

УДК 535(075)

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

*Е. Р. АДАМОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф. В. К. ЖЕЛЕЗНЯК*  
(Полоцкий государственный университет)  
*E. Adamovskiy ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1044-8741>*

*Произведен анализ известных способов формирования каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи и методы их защиты. Предложен новый способ повышения защищенности оптического волокна при передаче данных на основе магнитооптического эффекта Фарадея. Рассмотрен эксперимент, демонстрирующий практическое наблюдение эффекта Фарадея. Предложена и описана модель системы защиты информации в волоконно-оптической линии на основе устройства рефлектометра с использованием эффекта Фарадея и учетом особенностей рэлеевского рассеяния, связанных с поляризационными свойствами света. Произведены первичные расчеты для оценки возможности наблюдения эффекта Фарадея для характерных параметров объектов. Представлены результаты эксперимента, подтверждающие возможность практической реализации предложенной модели.*

**Ключевые слова:** эффект Фарадея, ВОЛС, защита информации, каналы утечки информации.

**Введение.** В настоящее время для передачи информации широко используются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) по ряду причин: высокая пропускная способность (10 Гбит/с и выше) [1], помехоустойчивость, защищенность, долговечность (номинальный срок работы порядка 25 лет) [2], меньший коэффициент затухания сигнала (до 0,18-0,19 дБ/км на частоте 1550 нм) [2] и малый вес по сравнению с медным кабелем (2200 кг/м<sup>3</sup> против 8900 кг/м<sup>3</sup>). Республика Беларусь является одним из европейских лидеров по распространенности ВОЛС [3], следовательно, актуальными являются вопросы защиты информации, передаваемой с помощью оптических систем связи.

Существующие методы защиты и противодействия перехвату информации в ВОЛС: покрытие или бронирование кабеля, регистрация физических воздействий (вибрационные, акустические и др.), многоканальная передача данных, мониторинг оптической линии с помощью рефлектометра, криптографические методы, в т.ч. квантовые [5; 6]. Для съема информации с волокна необходим физический контакт или воздействие, известные способы формирования технических каналов утечки информации (КУИ) в ВОЛС: создание макро и микро изгибов, деформация кабеля (нарушение полного отражения), создание эффекта туннелирования за счет плотного контакта, нанесение различных покрытий и воздействие электромагнитных полей [7].

В статье предложен метод повышения защищенности ВОЛС за счет использования магнитооптического эффекта Фарадея, позволяющий определить факт наличия несанкционированного устройства на участке линии, локализовать его и идентифицировать параметры.

**Эффект Фарадея.** Магнитооптический эффект Фарадея – это явление поворота плоскости поляризации линейно поляризованного света, проходящего через прозрачную среду в продольном магнитном поле [8]. Следует отметить, что эффект влияет на поляризацию света косвенно, путем формирования гиротропной среды внутри волокна источником поля [9]. Эффект Фарадея используется в физике полупроводников [10], а также при создании различных датчиков. Схема классического эксперимента, многократно описанного в литературе, позволяющая наблюдать вращение плоскости поляризации света в магнитном поле, представлена на рисунке 1 [11].

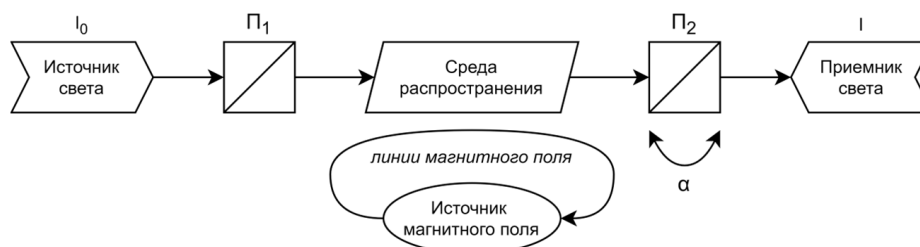


Рисунок 1. – Схема для наблюдения эффекта Фарадея

На пути источника света ставится линейный поляризатор  $\Pi_1$  – устройство, преобразующее проходящее через него оптическое излучение в линейно-поляризованное [12]. Поляризованный свет проходит через среду распространения в магнитном поле, в результате чего плоскость поляризации изменяется

на угол  $\alpha$ . Поляризованный свет проходит через второй поляризатор (анализатор)  $\Pi_2$ , расположенный под тем же углом, что и  $\Pi_1$ . Согласно закону Малюса (1) [13], интенсивность света при рассогласовании плоскостей поляризации света и поляризатора уменьшится пропорционально углу разности  $\alpha$ :

$$I = I_0 \cos^2(\alpha) . \quad (1)$$

Направление распространения света не влияет на направление изменения угла поляризации, что используется для усиления эффекта Фарадея. Пучок света многократно отражают в магнитном поле, в результате оптический путь кратно увеличивается, а воздействие эффекта накапливается. Величина угла поворота плоскости поляризации  $\alpha$  в направлении, параллельном линиям магнитного поля, определяется по формуле

$$\alpha = VHL \quad (2)$$

где  $V$  – постоянная Верде [14], зависит от свойств вещества, длины волны и температуры;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м;

$L$  – длина оптического пути.

Постоянная Верде (удельное магнитное вращение) измеряется в рад/А (СИ) [14] и для кварцевого стекла при длине волны  $\lambda = 632,8$  нм составляет  $V = 1,1 \times 10^{-5}$  рад/А [15], что является малой величиной.

Выполним оценочный расчет величины эффекта Фарадея (угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$ ) в кварцевом стекле:

1) найдем напряженность магнитного поля  $H$  проводника, через который протекает постоянный ток  $i = 3$  А на расстоянии от точки измерения  $d = 0,01$  м:

$$H = \frac{i}{2\pi d} = \frac{3}{6,28 \times 0,1} = 48 \text{ А/м};$$

2) по формуле (2) вычислим  $\alpha$  для длины оптического пути  $L = 1$  м:

$$\alpha = 1,1 \times 10^{-5} \text{ рад/А} \times 48 \text{ А/м} \times 1 \text{ м} = 5,28 \times 10^{-4} \text{ рад} = 0,031^\circ .$$

Значение угла поворота плоскости поляризации  $\alpha = 0,031^\circ$  может быть измерено косвенно через изменение интенсивности света, проходящего через анализатор. Производная зависимости  $I(\alpha)$  (1) имеет экстремум при значении  $\alpha = 45^\circ$ , следовательно, наибольшая чувствительность при измерении может быть достигнута при исходном рассогласовании поляризатора и анализатора на  $\pi/4$ . Изменение угла  $\Delta\alpha = 0,031^\circ$  приведет к падению или увеличению интенсивности света  $I$  на величину порядка  $\Delta I$ , если принять данный участок графика линейным:

$$\Delta I \approx \Delta\alpha / 90^\circ = 3,44 \times 10^{-4} ,$$

что эквивалентно 1/3000 максимальной выходной мощности сигнала. Подобная чувствительность выходит за рамки технических возможностей бытовых фотокамер, глубина цвета которых ограничена 8-битными значениями. Использование профессионального оборудования, позволяющего получать необработанные RAW-снимки, позволяет достигнуть необходимой чувствительности за счет 12–14-битного представления данных, но это относится лишь к оптическому диапазону. Для измерений в ИК- или УФ-областях спектра требуются соответствующие фотодетекторы.

Таким образом, показан способ наблюдения эффекта Фарадея, приведен расчет возможного значения угла поворота плоскости поляризации в магнитном поле, которое наблюдалось бы на практике. Можно заключить, что влияние даже относительно слабого поля в оптическом волокне поддается измерению с помощью высокоточной аппаратуры.

**Применение эффекта Фарадея.** Описанные способы формирования КУИ не оказывают влияния на плоскость поляризации светового потока, поскольку их действие в первую очередь проявляется в снижении выходной мощности, следовательно, с помощью эффекта Фарадея их невозможно обнаружить.

Для несанкционированного съема информации с оптического волокна требуется применение специальных технических средств, которые являются источниками электромагнитного излучения и, следовательно, формируют вокруг себя магнитное поле. Таким образом, изменение плоскости поляризации света в оптическом волокне (при мониторинге, согласно схеме на рисунке 1) свидетельствует о том, что в линии появился неучтенный источник магнитного поля, который может представлять собой как естественное

явление, так и некое техническое средство. Источник магнитного поля при его воздействии на ВОЛС может быть охарактеризован следующими параметрами:

1) частота  $f$  и амплитуда  $U$  сигнала. Современные средства вычислительной техники (СВТ) имеют в конструкции тактовые генераторы, которые формируют опорную частоту с высокой точностью и стабильностью до десятков ГГц. При наличии графических средств вывода данных (например, экрана) устройство также способно излучать видеосигнал в полосе до нескольких МГц. Влияние переменного магнитного поля на поляризованный оптический поток согласно рисунку 1 приводит к появлению на выходе колебаний интенсивности с тем же набором частот. Идентификация гармоник может помочь определить тип источника поля;

2) местоположение точки воздействия на оптическую линию при анализе светового потока может быть выражено через координату, соответствующую длине отрезка между местом воздействия магнитного поля и средством измерения сигнала. Предлагается способ локализации на основе принципа работы оптического рефлектометра (OTDR) – измерительного прибора для построения рефлектограмм.

Устройство рефлектометра показано на рисунке 2 [16]. Лазерный пульсирующий источник передает в оптическое волокно импульсы света, а приемник по тому же каналу с помощью разделителя лучей принимает отраженные сигналы с селекцией по времени, после чего прибор усредняет результаты.

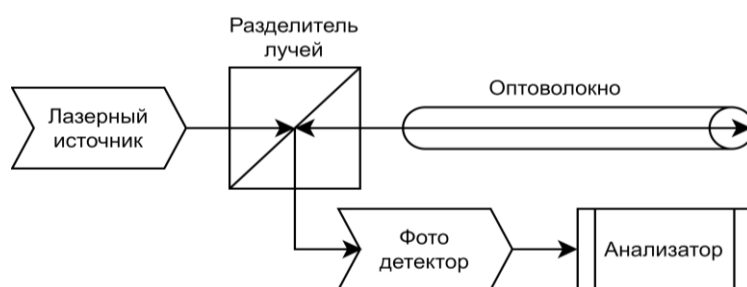


Рисунок 2. – Схема работы рефлектометра

Работа рефлектометра основана на детектировании отраженных сигналов, в т.ч., из-за рэлеевского рассеяния, а регистрируемая разность интенсивностей составляет 0,001 дБ [4]. Рэлеевское рассеяние – это рассеяние света на объектах, размеры которых меньше его длины волны.

Рассматриваемое явление – изменение поляризации света после отражения. Известно, что при рассеянии даже неполяризованный свет приобретает поляризацию в зависимости от угла наблюдения. Рассеяние выражается формулой Рэля [17]

$$I = \frac{9\pi^2 (1 + \cos^2(\theta))}{2r^2 \lambda^4} \left( \frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 V^2 I_0,$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света;

$r$  – расстояние до наблюдателя;

$n_1, n_0$  – показатели преломления дисперсной фазы и дисперсной среды;

$V$  – объем рассеивающей частицы;

$\theta$  – угол наблюдения.

Линейно поляризованный свет в таком случае рассеивается неравномерно в различных плоскостях и имеет индикатрису в виде бублика – угловое распределение интенсивности рассеянного излучения в плоскости рассеяния [17]:

$$I(\theta) \sim \cos^2(\theta).$$

Для проверки состояния поляризации рассеянного света в обратном направлении может быть проведен следующий эксперимент (рисунок 3). Источник поляризованного излучения (угол поляризации  $\alpha$ ) направляется на объект, обладающий рассеивающими свойствами (коллоидная система) и неподвижно закрепленный в центре вращающейся платформы. На краю конструкции устанавливается прибор, способный детектировать излучение с учетом его поляризации: фотодетектор + поляризатор (угол поворота поляризации  $\beta$ ). Прибор вращается относительно центра платформы, образуя угол  $\varphi$  с направлением первичного излучения, и фиксирует падение мощности потока относительно состояния  $\varphi = 0$  градусов. Вместе с изменением угла поворота детектора также искусственно варьируют углы  $\alpha$  и  $\beta$ . В случае, если свет сохраняет поляризацию при рассеянии, сохранение равенства  $\alpha = \beta$ , согласно закону Малюса (1), должно приводить к наблюдению максимально возможной мощности света при любых значениях  $\alpha, \beta$  и  $\varphi$ .

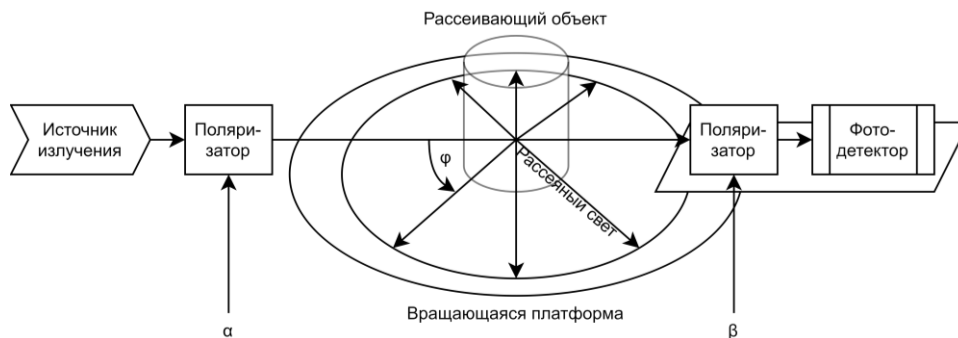
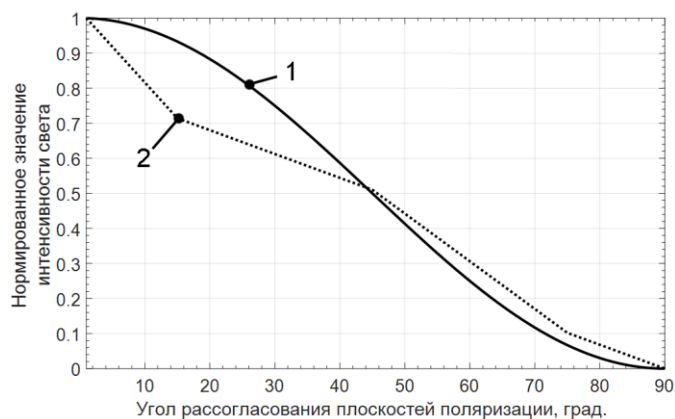


Рисунок 3. – Схема эксперимента по определению поляризации рассеянного света

В качестве источника излучения использовался лазер детектора температуры ( $\lambda = 650 - 670 \text{ нм}$ ), поляризационные свойства которого были подтверждены экспериментом согласно рисунку 1. Рассеивающей средой выступил гидроколлоид с характерными размером частиц от 10 до 300 нм [18], то есть условие рэлеевского рассеяния по объему среды выполнялось.

Поскольку свет лазера находился в оптическом диапазоне (красный цвет), в качестве детектора была использована бытовая камера с поставленной перед ней поляризационной пластинкой. Производился снимок рассеянного света в черно-белом формате (канал яркости), затем все отсчеты изображения усреднялись по яркости и записывалось результирующее значение в диапазоне от 0 до 255. Результаты нормировались по минимальному и максимальному полученному уровню яркости к диапазону  $[0; 1]$ . Если рассеянный в обратном направлении свет сохранил поляризацию, то следовало бы ожидать распределение значений, близкое к кривой, построенной по закону Малюса, что продемонстрировано на рисунке 4.



1 – кривая по закону Малюса; 2 – измерение рассеянного света под углом  $180^\circ$

Рисунок 4. – Влияние угла поворота плоскости поляризации на результирующую интенсивность света

Анализ рисунка 4 показывает, что при отражении в обратном направлении поляризованного света с использованием поляризатора и сохранении равенства  $\alpha = \beta$  детектор фиксирует более высокий уровень освещенности, чем при условии  $\alpha + 90 = \beta$ , а значение монотонно убывает по мере увеличения угла, что подтверждает факт сохранения информации об исходном угле поляризации в рассеянном свете. Построенный по результатам измерений график не в точности следует закону Малюса, следовательно, детектированный свет сохранил поляризацию лишь частично.

Данный вывод подтверждается в [19]: свет сохраняет исходную поляризацию, равно как и полностью отразившийся под углом  $180^\circ$ , а под углом  $90^\circ$  градусов свет полностью поляризован:

$$P \equiv \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}},$$

где  $P$  – степень поляризации рассеянного излучения;  
 $I_{\perp}$  – интенсивность света, рассеянного поперек плоскости поляризации;  
 $I_{\parallel}$  – интенсивность света, рассеянного вдоль плоскости поляризации.

Таким образом, поскольку рассеянный свет, возвращающийся обратно в рефлектометр, может сохранять поляризацию, использование поляризованного лазера и приемника позволит за счет времени задержки определить участки оптического волокна, на которых произошел поворот плоскости поляризации. Схема устройства на базе рефлектометра, способного регистрировать угол поляризации отраженного света в оптическом волокне, представлена на рисунке 5.

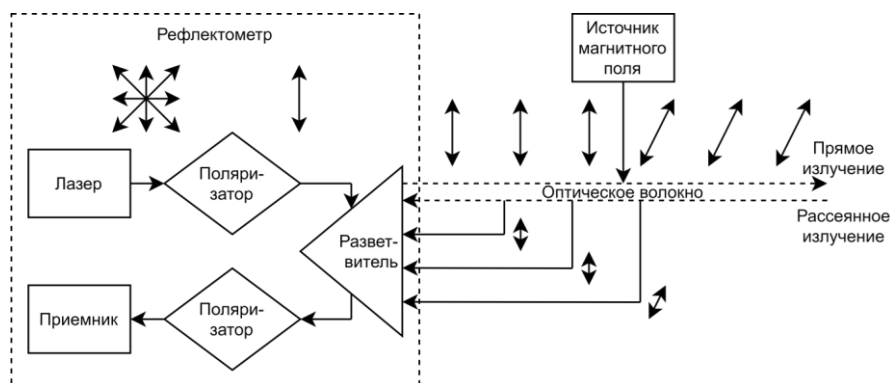


Рисунок 5. – Схема определения локализации источника магнитного поля в ВОЛС

Ключевым отличием предложенной схемы от стандартного рефлектометра является наличие поляризаторов, с помощью которых формируется и анализируется поляризованный свет. Обработка данных заключается в вычислении длины оптического пути  $d$  между рефлектометром и точкой поворота плоскости поляризации в линии.

Если известна полная длина линии  $D$ , то время, за которое свет пройдет ее до конца, отразится и вернется обратно, составит  $t_D = \frac{2D}{c}$ , которое следует принять за период повторения зондирующих импульсов. Следовательно, путь до точки, где на свет оказывает влияние магнитное поле, и обратно займет лишь  $t_d = \frac{2d}{c}$ . Естественным образом количество рассеянного света с увеличением расстояния нелинейно убывает, соответственно, можно построить опорную рефлектограмму для линии, в которой на момент измерения гарантируется отсутствие посторонних источников магнитного поля. Дальнейший мониторинг заключается в сопоставлении исходной и текущей рефлектограмм. Превышение разницы между ними на участке  $t_d$  порогового значения сигнализирует о том, что в соответствующей точке линии  $d$  на свет оказывает влияние магнитное поле.

При этом оставшийся фрагмент рефлектограммы также будет искажен за счет продолжения распространения света со смещенным углом поляризации дальше. Также следует отметить, что вычисление амплитуды воздействия магнитного поля должно производиться с коэффициентом 0,5, поскольку рассеянный свет подвергается искажающему воздействию дважды.

Таким образом, чувствительность измерительной системы зависит от разрешающей способности детектора рефлектометра и параметров зондирующих импульсов (амплитуды, частоты и ширины).

**Заключение.** В статье представлен анализ известных способов формирования каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи и их защиты. Рассмотрен магнитооптический эффект Фарадея в контексте повышения защищенности передачи оптической информации, а именно – возможность использования эффекта для мониторинга линии связи и определения характеристик воздействующего на участок линии технического устройства. Произведены расчеты, позволяющие судить о возможности наблюдения эффекта Фарадея в оптическом волокне при воздействии на него магнитного поля небольшой амплитуды. Предложен метод локализации источника магнитного поля в оптической линии на основании явления сохранения угла поляризации рассеянного света при его отражении в обратном направлении. Для подтверждения наличия явления произведен эксперимент и представлены его результаты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барашко, Е. Н. Сравнительный анализ новых технологий и систем проводной и беспроводной связи / Е. Н. Барашко, Н. В. Крепский, А. В. Трибельгон // European Scientific Conference : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 07 мая 2019 г. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 52–55.
2. Листвин, А. В. Оптические волокна для линий связи : учеб. пособие / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д.В. Швырков. – М. : ЛЕСАРпт, 2003. – 106 с.

3. FTTH Council Europe Webinar [Electronic resours] – April 23rd, 2020. – Mode of access: <https://www.telepolis.pl/images/2020/04/swiatlowod-eu-092019.pdf>. – Date of access: 29.08.2021.
4. Шарварко, В. Г. Волоконно-оптические линии связи : учеб. пособие / В. Г. Шарварко. – Таганрог : ТРТУ, 2006. – 170 с.
5. Юмашева, Е. С. Методы защиты волоконно-оптических линий связи / Е. С. Юмашева, В. Н. Ежгуров // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» : сб. избранных ст. Междунар. науч. конф., СПб., 23–28 февр. 2018 г. / ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». – СПб., 2018. – С. 15–18.
6. Кольцов, А. С. Исследование методов защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи / А. С. Кольцов, Н. В. Филатова, А. В. Пальчиков // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 25 окт. 2018 г. / отв. за выпуск Д. Г. Зыбин. – Воронеж : Научная книга, 2018. – С. 43–46.
7. Карпика, А. Г. О некоторых способах распространения вредоносных приложений в телекоммуникационных системах / А. Г. Карпика, С. В. Лемайкина // Охрана, безопасность, связь. – 2020. – № 5-2. – С. 247–252.
8. Верхозин, А. Н. Магнитооптика вчера и сегодня / А. Н. Верхозин // Вестн. Псков. гос. ун-та. – Псков, 2015. – С. 114–124.
9. Образование, наука и технологии: проблемы и перспективы : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 31 окт. 2019 г. / Под общ. ред. А. В. Туголукова. – М. : ИП Туголуков А.В., 2019. – С. 211–215.
10. Etienne, Du T. de L., Gignoux, D., Schlenker, M. Magnetism Fundamentals / Springer Science & Business Media, 2005. – P. 507.
11. Дейнека, И. Г. Изучение магнитооптического эффекта Фарадея / И. Г. Дейнека, О. А. Шрамко, С. А. Тараканов // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. – СПб., 2008. – С. 84–89.
12. Измерения оптические поляризационные. Термины и определения : ГОСТ 23778-79. – Введ. 01.07.80. – М. : Госком. СССР по стандартам, 1980. – 6 с.
13. Яворский, Б. М. Анализ поляризованного света. Эллиптическая и круговая поляризация света / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф // Справочник по физике. – 4-е изд. – М. : Наука, 1968. – 940 с.
14. Верде постоянная // Физическая энциклопедия : в 5 т. / редкол.: А. М. Прохоров (гл. ред.) [и др.]. – М. : Сов. энцикл., 1988–1998. – Т. 1 : Ааронова – Бома эффект – Длинные линии. – 1998. – 707 с. – С. 258.
15. Цуканов, Б. Д. Магнитное вращение плоскости поляризации в прозрачных средах / Б. Д. Цуканов // Современные проблемы физико-математических наук : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Орел, 4–5 дек. 2020 г. / Орловский гос. ун-т им. И. С. Тургенева ; под общ. ред. Т.Н. Можаровой. – Орел, 2020. – С. 570–576.
16. Ландорф, А. В. Оптический рефлектометр как устройство для измерения затухания в оптическом волокне / А. В. Ландорф, Д. В. Соловьев, В. Н. Фролков // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. – СПб., 2006. – С. 208–213.
17. Новикова, В. А. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике / В. А. Новикова, С. В. Варжель. – СПб. : С.-петерб. нац. исследоват. ун-т информ. технологий, механики и оптики, 2019. – 39 с.
18. Коллоидная система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kazedu.kz/referat/81985/2>. – Дата доступа: 29.08.2021.
19. Русаков, В. С. Оптика [Электронный ресурс] / В. С. Русаков. – Режим доступа: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/optics-rusakov-M.pdf>. – Дата доступа: 29.08.2021.

Поступила 14.09.2021

## MAGNETO-OPTICAL FARADAY EFFECT FOR INFORMATION LEAKAGE CHANNELS MONITORING IN FIBER-OPTICAL COMMUNICATIONS

*E. ADAMOVSKIY, V. ZHELEZNYAK*

*The search and analysis of known methods of information leakage channels formation in fiber-optic communication lines and methods of their protection is carried out. A new method of increasing the safety during data transmission in optical fiber, based on the magneto-optical Faraday effect, is proposed. An experiment on the practical observation of the Faraday effect is considered. A model of an information protection system in a fiber-optic communication line based on a reflectometer is proposed and described, which uses the Faraday effect and takes into account the features of Rayleigh scattering associated with the polarization properties of light. Primary calculations have been performed to assess the possibility of observing the Faraday effect for characteristic parameters. The results of experiments are presented, confirming the possibility of practical implementation of the proposed model.*

**Keywords:** *Faraday effect, fiber-optical communications, information protection, information leakage channels.*