RU 2 4 3 3 4 1 4 C 1

Изобретение относится к области волоконно-оптических измерительных устройств, в частности к волоконно-оптическому датчику тока, реализующему интерференционный принцип измерения.

5 В основу работы волоконно-оптического датчика тока положен эффект Фарадея, который заключается в том, что циркулярно поляризованные световые волны при своем прохождении по оптическому волокну, окружающему проводник с током, приобретают фазовые сдвиги, зависящие от величины тока и числа витков оптического волокна. Преобразуя определенным образом выходные световые волны, например формируя с помощью призмы Волластона ортогонально поляризованные волны, и далее анализируя их, можно получить информацию о величине тока, протекающего по проводнику, см., например, патенты США: [1] - US 4255018, G01R 15/24, G01R 15/07, 10.03.1981; [2] - US 5051577, G01R 15/24, H01J 5/16, 24.09.1991; [3] - US 5500909, G01R 15/24, G02B 6/255, G02B 6/00, G01R 31/00, G01J 4/00, 19.03.1996.

15 Достоинством таких волоконно-оптических датчиков тока является электроизолированность, недостатком - высокая степень зависимости от внешних условий, низкая чувствительность, а также необходимость расчленения/сочленения элементов оптического тракта при монтаже датчика на токопроводе.

20 Более удобным с точки зрения монтажа на токопроводе и более перспективным для широкого практического использования за счет большей чувствительности является волоконно-оптический датчик тока с сенсорной головкой отражательного типа, реализующий интерференционный принцип измерения. В таком датчике промодулированные по фазе циркулярно-поляризованные световые волны проходят по оптическому волокну сенсорной головки в двух направлениях - сначала в прямом направлении, а затем в обратном направлении за счет отражения от зеркального конца волокна, после чего интерферируют, см., например, патент США [4] - US 6563589, G01C 19/72, G01R 15/24, G01B 9/02, 13.05.2003. Результат интерференции преобразуется в электрический сигнал с помощью фотодетектора. Сигнал фотодетектора демодулируется (синхронно детектируется) с формированием выходного сигнала, несущего в себе информацию о величине тока, протекающего по токопроводу. Демодулирование (синхронное детектирование) осуществляется относительно опорного сигнала, формируемого опорным генератором. Этот же опорный сигнал одновременно является управляющим сигналом для фазового модулятора.

40 Этот же интерференционный принцип измерения реализован в волоконно-оптическом датчике тока, представленном в работе [5] - J. Blake, P. Tantaswadi, R.T. de Carvalho. In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor. IEEE Transaction on Power delivery. Vol.11, No. 1, January 1996, p.116-121, Fig. 2, принятом в качестве прототипа.

45 Датчик-прототип содержит оптически соединенные источник светового излучения, X-разветвитель, волоконный деполяризатор, волоконный поляризатор, волоконный фильтр, модулятор, например, реализованный в виде пьезомодулятора двулучепреломления, волоконную линию задержки, четвертьволновую пластину и охватывающую токопровод сенсорную головку (чувствительную катушку) отражательного типа.

50 Чувствительным элементом сенсорной головки является оптическое волокно, поддерживающее циркулярную поляризацию, например волокно, в котором оси двулучепреломления скручены вдоль направления распространения света. Это волокно охватывает проводник с измеряемым током.

Управляющий вход модулятора соединен с управляющим выходом блока

обработки сигнала, вход которого через фотодетектор соединен со вторым входом Х-разветвителя.

Блок обработки сигнала содержит демодулятор, реализованный в виде синхронного детектора, и опорный генератор, выход которого соединен с опорным входом демодулятора. Сигнальный вход демодулятора (сигнальный вход синхронного детектора) образует вход блока обработки сигнала, соединенный с выходом фотодетектора. Выход демодулятора (выход синхронного детектора) образует информационный выход блока обработки сигнала, являющийся выходом датчика. Выход опорного генератора образует управляющий выход блока обработки сигнала, соединенный с управляющим входом модулятора.

Датчик-прототип работает следующим образом. Свет от источника светового излучения проходит через Х-разветвитель и поступает в волоконный деполяризатор, который снимает остаточную поляризацию излучения. Далее свет поступает в волоконный поляризатор. Волоконный поляризатор преобразует деполяризованный свет в линейно-поляризованный и разделяет его на две равные по амплитуде волны, направляемые по «быстрой» и «медленной» оптическим осям двулучепреломляющего волокна. Далее эти волны проходят через волоконный фильтр и поступают в модулятор. В волоконном фильтре волны разводятся во времени для того, чтобы образованные в модуляторе паразитные волны после прохождения всей цепи интерферометра не интерферировали с волнами, несущими информацию о токе. В модуляторе волны модулируются по фазе в соответствии с управляющим сигналом, поступающим на управляющий вход модулятора с управляющего выхода блока обработки сигнала, т.е. с выхода опорного генератора. Далее волны проходят через волоконную линию задержки и поступают на вход четвертьволновой пластины. В четвертьволновой пластине волны преобразуются в противоположно циркулярно-поляризованные (левоциркулярную и правоциркулярную волны) и далее поступают в сенсорную головку, оптическое волокно которой поддерживает циркулярную поляризацию. Под действием магнитного поля, образующегося в результате протекания тока по токопроводу, левоциркулярная и правоциркулярная волны получают относительный фазовый сдвиг. Отразившись от зеркального конца сенсорной головки, левоциркулярная и правоциркулярная волны проходят через сенсорную головку в обратном направлении, в результате чего фазовый сдвиг между ними удваивается. Результирующий фазовый сдвиг  $\Delta\Phi_\phi$  определяется выражением:

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

где: V - постоянная Верде;

N - количество витков оптического волокна вокруг токопровода,

I - величина тока, протекающего по токопроводу.

Пройдя через четвертьволновую пластину в обратном направлении, указанные волны вновь преобразуются в линейно-поляризованные, при этом та волна, которая проходила по «быстрой» оси двулучепреломляющего волокна, направляется по «медленной» оси, и наоборот. Тем самым достигается взаимность распространения двух волн в датчике, т.е. они проходят одинаковые пути. Пройдя далее по оптическому тракту в обратном направлении, эти волны интерферируют на входе волоконного поляризатора. Результат интерференции, наблюдаемый на втором входе Х-разветвителя, фиксируется фотодетектором, а затем путем синхронного детектирования, осуществляемого в блоке обработки сигнала, преобразуется в выходной сигнал датчика, по которому судят о величине тока I, протекающего по токопроводу.

Основным недостатком датчика-прототипа является малый диапазон измерений и невысокая точность, обусловленные нелинейным характером зависимости выходного сигнала от измеряемого тока, а также отсутствием контроля работы модулятора, который по-разному модулирует фазу световой волны в зависимости от внешних условий.

Технической задачей, на решение которой направлено заявляемое изобретение, является повышение точности и расширение диапазона измерений.

Сущность заявляемого изобретения заключается в следующем. Волоконно-оптический датчик тока содержит оптически соединенные источник светового излучения, разветвитель, волоконный поляризатор, волоконный фильтр, модулятор, волоконную линию задержки, четвертьволновую пластину и охватывающую токопровод сенсорную головку, выполненную на основе оптического волокна, поддерживающего циркулярную поляризацию, а также фотодетектор, вход которого соединен со вторым входом разветвителя, а выход - с входом блока обработки сигнала, информационный выход которого является выходом датчика тока, а управляющий выход соединен с управляющим входом модулятора, причем блок обработки сигнала содержит демодулятор и опорный генератор, соединенный своим выходом с опорным входом демодулятора. В отличие от прототипа, блок обработки сигнала дополнительно содержит аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, блок сравнения, сумматор, формирователь прямоугольного сигнала и формирователь ступенчатого пилообразного сигнала. При этом сигнальный вход аналого-цифрового преобразователя образует вход блока обработки сигнала, соединенный с выходом фотодетектора, выход цифро-аналогового преобразователя образует управляющий выход блока обработки сигнала, соединенный с управляющим входом модулятора, информационный выход формирователя ступенчатого пилообразного сигнала образует информационный выход блока обработки сигнала, являющийся выходом датчика тока, выход аналого-цифрового преобразователя соединен с сигнальным входом демодулятора и сигнальным входом блока сравнения, стробирующий вход блока сравнения соединен со стробирующим выходом формирователя ступенчатого пилообразного сигнала, сигнальный выход которого соединен с первым входом сумматора, а сигнальный, корректирующий и опорный входы соединены соответственно с выходом демодулятора, выходом блока сравнения и выходом опорного генератора, при этом выход сумматора соединен с сигнальным входом цифро-аналогового преобразователя, а его второй вход - с выходом блока сравнения, опорный и корректирующий входы которого соединены соответственно с выходом опорного генератора и выходом блока сравнения.

В преимущественных вариантах выполнения источник светового излучения выполнен в виде источника деполяризованного светового излучения, а модулятор выполнен в виде модулятора двулучепреломления на основе канального волновода в кристалле ниобата лития.

Сущность изобретения и возможность его осуществления поясняются представленной на чертеже структурной схемой волоконно-оптического датчика тока в варианте использования в нем, как и в прототипе, в качестве разветвителя X-разветвителя, а в качестве сенсорной головки - сенсорной головки отражательного типа.

Волоконно-оптический датчик тока в рассматриваемом примере выполнения содержит оптически соединенные источник 1 светового излучения, представляющий собой источник деполяризованного светового излучения, X-разветвитель 2,

волоконный поляризатор 3, волоконный фильтр 4, модулятор 5, представляющий собой модулятор двулучепреломления на основе канального волновода в кристалле ниобата лития, волоконную линию задержки 6, четвертьволновую пластину 7 и сенсорную головку 8 отражательного типа, выполненную на основе оптического волокна, поддерживающего циркулярную поляризацию, охватывающую токопровод 9, по которому протекает измеряемый ток.

Второй вход X-разветвителя 2 соединен с входом фотодетектора 10. Выход фотодетектора 10 соединен с входом блока 11 обработки сигнала, управляющий выход которого соединен с управляющим входом модулятора 5, а информационный выход является выходом датчика.

Блок 11 обработки сигнала содержит аналого-цифровой преобразователь 12, блок 13 сравнения, демодулятор 14, опорный генератор 15, формирователь 16 прямоугольного сигнала, формирователь 17 ступенчатого пилообразного сигнала, цифро-аналоговый преобразователь 18 и сумматор 19.

Сигнальный вход аналого-цифрового преобразователя 12 образует вход блока 11 обработки сигнала, соединенный с выходом фотодетектора 10. Выход цифро-аналогового преобразователя 18 образует управляющий выход блока 11 обработки сигнала, соединенный с управляющим входом модулятора 5. Информационный выход формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала образует информационный выход блока 11 обработки сигнала, являющийся выходом датчика тока. Выход аналого-цифрового преобразователя 12 соединен с сигнальным входом блока 13 сравнения и сигнальным входом демодулятора 14, опорный вход которого соединен с выходом опорного генератора 15. Выход демодулятора 14 соединен с сигнальным входом формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала. Выход блока 13 сравнения соединен с корректирующим входом формирователя 16 прямоугольного сигнала и корректирующим входом формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала. Опорный вход формирователя 16 прямоугольного сигнала и опорный вход формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала соединены с выходом опорного генератора 15. Строблирующий выход формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала соединен со строблирующим входом блока 13 сравнения. Сигнальный выход формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала соединен с первым входом сумматора 19, второй вход которого соединен с выходом формирователя 16 прямоугольного сигнала, а выход соединен с сигнальным входом цифро-аналогового преобразователя 18.

Сумматор 19, формирователь 16 прямоугольного сигнала, формирователь 17 ступенчатого пилообразного сигнала, блок 13 сравнения и демодулятор 14 могут быть выполнены в виде отдельных цифровых устройств. Также возможна их реализация, например, в составе специализированной большой интегральной схемы (СБИС) или на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Заявляемый волоконно-оптический датчик тока работает следующим образом.

Свет от источника 1 светового излучения проходит через X-разветвитель 2 и поступает в волоконный поляризатор 3, который преобразует деполаризованный свет в линейно-поляризованный и разделяет его на две равные по амплитуде волны, направляемые по «быстрой» и «медленной» оптическим осям двулучепреломляющего волокна, соединяющего волоконный поляризатор 3 с последующими элементами оптического тракта.

Далее указанные световые волны проходят через волоконный фильтр 4 и поступают в модулятор 5.



В волоконном фильтре 4 указанные волны разводятся во времени для того, чтобы образованные в модуляторе 5 паразитные волны после прохождения всей цепи интерферометра не интерферировали с волнами, несущими информацию о токе.

5 В модуляторе 5 осуществляется прямоугольная фазовая модуляция проходящих через него световых волн с одновременным внесением относительного фазового сдвига  $\Delta\Phi_{oc}$  в соответствии со скоростью нарастания во времени ступенчатого пилообразного управляющего сигнала, поступающего на управляющий вход модулятора 5 с управляющего выхода блока 11 обработки сигнала (с выхода цифро-  
10 аналогового преобразователя 18). Модулятор 5 в рассматриваемом случае выполнен в виде модулятора двулучепреломления на основе канального волновода в кристалле ниобата лития, частотные свойства которого обеспечивают возможность выполнения указанной функции.

15 С выхода модулятора 5 световые волны поступают в волоконную линию задержки 6, проходят ее и далее поступают на вход четвертьволновой пластины 7, где преобразуются в противоположно циркулярно-поляризованные волны (левоциркулярную и правоциркулярную волны).

20 С выхода четвертьволновой пластины 7 эти волны поступают в охватывающую токопровод 9 сенсорную головку 8, представляющую собой в рассматриваемом случае сенсорную головку отражательного типа.

25 Пройдя через сенсорную головку 8 в прямом и обратном направлениях, левоциркулярная и правоциркулярная волны приобретают дополнительный относительный фазовый сдвиг  $\Delta\Phi_{\phi}$ , зависящий от измеряемого тока, протекающего через токопровод 9. Величина дополнительного относительного фазового сдвига  $\Delta\Phi_{\phi}$  характеризуется представленным выше выражением  $\Delta\Phi_{\phi}=4VNI$ .

30 В результате общий приобретенный относительный фазовый сдвиг  $\Delta\Phi$ , обусловленный воздействием модулятора 5 и сенсорной головки 8 на световые волны, определяется выражением  $\Delta\Phi=\Delta\Phi_{\phi}-\Delta\Phi_{oc}$ .

35 Пройдя далее в обратном направлении через четвертьволновую пластину 7, световые волны вновь преобразуются в линейно-поляризованные, при этом та волна, которая проходила по «быстрой» оси двулучепреломляющего волокна, направляется по «медленной» оси, и наоборот. Тем самым достигается взаимность распространения этих двух волн в датчике тока, т.е. они проходят одинаковые пути.

40 Пройдя далее по оптическому тракту в обратном направлении, эти волны интерферируют на входе волоконного поляризатора 3. Результат интерференции, наблюдаемый на втором входе X-разветвителя 2, фиксируется фотодетектором 10.

45 Выходной сигнал фотодетектора 10 поступает на вход блока 11 обработки сигнала, где оцифровывается в аналого-цифровом преобразователе 12 и далее преобразуется в демодуляторе 14 в сигнал ошибки, зависящий от величины и знака разности между фазовым сдвигом  $\Delta\Phi_{\phi}$ , обусловленным измеряемым током, протекающим через токопровод 9, и компенсирующим фазовым сдвигом  $\Delta\Phi_{oc}$ , вносимым модулятором 5. При этом минимальное значение сигнала ошибки имеет место при равенстве  $\Delta\Phi_{\phi}=\Delta\Phi_{oc}$ .

50 Сигнал ошибки, формируемый в демодуляторе 14, поступает на сигнальный вход формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала, где интегрируется с получением управляющего сигнала компенсирующей обратной связи, определяющего скорость нарастания во времени формируемого ступенчатого пилообразного сигнала и, соответственно, величину компенсирующего фазового сдвига  $\Delta\Phi_{oc}$ , вносимого модулятором 5. Изменение скорости нарастания во времени формируемого

ступенчатого пилообразного сигнала продолжается до тех пор, пока сигнал ошибки, снимаемый с выхода демодулятора 14, не станет равным нулю, т.е. когда компенсирующий фазовый сдвиг  $\Delta\Phi_{oc}$ , вносимый модулятором 5, не сравняется с фазовым сдвигом  $\Delta\Phi_{\phi}$ , обусловленным измеряемым током, протекающим через токопровод 9.

В установившемся режиме величина указанного управляющего сигнала компенсирующей обратной связи, определяющего скорость нарастания во времени ступенчатого пилообразного сигнала и, соответственно, величину компенсирующего фазового сдвига  $\Delta\Phi_{oc}$ , вносимого модулятором 5 для компенсации фазового сдвига  $\Delta\Phi_{\phi}$ , обусловленного измеряемым током, пропорциональна величине  $I$  этого тока, что позволяет использовать данный сигнал в качестве выходного информационного сигнала датчика тока. Этот сигнал снимается с информационного выхода формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала и поступает на информационный выход блока 11 обработки сигнала, являющийся выходом датчика тока.

Использование в качестве выходного информационного сигнала указанного управляющего сигнала компенсирующей обратной связи обеспечивает линейность, а также увеличенные, по сравнению с прототипом, точность и динамический диапазон измерений. Объясняется это, в частности, тем, что примененная компенсационная схема измерений, поддерживающая разностный сигнал ( $\Delta\Phi_{\phi}-\Delta\Phi_{oc}$ ) в нуле, обеспечивает работу датчика тока в точке с максимальной чувствительностью. Кроме этого в такой схеме, в отличие от прототипа, выходной сигнал, несущий информацию об измеряемом токе, не зависит от коэффициента усиления фотодетектора 10 и уровня поступающей на него оптической мощности.

Скорость нарастания во времени ступенчатого пилообразного сигнала, снимаемого с сигнального выхода формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала, определяющая величину компенсирующего фазового сдвига  $\Delta\Phi_{oc}$ , вносимого модулятором 5, в свою очередь определяется высотой ступеней модуляции и их шириной, т.е. длительностью по времени. Ширина ступеней модуляции постоянна и определяется длительностью  $\Delta T$ , соответствующей времени прохождения световых волн по световому тракту датчика тока. Высота ступеней модуляции является регулируемым параметром и задается рассмотренным выше управляющим сигналом компенсирующей обратной связи. В установившемся режиме приведенная к выходу модулятора 5 высота ступеней модуляции соответствует значению фазы  $\Delta\Phi_{oc}=\Delta\Phi_{\phi}$ , а глубина, на которую периодически осуществляется сброс пилы модуляции, соответствует значению фазы  $2\pi$ .

Ступенчатый пилообразный сигнал, снимаемый с сигнального выхода формирователя 17, дополнительно модулируется для осуществления в модуляторе 5 прямоугольной фазовой модуляции проходящих через него световых волн. Модуляция ступенчатого пилообразного сигнала осуществляется прямоугольным сигналом, например типа «меандр», формируемым в формирователе 16 прямоугольного сигнала на основе опорного сигнала, поступающего на его сигнальный вход с выхода опорного генератора 15. Модуляция осуществляется в сумматоре 19 путем суммирования сигналов, поступающих на его первый и второй входы с выходов формирователей 17 и 16. При этом суммируемые сигналы синхронизированы друг относительно друга за счет синхронной работы формирователей 16 и 17, обеспечиваемой опорным сигналом, поступающим на их опорные входы с выхода опорного генератора 15.

Промодулированный таким образом ступенчатый пилообразный сигнал, снимаемый с выхода сумматора 19, поступает на сигнальный вход цифро-аналогового преобразователя 18, который формирует из него аналоговый управляющий сигнал для модулятора 5, замыкая тем самым по сигналу цепь компенсирующей обратной связи.

В реальных условиях эксплуатации параметры модулятора 5 могут изменяться под воздействием возмущающих внешних факторов. В ряде случаев это может приводить к изменению соотношения между подаваемым на модулятор 5 управляющим сигналом и оказываемым им воздействием на свет, что, в свою очередь, будет приводить к ошибкам в модуляции и, соответственно, к ошибкам измерения.

Для уменьшения ошибок, обусловленных нестабильностью работы модулятора, в заявляемом датчике предусмотрена дополнительная корректирующая обратная связь, работающая следующим образом.

Изменение соотношения между подаваемым на модулятор 5 управляющим сигналом и оказываемым им воздействием на свет приводит, в частности, к отклонению сброса пилы модуляции от  $2\pi$ , что, в свою очередь, приводит к возникновению скачкообразных изменений сигналов на выходе аналого-цифрового преобразователя 12 в моменты, соответствующие сбросу пилы модуляции. Эти скачки выявляются с помощью блока 13 сравнения, который сравнивает между собой две выборки выходного сигнала аналого-цифрового преобразователя 12 на коротких промежутках времени непосредственно перед сбросом пилы модуляции и сразу после сброса. Для этого на сигнальный вход блока 13 сравнения подается сигнал с выхода аналого-цифрового преобразователя 12, а на стробирующий вход - соответствующие стробы со стробирующего выхода формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала. Результат сравнения - выходной сигнал блока 13 сравнения - содержит информацию, насколько вносимый модулятором при сбросе пилы фазовый сдвиг отличается от  $2\pi$ , а значит, и текущее состояние соотношения между подаваемым на модулятор 5 управляющим сигналом и вносимым при этом модулятором 5 фазовым сдвигом. Выходной сигнал блока 13 сравнения подается на корректирующие входы формирователя 16 прямоугольного сигнала и формирователя 17 ступенчатого пилообразного сигнала, и на его основании сигнал в формирователях пропорционально увеличивается или уменьшается по амплитуде с целью того, чтобы вносимые модулятором 5 фазовые сдвиги соответствовали требуемым значениям.

Таким образом, рассмотренное показывает, что заявляемое изобретение осуществимо и обеспечивает достижение технического результата, заключающегося в повышении точности и расширении диапазона измерений.

Указанный технический результат обеспечивается и при других возможных реализациях разветвителя 2 и сенсорной головки 8, например при использовании в качестве разветвителя Y-разветвителя или оптического циркулятора, а в качестве сенсорной головки - сенсорной головки замкнутого типа.

Источники информации:

1. US 4255018, G01R 15/24, G01R 15/07, опубл. 10.03.1981.
2. US 5051577, G01R 15/24, H01J 5/16, опубл. 24.09.1991.
3. US 5500909, G01R 15/24, G02B 6/255, G02B 6/00, G01R 31/00, G01J 4/00, опубл. 19.03.1996.
4. US 6563589, G01C 19/72, G01R 15/24, G01B 9/02, опубл. 13.05.2003.
5. J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho. In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor. IEEE Transaction on Power delivery. Vol.11, No.1, January 1996, p.116-121, Fig.2.

## Формула изобретения

1. Волоконно-оптический датчик тока, содержащий оптически соединенные источник светового излучения, разветвитель, волоконный поляризатор, волоконный 5 фильтр, модулятор, волоконную линию задержки, четвертьволновую пластину и охватывающую токопровод сенсорную головку, выполненную на основе оптического волокна, поддерживающего циркулярную поляризацию, а также фотодетектор, вход которого соединен со вторым входом разветвителя, а выход - с входом блока 10 обработки сигнала, информационный выход которого является выходом датчика тока, а управляющий выход соединен с управляющим входом модулятора, причем блок обработки сигнала содержит демодулятор и опорный генератор, соединенный своим выходом с опорным входом демодулятора, отличающийся тем, что блок 15 обработки сигнала дополнительно содержит аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи, блок сравнения, сумматор, формирователь прямоугольного сигнала и формирователь ступенчатого пилообразного сигнала, при этом сигнальный вход аналого-цифрового преобразователя образует вход блока обработки сигнала, соединенный с выходом фотодетектора, выход цифроаналогового преобразователя 20 образует управляющий выход блока обработки сигнала, соединенный с управляющим входом модулятора, информационный выход формирователя ступенчатого пилообразного сигнала образует информационный выход блока обработки сигнала, являющийся выходом датчика тока, выход аналого-цифрового преобразователя соединен с сигнальным входом демодулятора и сигнальным входом блока сравнения, 25 стробирующий вход блока сравнения соединен со стробирующим выходом формирователя ступенчатого пилообразного сигнала, сигнальный выход которого соединен с первым входом сумматора, а сигнальный, корректирующий и опорный входы соединены соответственно с выходом демодулятора, выходом блока сравнения 30 и выходом опорного генератора, при этом выход сумматора соединен с сигнальным входом цифроаналогового преобразователя, а его второй вход - с выходом блока сравнения, опорный и корректирующий входы которого соединены соответственно с выходом опорного генератора и выходом блока сравнения.

2. Датчик тока по п.1, отличающийся тем, что источник светового излучения 35 выполнен в виде источника деполяризованного светового излучения.

3. Датчик тока по п.1, отличающийся тем, что модулятор выполнен в виде модулятора двулучепреломления на основе канального волновода в кристалле ниобата лития.

40

45

50