

**ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО КАК ОСНОВА
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ**

А. О. ЗЕНЕВИЧ¹, Т. М. МАНСУРОВ², Т. Г. КОВАЛЕНКО*¹,
Е. В. НОВИКОВ¹, С. В. ЖДАНОВИЧ¹, Т. А. МАТКОВСКАЯ¹

¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь
*tgkov@yandex.by

²Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Аннотация. В настоящее время для контроля различного рода объектов широко применяются датчики на основе оптического волокна, они обладают рядом преимуществ: электробезопасность, невосприимчивость к электромагнитным воздействиям, возможность использования в сочетании с оптическими волокнами, по которым передаются данные о состоянии контролируемых объектов или сред. Датчики на основе оптического волокна химически нейтральны и достаточно устойчивы к химическому воздействию различного рода, а также могут использоваться для контроля состояния объектов с легковоспламеняющимися и взрывоопасными жидкостями. Особый интерес в связи с этим представляет применение подобных датчиков в химической и пищевой промышленности для определения уровня жидкостей в производственных емкостях и измерения концентрации растворов. Цель работы — установить возможность использования оптического волокна как основы датчиков идентификации жидкостей и датчиков определения концентрации растворенных в воде веществ. Проанализированы рефлектограммы оптического волокна, полученные при нахождении торца оптического волокна в различных жидкостях. Определено, что величина пика рефлектограммы оптического волокна, соответствующего местоположению границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды, зависит от показателя преломления жидкости, в которой находится торец этого оптического волокна. Предложено использовать в качестве информационного параметра величину этого пика рефлектограммы для идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, а также определения концентрации растворенных в воде веществ. Доказана возможность использования оптического волокна в сочетании с методом оптической рефлектометрии для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов.

Ключевые слова: оптическое волокно, коэффициент отражения, показатель преломления, рефлектометр, концентрация раствора

Ссылка для цитирования: Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В., Матковская Т. А. Оптическое волокно как основа для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 895—901. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901.

**OPTICAL FIBER AS A BASIS FOR CREATING SENSORS FOR IDENTIFYING LIQUIDS
AND DETERMINING THE CONCENTRATION OF SOLUTIONS**

A. O. Zenevich¹, T. M. Mansurov², T. G. Kovalenko*¹,
E. V. Novikov¹, S. V. Zhdanovich¹, T. A. Matkovskaia¹

¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus
*tgkov@yandex.by

²Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Abstract. Currently, sensors based on optical fiber are widely used to control various kinds of objects. Compared with other types of sensors, such sensors have a number of advantages, such as: electrical safety, immunity to electromagnetic influences, the ability to use in combination with optical fibers that transmit data on the state of controlled objects or environments. Fiber-optic sensors are chemically neutral and sufficiently resistant to chemical effects of various kinds, and can also be used to monitor the condition of objects with flammable and explosive liquids. Of particular interest in this regard is the use of such sensors in the chemical and food industries to determine the presence and level of liquids in production containers and measure the concentration of solutions. The possibility of using optical fiber as the basis for sensors for identifying liquids and sensors for determining the concentration of substances dissolved in water is established. Reflectograms of an optical fiber obtained by immersing the end of the fiber in various liquids are analyzed.

It is found that magnitude of the peak of the optical fiber reflectogram corresponding to the location of the interface between the core of the optical fiber and the environment, and depends on the refractive index of the liquid in which the end of this optical fiber is located. It is proposed to use the value of this reflectogram peak as an information parameter for identifying liquids having different refractive indices, as well as determining the concentration of substances dissolved in water. The possibility of using an optical fiber in combination with the method of optical reflectometry to create sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions is proved.

Keywords: optical fiber, reflection coefficient, refractive index, reflectometer, solution concentration

For citation: Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V., Matkovskaia T. A. Optical fiber as a basis for creating sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 895—901 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901.

Введение. В настоящее время для контроля состояния объектов и измерения их параметров широко применяются датчики на основе оптического волокна [1—4]. По сравнению с другими видами датчиков они имеют ряд преимуществ, к числу которых можно отнести электробезопасность, невосприимчивость к электромагнитным воздействиям, возможность использования в сочетании с оптическими волокнами, по которым передаются данные о состоянии контролируемых объектов или сред.

Подобные датчики позволяют исключить преобразование электрического сигнала в оптический, упрощают построение систем диагностики, а также обеспечивают контроль состояния объектов, находящихся на значительном расстоянии от места сбора и анализа данных.

Кроме того, датчики на основе оптоволокна химически нейтральны и достаточно устойчивы к химическому воздействию различного рода, а также могут быть использованы для контроля состояния объектов с легковоспламеняющимися и взрывоопасными жидкостями [5]. Особый интерес в связи с этим представляет применение подобных датчиков в химической и пищевой промышленности для определения наличия жидкостей (и их уровня) в производственных емкостях и измерения концентрации растворов.

В связи с этим целью настоящей работы является определение возможности использования оптического волокна как основы датчиков для идентификации жидкостей и датчиков определения концентрации растворенных в воде веществ.

Экспериментальная установка и методика исследований. На рис. 1 представлена структура экспериментальной установки для исследования возможности использования оптического волокна в качестве основы датчиков определения концентрации растворенных в воде веществ и датчиков для идентификации жидкостей.

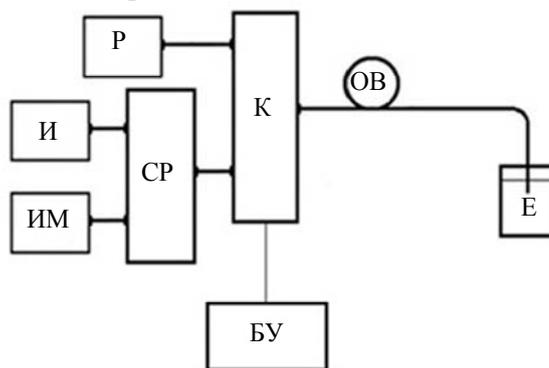


Рис. 1

В экспериментальной установке источник оптического излучения И подключался к одному из входов двунаправленного пассивного смесителя-разветвителя оптических сигналов СП. Ко второму входу этого смесителя-разветвителя подключен измеритель мощности оптического излучения ИМ. Выход смесителя-разветвителя подключен к одному из входов опти-

ческого коммутатора К. Ко второму входу коммутатора подсоединен рефлектометр Р. Выход оптического коммутатора соединен со входом оптического волокна ОВ. Блок управления БУ управляет работой оптического коммутатора, который подключает ОВ к выходу рефлектометра или к выходу СР.

При проведении измерений оптическое излучение от И через пассивный двунаправленный смеситель-разветвитель оптических сигналов подается на вход управляемого коммутатора, который направляет его в оптическое волокно. Оптическое излучение распространяется по оптическому волокну, достигая его выхода. В точке соприкосновения торца ОВ с внешней средой часть оптического излучения выходит за пределы оптического волокна во внешнюю среду, а часть излучения отражается от границы раздела сердцевины волокна и среды и поступает обратно. Отраженная часть излучения распространяется по оптическому волокну и через оптический коммутатор направляется на смеситель-разветвитель и поступает на источник, а также на измеритель мощности оптического излучения. При этом смеситель-разветвитель разделяет отраженное излучение на две равные доли. Использование смесителя-разветвителя с таким коэффициентом деления обеспечивает достаточную для регистрации величину мощности отраженного сигнала. Другие коэффициенты деления приводят либо к необходимости увеличения мощности оптического излучения источника для получения достаточной для регистрации величины мощности отраженного сигнала, либо к уменьшению доли мощности отраженного излучения, поступающего на измеритель мощности.

Значение мощности, поступающей от источника через смеситель-разветвитель оптических сигналов в измеритель мощности, меньше порогового значения. В качестве ИМ используется калиброванный и поверенный тестер ОТ-3-1, который измеряет величину поступившей на него отраженной мощности оптического излучения.

Если коммутатор подключает ко входу оптического волокна рефлектометр, то последний обеспечивает регистрацию рефлектограммы этого волокна. Отметим, что в экспериментальной установке в качестве рефлектометра использовался калиброванный и поверенный многофункциональный оптический измерительный прибор МТР 6000.

Объектом исследований выступали серийно выпускаемые одномодовые оптические волокна G657. Выбор этого типа волокна связан, с одной стороны, с тем, что оно весьма часто используется в оптических кабелях. С другой стороны, использование G657 позволяет упростить процесс сопряжения датчика на основе такого оптоволокна с кабелем, используемым в системах мониторинга различных объектов для передачи данных [6]. Это волокно также устойчиво к изгибам, и к его монтажу не предъявляются строгие требования [7].

Во время проведения исследований торец волокна размещался в емкости с различными жидкостями, а также водными растворами определенного вещества, его вид и концентрация вещества в растворе менялись. Торец волокна фиксировался в емкости на 2—3 см ниже поверхности жидкости (см. рис. 1: Е — емкость с жидкостью).

По результатам исследований определялся коэффициент отражения от границы раздела сердцевины волокна и окружающей среды. Под коэффициентом отражения k понимается величина, характеризующая способность тела (объекта) отражать падающее на него излучение:

$$k = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{п}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ — мощность оптического излучения, падающая на границу раздела сердцевины волокна и окружающей среды; $P_{\text{отр}}$ — мощность оптического излучения отраженного от границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды.

Значение $P_{\text{п}}$ определяется на основе значения мощности $P_{\text{и}}$ источника оптического излучения с учетом потери мощности излучения в смесителе-разветвителе и оптическом коммутаторе, а также в оптическом волокне. Для этого использовалась следующая формула:

$$P_{\Pi} = bP_{И} \exp(-\alpha l), \quad (2)$$

где b — коэффициент, характеризующий потери мощности оптического излучения источника в смесителе-разветвителе и оптическом коммутаторе; α — коэффициент, характеризующий потери мощности излучения, приходящиеся на единицу длины оптического волокна; l — длина оптического волокна.

Величина $P_{отр}$ вычисляется на основе измеренного значения мощности оптического излучения P , регистрируемого измерителем мощности. При этом учитывалось, что обратно отраженное в оптическое волокно излучение также претерпевает потери мощности по длине волокна l . Также необходимо учесть, что на ИМ поступает только половина мощности обратно отраженного излучения, достигшего выхода смесителя-разветвителя:

$$P_{отр} = \frac{2P}{\exp(-\alpha l)}. \quad (3)$$

В процессе эксперимента протяженность оптического волокна $l = 500$ м не изменялась, а длина волны оптического излучения составляла 1310 нм. Эта длина волны соответствует „окну прозрачности“ одномодового оптического волокна [8—11]. При этом величина $\exp(-\alpha l) = 0,58$; $b = 0,46$. Мощность оптического излучения источника оставалась постоянной $P_{И} = 10$ мВт. Длительность оптического импульса рефлектометра, при которой измерялись рефлектограммы, составляла 3,0 нс.

Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019*, контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 ГПа.

Результаты исследований и их обсуждение. При проведении исследований в качестве тестовых веществ выступали воздух и жидкости, имеющие различные показатели преломления. Данные о показателях преломления воздуха и жидкостей, а также полученные для этих веществ значения коэффициента отражения от границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды представлены в таблице.

Вещество	Показатель преломления оптического излучения	Коэффициент отражения, %
Воздух	1,000	2,73
Вода	1,333	0,19
Изопропиловый спирт	1,377	0,08
Глицерин	1,471	0,02

Отметим, что сведения о показателях преломления веществ взяты из работы [12], а значения величины k были определены на основании экспериментальных данных по формулам (1)—(3).

В результате исследований получены рефлектограммы оптического волокна при помещении торца оптического волокна в различные среды. Каждая рефлектограмма содержала пик, соответствующий местоположению границы раздела сердцевины волокна и окружающей среды. Наличие пика обусловлено отражением оптического излучения от этой границы. На рис. 2 представлены участки рефлектограмм, на которых отображен этот пик (1 — воздух; 2 — вода; 3 — изопропиловый спирт; 4 — глицерин). Величина пика зависела от того, в каком веществе оказывался торец оптического волокна. Отметим, что под величиной пика Δa подразумевалась разность между максимальным значением уровня мощности для этого пика и уровнем мощности в точке начала этого пика (с левой стороны от пика).

* ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 „Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий“.

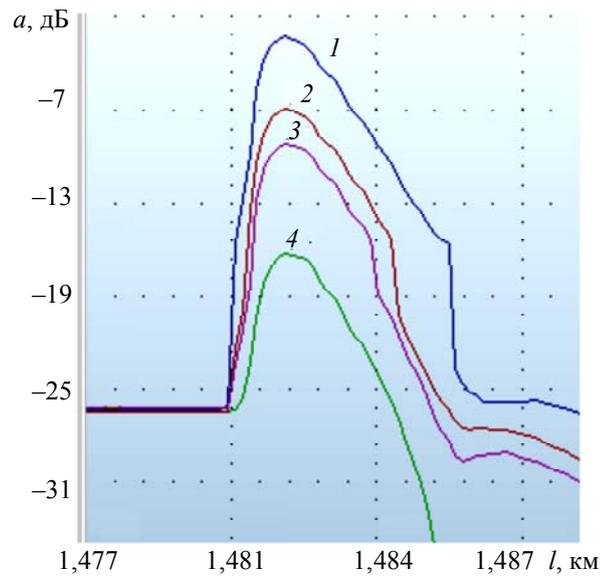


Рис. 2

Как видно из рис. 2, для веществ с большим коэффициентом отражения (см. таблицу) Δa больше, чем для веществ с меньшим значением коэффициента отражения. Таким образом, можно утверждать, что величина Δa и коэффициент отражения k взаимосвязаны. Поэтому Δa можно использовать как информативный параметр для идентификации веществ, имеющих разные показатели преломления.

Исследовались также зависимости информативного параметра Δa от концентрации C водных растворов сахара и изопропилового спирта. Полученные зависимости информативного параметра Δa от концентрации C представлены на рис. 3 (1 — раствор изопропилового спирта; 2 — раствор сахара) и в исследуемом диапазоне концентраций хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, причем увеличение концентрации раствора приводило к уменьшению Δa . Такое поведение связано с тем, что с увеличением концентрации повышался показатель преломления для раствора и эта величина приближалась к значению показателя преломления сердцевины оптического волокна. В результате уменьшался коэффициент отражения k (см. таблицу), а значит, и величина Δa .

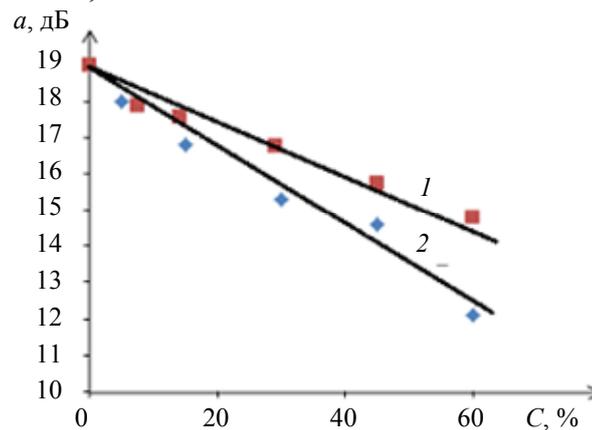


Рис. 3

Как видно из рис. 3, угол наклона зависимостей величины Δa от концентрации раствора C различается для водного раствора сахара и для водного раствора изопропилового спирта. Это можно объяснить тем, что у данных растворов от их концентрации по-разному зависят показатели преломления. Зависимости начинаются из одной точки, поскольку при $C = 0$ у всех растворов показатель преломления равен показателю преломления воды. Для максимальной концентрации раствора изопропилового спирта показатель преломления не может превышать

1,377 (см. таблицу). Согласно работам [13, 14], для концентрации раствора сахара в воде $C = 60\%$ показатель преломления составляет 1,442 и достаточно близок к показателю преломления сердцевинны оптического волокна.

Заключение. Показано, что величина пика рефлектограммы, соответствующего местоположению границы раздела сердцевинны оптического волокна и окружающей среды, зависит от показателя преломления вещества, в котором находится торец волокна. Предложено использовать величину пика в качестве информационного параметра для идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, а также для определения концентрации водных растворов.

Таким образом, доказана возможность использования оптического волокна в сочетании с методом оптической рефлектометрии для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
2. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
3. Fidanboyly K., Efendioğlu H. S. Fiber optic sensors and their applications // 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09). 13—15 May 2009, Karabuk, Turkey. P. 1—6.
4. Iniewski K., Rajan G. Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015.
5. Вяльшиев А. И., Добров В. М., Долгов А. А. и др. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32—37.
6. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАПарт, 2003. 288 с.
7. Recommendation ITU-T G.657 (11/2016) Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2017. 24 p.
8. Дмитриев С. А., Слепов Н. Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
9. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Тренз, 2001. 267 с.
10. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб: Лань, 2021. 268 с.
11. Kumar Sh., Jamal Deen M. Fiber optic communications. Fundamentals and applications. NJ: John Wiley & Sons, 2014. 573 p.
12. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 848 с.
13. Кириченко Н. А. Принципы оптики. М.: МФТИ, 2016. 308 с.
14. Бутиков Е. И. Оптика. СПб: Лань, 2012. 608 с.

Сведения об авторах

Андрей Олегович Зеневич

— д-р техн. наук, профессор; Белорусской государственной академии связи; ректор E-mail: a.zenevich@bsac.by

Тофиг Магомедович Мансуров

— д-р техн. наук, профессор; Азербайджанский технический университет, кафедра радиотехники и коммуникации; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru

Татьяна Георгиевна Коваленко

— аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tgkov@yandex.by

Евгений Владимирович Новиков

— канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, директор Института современных технологий связи; E-mail: e.novikov@bsac.by

- Сергей Вячеславович Жданович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Татьяна Александровна Матковская** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tandem7m@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.22; одобрена после рецензирования 24.08.22; принята к публикации 31.10.22.

REFERENCES

1. Udd E., ed., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, NY, John Wiley & Sons, 2011, 512 p., DOI: 10.1002/9781118014103.
2. Okoshi T., Okamoto K., Otsu M., Nishihara H., Kyuma K., Hatate K. *Volokonno-opticheskiye datchiki* (Fiber Optic Sensors), Leningrad, 1990, 256 p. (in Russ.)
3. Fidanboyly K., Efendioğlu H.S. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, May 13–15, 2009, Karabuk, Turkey, pp. 1–6.
4. Iniewski K., Rajan G. *Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications*, Boca Raton, CRC Press, 2015.
5. Vyalyshv A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A. et al. *Prirodoobustroystvo*, 2014, no. 3, pp. 32–37. (in Russ.)
6. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibers for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)
7. *Recommendation ITU-T G.657 (11/2016) Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*, Geneva, 2017, 24 p.
8. Dmitriyev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoye sostoyaniye i novyye perspektivy* (Fiber-Optic Technology: State of the Art and New Perspectives), Moscow, 2010, 607 p. (in Russ.)
9. Ubaidullaev R.R. *Volokonno-opticheskiye seti* (Fiber Optic Networks), Moscow, 2001, 267 p. (in Russ.)
10. Sklyarov O.K. *Volokonno-opticheskiye seti i sistemy svyazi* (Fiber Optic Networks and Communication Systems), St. Petersburg, 2021, 268 p. (in Russ.)
11. Kumar Sh., Jamal Deen M. *Fiber Optic Communications. Fundamentals and Applications*, NJ, John Wiley & Sons, 2014, 573 p.
12. Landsberg G.S. *Optika* (Optics), Moscow, 2010, 848 p. (in Russ.)
13. Kirichenko N.A. *Printsipy optiki* (Principles of Optics), Moscow, 2016, 308 p. (in Russ.)
14. Butikov E.I. *Optika* (Optics), St. Petersburg, 2012, 608 p. (in Russ.)

Data on authors

- Andrey O. Zenevich** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Tofiq M. Mansurov** — Dr. Sci., Professor; Azerbaijan Technical University, Department of Radio Engineering and Communication; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
- Tatiana G. Kovalenko** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tgkov@yandex.by
- Evgeny V. Novikov** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Sergey V. Zhdanovich** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Tatiana A. Matkovskaia** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tandem7m@gmail.com

Received 01.07.22; approved after reviewing 24.08.22; accepted for publication 31.10.22.