Современные инновации, системы и технологии // Modern Innovations, Systems and Technologies

2023; 3(3)
eISSN: 2782-2818
https://www.oajmist.com

УДК: 621.371: 550.837.6
DOI: https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116

EDN: **HAGHOD**

Применение сложных сигналов для определения свойств анизотропных сред над углеводородами

В. Ф. Янушкевич[1], С. В. Калинцев[1], К. В. Шпак[1], О. А. Кизина[1], В. А. Богуш[2]

[1]Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, г. Полоцк, Республика Беларусь
[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье проведено исследование распространения амплитудно-частотно-модулированных сигналов над анизотропными средами, расположенными над залежами нефти и газа. Исследование проведено на основе квазигидродинамического подхода. Проанализировано поведение компонентов тензоров диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса среды над углеводородами. Проведено моделирование характеристик среды над скоплениями углеводородов для амплитудно-частотно-модулированных сигналов от диэлектрической проницаемости, индекса модуляции, коэффициента амплитудной модуляции и проводимости диэлектрического наполнителя вмещающих пород. Для анализа использованы экспериментально полученные параметры среды над залежами углеводородов. Установлены закономерности изменения фазы комбинационной составляющей для электромагнитных волн с правой поляризацией от частоты несущего колебания. Определен диапазон проводимостей среды над углеводородами, который оказывает влияние на мнимую компоненту диэлектрической проницаемости для электромагнитных волн с правой поляризацией. Установлены значения индекса частотной модуляции, при которых фазовая составляющая для электромагнитных волн с правой поляризацией имеет точку перехода через нуль. Даны рекомендации по совершенствованию электромагнитных методов и аппаратуры для их реализации с целью повышения точности определения границ залежей углеводородов на основе сложных сигналов. Показаны способы повышения информативности электромагнитных методов электроразведки. Результаты исследований могут быть применены в системах поисковой геофизики.

Ключевые слова: углеводородная залежь, зондирующий сигнал, амплитудно-модулированный сигнал, электромагнитные методы, амплитудно-частотная модуляция.

Для цитирования: Янушкевич, В. Ф., Калинцев, С. В., Шпак, К. В., Кизина, О. А., & Богуш, В. А. (2023). Применение сложных сигналов для определения свойств анизотропных сред над углеводородами. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 3(3), 0101–0116. https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116

© В. Ф. Янушкевич, С. В. Калинцев, К. В. Шпак, О. А. Кизина, В. А. Богуш, 2023

Application of complex signals for determining the properties of anisotropic media over hydrocarbons

V. F. Yanushkevich[1], S. V. Kalintsev[1], K. V. Shpak[1], O. A. Kizina[1], V. A. Bogush[2]

[1]Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Polotsk, Republic of Belarus
[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article studies the propagation of amplitude-frequency-modulated signals over anisotropic media located above oil and gas deposits based on a quasi-hydrodynamic approach. The behavior of the components of the tensors of the permittivity and surface impedance of the medium over hydrocarbons is analyzed. Modeling of the characteristics of the medium above hydrocarbon accumulations for amplitude-frequency-modulated signals from the dielectric constant, modulation index, amplitude modulation coefficient and conductivity of the dielectric filler of the enclosing rocks has been carried out. For the analysis, experimentally obtained parameters of the medium above hydrocarbon deposits were used. Regularities have been established for the change in the phase of the combination component for electromagnetic waves with right-hand polarization as a function of the frequency of the carrier oscillation. The range of conductivities of the medium over hydrocarbons, which affects the imaginary component of the permittivity for right-handed electromagnetic waves, has been determined. The values of the frequency modulation index are established, at which the phase component for electromagnetic waves with right-hand polarization has a zero-crossing point. Recommendations are given for improving electromagnetic methods and equipment for their implementation in order to increase the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits based on complex signals. The ways of increasing the information content of electromagnetic methods of electrical prospecting are shown. The research results can be applied in the systems of prospecting geophysics.

Keywords: hydrocarbon reservoir, sounding signal, amplitude-modulated signal, electromagnetic methods, amplitude-frequency modulation.

For citation: Yanushkevich, V. F., Kalintsev, S. V., Shpak, K. V., Kizina, O. A., & Bogush, V. A. (2023). Application of complex signals for determining the properties of anisotropic media over hydrocarbons. Modern Innovations, Systems and Technologies, 3(3), 0101–0116. https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в необходимости усовершенствования и разработки новых методов поиска углеводородных залежей (УВЗ).

Целью данной работы является повышение производительности геологоразведочных работ, повышение точности определения границ залегания нефти и газа (углеводородов), модернизация электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и

разработка новых методов поиска, идентификации месторождений, повышение чувствительности и информативности методов поиска и выделения месторождений и скоплений для расширения их возможности использования в сложной геологической обстановке.

Решение задач поиска и идентификации УВЗ осуществляется на основе выявления новых эффектов от воздействия зондирующих сигналов на исследуемую среду [1, 2]. Активное применение различных методов и аппаратурных средств для обнаружения углеводородов и достижение высоких показателей точности и идентификации возможно при поиске, оконтуривании залежей нефти и газа с достаточно хорошими характеристиками на основе набора многочисленных опытных данных [3]. Это позволяет использовать высокоэффективные технологии поиска полезных ископаемых при освоении площадей с наличием углеводородных ресурсов на основе дифференциации анизотропных сред [4]. Установлено, что влияние на электрохимические и электрофизические процессы в среде над залежью высоких температур и пластового давления приводит к образованию на границе с воздушным пространством промежуточной области с избытком свободных электронов, оказывающих воздействие на электродинамический отклик анизотропной среды [5].

Соответственно данные проявления откликов подстилающей поверхности над месторождениями нефти и газа приводят к улучшению точности выделения границ и уровня идентификации месторождений углеводородов с применением квазигидродинамического подхода [6].

Активное внедрение технических средств для повышения точности и производительности выделения углеводородов возможно на основе вопросов аналитического описания параметров среды над углеводородами в различных режимах зондирования, разработки и экспериментального исследования устройств для повышения уровня достоверности разведки, поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа [7]. Различные режимы зондирования повышают информативность поиска [8]. Применение для поиска УВЗ метода становления поля с технологиями 3D-электроразведки [9] приводит к расширению функциональных зависимостей диэлектрической проницаемости среды над углеводородами от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

Реализация различных модифицированных способов и средств для реализации вертикального зондирования при поиске углеводородов определяет выбор методов

ЭММ с построением соответствующих электродинамических моделей сред, образующихся над скоплениями нефти и газа [10]. Определение залежей основано на изучении электрохимических и электрофизических процессов, происходящих в выше расположенной анизотропной среде с помощью применения комбинированных способов электроразведки [11]. Активное внедрение методов исследования свойств поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ и аппаратурных средств для обнаружения углеводородов основано на решении данных задач с высокой точностью обнаружения и с применением сложных сигналов [12, 13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для данной работы послужили экспериментально полученные параметры среды над залежами углеводородов и выражения для компонентов тензоров диэлектрической проницаемости среды над углеводородами.

Методология проведения исследований включает проведение компьютерного моделирования. Для моделирования использовался математический пакет MathCAD14 и выводимые ниже соотношения.

Взаимодействие сложных электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами

Исследование процесса взаимодействия сложных ЭМВ на анизотропную среду над УВЗ представляет теоретический и практический интерес, определяемый поиском инновационных подходов при реализации новых и модернизации действующих ЭММ.

При амплитудно-частотной модуляции (АЧМ) радиосигнал имеет вид:

$$e(t) = E_{\omega}(1 + k_m \cos\Omega t)\cos\left[\omega t + \beta \cdot \cos\Omega t\right], \quad (1)$$

где E_{ω} – амплитуда сигнала несущей частоты ω; k_m, β – соответственно коэффициент амплитудной модуляции и индекс частотной модуляции, Ω – модулирующая частота.

Составляющие тензора для режима смешанной модуляции имеют вид [7]:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_r(1-k_m^2\sin\Omega\cdot t)+\sum\limits_{i=1}^{2}\left\{\begin{array}{l}\dfrac{\omega_{\Pi i}^2\tilde{\omega}_4}{\omega}\dfrac{\omega_{\Gamma i}^2-\tilde{\omega}_4^2-\nu_i^{\,2}}{(\nu_i^{\,2}+\omega_{\Gamma i}^2-\tilde{\omega}_4^2)^2+4\tilde{\omega}_4^2\nu_i^{\,2}}+j\left[\dfrac{\varepsilon_r\beta\cdot k_m\sin\Omega\cdot t}{1+\beta\cdot\cos\Omega\cdot t}-\right.\\ \left.-\dfrac{\sigma_r}{\omega\varepsilon_0}-\dfrac{\omega_{\Pi i}^2\nu_i}{\omega}\dfrac{\tilde{\omega}_4^2+\nu_i^{\,2}+\omega_{\Gamma i}^2}{(\nu_i^{\,2}+\omega_{\Gamma i}^2-\tilde{\omega}_4^2)^2+4\tilde{\omega}_4^2\nu_i^{\,2}}\right]\end{array}\right\},\\ \dot{\varepsilon}_2 = \sum\limits_{i=1}^{2}\left\{\dfrac{\omega_{\Pi i}^2\omega_{\Gamma i}}{\omega}\dfrac{\omega_{\Gamma i}^2-\tilde{\omega}_4^2+\nu_i^{\,2}}{(\nu_i^{\,2}+\omega_{\Gamma i}^2-\tilde{\omega}_4^2)^2+4\tilde{\omega}_4^2\nu_i^{\,2}}-\dfrac{2j\tilde{\omega}_4\nu_i\omega_{\Pi i}^2\omega_{\Gamma i}}{\omega\,[(\nu_i^2+\omega_{\Gamma i}^2-\tilde{\omega}_4^2)^2+4\tilde{\omega}_4^2\nu_i^2]}\right\},\\ \dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_r(1-k_m^2\sin\Omega\cdot t)+\sum\limits_{i=1}^{2}\left\{\dfrac{\omega_{\Pi i}^2\tilde{\omega}_4}{\omega}\dfrac{1}{\nu_i^{\,2}+\tilde{\omega}_4^2}+j\left[\dfrac{\varepsilon_r\beta\cdot k_m\sin\Omega\cdot t}{1+\beta\cdot\cos\Omega\cdot t}-\dfrac{\sigma_r}{\omega\varepsilon_0}-\dfrac{\omega_{\Pi i}^2\nu_i}{\omega}\dfrac{1}{\tilde{\omega}_4^2+\nu_i^{\,2}}\right]\right\}. \end{cases} \quad (2)$$

В выражениях (2) фигурируют компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ $\dot{\varepsilon}_1$, $\dot{\varepsilon}_2$, $\dot{\varepsilon}_3$; плазменная частота $\omega_{\Pi i}$; гиротропная частота $\omega_{\Gamma i}$; частота столкновения частиц ν_i; относительная диэлектрическая проницаемость среды ε_r; проводимость среды σ_r; диэлектрическая постоянная ε_0.

При этом:

$$\tilde{\omega}_4 = \omega\left[1-k_m^2\sin\Omega t\right]. \quad (3)$$

Методика исследований заключается в определении компонентов комбинационных составляющих тензоров диэлектрической проницаемости среды над углеводородами

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R &= \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1+\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = \mathrm{Re}\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R + j\,\mathrm{Im}\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_R \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_L &= \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1-\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = \mathrm{Re}\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_L + j\,\mathrm{Im}\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_L. \end{aligned} \quad (4)$$

и поверхностного импеданса среды над УВЗ

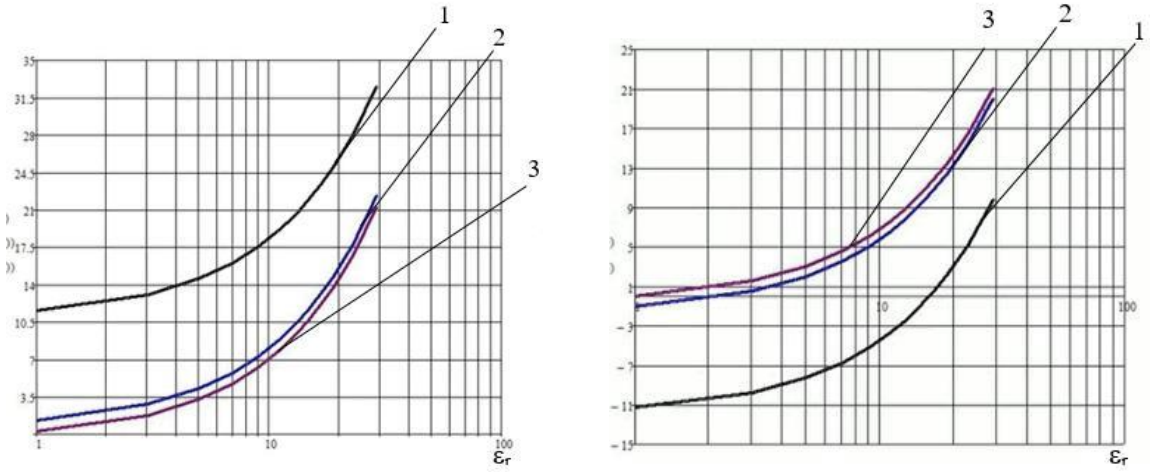
$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\varepsilon}_R\dot{\varepsilon}_L}}\left(\sqrt{\dot{\varepsilon}_R}-\sqrt{\dot{\varepsilon}_L}\right) \quad (5)$$

Для параметров среды над залежами углеводородов [5]: значения диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\varepsilon_r = 1-30$ и электрической проводимости $\sigma_r = 1\cdot10^{-5} - 1$ См/м; концентрации частиц $N_e = N_и = (10^{16} - 10^{18})$м$^{-3}$, частота столкновения частиц $\nu = 0.6\cdot\pi\cdot10^9 - 3\cdot\pi\cdot10^9$ рад / с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ выражений (4) для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ.

Вещественные значения для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями приведены соответственно на рисунках 1(а – действительная часть суммарной компоненты для ЭМВ с правой поляризацией, б – действительная часть суммарной компоненты для ЭМВ с левой поляризацией,).



а) б)

Рисунок 1. Зависимости вещественных составляющих компонент ЭМВ от диэлектрической проницаемости: а) действительная часть суммарной компоненты; б) действительная часть разностной компоненты:

1 - $\mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})), \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{L}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 5, \mathrm{km}=0.5, \mathrm{f} = 10^5\ Гц$;

2 - $\mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})), \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{L1}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^6\ Гц$;

3 - $\mathrm{Re}\left(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})\right),\ \mathrm{Re}\left(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{L2}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})\right) - для \beta = 5,\ \mathrm{km} = 0.5,\ \mathrm{f} = 10^7\ Гц$

Figure 1. Dependences of the real components of the EMW component on the permittivity: a) the real part of the total component; b) the real part of the difference component:

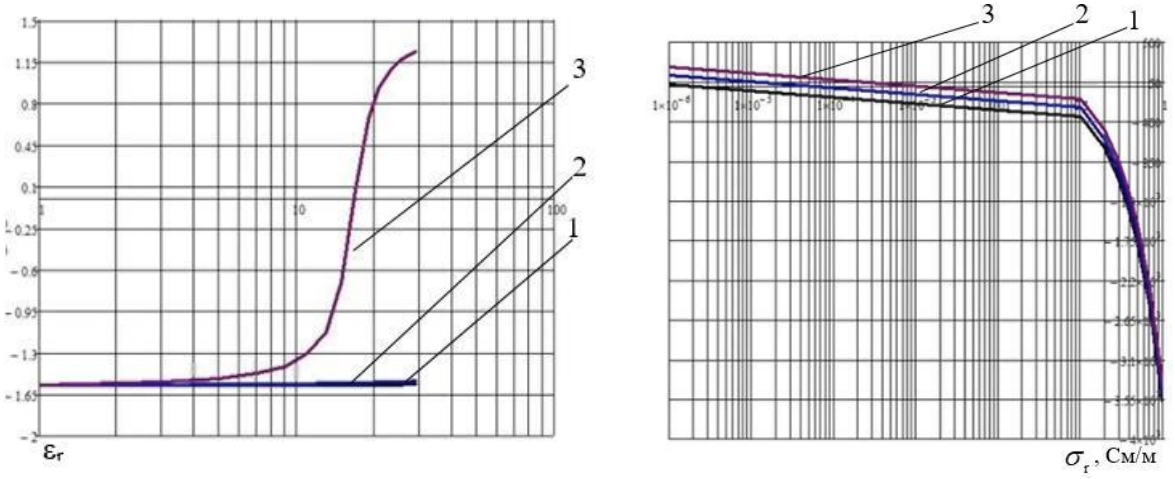
$$1 - \ \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})), \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{L}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})) - \ for\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^5\, Hz$$

$$2 - \ \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})), \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{L1}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})) - \ for\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^6\, Hz;$$

$$3 - \ \mathrm{Re}\left(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})\right),\ \mathrm{Re}\left(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{L2}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})\right) - \ for\ \beta = 5,\ \mathrm{km} = 0.5,\ \mathrm{f} = 10^7\, Hz$$

Как видно из рисунка, вещественные составляющие для обеих поляризаций увеличиваются с ростом диэлектрической проницаемости. Закономерности изменения характеристик примерно одинаковы. С увеличением частоты несущего колебания вещественная составляющая для правой поляризации ЭМВ уменьшается, а для левой – увеличивается.

Зависимости фазовых и мнимых составляющих тензора диэлектрической проницаемости приведены на рисунке 2 (а – фазовая часть суммарной компоненты, б – мнимая часть суммарной компоненты).



а) б)

Рисунок 2. Зависимости фазовых и мнимых составляющих компонент ЭМВ: а) фазовая часть суммарной компоненты; б) мнимая часть суммарной компоненты:

$$1 - \ \arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^5\, Гц; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\sigma_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 10, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^7\, Гц, \varepsilon_r = 10;$$

$$2 - \ \arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^6\, Гц; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\sigma_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 10, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^7\, Гц; \varepsilon_r = 20,$$

$$3 - \ \arg\left(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\varepsilon_{\mathrm{r}})\right) - для \beta = 5,\ \mathrm{km} = 0.5,\ \mathrm{f} = 10^7\, Гц; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\sigma_{\mathrm{r}})) - для\ \beta = 10, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^7\, Гц; \varepsilon_r = 30$$

Figure 2. Dependences of the phase and imaginary components of the EMW components: a) the phase part of the total component; b) the imaginary part of the total component:

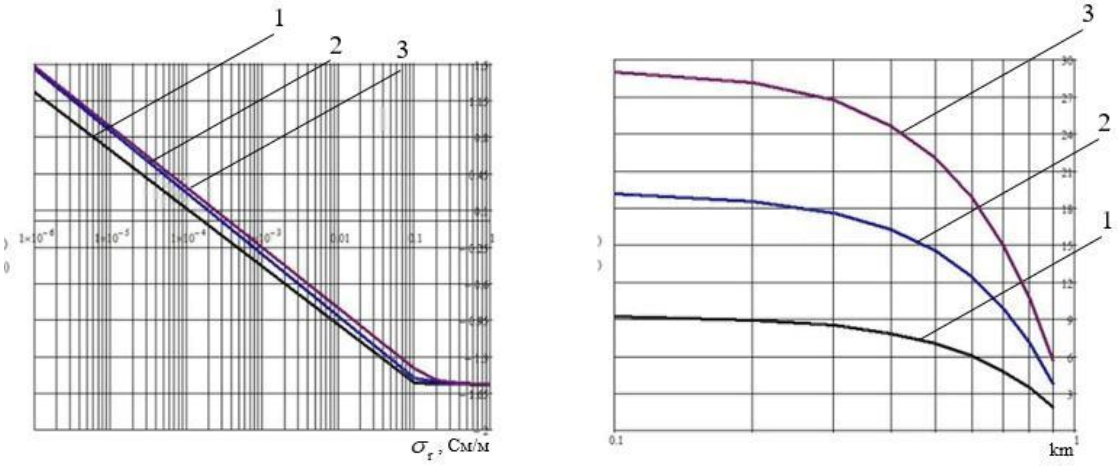
1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{R}(\varepsilon_{r}))$ – *for* $\beta = 5, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{5}\,Hz; \text{Im}(\dot{\varepsilon}_{R}(\sigma_{r}))$ – *for* $\beta = 10, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{7}\,Hz, \varepsilon_{r} = 10;$

2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{R1}(\varepsilon_{r}))$ – *for* $\beta = 5, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{6}\,Hz; \text{Im}(\dot{\varepsilon}_{R1}(\sigma_{r}))$ – *for* $\beta = 10, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{7}\,Hz; \varepsilon_{r} = 20,$

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{R2}(\varepsilon_{r}))$ – *for* $\beta = 5,\ \text{km} = 0.5,\ \text{f} = 10^{7}\,Hz; \text{Im}(\dot{\varepsilon}_{R2}(\sigma_{r}))$ – *for* $\beta = 10, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{7}\,Hz; \varepsilon_{r} = 30$

Закон изменения фазовых составляющих при низких частотах несущего колебания равномерен. С ростом частоты фаза резко увеличивается с переходом через нуль на отрезке диэлектрических проницаемостей 10 – 20. Мнимая компонента резко уменьшается при проводимостях среды над УВЗ 0.01 – 1 См / м. При высоких значениях частоты несущего колебания характеристики идут выше.

Проведено моделирование зависимостей фазовых и вещественных составляющих компонент ЭМВ от проводимости и коэффициента амплитудной модуляции, представленное на рисунке 3 (а – фазовая часть суммарной компоненты; б) вещественная часть суммарной компоненты).



а) б)

Рисунок 3. Зависимости фазовых и вещественных составляющих компонент ЭМВ:
а) фазовая часть суммарной компоненты;
б) вещественная часть суммарной компоненты:

1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{R}(\sigma_{r}))$ – *для* $\beta = 10, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{7}\,Гц; \text{Re}(\dot{\varepsilon}_{R}(\text{km}))$ – *для* $\beta = 1, \varepsilon_{r} = 10, \text{f} = 10^{7}\,Гц;$

2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{R1}(\sigma_{r}))$ – *для* $\beta = 5, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{6}\,Гц; \text{Re}(\dot{\varepsilon}_{R1}(\text{km}))$ – *для* $\beta = 1, \varepsilon_{r} = 20, \text{f} = 10^{7}\,Гц;$

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{R2}(\sigma_{r}))$ – *для* $\beta = 5, \text{km} = 0.5, \text{f} = 10^{7}\,Гц; \text{Re}(\dot{\varepsilon}_{R2}(\text{km}))$ – *для* $\beta = 1, \varepsilon_{r} = 30, \text{f} = 10^{7}\,Гц$

Figure 3. Dependences of the phase and real components of the EMW components:
a) the phase part of the total component; b) the real part of the total component:

1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\sigma_{\mathrm{r}}))$ – $for\ \beta = 10, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^7\ Hz; \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\mathrm{km}))$ – $for \beta = 1, \varepsilon_r = 10, \mathrm{f} = 10^7\ Hz;$

2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\sigma_{\mathrm{r}}))$ – $for\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^6\ Hz; \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\mathrm{km}))$ – $for \beta = 1, \varepsilon_r = 20, \mathrm{f} = 10^7\ Hz;$

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\sigma_{\mathrm{r}}))$ – $for\ \beta = 5, \mathrm{km} = 0.5, \mathrm{f} = 10^7\ Hz; \mathrm{Re}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\mathrm{km}))$ – $for\ \beta = 1, \varepsilon_r = 30, \mathrm{f} = 10^7\ Hz$

Установлено, что на фазовые характеристики оказывают наибольшее влияние все значения проводимостей среды над УВЗ, за исключением отрезка 0.01 – 1 См / м, где фаза стабильна. Вещественные значения данной составляющей тензора диэлектрической проницаемости уменьшаются с ростом коэффициента амплитудной модуляции.

Проведено моделирование зависимостей фазовых и мнимых составляющих компонент ЭМВ для правой поляризации от коэффициента амплитудной модуляции и индекса частотной модуляции, представленное на рисунке 4 (а – фазовая часть суммарной компоненты; б) мнимая часть суммарной компоненты).

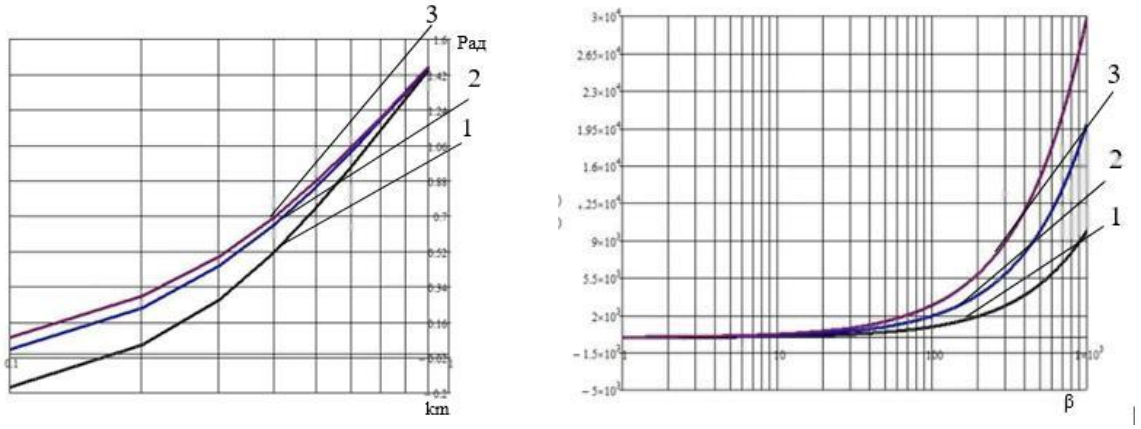
На фазу составляющей ЭМВ с правой поляризацией оказывает изменения весь диапазон коэффициентов амплитудной модуляции.

При низких значениях диэлектрической проницаемости вмещающих пород существует точка перехода через нуль, свидетельствующая об изменении характера проводимости.

На мнимую составляющую для правой поляризации индекс частотной модуляции оказывает следующее влияние в диапазоне (10 – 100 – несущественно), (100 – 1000 – заметное влияние).

Информативность может быть дополнительно повышена за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.

Фазовые характеристики для компонентов диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой круговой поляризацией в зависимости от индекса частотной модуляции приведены на рисунке 5 (а – фазовая часть суммарной компоненты для f = 10^7 Гц, б – фазовая часть суммарной компоненты для f = 10^9 Гц).



а) б)

Рисунок 4. Зависимости фазовых и мнимых составляющих компонент ЭМВ:
а) фазовая часть суммарной компоненты; б) мнимая часть суммарной компоненты:

1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\mathrm{km})) - для\ \beta = 1, \varepsilon_r = 10, \mathrm{f} = 10^7\ Гц; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\beta)) - для\ \mathrm{km} = 0.5, \varepsilon_r = 10, \mathrm{f} = 10^7\ Гц;$

2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\mathrm{km})) - для\ \beta = 1, \varepsilon_r = 20, \mathrm{f} = 10^7\ Гц; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\beta)) - для\ \mathrm{km} = 0.5, \varepsilon_r = 20, \mathrm{f} = 10^7\ Гц;$

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\mathrm{km})) - для\ \beta = 1, \varepsilon_r = 30, \mathrm{f} = 10^7\ Гц; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\beta)) - для\ \mathrm{km} = 0.5, \varepsilon_r = 30, \mathrm{f} = 10^7\ Гц$

Figure 4. Dependences of the phase and imaginary components of the EMW components:
a) the phase part of the total component; b) the imaginary part of the total component:

1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\mathrm{km})) - for\ \beta = 1, \varepsilon_r = 10, \mathrm{f} = 10^7\ Hz; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(\beta)) - for\ \mathrm{km} = 0.5, \varepsilon_r = 10, \mathrm{f} = 10^7\ Hz;$

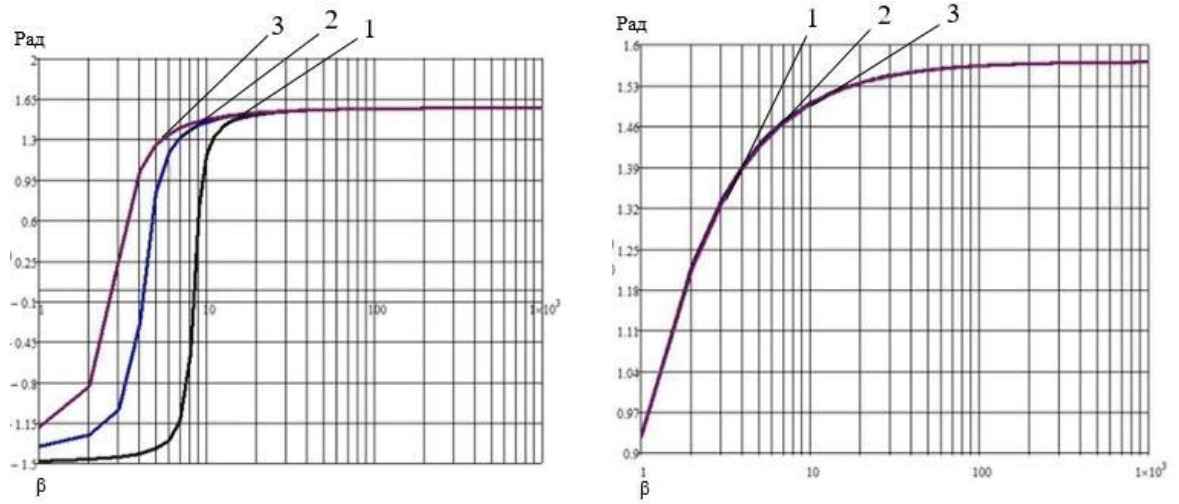
2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\mathrm{km})) - for\ \beta = 1, \varepsilon_r = 20, \mathrm{f} = 10^7\ Hz; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R1}}(\beta)) - for\ \mathrm{km} = 0.5, \varepsilon_r = 20, \mathrm{f} = 10^7\ Hz;$

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\mathrm{km})) - for\ \beta = 1, \varepsilon_r = 30, \mathrm{f} = 10^7\ Hz; \mathrm{Im}(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{R2}}(\beta)) - for\ \mathrm{km} = 0.5, \varepsilon_r = 30, \mathrm{f} = 10^7\ Hz.$

Как видно из рисунка, фазовая составляющая для ЭМВ с правой поляризацией имеет точку перехода через нуль при значениях индекса частотной модуляции 1 – 10. На отрезке 20 – 1000 фазовые характеристики сливаются в одну линию.

Проведено моделирование зависимостей абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса от диэлектрической проницаемости среды, представленных на рисунке 6 (а – абсолютная часть поверхностного импеданса; б – фазовая часть поверхностного импеданса).

Модуль поверхностного импеданса подвержен изменениям при низких частотах несущего колебания. Так при f = 10^7 Гц наблюдается максимум данной зависимости для диэлектрической проницаемости ε_r = 9.



а) б)

Рисунок 5. Зависимости фазовых составляющих компонент ЭМВ:
а) фазовая часть суммарной компоненты для f = 10^7 Гц; б) фазовая часть суммарной компоненты для f = 10^9 Гц.

1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\text{R}}(\beta))$ – *для* km=0.5, $\varepsilon_r = 10$; 2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\text{R1}}(\beta))$ – *для* km = 0.5, $\varepsilon_r = 20$;

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\text{R2}}(\beta))$ – *для* km = 0.5, $\varepsilon_r = 30$.

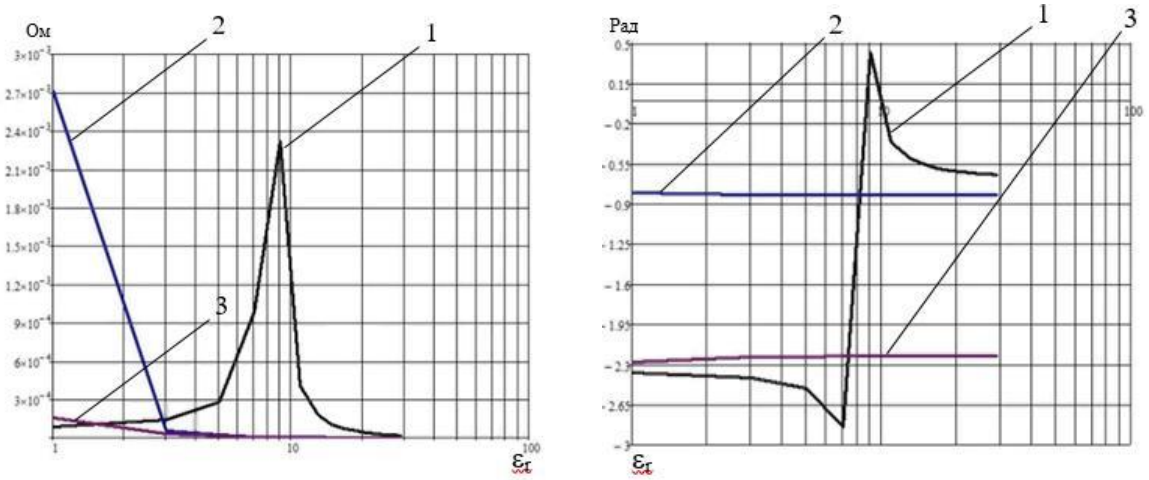
Figure 5. Dependences of the phase components of the EMW components:
a) the phase part of the total component for f = 10^7 Hz; b) phase part of the total component for f = 10^9 Hz

1 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\text{R}}(\beta))$ – *for* km=0.5, $\varepsilon_r = 10$; 2 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\text{R1}}(\beta))$ – *for* km = 0.5, $\varepsilon_r = 20$;

3 - $\arg(\dot{\varepsilon}_{\text{R2}}(\beta))$ – *for* km = 0.5, $\varepsilon_r = 30$.

Аналогично, для фазовой характеристики проявляется влияние более низких частот. На отрезке диэлектрических проницаемостей 7 – 10 фаза резко изменяется от отрицательных до положительных значений.

Информативность ЭММ поиска углеводородов может быть повышена за счет получения дополнительных данных по исследуемому геологическому профилю местности в зависимости от расстояния между приемником и передатчиком.



а) б)

Рисунок 6. Зависимости абсолютной и фазовой составляющей компонент поверхностного импеданса:

а) абсолютная часть поверхностного импеданса; б) фазовая часть поверхностного импеданса;

1 - $|\dot{Z}_{11}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{11}(\varepsilon_r)) - для\ k_m = 0.5, \beta = 10, f = 10^7\ Гц$;

2 - $|\dot{Z}_{12}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{12}(\varepsilon_r)) - для\ k_m = 0.5, \beta = 10, f = 10^8\ Гц$;

3 - $|\dot{Z}_{13}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{13}(\varepsilon_r)) - для\ k_m = 0.5, \beta = 10, f = 10^9\ Гц$.

Figure 6. Dependences of the absolute and phase components of the surface impedance components:

a) the absolute part of the surface impedance; b) phase part of the surface impedance;

1 - $|\dot{Z}_{11}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{11}(\varepsilon_r)) - for\ k_m = 0.5, \beta = 10, f = 10^7\ Hz$;

2 - $|\dot{Z}_{12}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{12}(\varepsilon_r)) - for\ k_m = 0.5, \beta = 10, f = 10^8\ Hz$;

3 - $|\dot{Z}_{13}(\varepsilon_r)|, \arg(\dot{Z}_{13}(\varepsilon_r)) - for\ k_m = 0.5, \beta = 10, f = 10^9\ Hz$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ распространения ЭМВ в среде над углеводородами в режиме амплитудно-частотно-модулированных сигналов показал, что:

- с ростом частоты несущего колебания фаза комбинационной составляющей для ЭМВ с правой поляризацией резко увеличивается с переходом через нуль на отрезке диэлектрических проницаемостей 10 – 20;

- мнимая компонента для ЭМВ с правой поляризацией изменяется при проводимостях среды над УВЗ 0.01 – 1 См / м;
- на мнимую составляющую для правой поляризации индекс частотной модуляции оказывает влияние в диапазоне 10 – 100;
- фазовая составляющая для ЭМВ с правой поляризацией имеет точку перехода через нуль при значениях индекса частотной модуляции 1 – 10;
- для выделения границ и идентификации УВЗ можно рекомендовать измерения поверхностного импеданса на частотах, где наблюдается максимум данной зависимости от диэлектрической проницаемости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Каратаев Г.И. Геофизические методы исследований. Минск: БГУ; 2008. 147.

[2] Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ; 2004. 153.

[3] Констебл С. Десять лет морской CSEM для разведки углеводородов Геофизика. 2010; 75(5). https://doi.org/10.1190/1.3483451

[4] Губин В.Н. Космическое зондирование нефтеносных структур в Припятской нефтегазоносной области. Земля Беларуси. 2013; 1: 40-44.

[5] Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, 1991, May 20-22. 1991; 1: 240-244.

[6] Гололобов Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. Минск: Бестпринт; 2009. 185.

[7] Янушкевич В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. Новополоцк: ПГУ; 2017. 232.

[8] Holten T., Luo X., Naevdal G., Helwig S.L. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles. SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016; 35: 971-975. https://doi.org/10.1190/segam2016-13858739.1

[9] Anderson C., Mattsson J. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. First Break. 2010; 28(5): 71-75. https://doi.org/10.3997/1365-2397.28.5.38986

[10] Helwig S.L., Wood W., Gloux B. Vertical–vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. Geophysical Prospecting. 2019. 67(6): 1582-1594. https://doi.org/10.1111/1365-2478.12771

[11] Henke C. H., Krieger M., Strack K., Zerilli A. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic. Interpretatio. 2020; 8(4): 15-24. https://doi.org/10.1190/INT-2020-0026.1

[12] Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф., Калинцев С.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала. Доклады БГУИР. 2010; 6(52): 13-17.

[13] Степуленок С.В., Янушкевич В.Ф. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами. Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. 2009; 9: 103-108.

REFERENCES

[1] Karataev G.I. Geofizicheskie metody issledovanij. Minsk: BGU; 2008. 147. (in Russian)

[2] Vladov M.L., Starovojtov A.V. Vvedenie v georadiolokaciyu. M.: Izd-vo MGU; 2004. 153. (in Russian)

[3] Konstebl S. Desyat' let morskoj CSEM dlya razvedki uglevodorodov Geofizika. 2010; 75(5). https://doi.org/10.1190/1.3483451

[4] Gubin V.N. Kosmicheskoe zondirovanie neftenosnyh struktur v Pripyatskoj neftegazonosnoj oblasti. Zemlya Belarusi. 2013; 1: 40-44. (in Russian)

[5] Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, 1991, May 20-22. 1991; 1: 240-244.

[6] Gololobov D.V. Vzaimodejstvie elektromagnitnyh voln i uglevodorodnyh zalezhej. Minsk: Bestprint; 2009. 185. (in Russian)

[7] Yanushkevich V.F. Elektromagnitnye metody poiska i identifikacii uglevodorodnyh zalezhej. Novopolock: PGU; 2017. 232. (in Russian)

[8] Holten T., Luo X., Naevdal G., Helwig S.L. Time lapse CSEM reservoir monitoring of the Norne field with vertical dipoles. SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016; 35: 971-975. https://doi.org/10.1190/segam2016-13858739.1

[9] Anderson C., Mattsson J. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. First Break. 2010; 28(5): 71-75. https://doi.org/10.3997/1365-

2397.28.5.38986

[10] Helwig S.L., Wood W., Gloux B. Vertical–vertical controlled-source electromagnetic instrumentation and acquisition. Geophysical Prospecting. 2019. 67(6): 1582-1594. https://doi.org/10.1111/1365-2478.12771

[11] Henke C. H., Krieger M., Strack K., Zerilli A. Subsalt imaging in Northern Germany using multi-physics (magnetotellurics, gravity, and seismic. Interpretatio. 2020; 8(4): 15-24. https://doi.org/10.1190/INT-2020-0026.1

[12] Gololobov D.V., Yanushkevich V.F., Kalincev S.V. Impedansnye granichnye usloviya anizotropnoj sredy dlya amplitudno-modulirovannogo signala. Doklady BGUIR. 2010; 6(52): 13-17. (in Russian)

[13] Stepulenok S.V., Yanushkevich V.F. Vzaimodejstvie amplitudno-chastotno-modulirovannyh signalov so sredoj nad uglevodorodnymi zalezhami. Vestnik PGU. Seriya S. Fundamental'nye nauki. Fizika. 2009; 9: 103-108. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Янушкевич Виктор Францевич, к.т.н., доцент кафедры энергетики и электроники Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь
e-mail: v.yanushkevich@psu.by
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-8817

Victor F. Yanushkevich, Ph.D in Engineering, Associate Professor, Department of Power Engineering and Electronics, Euphrosyne Polotskaya state university of polotsk, Novopolotsk, Belarus
e-mail: v.yanushkevich@psu.by
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-8817

Калинцев Сергей Викторович, старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Полоцк, Беларусь
e-mail: s.kalintsev@psu.by
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8414-2468

Sergey V. Kalintsev, senior teacher of department of computing systems and networks, Euphrosyne Polotskaya state university of polotsk, Polotsk, Belarus
e-mail: s.kalintsev@psu.by
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8414-2468

Шпак Константин Вацлавович, ассистент кафедры энергетики и электроники Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь
e-mail: k.shpak@psu.by

Konstantin V. Shpak, assistant of the Department of Power Engineering and Electronics, Euphrosyne Polotskaya state university of polotsk, Novopolotsk, Belarus
e-mail: k.shpak@psu.by

Кизина Оксана Анатольевна, ассистент кафедры энергетики и электроники Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь

Oksana A. Kizina, assistant of the Department of Power Engineering and Electronics, Euphrosyne Polotskaya state university of polotsk, Novopolotsk, Belarus
e-mail: o.kizina@psu.by

e-mail: o.kizina@psu.by

Богуш Вадим Анатольевич, д.ф-м.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь
e-mail: bogush@bsuir.by
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7516-4841

Vadim A. Bogush, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Rector of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
e-mail: bogush@bsuir.by
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7516-4841

Статья поступила в редакцию 29.06.2023; одобрена после рецензирования 06.07.2023; принята к публикации 10.07.2023.

The article was submitted 29.06.2023; approved after reviewing 06.07.2023; accepted for publication 10.07.2023.