

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОГО МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ ИЗ СВЕТОВОДА ТИПА “twist”

© 2010 г. И. Л. Ловчий, канд. физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

Описаны особенности формирования и алгоритмы обработки измерительных сигналов поляриметрического магнитооптического датчика переменного тока со световодом типа “twist”. Представлены результаты моделирования реакции датчика на изменение параметров чувствительного контура. Проведено сравнение расчетных характеристик с параметрами макетных образцов датчика.

Ключевые слова: датчик тока, эффект Фарадея, twist волокно, двулучепреломление, сфера Пуанкаре.

Коды OCIS: 120.0120, 120.2130.

Поступила в редакцию 24.12.2009.

Введение

Общей тенденцией развития техники регистрации электрических и магнитных полей является все более широкое использование методов измерения на базе электро- и магнитооптических эффектов, в частности на основе эффекта Фарадея для измерения электрического тока. Достоинствами таких методов являются отсутствие явлений насыщения и гистерезиса, сверхмалая инерционность, идеальная гальваническая связь, малые массогабаритные параметры и др. Использование в качестве чувствительного элемента одномодового оптического волокна позволяет легко адаптировать измерительный датчик к регистрации токов различной величины путем варьирования числа витков в волоконном контуре.

К сожалению, искривление светопровода в пространстве, неизбежное при формировании чувствительного контура, приводит к сложной поляризационной анизотропии стекловолокна вследствие многообразия возникающих упругих напряжений как по величине и направлению, так и по месту их расположения вдоль волокна. В результате проявление эффекта Фарадея в обычном стекловолокне становится расплывчатым и малоинформативным для использования в измерительных целях. Поэтому необходимо проведение некоторых специальных технологических операций для формирования особых по-

ляризационных параметров на стадии вытяжки волокна из заготовки либо уже непосредственно с готовым стекловолокном, а для обработки измерительных сигналов датчика требуется использование специальных алгоритмов.

Принципы моделирования параметров датчика

При размещении замкнутого световодного контура из стекловолокна длиной L вокруг проводника с током i общее циркулярное двойное лучепреломление (ДЛП) волокна $2\alpha_F$, вызванное магнитооптическим эффектом Фарадея, определяется выражением

$$\alpha_F = V \int_L H_l dl = V N i, \quad (1)$$

где H_l – составляющая магнитного поля проводника с током вдоль направления распространения света, V – константа Верде оптического материала, N – число витков волоконного контура. Это двулучепреломление векторно складывается с внутренним ДЛП волокна, обусловленным технологией его изготовления, а также с линейным ДЛП, вызванным изгибами волокна в контуре [1]:

$$\beta_R = \pi n^3 (p_{11} - p_{12}) (1 + v) r^2 / (2 \lambda R^2). \quad (2)$$

Здесь β_R – погонная величина двулучепреломления, n – коэффициент преломления материала

световода, p_{11} , p_{12} – коэффициенты фотоупругости, λ – длина волны излучения, ν – коэффициент Пуассона, r – внешний радиус волокна, R – радиус изгиба световода. В результате общее ДЛП волокна преобразуется в эллиптическое, поведение состояния поляризации (СП) света на выходе волокна становится крайне сложным, зависящим от большого числа параметров, и, в общем случае, не поддающимся расшифровке для определения в чистом виде величины магнитооптического эффекта – физического механизма измерения тока. Поэтому в волоконно-оптических датчиках тока в качестве чувствительных элементов применяются специальные световоды типа *twist* или *sprin*.

Для изготовления световода типа *twist* (*twist fiber*) обычно используется одномодовое волокно с предельно малым ($1-2$ °/м) внутренним ДЛП. Стекловолокно упруго закручивается вокруг собственной оси до появления в волокне сильного циркулярного ДЛП $2\alpha_t$, определяемого выражением [2]

$$\alpha_t = 0,25n^2(p_{11} - p_{12})\tau, \quad (3)$$

где τ – относительная величина закручивания волокна. Наведенное ДЛП должно многократно превышать все возможные линейные ДЛП, возникающие при изгибах светопровода в процессе намотки волоконных витков вокруг проводника с измеряемым током. В этом случае общее ДЛП волокна становится практически циркулярным и эллиптичность поляризации ε при распространении света вдоль световода меняется незначительно. При входном линейном СП ($\varepsilon = 0$) изменения азимута поляризации на выходе волокна при появлении тока в проводнике будут описываться выражением (1), а наведенная закручиванием волокна оптическая активность приведет лишь к постоянному угловому сдвигу азимута поляризации.

В типичной схеме поляриметрического датчика в качестве источника света обычно используется лазерный диод, излучение которого фокусируется в сердцевину стекловолокна – чувствительного элемента датчика. Для образования чувствительного контура светопровод обрачивают целое число раз вокруг проводника с измеряемым током. Излучение с выхода светопровода коллимируется и попадает на анализатор – поляризационный делитель (обычно – призму Волластона), разделяющий пучок на две линейно-ортогональные составляющие. Интенсивности последних (I_1 и I_2), регистрируемые с помощью фотодиодов, определяются выражениями

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(1 + \cos(2\varepsilon)\cos(2\phi))/2, \\ I_2 &= I_0(1 - \cos(2\varepsilon)\cos(2\phi))/2, \end{aligned} \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность пучка до анализатора, ϕ – азимут поляризации относительно одного из разрешенных направлений призмы-анализатора. Максимальная чувствительность датчика – абсолютная реакция на изменение угла ϕ – реализуется при 45° -ной ориентации азимутального направления. При таком положении призмы, с учетом малого изменения эллиптичности поляризации света вдоль сильно закрученного волокна ($\varepsilon \approx 0$), алгоритм обработки измерительных сигналов I_1 и I_2 для определения тока i выглядит следующим образом:

$$i = \arcsin(\Delta I_{12})/(2NV). \quad (5)$$

Здесь $\Delta I_{12} = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ – относительная разница измерительных сигналов. Поскольку при величине магнитооптического поворота $|\alpha_F| > 45^\circ$ алгоритм (5) становится неоднозначным, существует принципиальное ограничение на диапазон измеряемых токов, а именно

$$|i| \leq \pi/(4NV). \quad (6)$$

Оценка влияния на чувствительность датчика параметров измерительного контура (величина закручивания стекловолокна, число волоконных витков и их радиус, ориентация плоскости контура относительно начального азимута поляризации) и источника зондирующего излучения (шумовая составляющая интенсивности генерации лазерного диода) была проведена на основе анализа поведения СП света на выходе светопровода при изменении тех или иных условий. Моделирование проводилось с использованием формализма сферы Пуанкаре [3] – представления СП в виде точки на единичной сфере с координатами долготы и широты, равными удвоенным значениям азимута и угла эллиптичности поляризации. Координаты СП после прохождения произвольной фазовой пластины определяются вращением на сфере начального положения поляризации на угол двулучепреломления вокруг оси двулучепреломления.

Координаты СП света (x' , y' , z') после прохождения закрученного волокна с витками в плоскости чувствительного контура находятся из произведения матрицы поворота (на угол δ вокруг оси ДЛП с направляющим вектором (X , Y , Z)) на радиус-вектор точки начального состояния (x , y , z):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^2 + (Y^2 + Z^2)\cos\delta & XY - XY\cos\delta - Z\sin\delta & XZ - XZ\cos\delta + Y\sin\delta \\ XY - XY\cos\delta + Z\sin\delta & Y^2 + (X^2 + Z^2)\cos\delta & YZ - YZ\cos\delta - X\sin\delta \\ XZ - XZ\cos\delta - Y\sin\delta & YZ - YZ\cos\delta + X\sin\delta & Z^2 + (X^2 + Y^2)\cos\delta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $x = \cos(2\varphi)\cos(2\epsilon)$, $y = \sin(2\varphi)\cos(2\epsilon)$, $z = \sin(2\epsilon)$, $X = \cos(2\psi)\cos(\arctan(2\alpha/\beta))$, $Y = \sin(2\psi)\cos(\arctan(2\alpha/\beta))$, $Z = \sin(\arctan(2\alpha/\beta))$, $\delta = (\beta^2 + 4\alpha^2)^{-1/2}$, β и 2α – линейная (вызванная изгибами волокна) и циркулярная (вызванная закручиванием волокна и эффектом Фарадея) составляющие двулучепреломления, 2ψ – азимут направления оси ДЛП на сфере. При вычислениях использовались следующие численные значения параметров: диаметр стекловолокна из плавленого кварца 125 мкм, $n = 1,456$, $\lambda = 660$ нм, $V = 4,5 \times 10^{-6}$ рад/А, $p_{11} - p_{12} = -0,149$, $v = 0,168$.

Смоделированные изменения координат СП света на выходе волокна, обусловленные магнитооптическим эффектом, преобразовывались по формулам (4) в соответствующие изменения измерительных сигналов I_1 и I_2 , после чего рассчитывалась чувствительность датчика. Для переменного тока она определялась как отношение среднеквадратических значений (rms)

$$\eta = (\arcsin(\Delta I_{12}))_{\text{rms}} / (2VNi)_{\text{rms}}, \quad (8)$$

при этом подразумевалась (если не оговорено специально) оптимальная, 45°-ная ориентация призмы-анализатора относительно азимута поляризации света на выходе светопровода в отсутствие тока.

Результаты моделирования параметров датчика

На рис. 1 для переменного тока с действующим значением 1000 А представлена расчетная зависимость чувствительности датчика от относительной величины закручивания волокна вокруг своей оси для световодного контура из 10 витков диаметром 5, 10 и 15 см. Перепады чувствительности в границах одной величины закручивания отражают влияние вращения в пространстве на 180° (с шагом 1,8°) плоскости волоконных витков относительно направления поляризации входного пучка. Результаты показывают, что при малом сечении световодного контура необходимая величина закручивания волокна для минимально приемлемой точности измерения тока должна быть не менее 45–50 об/м при $R = 2,5$ см. Увеличение относительной закрутки волокна либо увеличение

радиуса витков волоконного контура (при соответствующем увеличении общей длины светопровода) приводят как к росту чувствительности, так и к повышению ее стабильности. Обратим внимание на пульсации границ возможных изменений η . При некоторых значениях угла эллиптического ДЛП, кратных π рад (а лучше 2π), колебания чувствительности существенно меньше, чем при других углах. Такая особенность может быть обусловлена зависимостью чувствительности от нескольких факторов: от эллиптичности поляризации на выходе волокна, от средней эллиптичности поляризации вдоль волокна, от наклона траектории выходного СП относительно экватора на сфере Пуанкаре, от взаимной ориентации на сфере направления колебания оси двулучепреломления и направления изменения СП при магнитооптическом эффекте. По-видимому, при эллиптическом ДЛП, кратном π , зависимость от некоторых факторов становится минимальной либо происходит взаимная компенсация влияния факторов. Тем не менее с учетом возможных изменений угла ДЛП (например температурных) при оценке реальных границ колебаний чувствительности необходимо опираться на общие огибающие их границ (пунктирные линии на рисунке).

Формально относительная разница измерительных сигналов ΔI_{12} не зависит от общей интенсивности света до анализатора. Однако реальные измерительные сигналы I_1 и I_2 имеют конечные шумовые составляющие. Такие флюктуации могут быть вызваны как темновыми токами фотодиодов и шумами коэффициента усиления операционных усилителей АЦП, так и в первую очередь высокочастотным хаотичным дребезгом интенсивности света, обусловленным физической природой излучения лазерного диода [4]. Реальный размах относительного среднеквадратического значения σ_{rms} шума интенсивности одномодового лазерного диода зависит от многих факторов (температура, значение протекающего тока, эффекты обратной оптической связи и т. д.) и может составлять от 0,01% (режим генерации на одной моде) до нескольких процентов (режим конкуренции нескольких продольных мод). При опросе каналов АЦП с межканальным временным сдвигом высокочастотные колебания

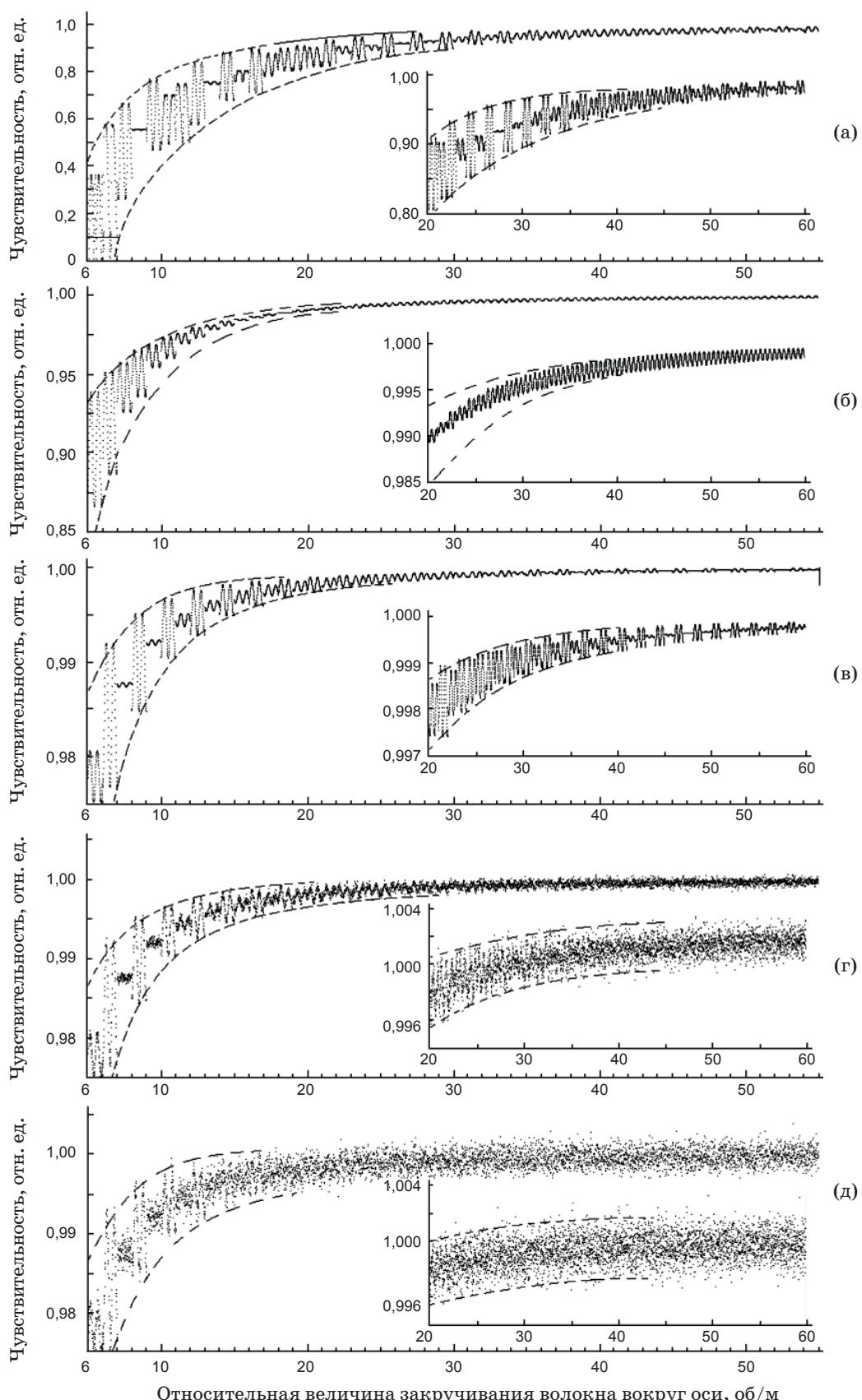


Рис. 1. Зависимости вариаций возможных значений чувствительности от относительной величины закручивания волокна при диаметре контура 5 см (а), 10 см (б) и 15 см (в, г, д) и относительном уровне шумов источника излучения $\sigma_{rms} = 0\%$ (а, б, в), 0,015% (г) и 0,05% (д). На вставках масштаб по оси ординат увеличен.

частотные хаотичные флуктуации интенсивности излучения проявляются в измерительных сигналах I_1 и I_2 в виде несинфазных шумовых составляющих. Учет возможных шумов при расчете чувствительности датчика существенно меняет картину зависимости $\eta(\tau)$. Так, для измерительного контура диаметром 15 см при шумовой составляющей интенсивности света $\sigma_{\text{rms}} = 0,015\%$ ($0,045\%$) закручивать волокно более, чем на 25 об/м (15 об/м), не имеет смысла, поскольку далее нестабильность η из-за шумов начинает превалировать над вариациями чувствительности при изменении положения плоскости контура относительно направления поляризации входного излучения (см. рис. 1г, 1д). Заметим, что чем больше величина закручивания волокна, тем больше вероятность его усталостного механического разрушения со временем, поэтому τ должно иметь наименьшее из допустимых значений. Наш опыт работы со световодом типа *twist* с внешним диаметром стекловолокна 125 мкм показывает, что величина закручивания $\tau = 25$ об/м обеспечивает длительную эксплуатацию датчика без разрушения чувствительного элемента. Опираясь на это значение и исходя из критерия достижения максимальной стабильности чувствительности, определим оптимальное количество витков световодного контура для нескольких возможных комбинаций следующих параметров: уровень шумов интенсивности света, общая длина волокна, номинальное значение измеряемого тока. На рис. 2 представлены возможные вариации чувствительности датчика. Оптимальное число витков измерительного контура – на рисунке выделено пунктирными линиями – лежит в области перетяжки множества возможных значений чувствительности. Как видно из рисунка, при малом значении измеряемого тока с ростом уровня шумов ширина перетяжки увеличивается и положение ее сдвигается вправо – в сторону увеличения количества витков. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе необходимого количества витков контура для корректного измерения тока в некотором диапазоне, поскольку класс точности измерительного прибора отражает не только максимально допустимую погрешность измерения в диапазоне 100–120% от номинального значения, но и нормирует допустимые погрешности для токов: 1% (для подкласса точности “S”), 5% и 20% [5]. Например, исходя из требований класса 0,2 для трансформаторов тока на номинальное значение 2 кА (rms) были рассчитаны зависимости чувствительности датчика от количества витков

в измерительном контуре для токов 2,4 кА (допустимая погрешность $\pm 0,2\%$), 2 кА ($\pm 0,2\%$), 400 А ($\pm 0,5\%$) и 100 А ($\pm 0,75\%$) при общей длине волокна $L = 5$ м и уровне шумовой составляющей интенсивности света $\sigma_{\text{rms}} = 0,015\%$. Для токов 2,4 и 2 кА допустимое количество витков в контуре составило от 2 до 13 (минимальные вариации чувствительности при 7 витках), для тока 400 А – от 5 до 17 (минимум при 8 витках), для тока 100 А – от 11 до 17 (минимум при 13 витках). Таким образом, для удовлетворения общих требований по точности измерения в полном диапазоне регистрируемых токов чувствительный контур при заданной длине стекловолокна должен содержать от 11 до 13 витков.

Очевидно, что ориентация призмы-анализатора в реальном датчике может отличаться от 45°-ной. Действие так называемого “геометрического эффекта” [6] приводит к изменению азимута поляризации света на выходе светопровода при изменении формы волоконных витков в пространстве. Колебания температуры среды также приводят к сдвигу азимута вследствие температурной зависимости наведенной закручиванием волокна оптической активности (порядка 10^{-4} К $^{-1}$ [2]). В конечном итоге алгоритм (5) становится неработоспособным. Однако при определении действующего значения переменного тока можно воспользоваться следующим алгоритмом обработки измерительных сигналов:

$$i_{\text{rms}} = \left(\frac{1}{2NV} \arcsin \left[\frac{\Delta \tilde{I}_{12}}{\sin \{ \arccos(\Delta \bar{I}_{12}) \}} \right] \right)_{\text{rms}} . \quad (9)$$

Здесь $\Delta \tilde{I}_{12}$ и $\Delta \bar{I}_{12}$ – переменный и постоянный компоненты относительной разницы измерительных сигналов. Первая составляющая непосредственно отражает действие переменного магнитооптического эффекта, а вторая используется как для нахождения сдвига среднего значения азимута поляризации (“рабочей точки”) относительно оптимального 45°-ного положения, так и для определения поправочного коэффициента чувствительности датчика, обусловленного этим сдвигом. Очевидно, что при оптимальном положении призмы-анализатора результаты вычисления тока по алгоритмам (5) и (9) совпадают.

На рис. 3 для шести различных ориентаций призмы-анализатора представлены рассчитанные с использованием алгоритма (9) диапазоны возможных вариаций относительной погрешности измерения тока датчиком с десятью витками чувствительного контура из волокна длиной 5 м при уровне шумовой составляющей интенсив-

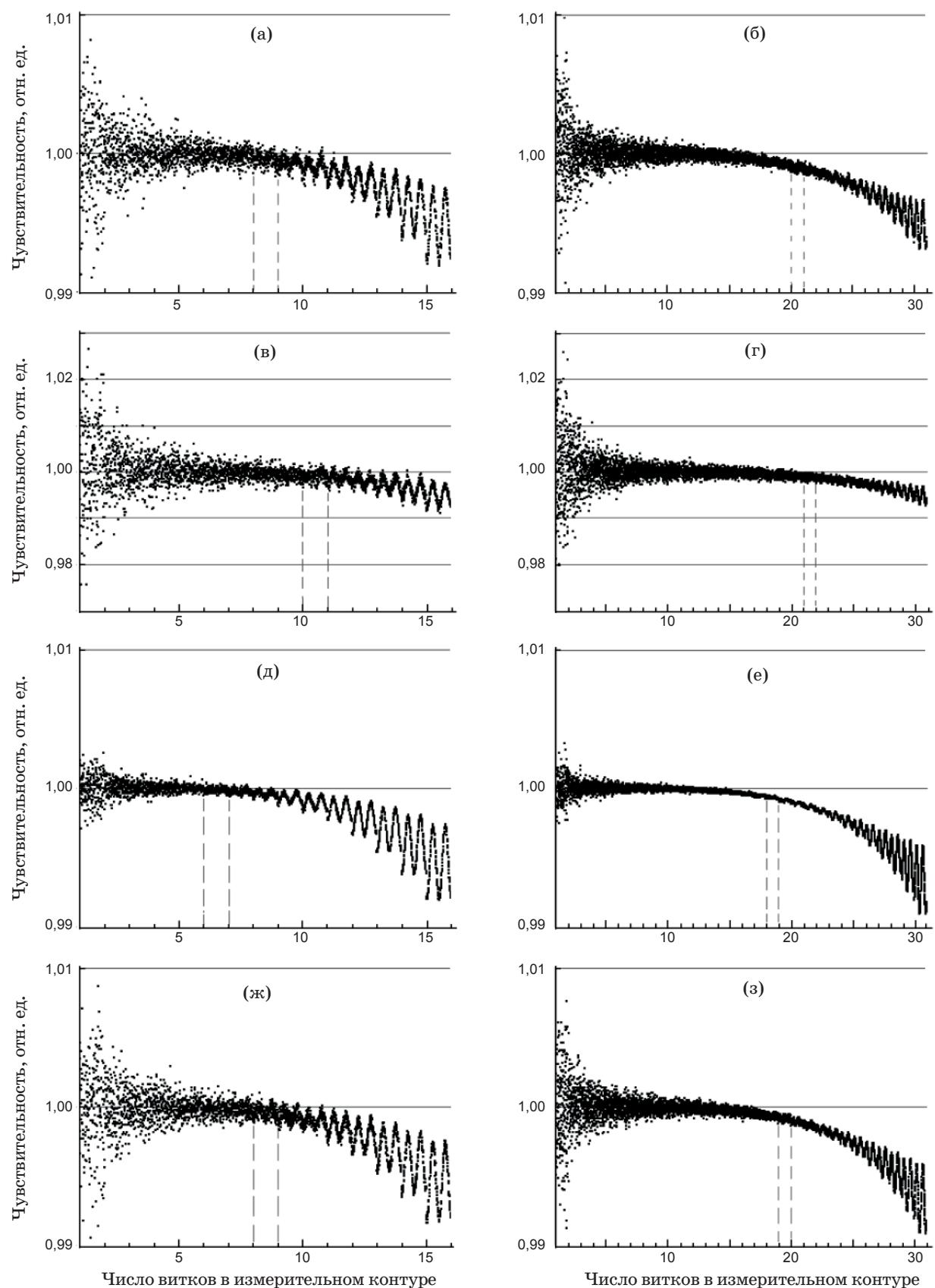


Рис. 2. Зависимости вариаций возможных значений чувствительности от количества витков волоконного контура при действующем значении измеряемого тока 1000 А (а-г) и 3000 А (д-з), общей длине световода 5 м (а, в, д, ж) и 10 м (б, г, е, з); значение шумовой составляющей интенсивности зондирующего света 0,015% (а, б, д, е) и 0,045% (в, г, ж, з).

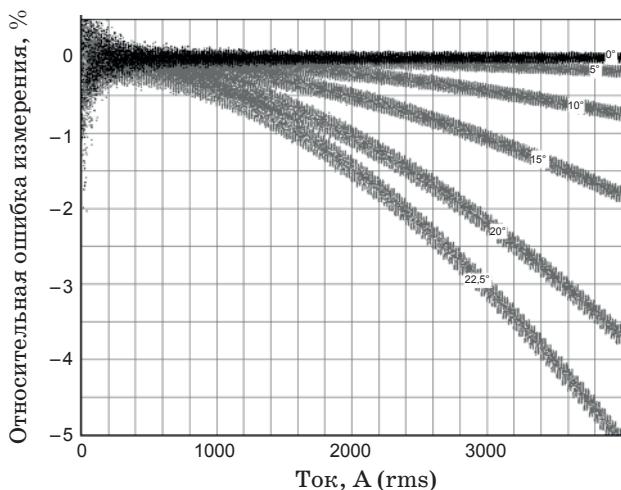


Рис. 3. Расчетные зависимости относительной ошибки измерения датчика от измеряемого тока при оптимальной ориентации призмы-анализатора (0°) и повороте ее на 5° , 10° , 15° , 20° и $22,5^\circ$ относительно угла $\pi/4$.

ности света 0,015% (для увеличения масштаба рисунка предельные ошибки выше $+0,5\%$ для малых токов не показаны). Результаты показывают, что сдвиг ориентации призмы относительно оптимального угла $\pi/4$ приводит к возрастанию шумовой составляющей ошибки, а также к появлению систематической ошибки измерения, особенно заметной при измерении больших токов. Поворот на $22,5^\circ$ соответствует максимально возможному сдвигу азимута поляризации относительно ориентации призмы-анализатора при использовании в системе регистрации дополнительной призмы, развернутой на угол 45° относительно первой. При этом в алгоритме (9) перекрестно используются измерительные сигналы с той призмы, угловой сдвиг относительно которой не превышает $22,5^\circ$ (т. е. используется та из призм, которая в данный момент времени имеет большую переменную составляющую относительной разницы сигналов). В этом случае, например для измеряемого тока 1000 А (2000 А), максимальная систематическая ошибка не превысит 0,5% (1,5%) при любой ориентации блока из двух призм.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная проверка работоспособности алгоритма (9) при изменении ориентации призмы-анализатора проводилась с использованием макетного образца датчика с чувствительным контуром постоянной формы из стек-

ловолокна LB600 (диаметр сердцевины волокна 3,5 мкм, числовая апертура 0,1 – данные производителя) длиной 4,75 м с величиной относительного закручивания волокна 25 об/м. Конечные части волокна вклеивались в керамические вставки стандартных оптических коннекторов типа FC. В качестве источника света использовался одномодовый лазерный диод ML1016R с номинальной мощностью излучения 35 мВт на длине волны 660 нм.

Входной торец стекловолокна полировался наклонно (торец со “скосом”), выходной – перпендикулярно оси (“нормальный” торец). Такая конфигурация наклонов была выбрана для исключения интерференционных эффектов между торцами волокна, а также для пассивной стабилизации интенсивности излучения лазерного диода. Дело в том, что при значительной длине попавшего в одномодовое стекловолокно излучения лазерный диод начинает работать в схеме с составным резонатором, роль внешнего зеркала которого играет дальний, “нормальный” торец волокна. За счет чрезвычайно большой длины составного резонатора межмодовые расстояния резко сужаются, что, по-видимому, выравнивает условия генерации для продольных мод основного резонатора диодного лазера. В результате диод одновременно излучает на большом количестве продольных мод (порядка 10 шт. с межмодовым интервалом примерно 0,08 нм) при общей интенсивности шумов излучения $\sigma_{rms} = 0,01–0,02\%$.

Для измерения интенсивностей световых пучков использовались фотодиоды ФД-256, работающие в фотодиодном режиме. Напряжения U_1 и U_2 с нагрузочных сопротивлений в цепях питания фотодиодов, пропорциональные интенсивностям световых пучков, оцифровывались с помощью 16-разрядного АЦП. Далее осуществлялась “нормировка” измеренных сигналов U_1 и U_2 . Для этого определялись среднеквадратические значения переменных составляющих \tilde{U}_1 и \tilde{U}_2 и их соотношение – нормировочный коэффициент $k = (\tilde{U}_1)_{rms}/(\tilde{U}_2)_{rms}$. Определение нормировочного коэффициента необходимо для учета возможных неравномерных по каналам потерь излучения, разной чувствительности фотодиодов, неодинаковой юстировки их положения в схеме и т. п. Поскольку в идеальных условиях (при равенстве всех условий) переменные составляющие сигналов \tilde{U}_1 и \tilde{U}_2 должны быть равны по амплитуде, то в алгоритмах обработки измерительных сигналов необходимо использовать нормированные сигналы $U_1/k = I_1$

и $U_2 = I_2$. Заметим, что для минимизации влияния шумов на точность вычисления нормировочного коэффициента его целесообразно определять при максимальных значениях переменных составляющих \tilde{U}_1 и \tilde{U}_2 , т. е. при ориентации призмы-анализатора вблизи угла $\pi/4$.

Измерительный контур датчика состоял из 11 световодных витков, через которые пропускались 938 витков токопроводящей катушки. Максимальное значение переменного тока (50 Гц), проходящего через волоконный контур, достигало 2,7 кА (rms). Ток контролировался путем измерения напряжения на высокоточном шунте (0,1 Ом) в цепи питания катушки. Для этого напряжение с шунта $U_{\text{ш}}$ одновременно с измерительными сигналами U_1 и U_2 поступало на один из входов АЦП.

Предварительно, при максимально возможном в эксперименте значении тока через соленоид и оптимальной ориентации призмы-анализатора, данные относительного измерения тока датчиком и контроля этого тока с помощью шунта приравнивались друг другу с помощью масштабного коэффициента M . Этот коэффициент запоминался и использовался при последующих измерениях в качестве опорного в алгоритме обработки измерительных сигналов. Таким образом, изменения чувствительности датчика при варьировании условий эксперимента, приводящие к изменению соотношения между одновременным и опорным (M) масштабными коэффициентами, отражались в виде относительной погрешности измерений.

На рис. 4 представлены экспериментальные результаты регистрации суммарного тока, проходящего через измерительный контур датчика, для четырех угловых ориентаций призмы-анализатора. За оптимальную угловую ориентацию принималось положение с нулевой постоянной составляющей относительной разности измерительных сигналов $\Delta\bar{I}_{12} = 0$. Экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования (см. рис. 3). Так, при 15°-ном угловом сдвиге положения анализатора для токов 1 кА (2,7 кА) расчетная и экспериментальная систематические ошибки составили 0,15% (0,9%) и 0,2% (1,1%) соответственно. Некоторое увеличение экспериментального значения ошибки по сравнению с расчетным, возможно, связано с влиянием неучитываемых локальных двулучепреломлений в коннекторах.

Расчетные и экспериментальные результаты, представленные на рис. 3 и 4, получены для разных угловых положений анализатора, но

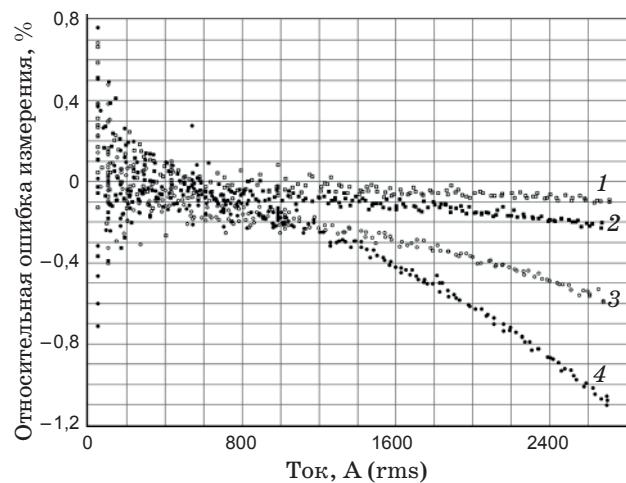


Рис. 4. Экспериментальные результаты регистрации суммарного тока в диапазоне до 2,7 кА для четырех угловых сдвигов призмы-анализатора относительно оптимального положения: 1 – 0°, 2 – 5°, 3 – 10° и 4 – 15°.

неизменном СП света на выходе стекловолокна. В реальной конструкции датчика возможные изменения среднего азимута поляризации излучения на выходе стекловолокна относительно ориентации анализатора происходят при фиксированном положении последнего. При наличии дополнительных локальных линейных двулучепреломлений в коннекторах поведение измерительных сигналов I_1 , I_2 и результат их обработки по алгоритму (9) в этом случае существенно меняются. Это приводит к дополнительной ошибке измерения тока.

Влияние и учет двулучепреломлений в местах фиксации конечных участков стекловолокна

Жесткая фиксация конечных участков волокна (обжимные крепления, вклейка в керамические вставки оптических коннекторов) неизбежно приводит к возникновению упругих деформаций в фиксируемых объемах стекла, а значит, и к возникновению в этих местах поляризационной анизотропии. Поскольку вклейка в коннекторы или иная механическая фиксация концов стекловолокна проводится до операции закрутки волокна вокруг оси (т. е. до создания в нем распределенной оптической активности), в конечных участках волокна циркулярное ДЛП отсутствует. Поэтому локальные линейные двулучепреломления на входе и выходе стекловолокна, вызванные механическими напряже-

ниями, остаются некомпенсированными. ДЛП в коннекторах может достигать нескольких десятков градусов, что резко усложняет картину поведения СП света на выходе волокна в реальных условиях.

На рис. 5 на сфере Пуанкаре представлена условная траектория распространения СП света вдоль сильно закрученного вокруг оси стекловолокна. Полюса сферы L , R представляют левую и правую круговые поляризации, точки на экваторе H и V – горизонтальное и вертикальное линейные состояния поляризации, P и Q – поляризации с азимутами $-\pi/4$ и $\pi/4$. Точками B_{in} и B_{out} и углами β_{in} и β_{out} обозначены положения осей ДЛП и их значения во входном и выходном узлах крепления волокна – оптических коннекторах.

Допустим, что положение 1 – линейное СП света перед входным торцом волокна. Под действием “входного” ДЛП начальное СП из положения 1 переходит в положение 2. При сильной наведенной активности эллиптичность поляризации света в волокне на участке между коннекторами почти не меняется и траектория распространения СП вдоль волокна представляет собою практически правильную окружность I, параллельную экватору. СП света последовательно проходит через точки этой окружности (условно показаны промежуточные позиции 2–8), причем общее количество обходов окруж-

ности и конечное положение СП на ней перед выходным коннектором зависят от длины и величины закручивания волокна, а также от проявлений “геометрического эффекта”. Дуги, проходящие через промежуточные позиции (на рисунке выделены), условно отражают интегральные диапазоны изменения двойного азимута поляризации света в переменном магнитном поле, “накопленные” на отрезке волокна от входного торца до рассматриваемых точек.

Допустим, что положение 8 соответствует СП света перед выходным коннектором. Двулучепреломление в последнем переведет его в положение 9, лежащее на непараллельной экватору окружности II, при этом на выходе волокна в общем случае результатом действия эффекта Фарадея будет модуляция как азимута поляризации, так и угла эллиптичности, а диапазоны изменений углов будут зависеть от конкретного положения СП на окружности II. Поскольку ДЛП в коннекторах и положение их осей могут быть произвольными и, кроме того, зависящими от температуры, адекватная интерпретация результатов измерений для определения переменного тока в этом случае представляется весьма проблематичной. В качестве примера в таблице представлены возможные вариации чувствительности датчика при перемещении положения СП по окружности II для переменного тока, который соответствует среднеквадратическому значению переменного магнито-оптического угла 0,1 рад. Чувствительность определялась при условии перекрестного использования алгоритма (9) для измерительных сигналов от двух призм-анализаторов. Ориентация оси входного ДЛП принималась равной 45° относительно направления поляризации света (для учета максимально возможных изменений СП после прохождения входного коннектора). За относительную единицу принималась чувствительность при отсутствии линейных ДЛП в коннекторах и при оптимальной ориентации одной из призм. Очевидно, что при совпадении оси входного ДЛП с направлением поляризации света изменений СП на выходе не происходит и такая ситуация аналогична случаю с нулевым входным ДЛП.

В [7] для определения и учета влияний ДЛП в конечных участках стекловолокна описана последовательность обработки измерительных сигналов от двух призм-анализаторов с известным взаимным разворотом (предпочтительно $\pi/4$). Две пары измерительных сигналов позволяют определить СП света на выходе стекловолокна

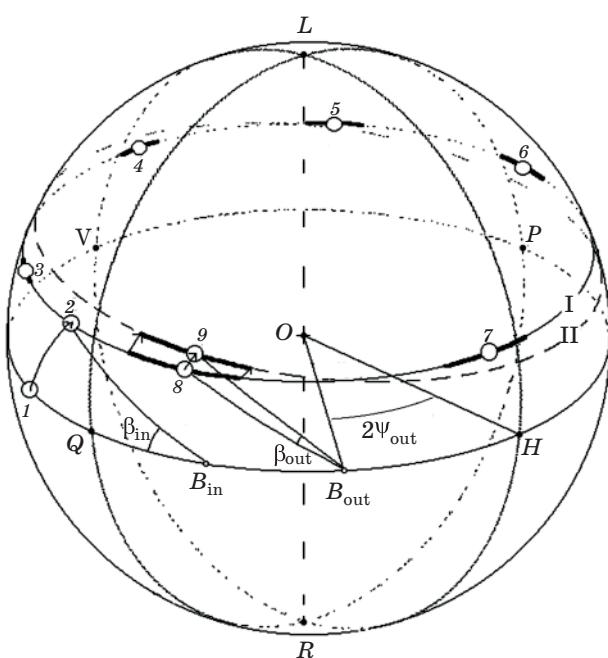


Рис. 5. Условная траектория изменения СП света на сфере Пуанкаре.

Возможные вариации относительной чувствительности датчика (min, max) при проявлении “геометрического эффекта” в зависимости от входного и выходного линейных двулучепреломлений

Угол входного ДЛП, рад	Угол выходного ДЛП, рад							
	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,996	0,994	0,989	0,966	0,929	0,879	0,827	0,759
	1,000	1,000	0,999	0,997	0,992	0,987	0,980	0,972
0,05	0,993	0,989	0,981	0,953	0,912	0,860	0,808	0,739
	0,999	0,999	0,998	0,996	0,992	0,986	0,980	0,972
0,1	0,986	0,980	0,969	0,937	0,893	0,839	0,788	0,719
	0,995	0,995	0,995	0,993	0,990	0,985	0,979	0,971
0,2	0,957	0,948	0,933	0,895	0,848	0,793	0,744	0,678
	0,980	0,980	0,980	0,979	0,978	0,976	0,973	0,967
0,3	0,913	0,903	0,885	0,844	0,796	0,743	0,699	0,637
	0,955	0,955	0,955	0,955	0,954	0,954	0,953	0,951
0,4	0,855	0,846	0,828	0,787	0,741	0,690	0,651	0,594
	0,921	0,921	0,921	0,921	0,920	0,920	0,920	0,919
0,5	0,789	0,780	0,764	0,725	0,682	0,636	0,603	0,551
	0,877	0,877	0,877	0,877	0,877	0,877	0,876	0,876
0,6	0,716	0,709	0,696	0,661	0,623	0,582	0,554	0,508
	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825	0,824	0,824	0,824

(углы φ и ε), а значит, и координаты точек выделенной дуги в позиции 9 на сфере рис. 5 (с точностью до полусферы). Далее эта дуга расчетным путем достраивается до полной окружности II и определяются угол и направление наклона плоскости найденной окружности относительно плоскости равной ей по размеру окружности I, параллельной экватору. В итоге определяется размер дуги в позиции 8, а значит, и искомая интегральная величина магнитооптического эффекта перед выходным коннектором.

Описанное выше качественное поведение СП света на выходе чувствительного элемента датчика подтвердилось экспериментально. В экспериментах использовался макетный образец датчика с оптическим кабелем длиной 8 м (относительное закручивание волокна 25 витков/м). Часть излучения с выхода кабеля после коллимации проходила через две призмы Волластона, развернутые относительно друг друга на угол $\pi/4$. Значения интенсивностей световых сигналов с выходов призм обрабатывались для определения СП излучения на выходе волокна. Два витка волокна проходили через центр соленоида с обмоткой из 2000 витков, по которому пропускался переменный электрический ток 10 А (rms). В начальной части световода образовывался виток диаметром примерно 40 см, плоскость которого с периодом порядка 40 с механически вращалась в пространстве на $\pm 0,5$ оборота. При этом за счет “геометрического эффекта” положе-

ние СП перед выходным коннектором изменялось в пределах условной окружности I рис. 5, что в конечном счете приводило к прецессии выходного СП на сфере Пуанкаре вдоль окружности II. На рис. 6 представлены графики изменений азимутального угла (а) и угла эллиптичности (б) поляризации света на выходе световода при вращении волоконного витка в пространстве; относительной ошибки измерения тока при учете двулучепреломлений в коннекторах (в) или при перекрестном использовании алгоритма (9) для двух пар измерительных сигналов (г); локальные временные “кадры” с экспозицией по 20 мс (25, 32, 40 и 47-я секунды) координат состояний поляризации на выходе светопровода (д) – кривые на общей синусоидальной траектории, и пересчитанные СП до выходного коннектора – кривые вдоль линий широты. Для зависимостей на рис. 6д разброс точек внутри кадра вызван переменным магнитооптическим эффектом, а сдвиги между кадрами – проявлением “геометрического” эффекта.

Как видно из рисунка, применение описанной выше процедуры определения СП света перед выходным коннектором оказалось достаточно эффективным для адекватного измерения тока (ошибка $\pm 0,5\%$) по сравнению с использованием алгоритма (9) (диапазон ошибок лежит в интервале $-18\dots+6\%$ относительно среднего уровня). Моделирование реакции алгоритма (9) на возможные изменения СП на выходе свето-

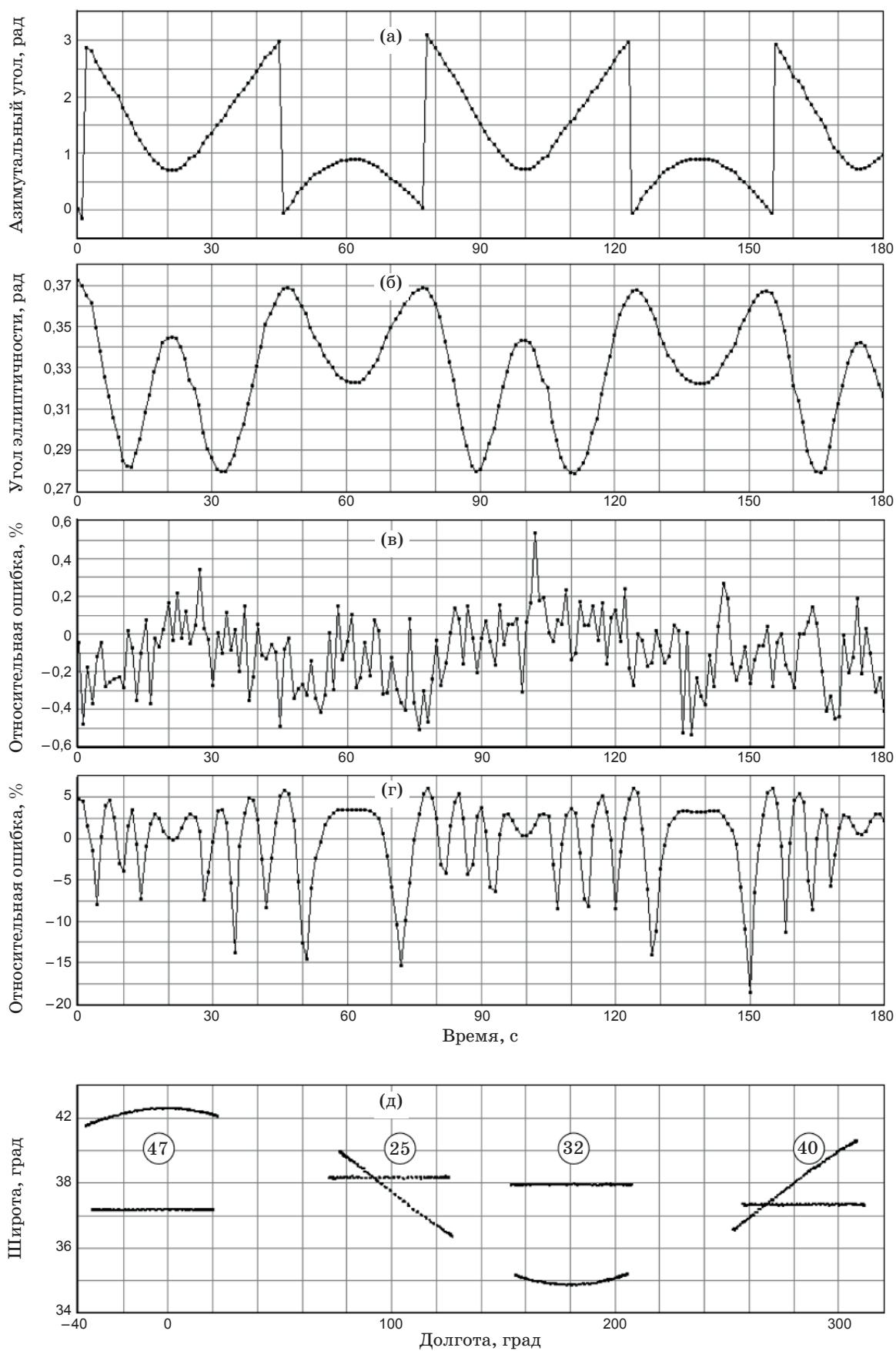


Рис. 6. Изменения азимутального угла (а) и угла эллиптичности (б) поляризации света на выходе светопровода, ошибки измерения тока (в), (г) и координат СП света до и после выходного коннектора (д) при вращении волоконного витка в пространстве (пояснения в тексте).

проводка при вращении витка в пространстве (при использовании вычисленных в эксперименте средних значений эллиптичности поляризации до выходного коннектора и двулучепреломления в последнем) показало, что диапазон размаха ошибок в этом случае может составлять до 23%, что качественно согласуется с результатами эксперимента.

Эксперименты по раздельному локальному нагреву направленными потоками горячего воздуха оптических коннекторов, приводящему к изменению локальных двулучепреломлений и положений их осей, при неизменной форме волоконных витков в пространстве, также подтвердили эффективность описанной выше процедуры учета двулучепреломлений в коннекторах для определения измеряемого тока [8].

К сожалению, точность определения ДЛП в коннекторах зависит от многих факторов: от шумовой составляющей интенсивности света, от точности определения взаимной ориентации призм-анализаторов и нормировочных коэффициентов в парах измерительных сигналов, от амплитуды измеряемого тока (от размера дуги на сфере Пуанкаре, используемой для построения полной окружности). Погрешности определения поляризационных параметров накапливаются на каждом этапе расчета, что в конечном счете приводит к заметным итоговым ошибкам измерения, особенно при регистрации малых токов. Успешность применения описанного выше алгоритма зависит также от соотношения значений входного и выходного ДЛП. Дело в том, что, если значение выходного ДЛП превышает удвоенный угол эллиптичности поляризации после входного коннектора, траектория выходного СП света может пересекать экватор сферы Пуанкаре. В такие моменты резко растет погрешность построения окружности I. Поэтому необходимо предусмотреть меры для исключения описанной ситуации при измерениях, например, путем изменения азимута поляризации света до входного торца волокна либо принудительным смещением координат точек выходного СП за счет “геометрического эффекта”.

Заключение

Эффективность использования световода типа *twist* в качестве чувствительного элемента поляриметрического волоконно-оптического датчика переменного электрического тока зависит от ряда факторов. Шумовая составляющая источника света и номинальное значение

измеряемого тока определяют минимально необходимое число витков в контуре, диаметр витков контура – минимальную относительную величину закручивания волокна вокруг оси для создания достаточного циркулярного ДЛП. Общая величина закручивания волокна определяет возможный температурный диапазон смещения азимутального направления поляризации относительно анализатора (для фиксированной формы чувствительного элемента в пространстве). Наличие дополнительных локальных ДЛП на входе–выходе волокна требует значительного усложнения системы регистрации и алгоритма обработки измерительных сигналов датчика для получения приемлемой точности измерения тока.

Следует отметить, что однопроходная схема с чувствительным контуром произвольной формы малопригодна при наличии сильной вибрации составных частей датчика, поскольку реакция прибора на проявление быстроменяющегося “геометрического эффекта” в этом случае качественно неотличима от реакции непосредственно на переменный магнитооптический эффект. Выходом из ситуации может служить применение схемы с двойным проходом излучения через светопровод (туда и обратно), однако в этом случае увеличивается влияние локальных двулучепреломлений в конечных частях волокна на результат измерения тока. Поэтому желательно, чтобы узел обратного ввода излучения в волокно помимо коллимирующей оптики и зеркала содержал 90-градусный фазовый вращатель [9]. В этом случае полностью нивелируется роль двулучепреломления на выходе волокна и в значительной мере компенсируется влияние входного ДЛП на результаты измерения тока.

В статье не затрагивались очевидные вопросы необходимости учета температурной зависимости константы Верде материала светопровода (для плавленого кварца примерно $0,7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [10]), а также учета возможного температурного сдвига длины волны излучения лазерного диода (тически порядка $0,2 \text{ нм/К}$ для диодов красного диапазона спектра), приводящего к относительному изменению константы Верде вследствие ее спектральной зависимости (для плавленого кварца примерно на 0,3% при сдвиге 1 нм на длине волны 660 нм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single mode fibers // Opt. Lett. 1980. V. 5. P. 273–275.

2. *Smith A.M.* Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber // *Appl. Opt.* 1980. V. 19. № 15. P. 2606–2611.
3. *Шерклифф У.* Поляризованный свет. Пер. с англ. М.: Мир, 1965. 264 с.
4. Физика полупроводниковых лазеров. Пер. с яп. / Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с.
5. ГОСТ 7746 – 2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
6. *Клышко Д.Н.* Геометрическая фаза Берри в колебательных процессах // *УФН.* 1993. Т. 63. № 11. С. 1–18.
7. *Ловчий И.Л.* Определение *in situ* параметров двойных лучепреломлений в оптических коннекторах волоконно-оптического датчика переменного электрического тока и их учет в алгоритме обработки измерительных сигналов // Сб. тр. VI Междунар. конф. “Прикладная оптика-2004”. СПб. 2004. Т. 1. С. 215–219.
8. *Ловчий И.Л.* Волоконно-оптический датчик для оперативного контроля больших электрических токов промышленной частоты // Сб. тр. VI Междунар. конф. “Прикладная оптика-2004”. СПб. 2004. Т. 1. С. 374–378.
9. *Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Иванов В.В., Новиков М.А.* Фарадеевский компенсатор взаимной оптической анизотропии на основе поляризационного кольцевого интерферометра // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. В. 10. С. 57–63.
10. *Williams P.A., Rose A.H., Day G.W., Milner T.E., Deeter M.N.* Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. № 10. P. 1176–1178.