



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01R 15/246 (2018.08)

(21)(22) Заявка: 2018115434, 24.04.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.04.2018

Дата регистрации:
14.03.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.04.2018

(45) Опубликовано: 14.03.2019 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

420075, Рес. Татарстан, г. Казань, ул. Липатова,
37, Акционерное общество "Швабе-
Технологическая лаборатория"

(72) Автор(ы):

Пеньковский Анатолий Иванович (RU),
Кириллова Светлана Анатольевна (RU),
Верещагин Валерий Игоревич (RU),
Игнатьев Антон Андреевич (RU),
Хакимуллин Артур Альбертович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Швабе -
Технологическая лаборатория" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 5500909 A, 19.03.1996. RU
2620927 C1, 30.05.2017. US 2015097551 A1,
09.04.2015.

(54) ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОКА ОПТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ

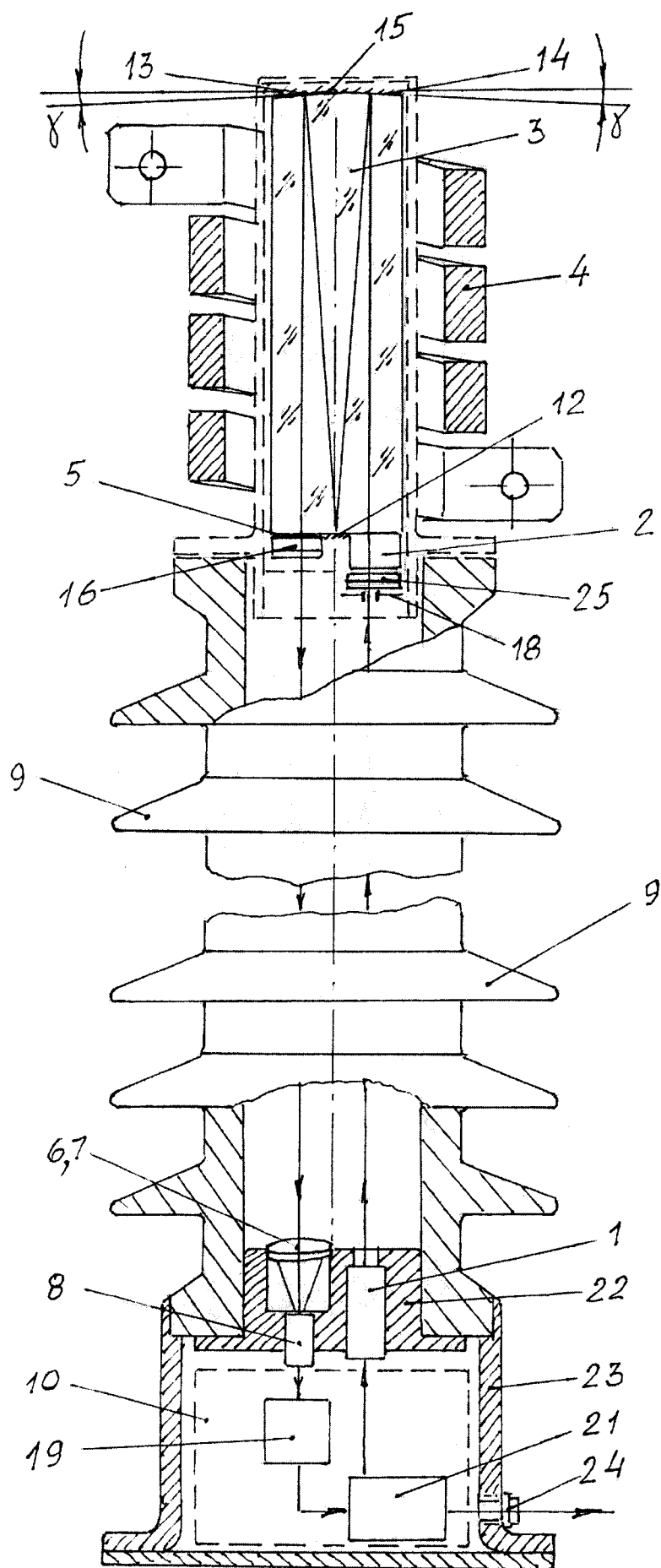
(57) Реферат:

Изобретение относится к оптическому приборостроению, а именно к измерительным приборам, в которых используется эффект Фарадея. Устройство содержит источник света, первый поляризатор в виде призмы Волластона, магнитооптический элемент в виде стеклянной четырехугольной призмы высотой h , у которой на первом основании нанесено зеркальное покрытие в виде полосы, равной ширине пучка света D , а второе основание имеет две полированные наклонные поверхности с зеркальными покрытиями, составляющие с первым основанием равные углы $\gamma = \arctg(0,5D/h)$. Далее по ходу лучей установлены второй поляризатор с плоскостью пропускания $\pm 45^\circ$ по отношению к плоскостям пропускания призмы Волластона, линзы, фотоприемники и электронный блок. Призма Волластона закреплена на первом основании

четырехугольной призмы так, что плоскость разведения ею лучей параллельна длинной стороне зеркальной плоскости, а ее угол разведения лучей $2\beta \geq \arctg(D/4h)$. Второй поляризатор также закреплен на плоскости первого основания, но с другой стороны полосы зеркального покрытия, а за ним установлена дополнительная стеклянная призма с двумя гранями, образующими с ее третьей гранью одинаковые углы

$$\theta = \beta + \arcsin\left(\frac{\sin\beta}{n}\right),$$

где β - угол отклонения лучей призмой Волластона; n - показатель преломления стекла призмы. Изобретение обеспечивает повышение универсальности при измерениях, уменьшение габаритов. 1 з.п. ф-лы, 8 ил.



Фиг. 3



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 682 133**⁽¹³⁾ **C1**
(51) Int. Cl.
G01R 15/24 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01R 15/246 (2018.08)

(21)(22) Application: **2018115434, 24.04.2018**

(24) Effective date for property rights:
24.04.2018

Registration date:
14.03.2019

Priority:

(22) Date of filing: **24.04.2018**

(45) Date of publication: **14.03.2019** Bull. № 8

Mail address:

**420075, Res. Tatarstan, g. Kazan, ul. Lipatova, 37,
Aktionernoe obshchestvo "Shvabe-
Tekhnologicheskaya laboratoriya"**

(72) Inventor(s):

**Penkovskij Anatolij Ivanovich (RU),
Kirillova Svetlana Anatolevna (RU),
Vereshchagin Valerij Igorevich (RU),
Ignatev Anton Andreevich (RU),
Khakimullin Artur Albertovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Aktionernoe obshchestvo "Shvabe -
Tekhnologicheskaya laboratoriya" (RU)**

(54) **OPTICAL UNIVERSAL CURRENT METER**

(57) Abstract:

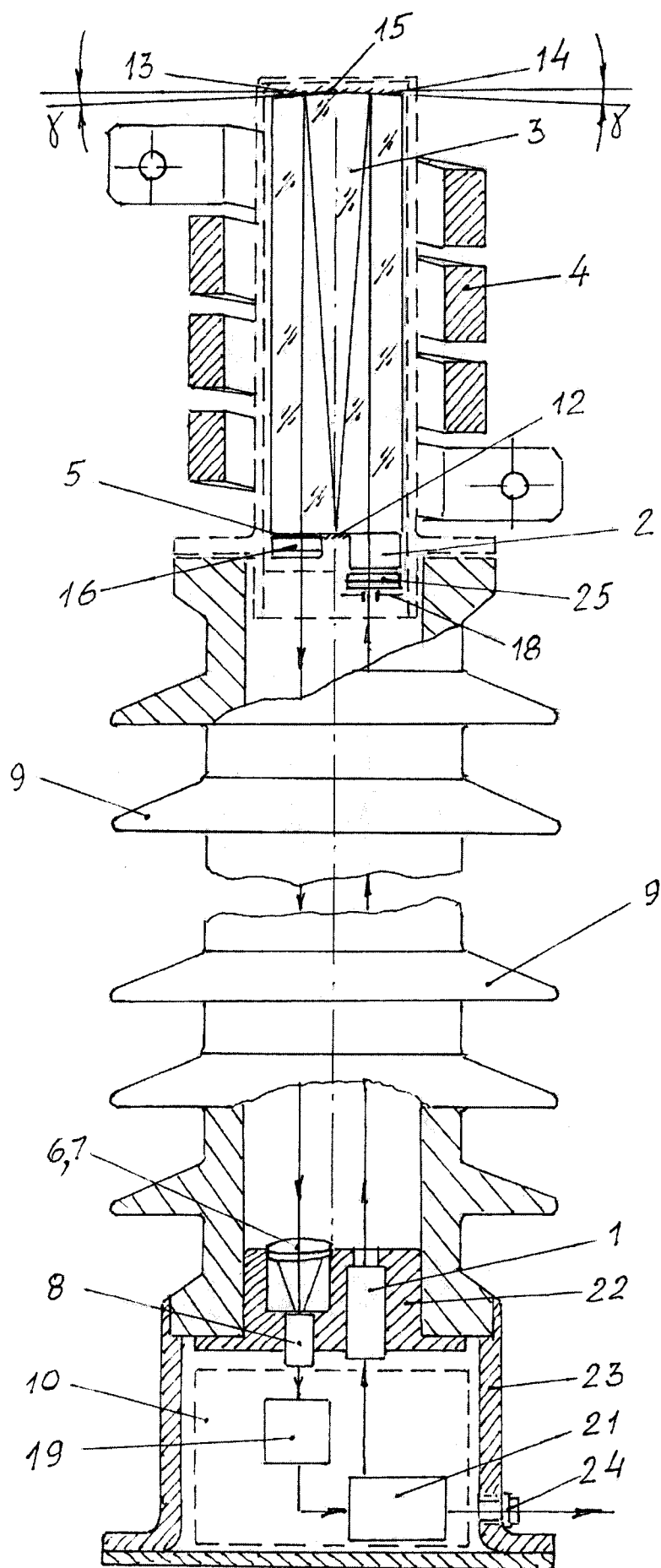
FIELD: instrument engineering.

SUBSTANCE: invention relates to an optical instrument, namely to measuring instruments that use the Faraday effect. Device contains a light source, the first polarizer in the form of a Wollaston prism, a magneto-optical element in the form of a glass quadrangular prism of height h , with a mirror coating in the form of a strip equal to the width of the light beam D on the first base, and the second base has two polished inclined surfaces with mirror coatings, which are equal angles with the first base $\gamma = \arctg(0.5D/h)$. Further along the rays, a second polarizer is installed with transmission plane $\pm 45^\circ$ in relation to the transmission planes of the Wollaston prism, lenses,

photodetectors and electronic unit. Wollaston prism is fixed on the first base of the quadrilateral prism so that the plane of rays dilution is parallel to the long side of the mirror plane, and angle thereof of the rays dilution is $2\beta \geq \arctg(D/4h)$. Second polarizer is also fixed on the plane of the first base, but on the other side of the strip of the mirror coating, followed by an additional glass prism with two faces forming the same angles $\theta = \beta + \arcsin(\sin\beta/n)$ with third face thereof, where β – deflection angle by the Wollaston prism ray; n is the refractive index of the prism glass.

EFFECT: invention provides increased versatility in measurements, reduced size.

1 cl, 8 dwg



Фиг. 3

Изобретение относится к оптическому приборостроению, а точнее - к поляризационным приборам, в которых используется эффект Фарадея. Оно может быть использовано в электроэнергетике для измерения тока в высоковольтных сетях различных классов, так и в других электрических установках.

Традиционные электромагнитные измерители тока (трансформаторы тока) содержат первичную обмотку из одного-двух витков и вторичную обмотку, состоящую из большого числа витков. Первичная обмотка находится под напряжением сети, а вторичная - под нулевым потенциалом земли. Между первичной и вторичной обмотками находится изоляционный материал, например, эпоксидный компаунд, трансформаторное масло или элегаз. Обмотки обхватывают магнитопровод.

Основными недостатками электромагнитных трансформаторов тока являются высокая вероятность электрического пробоя изоляции, находящейся между обмотками, насыщение магнитопровода апериодической составляющей тока короткого замыкания, значительные габариты, большой расход меди.

Известны более совершенные оптико-электронные измерители тока, используемые в установках высокого напряжения [1], принцип работы которых основан на явлении магнитного вращения плоскости поляризации света веществом, находящимся в продольном магнитном поле (эффект Фарадея) \2\ . Основным узлом подобных устройств является активное прозрачное вещество, например, стекло с большой постоянной Верде, помещенное в продольное магнитное поле, на входе и выходе которого установлены линейные поляризаторы. Такой узел называют ячейкой Фарадея.

Под действием продольных силовых линий магнитного поля фрагмент проводника высоковольтной линии - активное вещество (стекло) - приобретает способность вращать плоскость поляризации линейно поляризованного света на угол

$$\alpha = \vec{H}VL\cos\beta = NkVL, \quad (1)$$

где \vec{H} - усредненное значение напряженности магнитного поля;

V - постоянная Верде активного элемента;

L - длина пути света, пройденного в активном элементе;

β - угол между направлением распространения света и направлением силовых линий магнитного поля;

N - число витков фрагмента проводника;

i - ток, протекаемый по проводнику;

k - конструктивный коэффициент, учитывающий соотношения длины и диаметра соленоида, образованного проводником, и усреднения напряженности магнитного поля в различных точках активного элемента.

Измеряя угол поворота плоскости поляризации α , можно определить величину тока i , протекаемого по проводнику

$$i = \frac{\alpha}{NkVL}, \quad (2)$$

где N , k , V и L - постоянные величины для конкретной конструкции ячейки Фарадея.

Известные лабораторные измерители переменного тока с ячейками Фарадея обычно содержат источник света 1 (фиг. 1) и установленные по ходу лучей первый линейный поляризатор 2, активный элемент, например, в виде стеклянного стержня 3 с полированными торцами, помещенного в продольное магнитное поле катушки 4. второй линейный поляризатор 5, плоскость пропускания которого составляет угол $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора 2, линзы 6, 7, фотоприемник 8, основание 9 и электронный блок 10.

Интенсивность света I , воспринимаемую фотоприемником 8, можно найти применив векторную алгебру из уравнения

$$[M_{П_2}]_{45} [M_5] [M_{П_1}]_0 \bar{V}_i = \bar{V}_e, \quad (3)$$

5 где \bar{V}_e - искомый вектор Стокса;

$$\bar{V}_i = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

10 вектор Стокса неполяризованного света источника 1 интенсивностью I_0 ;

$$[M_{П_1}]_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

15 матрица преобразования света первым поляризатором 2 с азимутом пропускания 0° ;

$$[M_5] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & \sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

матрица преобразования стеклянного стержня 3 ячейки Фарадея;

$$[M_{П_2}]_{45} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

матрица преобразования света вторым поляризатором 5 с азимутом пропускания 45° .

30 После перемножения матриц находим первый параметр Стокса, пропорциональный интенсивности света, воспринимаемого фотоприемником 8

$$I = \frac{I_0}{4} (1 + \sin 2\alpha). \quad (8)$$

35 По проводнику 6 протекает переменный ток с частотой $\omega=50$ Гц, следовательно, фотоприемник 8 воспринимает свет, изменяющийся по закону

$$I = 0,25I_0[1 + \sin(2\alpha_{\max}\sin\omega t)], \quad (9)$$

где ω - частота переменного тока;

α_{\max} - максимальный угол поворота плоскости поляризации света, соответствующий моменту максимального тока.

40 Из этого уравнения видно, что в отсутствии тока i , когда $\alpha=0$, интенсивность света $I=0,25I_0$ и в спектре сигнала фотоприемника 8 присутствует только постоянная составляющая $U_=0,25I_0$ и отсутствует переменная составляющая частоты сети ω . При протекании по катушке 4 переменного тока в спектре сигнала фотоприемника 8

45 появляется переменная составляющая

$$U_{\sim} = 0,25I_0\sin(2\alpha_{\max}\sin\omega t). \quad (10)$$

Электронный блок 10 вычисляет отношение $Q=U_{\sim}/U_=$, что является мерой угла

поворота плоскости поляризации света α , по которому вычисляется искомый ток i в катушке 4 согласно формуле (2).

Известные лабораторные устройства, типичная схема которых показана на фиг. 1, мало пригодны для использования их в качестве измерителей тока в высоковольтных сетях потому, что при установке ячейки Фарадея на высоковольтный изолятор возникает проблема передачи света от источника света 1 через ячейку Фарадея (элементы схемы 2, 3, 4, 5 фиг. 1) к фотоприемнику 8.

Известно ряд устройств, у которых в качестве активного вещества ячейки Фарадея используется оптическое волокно.

Типичным представителем таких известных устройств является токоизмерительная система по патенту США [3]. Это устройство содержит источник света и установленные последовательно по ходу лучей первое многомодовое оптическое волокно, поляризатор, активный элемент ячейки Фарадея, представляющий собой катушку из оптического одномодового волокна, надетую на фрагмент проводника высоковольтной линии, второй поляризатор, плоскость пропускания которого составляет $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора, второе оптическое волокно, фотоприемник и электронный блок преобразования сигналов. В процессе прохождения тока i по проводнику вокруг него возникает магнитное поле, силовые линии которого совпадают с витками оптического одномодового волокна и, следовательно, совпадают с направлением распространения лучей света.

Оптическое волокно в качестве активного элемента особой конструкции предложено в патенте РФ №2321000 [4]. В этом же патенте предложена многоканальная схема для компенсации температурных и механических напряжений, возникающих в оптическом волокне.

Фирма ООО «Алтай Оптика Кабель» запатентовала устройство [5], в котором активный элемент выполнен в виде катушки из оптического волокна, надетой на фрагмент проводника с током.

Однако, все устройства, у которых в качестве активного элемента ячейки Фарадея используется оптическое волокно, имеют существенные недостатки.

Главным недостатком оптического волокна является искажение состояния поляризации света.

Известно, что в процессе прохождения поляризованного света через оптическое многомодовое волокно в результате многократного хаотического полного внутреннего отражения на границе контакта сердцевины и оболочки волокна происходит

преобразование линейно поляризованного света в эллиптический и смешивание различных состояний поляризации, что приводит к частичной или полной деполяризации света. Поэтому многомодовое оптическое волокно непригодно для использования его в качестве активного элемента ячейки Фарадея. Оптические волокна под названием «Панда» или «Галстук-бабочка» так же малопригодны из-за сильного

двулучепреломления. В известных оптических трансформаторах тока в качестве активного элемента ячейки Фарадея применяют особое одномодовое оптическое волокно (диаметр волокна 4 мкм), в котором угол падения при полном внутреннем отражении близок к 90° и в процессе распространения в нем поляризованного света его состояние поляризации изменяется меньше. Такое оптическое волокно можно представить в виде набора фазовых пластинок, вносящих небольшую разность фаз δ , главные оси которых хаотически расположены по отношению к плоскости поляризации света, проходящего по волокну. В результате происходит частичная деполяризация света с коэффициентом деполяризации Δp .

Следовательно, вместо матрицы (6) ячейку Фарадея с активным элементом в виде одномодового волокна можно представить матрицей преобразования

$$[M_5] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p\cos 2\alpha & p\sin 2\alpha & 0 \\ 0 & p\sin 2\alpha & p\cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $p=1-\Delta p$ - степень поляризации света.

После перемножения матриц преобразования элементов оптической схемы с учетом матрицы (11) находим интенсивность света

$$I = 0,25I_0[1 + p\sin(2\alpha_{\max}\sin\omega t)]. \quad (12)$$

Блок преобразования сигналов определяет отношение

$$Q = \frac{U_{\sim}}{U_{\sim}} = \frac{0,25I_0p\sin(2\alpha_{\max}\sin\omega t)}{0,25I_0} = p\sin(2\alpha_{\max}\sin\omega t), \quad (13)$$

а затем искомый ток i в проводнике:

$$i = \frac{\alpha}{NkVL} = \frac{0,5\arcsin(Q/p)}{NkVL}. \quad (14)$$

Из уравнений (11-14) видно, что частичная деполяризация света Δp уменьшает степень поляризации p и напрямую влияет на величину угла вращения плоскости поляризации α и, следовательно, на результат измерения тока i . Кроме того, эффект деполяризации уменьшает динамический диапазон измерений.

Более совершенным является магнитооптический измерительный преобразователь переменного тока МПР-МЭ-5 [6]. Преобразователь переменного тока МПР-МЭ-5 содержит источник света и установленные последовательно по ходу лучей многомодовое оптическое волокно, коллиматор, первый поляризатор, активный элемент ячейки Фарадея, выполненный в виде четырех стеклянных призм типа AP-180°, охватывающих по кругу проводник с током, второй поляризатор, плоскость пропускания которого составляет $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора, приемное устройство в виде собирающей линзы, второго оптического многомодового волокна, фотоприемника и блок преобразования сигналов. Отличительными особенностями конструкции преобразователя является то, что четыре призмы типа AP-180°, выполненные из стекла, расположены последовательно по ходу распространения света и образуют замкнутый контур вокруг проводника с током. Для удобства ввода и вывода коллимированного пучка света торцы первой и последней призм дополнены клиньями. Между клином и первой призмой вклеен первый поляризатор, а между вторым клином и последней призмой вклеен второй поляризатор. Плоскость пропускания второго поляризатора составляет угол $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора. Торцы оптических волокон установлены в фокальных плоскостях коллиматора собирающей линзы. Блок преобразования сигналов содержит источник питания, линейный усилитель сигнала фотоприемника и схему обработки сигнала.

По сравнению с рассмотренными выше токоизмерительными устройствами [3-5], у которых в качестве активного элемента ячейки Фарадея используются оптические волокна, в данном устройстве установлены четыре призмы типа AP-180°, что позволило сохранить степень поляризации света в процессе его прохождения через призмы и тем самым повысить точность и динамический диапазон преобразования тока. Призмы размещены так, что главное сечение последующей призмы находится под углом 90° к главному сечению предыдущей призмы. Поэтому разность фаз δ между компонентами

поляризованного света, полученная в процессе полного внутреннего отражения в предыдущей призме

$$\delta = 2\arctg\left(\frac{\cos\alpha\sqrt{\sin^2\alpha - \left(\frac{1}{n}\right)^2}}{\sin^2\alpha}\right) = 2\arctg(1,4142\sqrt{0,5 - \left(\frac{1}{n}\right)^2}), \quad (15)$$

где $\alpha=45^\circ$, а n - показатель преломления призм, полностью компенсируется в результате полного внутреннего отражения в последующей призме. Однако, известный магнитооптический измерительный преобразователь переменного тока МПР-МЭ-5 также имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, в данном известном устройстве не эффективно используется магнитное поле, возникающее вокруг проводника с током i . В каждой из призм свет распространяется по прямой, составляя траекторию четырехугольника, а силовые линии вокруг проводника имеют форму концентрических колец. Причем, напряженность магнитного поля H у поверхности проводника наибольшая, а с увеличением радиуса r кольца убывает по закону

$$H = \frac{i}{r}. \quad (16)$$

Поэтому в зоне центральной части каждой призмы напряженность поля H наибольшая, а у концов призм существенно меньшая. К тому же, у концов призм направление силовых линий поля и направление света существенно различаются, составляя между собой угол β от которого зависит эффект поворота плоскости поляризации согласно закону Фарадея

$$\alpha = HVL\cos\beta. \quad (17)$$

На участках перехода света от одной призмы к другой лучи двигаются параллельно проводнику, то есть, перпендикулярно плоскостям колец магнитных силовых линий, и не вносят никакого вклада в эффект Фарадея. Таким образом, линейно поляризованный свет проходит большой путь в стекле, а эффективность использования продольного магнитного поля проводника не высока. Главное, что у данной конструкции устройства нет никаких перспектив увеличить эту эффективность.

Во-вторых, на базе данного известного преобразователя сложно создать универсальный компактный измеритель тока, например, для открытых высоковольтных подстанций.

Наиболее близким аналогом предлагаемого устройства является оптический измеритель переменного тока в высоковольтных сетях [7], структурная схема которого показана на фиг. 2.

Оптический измеритель переменного тока в высоковольтных сетях содержит источник коллимированного пучка света 1 (фиг. 2), первый поляризатор 2, магнитооптический элемент ячейки Фарадея, выполненный в виде четырехугольной стеклянной призмы 3 высотой h , размещенной в продольном магнитном поле фрагмента проводника с током, например, в виде шины 4, второй поляризатор 5, плоскость пропускания которого составляет угол $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора 2, линзы 6, 7, фотоприемник 8, высоковольтный изолятор 9, электронный блок 10.

Первое основание 11 призмы 3 полировано и в центре его поверхности нанесено зеркальное покрытие 12 в виде полосы шириной D , равной ширине пучка света, проходящего через призму 3. Второе основание призмы 3 содержит две полированные наклоненные поверхности 13, 14 с зеркальными покрытиями, составляющие с первым

основанием 11 призмы 3 равные углы наклона

$$\gamma = \arctg(0,5D/h), \quad (18)$$

где D - диаметр пучка света;

h - высота призмы 3.

Известное устройство [7] работает следующим образом. Свет от источника 1 (фиг. 2) по многомодовому оптическому волокну передается в фокальную плоскость линзы 7 и преобразуется ею в коллимированный пучок света диаметром D. Далее свет проходит первый поляризатор 2 и становится линейно поляризованным, азимут поляризации которого ψ параллелен одной из боковых граней, т.е. $\psi=0$ по отношению к плоскости падения света на поверхности 12, 13, 14 призмы 3. Линейно поляризованный коллимированный пучок света проходит стеклянную четырехугольную призму 3, отражается от зеркальной поверхности 14, второй раз проходит призму 3, отражается от зеркальной поверхности 12, третий раз проходит призму 3, отражается от зеркальной поверхности 13, проходит в четвертый раз призму 3, второй поляризатор 5 и линзой 6 собирается на торце оптического волокна, которое передает свет на фотоприемник 8.

Интенсивность света I, воспринимаемая фотоприемником 8, в случае отсутствия тока в фрагменте проводника 4 равна

$$I = 0,25I_0Rk, \quad (19)$$

где I_0 - интенсивность света, падающего на поляризатор 2;

R - общий коэффициент отражения от границ стекло-алюминий зеркальных покрытий 11-13 (фиг. 2).

k - коэффициент, учитывающий потери света из-за диафрагмирования, виньетирования, поглощения.

Если по фрагменту проводника 4 протекает переменный ток $i = i_{\max} \sin \omega t$ частоты сети $\omega = 50$ Гц, то фотоприемник 8 воспринимает свет, изменяющийся по закону

$$I = 0,25I_0Rk[1 + \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)], \quad (20)$$

где $\alpha_{\max} = \vec{H}_{\max} V L \cos \beta = N i V L \cos \beta$;

N - число витков фрагмента проводника;

V - постоянная Верде стекла призмы 3;

L - длина пути света в призме 3.

Фотоприемник 8 преобразует свет (20) в электрический сигнал

$$U = U_0[1 + \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)], \quad (21)$$

который после усилителя формируется в виде постоянной составляющей $U_{\text{ср}} = U_0$ и переменной составляющей $U_{\text{зм}} = U_0[\sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)]$. Блок электронный вычисляет отношения

$$Q = U_{\text{зм}} / U_{\text{ср}} = \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t), \quad (22)$$

а затем вычисляется искомый ток i, протекаемый по фрагменту проводника 4, по формуле

$$i = \alpha / N M V L = (0,5 \arcsin Q) / N M V L, \quad (23)$$

где N - число витков фрагмента проводника;

M - коэффициент, характеризующий эффективность использования продольной составляющей вектора магнитного поля проводника 4.

Измеренная величина тока i индицируется на цифровом табло блока электронного 10.

В отличие от других известных устройств, в которых в качестве активного элемента ячейки Фарадея используется анизотропное оптическое волокно, в оптическом измерителе переменного тока в высоковольтных сетях [7] активным элементом ячейки Фарадея является призма, в которой не происходит искажений линейной поляризации света, то есть в ней не происходит эффекта деполяризации света.

Это позволило достичь высокой чувствительности и большого диапазона измерений переменного тока. Однако и это устройство имеет ряд недостатков.

Во-первых, принцип работы известного оптического измерителя переменного тока в высоковольтных сетях [7] основан на периодическом (с частотой 50 Гц) изменении направления вектора напряженности магнитного поля, вызванного переменным током, протекаемым по фрагменту проводника 4 (фиг. 2). Поэтому его нельзя использовать для измерения постоянного тока в цепях энергетических установок, работающих, например, в металлургии (производство алюминия), в некоторых видах транспорта, где используется постоянный ток.

Во-вторых, для подачи света ячейке Фарадея (элемент 3 и поляризаторы 2,5). находящейся под высоким потенциалом вместе с фрагментом проводника 4, и для передачи света фотоприемнику 8 в известном устройстве [7] используются оптоволоконные жгуты. Но, как известно, выходящие из оптического волоконного жгута лучи всегда расходящиеся и имеют форму конуса.

Так, например, если на один торец семижильного оптического волокна (диаметр одной жилы 100 мкм) направить идеально параллельный пучок света нормально к торцу жгута, то из другого торца жгута выйдет расходящийся пучок света в виде конуса с телесным углом не менее 14° .

Для последующего формирования коллимированного пучка света, например, расходимостью не более $1,2^\circ$ требуется коллиматор в виде линзы 7 (фиг. 2) с фокусным расстоянием f не менее 40 мм. В этом случае диаметр D коллимированного пучка света после линзы 7 будет не менее 10 мм.

Однако в данном известном устройстве в качестве источника света 1 использован светодиод, излучающий расходящийся пучок света в пределах телесного угла $\sim 10^\circ$. Поэтому диаметр D коллимированного пучка света после коллимирующей линзы 7 не менее 16 мм.

Следовательно, для того, чтобы свободно пропустить пучок света диаметром $D=46$ мм через призму 3 высотой, например, $h=70$ мм по схеме, показанной на фиг. 2, потребуется массивная стеклянная призма 3 шириной не менее 50 мм, а угол γ согласно формуле (18) - равный $6,5^\circ$.

В-третьих, наличие в известном устройстве [7] оптико-волоконных жгутов частично мешает его универсальности, поскольку длина жгутов зависит от конкретных условий эксплуатации измерителя тока, то есть от конструкций высоковольтных подстанций и других энергетических установок.

Предлагается новый измеритель тока оптический универсальный, свободный от упомянутых недостатков.

Измеритель тока оптический универсальный содержит источник коллимированного пучка света, первый поляризатор, магнитооптический элемент ячейки Фарадея, выполненный, например, в виде четырехугольной призмы высотой h , первое основание которой полировано и в центре его поверхности нанесено зеркальное покрытие в виде полоски шириной D , равной ширине пучка света, второе основание призмы содержит

две полированные наклоненные поверхности с зеркальными покрытиями, составляющие между собой ребро, параллельные зеркальной полоске первого основания и составляющие с первым основанием равные углы наклона $\gamma = \arctg(0,5D/h)$.

Магнитооптический элемент размещен в продольном магнитном поле фрагмента проводника с током высоковольтной сети. Далее по ходу лучей установлены второй поляризатор, плоскость пропускания которого составляет углы $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора, собирающая линза, фотоприемник и электронный блок. С целью достижения универсальности первый поляризатор выполнен в виде призмы Волластона, которая закреплена на свободной от зеркального покрытия поверхности первого основания так, что ее плоскость разведения лучей параллельна длинной стороне плоскости зеркального покрытия, ее угол разведения лучей 2β удовлетворяет условию $2\beta \geq \arctg(D/4h)$, второй поляризатор закреплён также на плоскости первого основания, но с другой стороны относительно плоскости зеркального покрытия, а за ним установлена дополнительная стеклянная призма с двумя полированными гранями, образующими ребро, перпендикулярное плоскости разведения лучей призмы Волластона. Полированные грани дополнительной призмы с третьей полированной гранью этой дополнительной призмы имеют одинаковые углы θ , удовлетворяющие условию

$$\theta = \beta + \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \beta\right), \quad (24)$$

где β - угол отклонения лучей призмой Волластона относительно оптической оси падающих на нее лучей;

n - показатель преломления стекла магнитооптического элемента и дополнительной призмы.

После дополнительной призмы последовательно установлены дополнительно вторая собирающая свет линза и второй фотоприемник. С целью повышения точности измерений переменного или постоянного тока в высоковольтной сети непосредственно перед призмой Волластона установлена четвертьволновая пластинка так, что ее кристаллографические оси составляют с плоскостями пропускания призмы Волластона углы $\pm 45^\circ$.

На фиг. 1 показана типичная структурная схема известного лабораторного оптического измерителя переменного тока с ячейкой Фарадея.

На фиг. 2 показана структурная схема известного оптического измерителя переменного тока в высоковольтных сетях (прототипа) [7].

На фиг. 3 показана структурная схема предлагаемого измерителя тока оптического универсального с разрезами, перпендикулярными плоскости разведения лучей призмой Волластона.

На фиг. 4 показана структурная схема предлагаемого измерителя тока оптического универсального с разрезами, совпадающими с плоскостью разведения лучей призмой Волластона.

На фиг. 5 показана оптическая схема предлагаемого измерителя тока оптического универсального, соответствующая структурной схеме, показанной на фиг. 3.

На фиг. 6 показан вид А-А на первое основание магнитооптического элемента ячейки Фарадея, показанного на фиг. 5.

На фиг. 7 показана оптическая схема предлагаемого измерителя тока оптического универсального, соответствующая структурной схеме, показанной на фиг. 4.

На фиг. 8 показан вид Б-Б на первое основание магнитооптического элемента ячейки Фарадея, показанного на фиг. 7.

Предлагаемый измеритель тока универсальный содержит источник коллимированного, монохроматического пучка света, например, в виде лазерного модуля 1 (фиг. 3), первый поляризатор 2, магнитооптический элемент ячейки Фарадея, выполненный, например, в виде четырехугольной призмы 3 высотой h , который
 5 размещен в продольном магнитном поле фрагмента проводника 4 с током высоковольтной сети. Далее по ходу лучей установлены второй поляризатор 5, плоскость пропускания которого составляет угол $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора 2, линзы 6, 7 (фиг. 5), фотоприемник 8. Поляризатор 2, элемент 3, фрагмент проводника 4 и поляризатор 5 представляют собой ячейку Фарадея, которая
 10 закреплена на верхней части высоковольтного изолятора 9. В нижней части изолятора 9 размещен электронный блок 10. Магнитооптический элемент ячейки Фарадея 3 выполнен в виде четырехугольной стеклянной призмы высотой h , ее первое основание 11 (фиг. 5, фиг. 6) полировано и в центре его поверхности нанесено зеркальное покрытие в виде полосы 12 шириной D , равной ширине коллимированного пучка света.

Второе основание призмы 3 содержит две полированные наклоненные поверхности 13 и 14 с зеркальными покрытиями. Поверхности 13, 14 составляют с первым основанием 11 равные углы наклона $\gamma = \arctg(0,5D/h)$, где D - диаметр коллимированного пучка света, а h - высота прямоугольной призмы 3.

Первый поляризатор 2 выполнен в виде призмы Волластона, которая закреплена
 20 на свободной от зеркальной полосы 12 поверхности первого основания 11 так, что ее плоскость разведения лучей параллельна длинной стороне зеркальной полосы 12. Угол разведения лучей 2β призмы Волластона 2 удовлетворяет условию $2\beta \geq \arctg(D/4h)$.

Второй поляризатор 5 выполнен, например, в виде поляроидной пленки, закреплена также на плоскости первого основания 11, но с другой стороны от зеркальной плоскости
 25 12 (фиг. 6).

За вторым поляризатором 5 (фиг. 3, фиг. 4) установлена дополнительная стеклянная призма 16, например, из того же стекла, что и призма 3.

Две полированные грани дополнительной призмы 16 (фиг. 7) образуют ребро, перпендикулярное плоскости разведения лучей призмы Волластона 2, и с третьей
 30 полированной гранью дополнительной призмы 16 образуют одинаковые углы θ , удовлетворяющие условию

$$\theta = \beta + \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \beta\right), \quad (25)$$

где β - угол отклонения лучей призмой Волластона 2 относительно оптической оси
 35 падающих на нее лучей;

n - показатель преломления стекла призм 3 и 16.

После дополнительной призмы 16 в каждом из разделенных призмой Волластона 2 пучках света установлены линзы 6, 7 (фиг. 7), фотоприемник 8, дополнительный фотоприемник 17.

40 Перед призмой Волластона установлена диафрагма 18, например, прямоугольной формы, длинная сторона которой параллельна зеркальной полоске 12 (фиг. 5).

Фотоприемники 8 и 17 подключены соответственно к усилителям 19, 20 (фиг. 4), которые соединены с микропроцессорным преобразователем сигналов 21.

Источник света 1, линзы 6, 7 и фотоприемники 8, 17 закреплены на втулке 22, которая
 45 вставлена во внутреннее отверстие нижней части изолятора 9. Нижняя часть изолятора 9 закреплена на подставке 23, в которой имеется разъем 24 (фиг. 3) для подключения внешних устройств, регистрирующих результаты измерения тока, протекаемого по фрагменту проводника 4.

Известно, что свет, излучаемый лазерным модулем 1, как правило, частично поляризован. Причем в процессе излучения под воздействием изменений температуры или тока питания азимут частичной поляризации света может изменяться на величину ϵ . Это может привести к тому, что разведенные призмой Волластона 2 лучи будут не

5 одинаковые по амплитудам. С целью стабилизации азимута преимущественной поляризации падающего на призму Волластона 2 света непосредственно перед призмой Волластона 2 установлена четвертьволновая пластинка 25, например, из слюды, и закреплена так, что ее кристаллографические оси составляют углы $\pm 45^\circ$ с плоскостями пропускания призмы Волластона 2.

10 Предлагаемый измеритель тока оптический универсальный работает следующим образом.

Коллимированный, монохроматический, частично поляризованный пучок света от лазерного модуля 1 (фиг. 3) проходит диафрагму 18, четвертьволновую пластинку 25 и падает на первый поляризатор, выполненный в виде призмы Волластона 2.

15 Свет, излучаемый лазерным модулем 1, можно представить вектором Стокса

$$\bar{V}_{e_1} = I_0 p \begin{bmatrix} 1 \\ \sin 2\epsilon \\ \cos 2\epsilon \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

20 где I_0 - интенсивность света, излучаемого источником 1;

p - степень поляризации света;

ϵ - величина изменения азимута линейной поляризации.

Четвертьволновая пластинка 25 преобразует линейную частичную поляризацию источника света 1 в эллиптическую с азимутом большой оси эллипса поляризации, совпадающим с ее кристаллографическими осями, т.е. азимутом $\pm 45^\circ$ по отношению к

25 плоскостям пропускания призмы Волластона 2. Это подтверждается вектором Стокса \bar{V}_{e_1} , света, падающего на призму Волластона 2, который находим из уравнения

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} I_0 p \begin{bmatrix} 1 \\ \sin 2\epsilon \\ \cos 2\epsilon \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{V}_{e_2} = I_0 p \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cos 2\epsilon \\ \sin 2\epsilon \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Призма Волластона 2 разделяет свет на два одинаковых по интенсивности линейно поляризованных пучка света с взаимно ортогональными плоскостями поляризации.

35 Векторы Стокса этих двух пучков света находим из уравнения

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \pm 1 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} I_0 p \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cos 2\epsilon \\ \sin 2\epsilon \end{bmatrix} = 0,5 I_0 p \begin{bmatrix} 1 \\ \pm 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

40 где знак «плюс» характеризует линейно поляризованный свет с азимутом поляризации, совпадающим с плоскостью разведения лучей призмой Волластона 2, а знак «минус» характеризует линейно поляризованный свет с азимутом, перпендикулярным этой плоскости.

Из уравнения (28) видно, что благодаря наличию четвертьволновой пластинки 25 исключается влияние частичной поляризации света, излучаемого лазерным модулем 1, на баланс интенсивностей света после призмы Волластона 2.

Далее разведенные призмой Волластона 2 два линейно поляризованных пучка света, лежащие в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа (фиг. 5), проходят

магнитооптический элемент (призму) 3, отражаются от зеркальной поверхности 14, вторично проходят элемент 3, отражаются от зеркальной полоски 12, третий раз проходят элемент 3, отражаются от зеркальной поверхности 13. в четвертый раз проходят элемент 3 и проходят второй поляризатор 5.

5 На фиг. 7 показан ход разведенных на угол 2β призмой Волластона 2 двух поляризованных пучков света в призме 3 в другой плоскости, перпендикулярной той, которая рассматривалась на фиг. 5.

После прохождения поляризатора 5 (фиг. 7) разделенные пучки света проходят дополнительную призму 16 и преломляются в ней так, что выходят из нее
10 параллельными друг другу и линзами 6, 7 фокусируются на фотоприемниках 8, 17.

Интенсивности света, воспринимаемые фотоприемниками 8, 17, можно найти из уравнения

$$[M_5][M_3]\bar{V}_i = \bar{V}_e, \quad (29)$$

15 где $\bar{V}_i = 0,5I_0p \begin{bmatrix} 1 \\ \pm 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор Стокса пучков света, прошедших поляризатор 2;

20 $[M_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & \sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица преобразования стеклянной призмы 3, на которую действует магнитное поле фрагмента проводника 4;

25 $[M_5]_{45} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица преобразования поляризатора 5.

После перемножения матриц преобразования элементов оптики и исходного вектора \bar{V}_i по формуле (28) находим первые параметры Стокса пучков света, характеризующие
30 их интенсивности I_1 и I_2 . Так, если по фрагменту проводника 4 течет постоянный ток, то

$$I_1 = 0,25I_0p[1 + \sin 2\alpha]; \quad (30)$$

$$35 \quad I_2 = 0,25I_0p[1 - \sin 2\alpha]. \quad (31)$$

Фотоприемники 8, 17 преобразуют пучки света с интенсивностями света I_1 и I_2 в электрические сигналы

$$U_1 = U_0(1 + \sin 2\alpha), \quad (32)$$

$$40 \quad U_2 = U_0(1 - \sin 2\alpha). \quad (33)$$

Линейные усилители 19, 20 (фиг. 4) усиливают эти сигналы. Микропроцессорный преобразователь 21 суммирует сигналы

$$U_1 + U_2 = 2U_0, \quad (34)$$

45 вычитает сигналы

$$U_1 - U_2 = 2U_0 \sin 2\alpha, \quad (35)$$

находит их отношение

$$Q = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \sin 2\alpha \quad (36)$$

и величину измеряемого постоянного тока

$$i = \frac{0,5 \arcsin Q}{C}, \quad (37)$$

где $C = NkVL$ - постоянная величина, зависящая от числа витков N соленоида 4, коэффициента использования магнитного поля k , от постоянной Верде V стекла призмы 3 и длины пути L пучка света в призме 3.

Если по фрагменту проводника 4 течет переменный ток частоты ω и напряженность магнитного поля внутри фрагмента проводника 4 также переменна $H = H_{\max} \sin \omega t$, то фотоприемники 8, 17 будут воспринимать интенсивности света

$$I_1 = 0,25 I_{0p} [1 + \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)]; \quad (38)$$

$$I_2 = 0,25 I_{0p} [1 - \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)]. \quad (39)$$

Соответственно на выходах линейных усилителей 19, 20 будут электрические сигналы

$$U_1 = U_0 [1 + \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)]; \quad (40)$$

$$U_2 = U_0 [1 - \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t)]. \quad (41)$$

Переменные составляющие сигналов U_1 , U_2 частоты ω находятся в противофазе, поэтому после суммирования получаем постоянную составляющую $2U_0$, а после вычитания получаем разность сигналов в виде переменной составляющей

$$U_1 - U_2 = 2U_0 \sin(2\alpha_{\max} \sin \omega t). \quad (42)$$

После детектирования и сглаживания сигнал, характеризующийся зависимостью (42), можно представить зависимостью (35).

Далее микропроцессорный преобразователь 21 также находит отношение сигналов Q по формуле (36) и величину протекаемого переменного тока по фрагменту проводника 4 согласно формулы (37).

Предлагаемое устройство обладает рядом преимуществ по сравнению с известными устройствами, решающими задачу измерения тока в высоковольтных сетях.

Во-первых, использование в качестве первого поляризатора призмы Волластона 2 (фиг. 3) позволяет получать нормированные сигналы фотоприемников 8, 17 не зависимо от рода тока, протекаемого по фрагменту проводника 4 высоковольтной сети. То есть предлагаемое устройство может работать в сетях как постоянного, так и переменного тока, что позволяет считать его универсальным.

Во-вторых, четырехкратное прохождение поляризованного света через магнитооптический элемент, выполненный в виде четырехгранной стеклянной призмы 3 (фиг. 3), находящейся в продольном магнитном поле фрагмента проводника 4, позволяет достигать высокой чувствительности и точности измерений как переменного, так и постоянного тока.

В-третьих, наличие зеркальных поверхностей 13, 14 (фиг. 5) призмы 3, наклоненных к основанию 11 под углом γ , позволяет достигать параллельности отраженных пучков света относительно падающих в плоскости, параллельной широкой грани четырехугольной призмы 3. А наличие дополнительной призмы 16 (фиг. 7) позволяет достигать параллельности пучков света, разведенных призмой Волластона 2, в плоскости разведения. Этим достигается возможность установки ячейки Фарадея (элементы 2, 3,

5, 16, 18, 25) на таких расстояниях от источника света и фотоприемников, которые требуются при монтаже измерителя тока на изоляторах любых размеров. Следовательно, предлагаемый измеритель тока оптический является универсальным для любых классов напряжений.

В-четвертых, электронный блок 10 (фиг. 3) размещен в нижней подставке 23 изолятора 9, который находится под нулевым потенциалом и заземлен. Поэтому передача результатов измерений тока в высоковольтной линии каждой фазы может передаваться через разъем 24 обычным проводом на требуемое расстояние без использования оптоволоконных жгутов.

В-пятых, установленная после лазерного модуля 1 (фиг. 3, 4) четвертьволновая пластинка 25 позволяет достигать стабильности азимута преимущественной поляризации частично поляризованного света, падающего на призму Волластона 2, и таким образом достигать стабильности и высокой точности измерений как переменного, так и постоянного токов в высоковольтных сетях различных классов.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Зубков В.П., Красина А.Д. Оптико-электронные методы измерения в установках высокого напряжения: (обзор). - М.: ИнформЭнерго 1975. 156 с.

2. Лансберг Г.С. Оптика - «Наука». М. 1976 - 926 с.

3. Патент США №3.605.013.

4. Патент РФ №2321000, G01R 15/24.

5. Патент РФ №2438138, G01R 15/24.

6. Магнитооптический измерительный преобразователь переменного и импульсного тока МПР-МЭ-5.000 НПП «Марс-Энерго»

7. www.mars-energo.ru.

8. Патент РФ №2627989, G01R 15/24.

(57) Формула изобретения

1. Измеритель тока оптический универсальный, содержащий источник коллимированного пучка света, первый поляризатор, магнитооптический элемент ячейки Фарадея, выполненный в виде четырехугольной стеклянной призмы высотой h , первое основание которой полировано и в центре его поверхности нанесено зеркальное покрытие в виде полосы шириной D , равной ширине пучка света, второе основание призмы содержит две полированные наклоненные поверхности с зеркальными покрытиями, составляющие между собой ребро, параллельное зеркальной полоске первого основания, и составляющие с первым основанием равные углы наклона $\gamma = \arctg(0,5D/h)$, магнитооптический элемент размещен в продольном магнитном поле фрагмента проводника с током высоковольтной сети, далее по ходу лучей установлены второй поляризатор, плоскость пропускания которого составляет углы $\pm 45^\circ$ с плоскостью пропускания первого поляризатора, собирающая линза, фотоприемник и электронный блок, отличающийся тем, что с целью достижения универсальности в качестве первого поляризатора установлена призма Волластона и закреплена на свободной от зеркальной поверхности первого основания четырехугольной призмы так, что плоскость разведения лучей призмы Волластона параллельна длинной стороне зеркальной полоски, угол разведения лучей призмой Волластона 2β удовлетворяет условию $2\beta \geq \arctg(D/4h)$, второй поляризатор закреплён также на первом основании четырехугольной призмы, но с другой стороны полосы зеркального покрытия, а за ним установлена дополнительная стеклянная призма с двумя полированными гранями, образующими ребро, перпендикулярное плоскости разведения лучей призмы Волластона, и образующими с

третьей полированной гранью этой дополнительной призмы одинаковые углы θ , удовлетворяющие условию

$$\theta = \beta + \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \beta\right),$$

где β - угол отклонения лучей призмой Волластона относительно оптической оси падающих на нее лучей;

n - показатель преломления стекла магнитооптического элемента и дополнительной призмы;

а после дополнительной призмы последовательно установлены собирающие свет линзы и второй фотоприемник.

2. Измеритель тока оптический универсальный по п. 1, отличающийся тем, что с целью повышения точности перед призмой Волластона установлена четвертьволновая пластинка так, что ее кристаллографические оси составляют с плоскостями пропускания призмы Волластона углы $\pm 45^\circ$.

1

"Измеритель тока оптический универсальный"

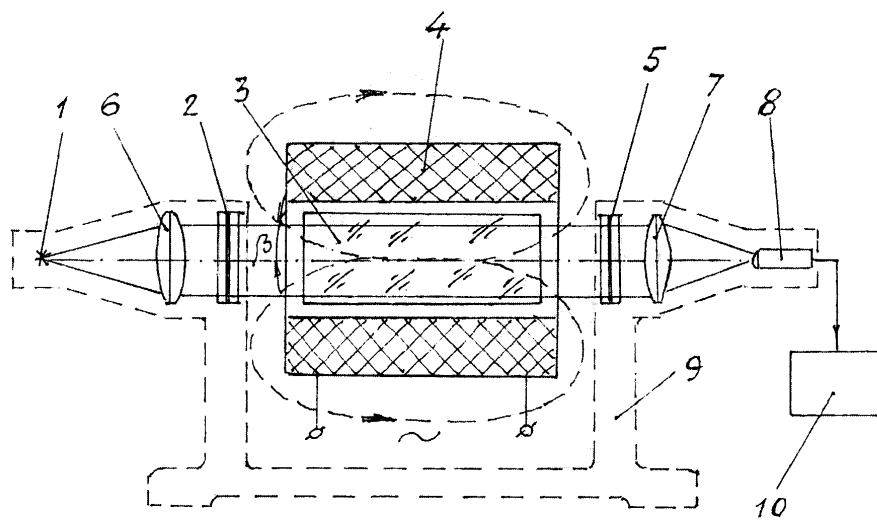
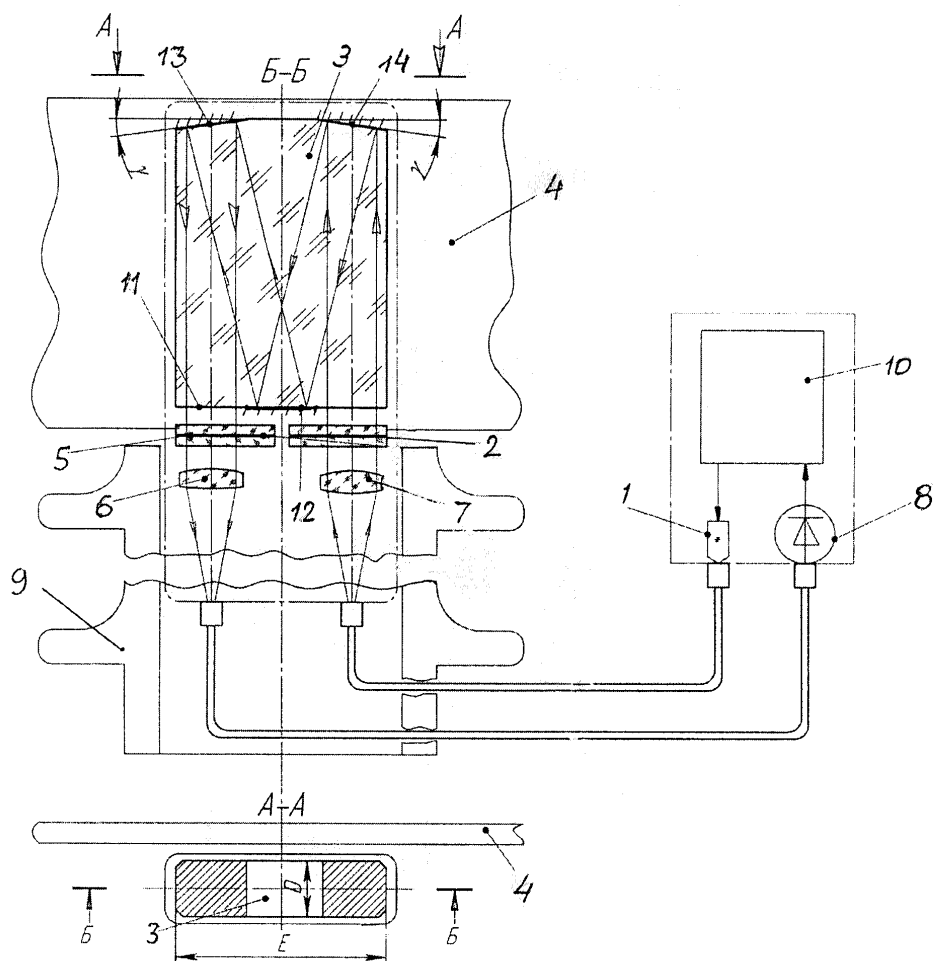


Рис. 1

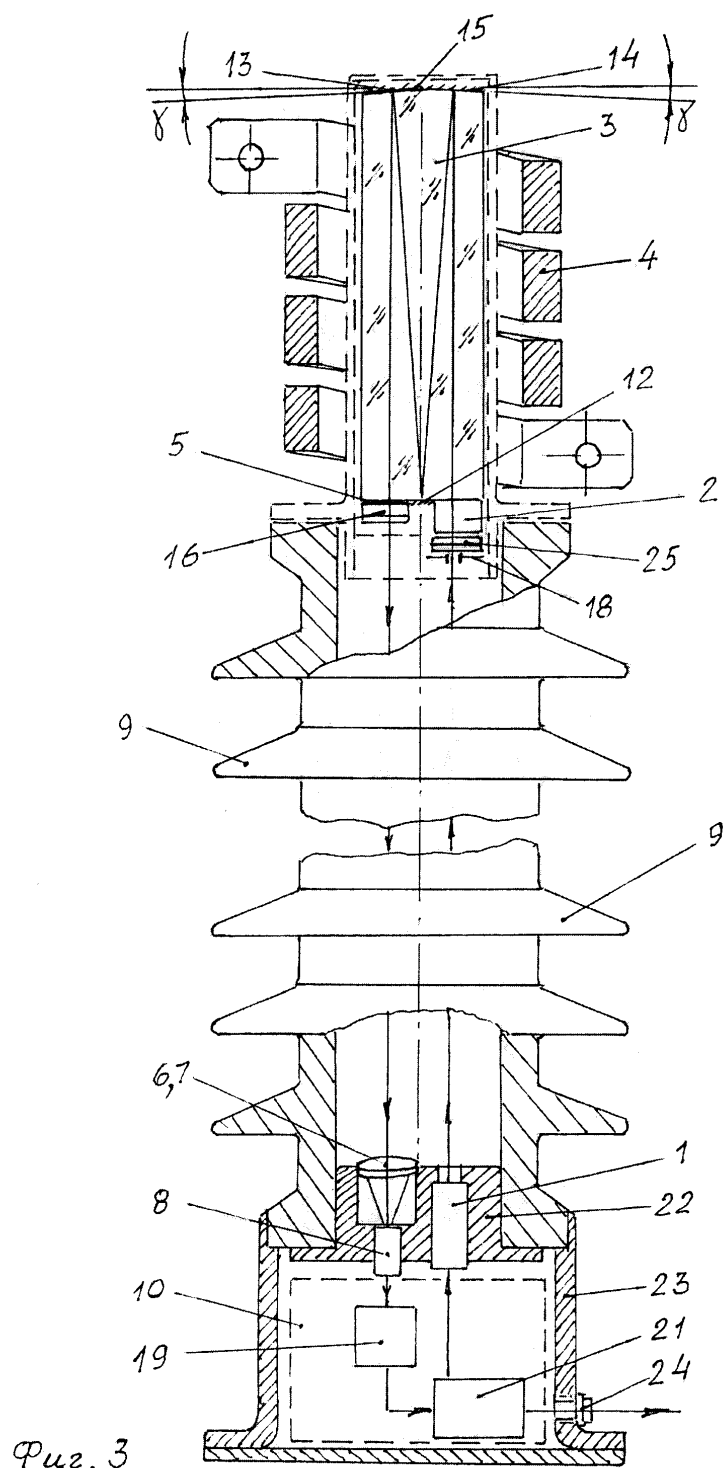
2

"Измеритель тока оптический универсальный"

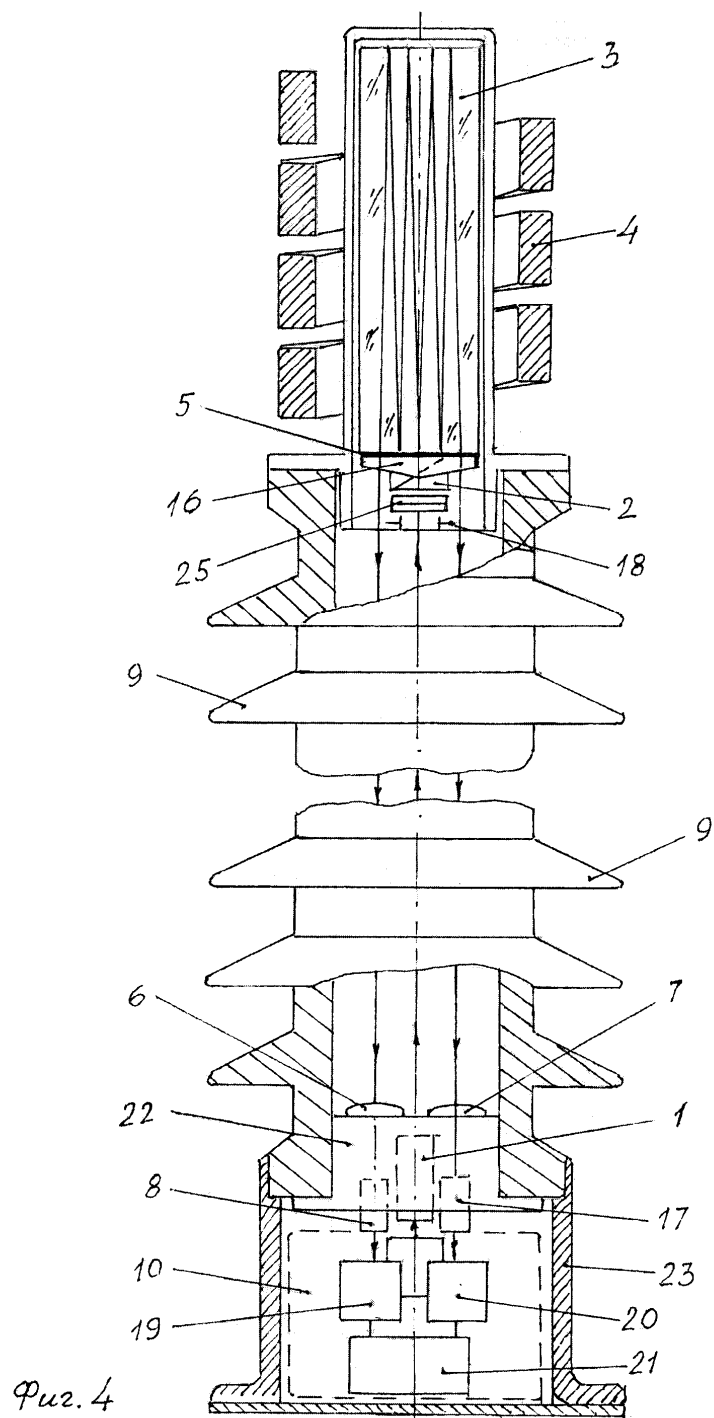


Фиг. 2

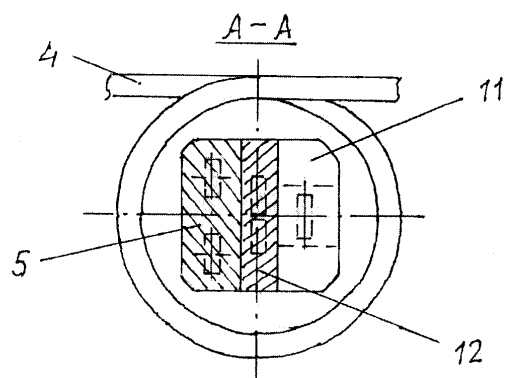
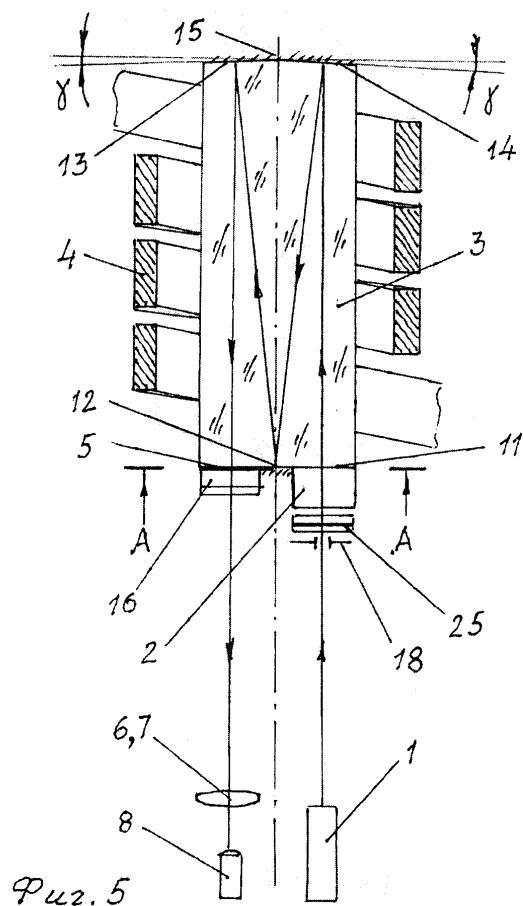
"Измеритель тока оптический универсальный"



"Измеритель тока оптический универсальный"



"Измеритель тока оптический универсальный"



"Измеритель тока оптический универсальный"

