

УДК 535.5

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-07-44-49

## Моделирование чувствительности волоконного магнитооптического датчика тока при сугубо неоднородном распределении магнитного поля вдоль контура

© 2018 г. И. Л. Ловчий, канд. физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: lovchy@nioer.ru

Поступила в редакцию 25.12.2017

На примерах несимметричного расположения токоведущих проводников относительно волоконного измерительного контура магнитооптического датчика тока проведена оценка влияния неоднородности магнитного поля на точностные характеристики датчика.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик тока, оптическое волокно типа *spun*, состояние поляризации, эффект Фарадея, сфера Пуанкаре.

**Коды OCIS:** 060.0060, 060.2370

Общепринятыми достоинствами волоконно-оптических датчиков тока (ВОДТ) на магнитооптическом (МО) эффекте Фарадея являются малые массогабаритные параметры, широкий динамический диапазон, универсальность в части измерения переменных и постоянных токов, отличная электрическая изоляция [1]. Безусловными плюсами являются также возможность формирования произвольной формы чувствительного контура (например, для обеспечения измерения токов в проводниках сложной конструкции) и эффективная «помеховая» развязка от токоведущих проводников вне измерительного контура при условии замкнутости последнего. В случае чувствительного контура из идеального изотропного оптического волокна это прямо следует из теоремы о циркуляции магнитного поля. Однако конструктивно волоконный контур может содержать в себе нецелое количество витков, что потенциально может привести к возможным ошибкам измерения тока из-за наводок от расположенных рядом, но находящихся вне контура токоведущих проводников [2]. С другой стороны, даже в случае полностью замкнутого контура из реального оптического волокна с конкретным распределением, в общем случае, эллиптического двойного лучепреломления (ДЛП) при использовании конкретного алгоритма

обработки измерительных сигналов большие локальные перепады напряженности магнитного поля вдоль контура могут привести к нарушению принципа «независимости» измерений от траектории накопления МО отклика датчика. Такая ситуация может сложиться, например, при регистрации тока в многожильном проводнике, когда чувствительным контуром охватывается только часть из совокупности идентичных токоведущих жил с последующим умножением результатов измерений на коэффициент охвата, если общее значение тока выходит за допустимый рабочий диапазон датчика. Очевидно, при этом необходимо быть уверенным, что проводники, не попавшие в измерительный контур, не вносят искажений в отклик датчика.

Аналогичная ситуация с неравномерностью поля наблюдается при калибровке ВОДТ. Обычно процедура калибровки заключается в пропуске стекловолоконного контура по оси многовиткового соленоида с числом витков  $N$ , через который пропускается относительно небольшой ток  $i$ , измеренный с требуемой точностью традиционными способами [3]. Считается, что отклик датчика на суммарное значение тока в соленоиде  $N \times i$  идентичен реакции на ток  $I = N \times i$ , пропущенный сквозь чувствительный контур датчика по одному проводнику, что также следует из теоремы

о циркуляции магнитного поля. Поскольку продольная (вдоль оси волокна) составляющая магнитного поля практически полностью сосредоточена внутри соленоида, необходимо быть уверенным, что реакция датчика на интегральное магнитное поле не зависит от степени локализации поля на небольшом участке контура.

В работе на примерах несимметричного расположения токоведущих проводников относительно измерительного контура представлены результаты численного исследования влияния неоднородности магнитного поля на точностные характеристики поляриметрического ВОДТ.

Наиболее часто в качестве чувствительного элемента ВОДТ используется оптическое волокно типа *spun* [4, 5], изготавливаемое вытяжкой из вращающейся заготовки с сильным внутренним линейным ДЛП. Типичные длина  $L_p$  биений ДЛП и шаг  $L_\tau$  закрутки волокна при вытяжке составляют несколько миллиметров, причем  $L_\tau \leq L_p$ . Уменьшение  $L_p$  приводит к повышению устойчивости отклика датчика к искривлениям волокна в пространстве, увеличение соотношения  $L_p/L_\tau$  — к повышению чувствительности датчика.

Численное моделирование чувствительности датчика проводилось с учетом параметров волокна, используемого в макетном образце поляриметрического датчика [6], построенного по двухпроходной схеме с компенсатором взаимной оптической анизотропии и обладающего высокой устойчивостью к температурным, спектральным и геометрическим вариациям условий прохождения зондирующего излучения по волокну. В процессе моделирования анализировалось состояние поляризации (СП) изначально линейно поляризованного пучка света, проходящего вдоль оси волокна, для чего последнее представлялось в виде последовательности предельно тонких фазовых пластин, преобразующих СП в соответствии с локальным распределением ДЛП. После двойного обхода чувствительного контура зондирующий пучок на выходе волокна умозрительно расщеплялся поляризационным делителем — анализатором, установленным под углом  $\pm\pi/4$  к направлению вектора поляризации на входе в волокно, на две составляющие, интенсивности которых  $I_1$  и  $I_2$ , как и в реальном датчике, использовались в алгоритме обработки сигналов для получения информации о значении измеряемого тока.

Для «идеального» двухпроходного волоконного датчика, в котором изменения СП света обусловлены только циркулярным ДЛП вследствие эффекта Фарадея в магнитном поле проводника с током, относительная разница измерительных сигналов  $\Delta I_{12} = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$  связана с углом  $\alpha$  — углом МО вращения плоскости поляризации за один проход изотропного световода, следующим соотношением:

$$\Delta I_{12} = \sin(4\alpha). \quad (1)$$

Это соотношение использовалось для моделирования вариаций чувствительности реального датчика при изменении параметров волокна, значения и локального распределения МО эффекта, геометрии и ориентации чувствительного контура. Для этого рассчитанные вариации СП света на выходе волокна — изменения азимута  $\varphi$  (относительно 45-градусного положения анализатора) и угла эллиптичности поляризации  $\epsilon$ , отвечающие изменениям условий накопления МО угла, использовались для нахождения соответствующих вариаций величины  $\Delta I_{12}$  исходя из ее зависимости от поляризационных углов

$$\Delta I_{12} = \cos(2\epsilon)\sin(2\varphi), \quad (2)$$

а чувствительность датчика определялась как

$$\eta(\alpha) = \sin^{-1}(\Delta I_{12})/4\alpha. \quad (3)$$

Очевидно, что в случае «идеального» датчика  $\eta(\alpha) = 1$  при  $|\alpha| \leq 22,5^\circ$ .

На рис. 1 на сфере Пуанкаре представлена эволюция СП распространяющегося вдоль волокна изначально линейно-поляризованного света. Точки экватора сферы  $H$  и  $V$  соответствуют линейным состояниям поляризации с горизонтальным и вертикальным направлениями вектора поляризации, полюса сферы  $R$  и  $L$  — право- и левовращающему состояниям поляризации.

При начальном положении оси ДЛП волокна  $\pm\pi/4$  СП периодически отклоняется от экватора на угол  $\pm\chi$

$$\chi = \tan^{-1}(L_\tau/2L_p) \quad (4)$$

с периодом колебаний  $T$ , достаточно точно удовлетворяющим эмпирическому выражению

$$T = \pi(L_\tau / 2L_p)\sin\chi\sqrt{\cos\chi}. \quad (5)$$

При ином начальном положении оси ДЛП колебательная кривая («змейка») искажается по форме и смещается от экватора к одному из полюсов. Искривление волокна в пространстве приводит к добавочным возмущениям траектории СП в виде

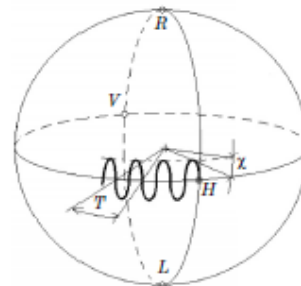


Рис. 1. Эволюция СП, распространяющегося вдоль *spun* волокна, изначально линейно-поляризованного света.



наложения дополнительных колебаний относительно экватора всей «змейки» в целом.

В работе [6] показано, что при малых МО углах и небольших изгибах волокна чувствительность датчика определяется выражением

$$\eta = (\cos\gamma)^2. \quad (6)$$

При сильных изгибах (например, при намотке волокна в катушку с малым радиусом для увеличения числа витков в чувствительном контуре) отклик датчика становится неустойчивым, зависящим от ориентации контура, и общая чувствительность определяется выражением

$$\eta \pm \Delta\eta = (\cos\gamma)^2 \pm 2\delta\cos\gamma\sin\gamma, \quad (7)$$

где коэффициент  $\delta$  зависит от соотношения наведенного изгибом и встроенного ДЛП, а также от закрутки осей последнего. Заметные колебания чувствительности плавленного кварца (на уровне около 1% и более) на длине волны 660 нм и типичных значениях  $L_p$  и  $L_z$  проявляются при радиусах изгиба волокна менее 2–3 см.

Для однозначного определения двух проходным поляриметрическим датчиком угла  $\alpha$  последний не должен выходить из диапазона  $\pm 22,5^\circ$  (при использовании идеального изотропного волокна). Тогда при константе Верде плавленного кварца 4,2 мкрад/А на длине волны 660 нм диапазон измерения тока датчиком с одновитковым чувствительным контуром составит около  $\pm 93,5$  кА. В *spun* волокне траектория СП отклоняется от экватора, и диапазон изменения азимутального угла поляризации света на выходе волокна меньше аналогичного диапазона для идеального волокна. Это приводит к потенциально возможному расширению диапазона измерения МО угла (примерно до  $\pm 100$  кА в случае реального волокна, используемого в датчике [6]). Но следует иметь в виду, что на концах диапазона точность измерения угла  $\alpha$  существенно падает вследствие стремления к нулю отношения приращения  $\Delta I_{12}$  к приращению  $\alpha$ .

На рис. 2 представлено расчетное распределение продольной (вдоль оси волокна) составляющей напряженности магнитного поля чувствительного контура в форме окружности длиной 1 м (радиус контура  $r \approx 159$  мм), относительно которого размещены проводники с противоположными направлениями токов. Проводник с измеряемым током проходит сквозь контур, проводник с обратным, «помеховым», током — вне его. Для усиления эффекта неоднородности поля вдоль контура проводники максимально сближены (до расстояния в 1 см), а значение обратного тока на два порядка превышает значение измеряемого. В идеальной (типовой) для измерения тока ситуации — при расположении проводника с измеряемым током по центру контура и отсутствии «помехового» проводника — относительное значение напряженности

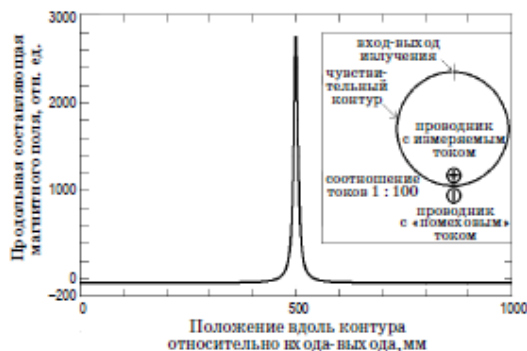


Рис. 2. Расчетное распределение продольной (вдоль оси волокна) составляющей магнитного поля чувствительного контура в форме окружности длиной 1 м. На вставке рисунка представлена геометрия расположения контура относительно проводников с токами.

поля вдоль оси волокна принято за единицу. Как видно из рисунка, перепады напряженности поля в описанном выше случае по сравнению с идеальной ситуацией составляют свыше трех порядков.

На рис. 3а представлена типовая реакция датчика (светлые точки) на возбуждение в контуре МО угла с интегральным значением от  $-22^\circ$  до  $+22^\circ$  (на рисунке за счет двойного обхода контура углы от  $-44^\circ$  до  $+44^\circ$  — 11 дискретных реализаций, темные точки) при отсутствии проводника с обратным током. Конкретное расположение проводника с измеряемым током внутри чувствительного контура практически не сказывается на реакции датчика. Моделирование проводилось с учетом реальных параметров *spun* волокна, используемого в датчике [6]:  $L_p = 4,4$  мм,  $L_z = 3,33$  мм. Числа у светлых точек соответствуют определенной по формуле (3) чувствительности, чувствительность, определенная по формуле (6), составляет 0,874. Результаты показывают, что при максимальных рассматриваемых МО углах падение чувствительности датчика составляет около 12% относительно расчетной по формуле (3), и для адекватных измерений тока необходимо использовать поправочную кривую  $\eta_{\text{нст}}(\alpha)$  — назовем ее типовой поправочной кривой. Такое падение обусловлено увеличением эллиптичности поляризации света на выходе волокна (а значит, уменьшением первого сомножителя в выражении (2)) при больших МО углах. Это видно из рис. 3б, на котором на развертке поверхности сферы Пуанкаре представлены координаты трека СП излучения на выходе волокна при последовательном переборе МО углов. Значения долготы соответствуют удвоенному азимутальному углу поляризации излучения, значения широты — удвоенному углу эллиптичности.

На рис. 4 представлены реакция датчика и координаты СП для условий рис. 2. Для более под-

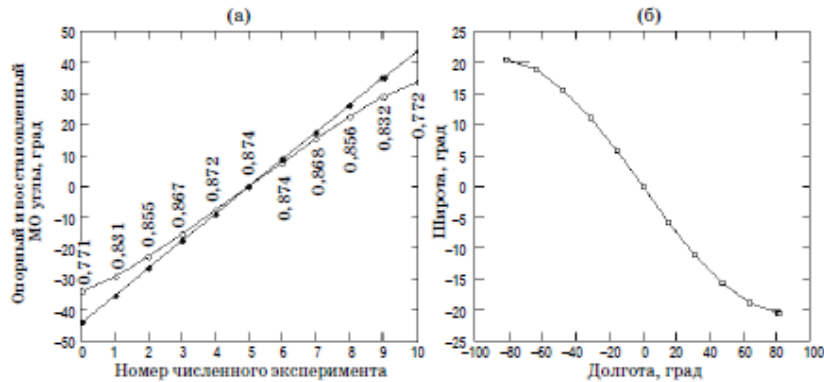


Рис. 3. Реакция датчика (светлые точки) на возбуждение в чувствительном контуре МО угла с интегральным размером от  $-22^\circ$  до  $+22^\circ$  (11 дискретных реализаций, темные точки) при центральном расположении проводника с измеряемым током и отсутствии проводника с обратным током (а). Координаты трека СП излучения на выходе волокна при последовательном переборе МО углов (развертка поверхности сферы Пуанкаре) (б).

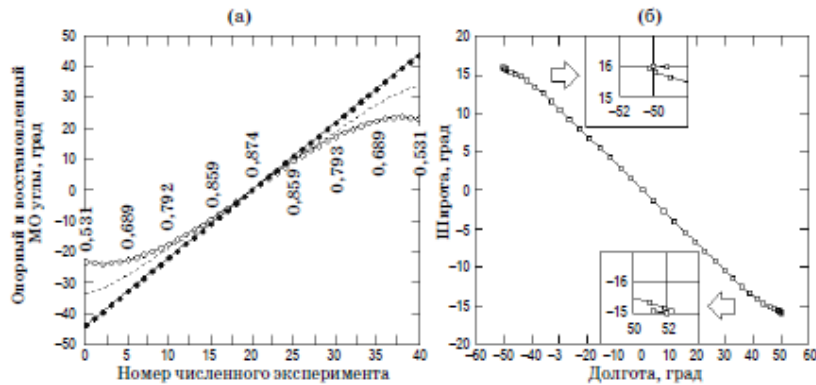


Рис. 4. Реакция датчика (а) и координаты СП (б) для условий рис. 2. Пунктирная кривая соответствует типовой реакции датчика.

робной прорисовки краев диапазона число дискретных точек в реализации увеличено до 40. Пунктирная кривая на рис. 4а соответствует типовой реакции датчика. Падение чувствительности на краях углового диапазона составляет уже почти 40% относительно расчетной по выражению (3). Отметим «сгущение» и наложение друг на друга крайних точек трека СП на сфере Пуанкаре, что свидетельствует о начале процесса «свертывания» концов трека (см. вставки на рис. 4б), а значит, и о неоднозначной реакции датчика на максимальные МО углы.

Другая ситуация наблюдается при совпадении направления токов в обоих проводниках. В этом случае картина распределения продольной составляющей магнитного поля меняется на противоположную относительно оси абсцисс рис. 2. На рис. 5 представлены реакция датчика и координаты СП

в описанной ситуации. Смена направления тока в «помеховом» проводнике привела к увеличению чувствительности относительно расчетной (кроме крайних точек) и относительно случая измерения тока без влияния второго проводника. «Завал» чувствительности в крайних точках объясняется выходом за допустимый диапазон регистрации изменения азимутального угла поляризации  $\pm 45^\circ$ .

Заметные отклонения (на уровне 1% и более) поправочной кривой чувствительности датчика  $\eta(\alpha)$  от типовой поправочной кривой появляются лишь при значительном превышении тока в «помеховом» проводнике относительно измеряемого (в 30 и более раз), когда максимальное локальное значение циркулярного ДЛП, вызванного эффектом Фарадея, становится сравнимым с уровнем встроенного линейного ДЛП. При этом в окрестности экстремальной напряженности поля ухудшаются

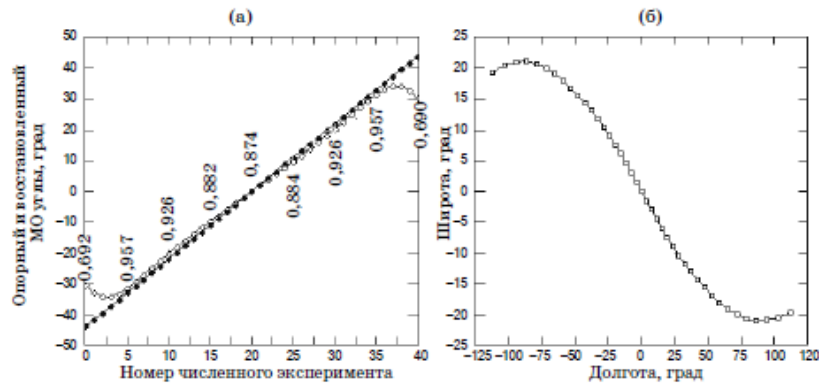


Рис. 5. Реакция датчика (а) и координаты СП (б) при совпадении направлений токов в проводниках.

условия накопления МО отклика по сравнению с обычными условиями (изменяются амплитуда и период «змейки» траектории СП на сфере Пуанкаре). Этим, в частности, объясняется разнонаправленное поведение реакций датчика на рис. 4а и 5а относительно типовой реакции, поскольку в первом случае ухудшаются условия накопления МО отклика датчика на экстремальную напряженность магнитного поля в волокне между проводниками, совпадающую по направлению с напряженностью поля от проводника с измеряемым током, а во втором — обратную к этому направлению.

Таким образом, потенциально наличие сильноточного «помехового» проводника снаружи, но вблизи замкнутого чувствительного контура, может изменить поправочную кривую датчика. Однако в нашем случае это влияние в условиях описанной выше геометрии расположения проводников относительно контура сказывается лишь при «помеховом» токе на уровне 3 МА и более. Очевидно, что с учетом реальных сечений проводников и толщины изоляций на практике такая ситуация кажется крайне маловероятной, и действительное значение «помехового» тока, способного изменить поправочную кривую, на самом деле еще выше.

Рассмотрим теперь поведение чувствительности датчика в режиме калибровки при изменении уровня локализации магнитного поля вдоль чувствительного контура. Как и в численных экспериментах выше, рассмотрим контур в виде окружности длиной 1 м. Будем уменьшать длину участка контура, вдоль которого сосредоточено магнитное поле, соответствующее интегральному МО углу  $22^\circ$  при проходе участка в одну сторону. На рис. 6 представлен график зависимости чувствительности датчика от длины локализованного участка. График показывает, что заметные колебания чувствительности (на уровне 1% и более) проявля-

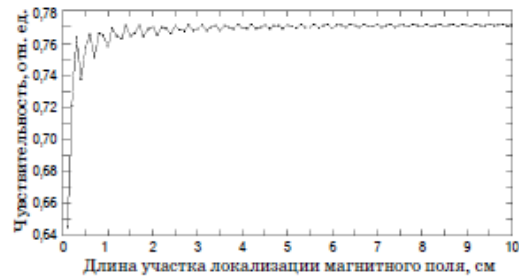


Рис. 6. Зависимость чувствительности датчика от степени локализации интегрального магнитного поля вдоль контура.

ются лишь при длине локализации 2 см и менее. При длине локализации свыше 10 см чувствительность датчика практически не меняется (на графике не показано). Заметим, что результаты графика рис. 6 справедливы и в случае более длинных контуров при условии сосредоточения интегрального поля на участке от 0,1 до 10 см. В реальности размеры используемых соленоидов существенно больше. Так, для получения в соленоиде суммарного тока  $N \times i = 100$  кА характерные размеры катушки из медного провода диаметром 1,13 мм составят примерно  $10 \times 30$  см (диаметр  $\times$  длина). Таким образом, реализуемое на практике локальное сосредоточение магнитного поля в режиме калибровки датчика не приводит к искажению его поправочной кривой.

Рассмотрим другой фактор потенциально возможных ошибок — незамкнутость измерительного контура. Вернемся к расположению проводников, представленному на вставке рис. 2. Как следует из анализа изменения СП света вдоль волокна, при близком расположении обратного токопровода МО отклик значительной части контура



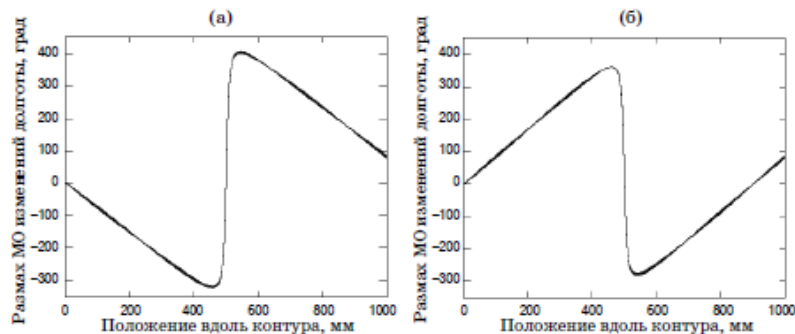


Рис. 7. Результаты накопления МО отклика вдоль чувствительного контура (при однократном его обходе) в виде длины трека (в градусах долготы) точек СП, отвечающих последовательному перебору МО углов, при разной (а) и одинаковой (б) направленности токов в проводниках.

«тратится» на погашение (компенсацию) противоположно направленного отклика отрезка волокна вблизи экстремальной напряженности магнитного поля, и лишь на небольшой конечной части волокна формируется итоговый сигнал. Поэтому в этом случае даже относительно небольшая «незамкнутость» контура может привести к непропорционально большим ошибкам измерения тока.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда ток в «помеховом» проводнике в 20 раз превышает измеряемый ток. Моделирование отклика датчика показывает, что поправочная кривая в этом случае практически не отличается от типовой поправочной кривой. Однако удаление последнего сантиметра волокна из контура (в геометрии вставки на рис. 1) приводит примерно к 10%-му изменению чувствительности датчика. Это видно из рис. 7, на котором представлены результаты накопления МО отклика при проходе чувствительного контура в одну сторону в виде длины трека (в градусах долготы) точек СП, отвечающих последовательному перебору МО углов. На рис. 7а — разная направ-

ленность токов в проводниках (реакция датчика возрастает примерно в 2 раза при укорочении контура на 10%), 7б — одинаковая (реакция падает до нуля при таком же укорочении). Очевидно также, что чувствительность датчика с укороченным контуром становится зависимой от положения «недостающего» участка контура относительно проводников с токами.

В работе рассмотрены потенциально возможные вариации чувствительности ВОДТ с чувствительным элементом из *spun* волокна при резко неоднородном распределении магнитного поля вдоль чувствительного контура как вследствие влияния сильноточного токоведущего проводника, расположенного вне контура, но на небольшом расстоянии от проводника с измеряемым током, так и при намеренном сосредоточении магнитного поля на локальном участке волокна в режиме калибровки датчика. Численные расчеты показывают, что в реальных условиях такое влияние становится заметным лишь при условии незамкнутости чувствительного контура датчика.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Silva R.M., Martins H., Nascimento I., Baptista J.M., Ribeiro A.L., Santos J.L., Jorge P., Frazão O. Optical current sensors for high power systems: A review // *Appl. Sci.* 2012. V. 2. № 3. P. 602–628.
2. Cheng S., Guo Z., Zhang G., Yu W., Shen Y. Distributed parameter model characterizing magnetic crosstalk in a fiber optic current sensor // *Appl. Opt.* 2015. V. 54. № 34. P. 10009–10017.
3. Barmenkov Y.O., Santoyo F.M. Faraday plasma current sensor with compensation for reciprocal birefringence induced by mechanical perturbations // *J. Appl. Research and Technology.* 2003. V. 1. № 2. P. 157–163.
4. Laming R.J., Payne D.N. Electric current sensor employing spun highly birefringent optical fibers // *J. Lightwave Technol.* 1989. V. 7. № 12. P. 2084–2094.
5. Губин В.П., Исаев В.А., Моршнев С.К., Сазонов А.И., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Усов А.И. Использование волоконных световодов типа *Spun* в датчиках тока // *Квант. электрон.* 2006. Т. 36. № 3. С. 287–291.
6. Ловчий И.Л. Численное моделирование и исследование поляриметрического датчика тока со световодом типа *spun* // *Оптический журнал.* 2010. Т. 77. № 12. С. 25–33.