



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-46-52>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.8, 51-7

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ

КАМЛАЧ П.В.¹, ГРОДО Д.С.², ЧУРАКОВ А.В.¹, КАМЛАЧ В.И.¹, БОНДАРИК В.М.¹,
МАДВЕЙКО С.И.¹, КЛЮЕВ А.П.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Унитарное предприятие «Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО»
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 16 ноября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Проектированию современных приборов экстракорпоральной магнитотерапии должно предшествовать физико-математическое моделирование всех этапов технологии воздействия магнитных полей на различные типы тканей организма с учетом их диэлектрических свойств. Это нужно для создания электромагнитного поля с необходимыми биотропными параметрами. В данной работе построена математическая модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани, такие как мышцы, кожа и жировая ткань. Математическая модель учитывает различные параметры биологической ткани, такие как удельная электропроводность и относительная диэлектрическая проницаемость. На основе модели рассчитаны параметры отклика в биологических тканях (амплитуда отклика в ткани и максимальное значение тока в ткани) в инновационной платформе Sim4Life 5.2. Для проверки математической модели использовался лабораторный макет для измерений электрических характеристик биологической ткани. В ходе проведения исследований были проведены эксперименты с тремя биологическими образцами: жировая ткань, мышечная ткань и кожа. Построены зависимости амплитуды отклика в биологических образцах от мощности выходного сигнала. Полученные результаты показывают использование предложенного алгоритма работы в комплексе на базе платформы Sim4Life 5.2 и симуляции электромагнитного поля с биологическим объектом, оптимальным для создания и экспертизы технологий и приборов магнитотерапии и индукторов экстракорпорального воздействия магнитного поля. Данная работа позволит ознакомить более широкий круг разного профиля специалистов с возможностями платформы Sim4Life 5.2 не только для моделирования новых приборов медицинского назначения, но и для экспертизы имеющихся и применяющихся в здравоохранении.

Ключевые слова: магнитотерапия, индуктор, биологический образец, симуляция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Камлач П.В., Гродо Д.С., Чураков А.В., Камлач В.И., Бондарик В.М., Мадвейко С.И., Ключев А.П. Модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани. Доклады БГУИР. 2020; 18(8): 46-52.

MODEL OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECT ON BIOLOGICAL TISSUES

PAVEL V. KAMLACH¹, DZMITRY S. HRODA², ANDREJ V. CHURAKOV¹,
VIERANIKA I. KAMLACH¹, VASILII M. BANDARYK¹,
SIARHEI I. MADVEIKA¹, ANDREJ P. KLYUEV¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Unitary enterprise "Scientific and technical center "LEMT" BelOMO" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 16 November 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The design of modern devices for extracorporeal magnetotherapy should be preceded by physical and mathematical modeling of all stages of the technology of the effect of magnetic fields on various types of body tissues, taking into account their dielectric properties. This is necessary to create an electromagnetic field with the necessary biotropic parameters. In this work, a mathematical model of the effect of electromagnetic field on biological tissues, such as muscles, skin and adipose tissue, is constructed. The mathematical model takes into account various parameters of biological tissue, such as electrical conductivity and relative dielectric constant. Based on the model, the parameters of the response in biological tissues (the amplitude of the response in the tissue and the maximum value of the current in the tissue) were calculated in the innovative Sim4Life 5.2 platform. To test the mathematical model, a laboratory model was used to measure the electrical characteristics of biological tissue. During the research, experiments were carried out with three biological samples: adipose tissue, muscle tissue and skin. The dependences of the response amplitude in biological samples on the output signal power are plotted. The results obtained characterize the use of the proposed operation algorithm in a complex based on the Sim4Life 5.2 platform and simulation of electromagnetic field with a biological object that is optimal for the creation and examination of technologies and devices for magnetotherapy and inductors of extracorporeal effects of magnetic field. This work will make it possible to familiarize a wider range of different experts with the capabilities of the platform not only for modeling new medical devices, but also for the examination of available and those already applied in healthcare.

Keywords: magnetotherapy, inductor, biological sample, simulation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kamlach P.V., Hroda D.S., Churakov A.V., Kamlach V.I., Bandaryk V.M., Madveika S.I., Klyuev A.P. Model of electromagnetic field effect on biological tissues. Doklady BGUIR. 2020; 18(8): 46-52.

Введение

Проектированию современных приборов экстракорпоральной магнитотерапии должно предшествовать физико-математическое моделирование всех этапов технологии воздействия магнитных полей на различные типы тканей организма с учетом их диэлектрических свойств. Это необходимо для создания электромагнитного поля с необходимыми биотропными параметрами. Решению этой важной задачи во многом способствует использование современных систем программного обеспечения (ПО), которые задействуют различные модели при решении поставленных задач. Однако для их реализации требуется иметь представление о возможностях и основных алгоритмах работы программных платформ (ПП) и определиться с физическими формулами, которые будут использоваться [1–4].

Математическая модель воздействия магнитного поля на биологические ткани

В уравнениях Максвелла изменение электрического поля E (частная производная) зависит от распределения в пространстве магнитного поля H (ротор). Аналогично, изменение поля H зависит от распределения в пространстве электрического поля E . На этом наблюдении

основан алгоритм Йи [5]. Сетки для полей E и H смещены по отношению друг к другу на половину шага дискретизации времени и по каждой из пространственных переменных. Конечно-разностные уравнения позволяют определить поля E и H на данном временном шаге на основании известных значений полей на предыдущем.

Уравнения Максвелла дискретизируются с помощью конечно-разностной аппроксимации второго порядка как в пространстве, так и во времени в равноудаленной сетке. Первые частные производные пространства и времени приводят к [5]:

$$\frac{\partial F(i, j, k, n)}{\partial x} = \frac{F^n(i + 1/2, j, k) - F^n(i - 1/2, j, k)}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2], \quad (1)$$

$$\frac{\partial F(i, j, k, n)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2], \quad (2)$$

где F^n – электрическое (E) или магнитное (H) поле в момент времени $n \cdot \Delta t$;

i, j и k – индексы пространственной решетки;

$O[(\Delta x)^2]$ и $O[(\Delta t)^2]$ – ошибочные составляющие.

Уравнения Максвелла применяются для определения напряженности электрического поля E и напряженности магнитного поля H [5]:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \vec{E} + \sigma \vec{E},$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H} + \sigma \vec{H},$$

где $\sigma \vec{E}$ – электрические потери для данного распределения полей в пространстве и времени;

$\sigma \vec{H}$ – магнитные потери для данного распределения полей в пространстве и времени.

Для моделирования в программе Sim4Life 5.2 построен прямоугольный параллелепипед в качестве облучаемого объекта, а также два узких цилиндра в качестве имитации полуволнового диполя (рис. 1). Параметры модели в данной программе приведены в табл. 1.

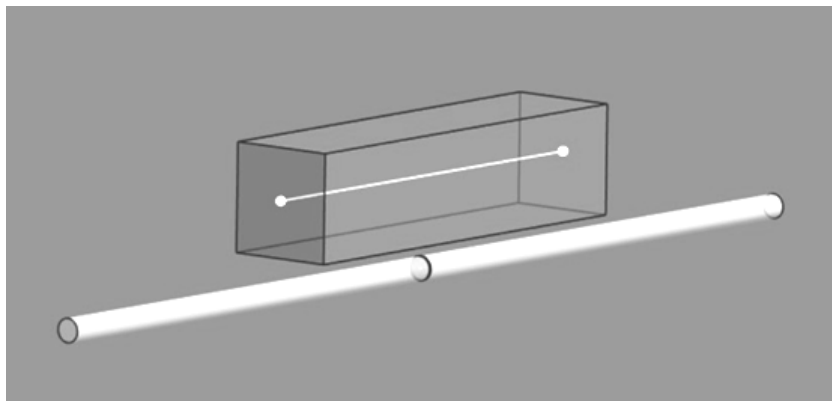


Рис. 1. Вид построенного объекта в программе Sim4Life
Fig. 1. View of the constructed object in the program Sim4Life

Таблица 1. Параметры модели в программе Sim4Life
Table 1. Model Parameters in Sim4Life

Геометрический параметр модели Geometric parameter of the model	Величина параметра, мм Parameter value, mm
Размеры параллелепипеда	200×50×50
Размах плечей диполя	500м
Диаметр плечей диполя	11,1
Зазор между плечами	1
Расстояние между диполем и параллелепипедом	10

Линии внутри параллелепипеда используются в качестве датчика для построения зависимостей напряжения и силы тока от времени и частоты, между диполями – в качестве источника сигнала (для этого используются точки начала и конца линий).

Цилиндрам назначен материал PEC (идеальный электрический проводник). Параллелепипеду будут поочередно назначены такие материалы, как мышцы, жир и кожа. Окружающей среде назначен воздух.

Мышцы, жир, кожа и воздух относятся к диэлектрикам, в табл. 2 приведены параметры этих материалов при моделировании симуляции. Удельная электропроводность и относительная диэлектрическая проницаемость зависят от частоты воздействующего сигнала. При моделировании использовался сигнал с несущей частотой 300 МГц.

Таблица 2. Параметры материалов для симуляций в программе Sim4Life
Table 2. Parameters of materials for simulations in Sim4Life

Материал Material	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Удельная электропроводность, см/м Specific electrical conductivity, s/m	Относительная диэлектрическая проницаемость Relative dielectric constant
Воздух	1,16409	0	1
Мышцы	1090,4	0,770531	58,2011
Жир	911	0,0764754	11,745
Кожа	1109	0,641421	49,8211

Исходный сигнал генерируется между плечами диполя. Форма сигнала во временной и частотной областях представляет собой функцию Гаусса с амплитудой 1 В, временем воздействия на объект 50 нс (рис. 2).

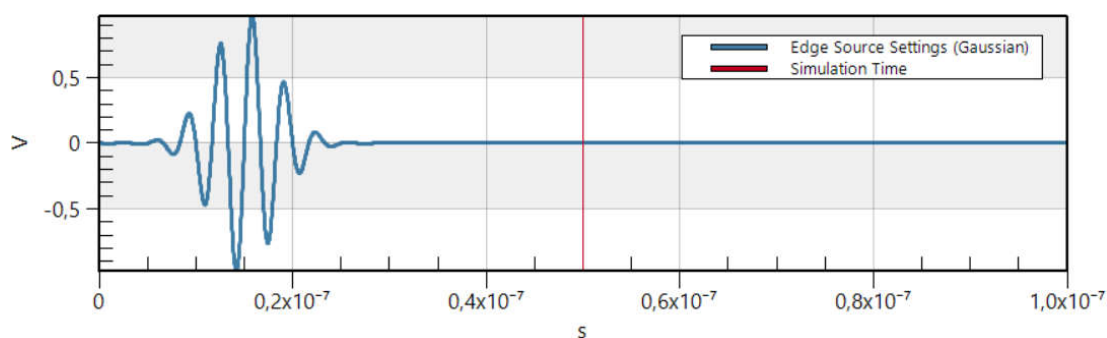


Рис. 2. Временная область исходного сигнала $U(t)$ в программе Sim4Life
Fig. 2. View of the constructed object in the program Sim4Life

Программой автоматически подобраны оптимальные параметры сетки. Таким образом, модель разбита на 172 044 ячеек. Используются граничные условия ABC/UPML, т. е. при достижении границ области симуляции происходит полное затухание электромагнитных волн.

Построены зависимости значений напряжения и тока, возникающие в ткани при воздействии электромагнитного сигнала от времени. Результаты моделирования сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты моделирования в программе Sim4Life
Table 3. Simulation results in Sim4Life

Тип ткани Fabric type	Амплитуда отклика в ткани, В Response amplitude in tissue, V	Максимальное значение тока в ткани, мкА Maximum tissue current, μ A
Мышцы	0,14	42
Жир	0,32	1,7
Кожа	0,16	42

Для проверки математической модели использовался лабораторный макет для измерений электрических характеристик биологической ткани под влиянием импульсного магнитного поля на образцы (рис. 3) [6–8].

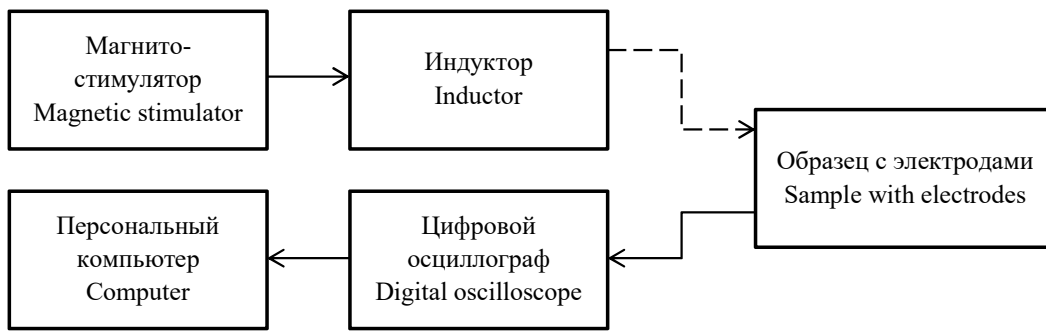


Рис. 3. Структурная комбинированная схема лабораторного макета для измерения влияния импульсного магнитного поля на образцы

Fig. 3. Block diagram of a setup for measuring the influence of a pulsed magnetic field on samples

В состав лабораторного макета для измерения влияния импульсного магнитного поля на образцы входят транскраниальный магнитный стимулятор Нейро-МС/Д с индуктором кольцевым 150 мм ИК-02-150, цифровой осциллограф С8-46 с персональным компьютером и биологический образец с электродами [9].

В ходе исследований были проведены эксперименты с тремя биологическими образцами: жировая ткань [6], кожа [7] и мышечная ткань [8]. На рис. 4 представлена зависимость амплитуды отклика в биологических образцах от мощности выходного сигнала.

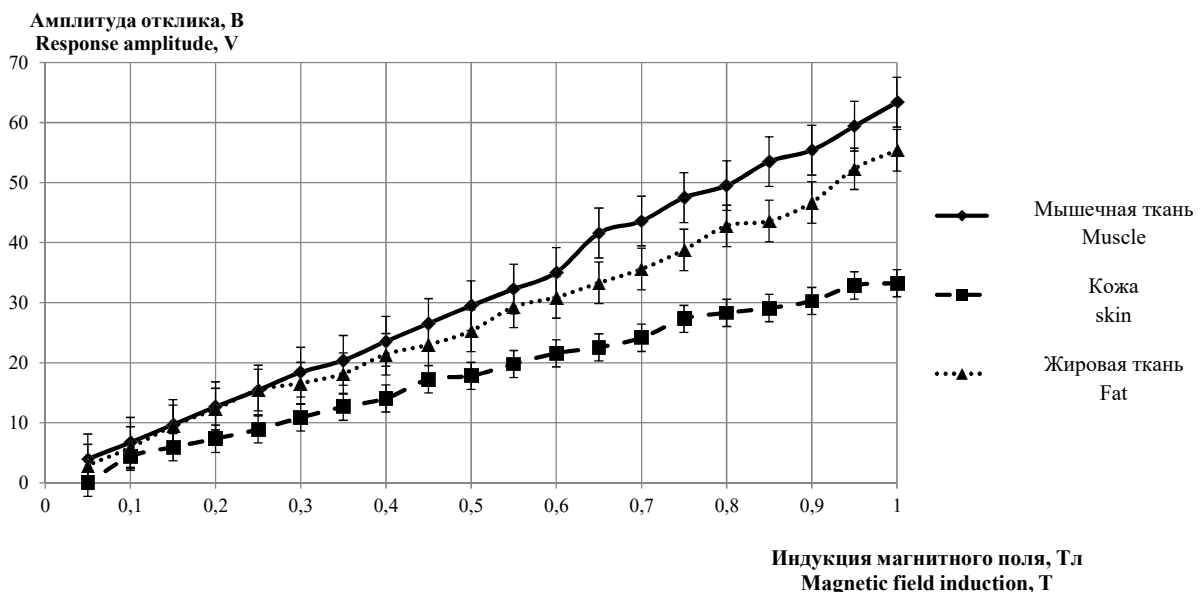


Рис. 4. Зависимость амплитуды отклика в биологическом образце от мощности выходного сигнала

Fig. 4. Dependence of the response amplitude in a biological sample on the output signal power

Математическая модель не позволила задать реальные параметры электромагнитного поля ввиду ограниченности вычислительных мощностей программы Sim4Life и персонального компьютера (время расчета параметров составляет несколько месяцев непрерывной работы).

Результаты и их обсуждение

По расчетам разница значений амплитуды отклика в мышечной ткани и кожи составила примерно 12 %, а при измерении на биологических образцах – 50 %. Расхождение результатов моделирования и реальных измерений объясняется изменением удельных сопротивлений, проводимостей и диэлектрических проницаемостей биологических тканей в зависимости от частоты переменного тока [10].

Полученные результаты позволят использовать предложенный алгоритм работы в комплексе на базе платформы Sim4Life 5.2 и симуляции электромагнитного поля с биологическим объектом, оптимальным для создания и экспертизы технологий и приборов магнитотерапии и индукторов экстракорпорального воздействия магнитного поля.

Заключение

Перед проектированием приборов магнитотерапии необходимо проводить моделирование процесса воздействия физических факторов на человека с учетом диэлектрических свойств всех тканей организма на пути следования излучения и задавать параметры магнитного поля, обладающего реальными биотропными параметрами, а именно: интенсивностью, градиентом, вектором, частотой, формой импульса, экспозицией и локализацией. Программная платформа Sim4Life наиболее оптимальна для выполнения данной задачи. Предложенный алгоритм работы в данной платформе позволяет провести экспертизу технических характеристик и параметров излучаемого электромагнитного поля приборов и его безопасность для организма.

Список литературы

1. Улащик В.С., Молчанова А.Ю., Жаворонок И.П., Мелик-Касумов Т.Б., Счастливая Н.И., Войченко Н.В., Морозова И.Л., Никифорова Л.А., Кистень О.В. *Электромагнитотерапия: новые данные и технологии*. Минск: Беларуская навука; 2018.
2. Cadwell J., Chokroverty S. *Principles of magnetoelectric stimulation in clinical neurophysiology*. Boston; 1990.
3. Hallet M., Chokroverty S. *Magnetic stimulation in clinical neurophysiology*. Ed. Elsevier; 2005.
4. Barker A.T. An introduction to the basic principles of magnetic nerve stimulation. *J. Clin. Neurophysiol.* 1991; Vol. 8.
5. Taflove A., Hagness S.C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Norwood, MA: Artech House; 2005.
6. Камлач П.В., Сидорович А.Ю., Куликов Н.И., Камлач В.И., Бондарик В.М., Чураков А.В., Ланина О.В., Алтавил Н.М. Имитатор электрических характеристик жировой ткани. *Доклады БГУИР*. 2018;7(117).
7. Камлач П.В., Сидорович А.Ю., Куликов Н.И., Камлач В.И., Ревинская И.И. Имитатор кожи в магнитном поле. *Изобретатель*. 2020;1(237).
8. Kamlach P., Sidorovich A., Kulikov M., Kamlach V., Davydova N. Simulator of electrical characteristics of muscle tissue. *Journal of engineering science*. 2020;3(XXVII). DOI: 10.5281
9. Роза М.А., Роза М.О. *Лечебная ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция*. Иваново: Научное издание; 2012.
10. Gabriel C., Gabriel S., Coryhouth E. The Dielectric Properties of Biological Tissues. *Physics in Medicine and Biology*. 1996;Vol. 41(11).

References

1. Ulashchik V.S., Molchanova A.Y., Lark I.P., Melik-Kasumov T.B., Schastnaya N.I., Voichenko N.V., Morozova I.L., Nikiforenkov L.A., Kisten O.V. [*Electromagnetic therapy: new data and technologies*]. Minsk: Belaruskaja Navuka; 2018. (In Russ.)
2. Cadwell J., Chokroverty S. *Principles of magnetoelectric stimulation in clinical neurophysiology*. Boston; 1990.
3. Hallet M., Chokroverty S. *Magnetic stimulation in clinical neurophysiology*. Ed. Elsevier; 2005.
4. Barker A.T. An introduction to the basic principles of magnetic nerve stimulation. *J. Clin. Neurophysiol.* 1991; Vol. 8.
5. Taflove A., Hagness S. C., *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Norwood, MA: Artech House; 2005.
6. Kamlach P.V., Sidorovich A.Y., Kulikov N.I., Kamlach V.I., Bondarik V.M., Churakov A.V., Lanina O.V., Altavil N.M. [A simulator of the electrical characteristics of adipose tissue]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;7(117). (In Russ.)
7. Kamlach P.V., Sidorovich A.Y., Kulikov N.I., Kamlach V.I., Revinskaya I.I. [Skin simulator in a magnetic field]. *Izobretatel*. 2020;1(237). (In Russ.)

8. Kamlach P., Sidorovich A., Kulikov M., Kamlach V., Davydova N. Simulator of electrical characteristics of muscle tissue. *Journal of engineering science*. 2020;3(XXVII). DOI: 10.5281.
9. Roza M.A., Roza M.O. [*Medical rhythmic transcranial magnetic stimulation*]. Ivanovo: Scientific edition; 2012. (In Russ.)
10. Gabriel C. Gabriel S. Corthout E. The Dielectric Properties of Biological Tissues. *Physics in Medicine and Biology*. 1996;Vol. 41(11).

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Камлач П.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гродо Д.С., инженер-электроник Научно-технического центра «ЛЭМТ» БелОМО.

Чураков А.В., к.м.н., доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Камлач В.И., ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондарик В.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мадвейко С.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Клюев А.П., ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-14;
e-mail: kamlachpv@bsuir.by
Камлач Павел Викторович

Information about the authors

Kamlach P.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hroda D.S., Electronics Engineer of the Scientific and technical center "LEMT" BelOMO.

Churakov A.V., PhD, Associate Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kamlach V.I., Assistant of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarik V.M., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Madveika S.I., PhD, Associate Professor, Head of the Electronic Technology and Engineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

A.P. Klyuev, Assistant of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovka str., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-17-293-84-14;
e-mail: kamlachpv@bsuir.by
Kamlach Pavel