

Особенности распространения радиоимпульсных сигналов в анизотропной среде над углеводородными залежами

В.Ф. Янушкевич

Полоцкий государственный университет
211440, Республика Беларусь, Витебская обл., г. Новополоцк
ул. Блохина, 29

В статье приводится анализ взаимодействия электромагнитных волн в режиме радиоимпульсных сигналов с анизотропной средой над углеводородными залежами. Выведены амплитудные и фазовые характеристики комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями и проведен их анализ на основе квазигидродинамического подхода с использованием многочастичных электронно-ионных токов. Показано, что результаты исследований могут быть использованы для идентификации среды над залежами по характеру и величине суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя.

Ключевые слова: радиоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь.

Введение

Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в усовершенствовании существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов) на основе анализа электрофизических и электрохимических процессов в анизотропных средах (АС) над залежами углеводородов и отклика данных процессов на воздействие зондирующего сигнала. Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ полученные решения при изучении плазмы и плазмоподобных сред на основе квазигидродинамического подхода с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений [1].

Результаты анализа взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах. В статье [2] выведен тензор диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме гармонических сигналов. Обнаружение углеводородов осуществляется по изменению поверхностного импеданса среды над залежами [3]. В работе [4] показано, что система уравнений классической электродинамики при анализе рас-

пространения плоской гармонической электромагнитной волны в устройствах радиоэлектроники с однородной анизотропной проводящей рабочей средой должна быть «полной», возможность исключения из рассмотрения дивергентных уравнений является частным случаем и в каждой конкретной ситуации должна быть обоснована. Особенности расчета элементов тензора для частного случая – использования силице-на – показывает, что для каждого конкретного применения вида анизотропной среды возможны свои оригинальные решения [5]. Для обнаружения углеводородов применяются методы электрорезонансного зондирования [6]. В работе [7] проведен анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ с учетом влияния всех ниже расположенных слоев на верхний слой. Результаты исследования затухания радиоимпульсных сигналов в среде над залежью приведены в работе [8]. Способ поиска УВЗ [9] позволяет обнаруживать месторождения нефти и газа по измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м. Исследование процессов распространения ЭМВ вблизи точки перехода диэлектрической проницаемости через нуль связано с аномальным поведением напряженности электрического поля, различными резонансными эффектами и может быть применено для поиска и идентификации УВЗ [10].

Целью настоящей работы является качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации УВЗ при использовании радиоимпульсных сигналов на основе анализа амплитудных и фазовых характеристик комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, идентификации среды над залежами по характеру и величине суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя. Новизна исследований, приведенных в данной статье заключается в том, что полученные результаты способствуют определению анизотропных сред по определению отличий сигналов двухканальной схемы на основе полученных величин отраженных сигналов.

1. Взаимодействие АС с УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов

Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме импульсного сигнала вида:

$$E(f) = \frac{E\tau_u}{2} \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0)\tau_u}{2}}{(\omega - \omega_0)\tau_u} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0)\tau_u}{2}}{(\omega + \omega_0)\tau_u}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – частота; ω_0 – несущая частота; τ_u – длительность радиоимпульса. Положим амплитуду радиоимпульса $\frac{E\tau_u}{2} = 1$.

Выведем тензор диэлектрической проницаемости АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов, представляющий собой матрицу [11]:

$$\dot{\hat{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{11} & \dot{\epsilon}_{12} & \dot{\epsilon}_{13} \\ \dot{\epsilon}_{21} & \dot{\epsilon}_{22} & \dot{\epsilon}_{23} \\ \dot{\epsilon}_{31} & \dot{\epsilon}_{32} & \dot{\epsilon}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе распространения радиоволн можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами ϵ_0 , μ_0 , δ_0 на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. В рамках квазигидродинамического приближения уравнение движения электрона имеет вид:

$$m \frac{d\dot{\mathfrak{g}}}{dt} + v m \dot{\mathfrak{g}} = q \dot{E} + q \mu_0 \left[\dot{\mathfrak{g}}, \dot{H}_0 \right], \quad (3)$$

где m , q , $\dot{\mathfrak{g}}$ – масса, заряд и скорость движения частиц; v – частота столкновений электрона с тяжелыми частицами; μ_0 – магнитная проница-

емость вакуума; \dot{E} – напряженность электрического поля ЭМВ; \dot{H}_0 – напряженность магнитного поля Земли. Заряд электрона равен элементарному заряду $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Найдем плотность полного тока в немагнитной анизотропной среде (μ_r – магнитная проницаемость исследуемой среды не отличается от μ_0)

$$\dot{j}_{\Sigma} = \dot{j}_{CM} + \dot{j}_{ПР} = i\omega\epsilon_0\epsilon_r\dot{E} + \sum_{i=1}^N q_i N_i \dot{\mathfrak{g}}_i, \quad (4)$$

которая определяется токами в диэлектрическом наполнителе среды с проницаемостью ϵ_r ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹ – диэлектрическая проницаемость вакуума) и включает ток проводимости $\delta_{ПР}$ с известной концентрацией электронов N_e .

Расчет компонент тензоров диэлектрической проницаемости осуществлен на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [2]: удельная электрическая проводимость $\delta_r = 10^{-5}$ См/м; концентрация частиц $N_e = N_u = 10^{16}$ м⁻³; частота столкновения частиц $v = 2\pi \cdot 10^9$ рад/с. Значение n выбрано равным 5. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 27.

Учитывая, что w_{ni} – плазменная частота, δ_r – удельная проводимость среды,

$$F = \frac{\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi n F_1 \tau)}{\pi n F_1 \tau},$$

T , F_1 , n – период, частота импульса и номер гармоники, $\Omega_1 = 2\pi F_1$, $i = 1$ для электронов, $i = 2$ для ионов, $w_{\Gamma i}$ – гиротропная частота, можно записать:

$$\begin{aligned} \vec{j}_X &= i\omega\epsilon_0 E_X \left\{ \left[\epsilon_r F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w} \right) - i \frac{\delta_r F}{w\epsilon_0} \right] - \right. \\ &\quad \left. - i \frac{w_{ni}^2}{w} F \frac{i(w + n\Omega_1) + v}{[i(w + n\Omega_1) + v]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right\} + \\ &\quad + iw\epsilon_0 E_y \left[i \frac{w_{ni}^2 w_{\Gamma i} F}{w} \frac{1}{[i(w + n\Omega_1) + v]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right], \\ \vec{j}_Y &= i\omega\epsilon_0 E_Y \times \\ &\quad \times \left[\frac{w_{ni}^2 F w_{\Gamma i}}{w} \frac{1}{[i(w + n\Omega_1) + v]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right] + \\ &\quad + iw\epsilon_0 E_x \left\{ \left[\epsilon_r F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w} \right) - i \frac{\delta_r F}{w\epsilon_0} \right] - \right. \end{aligned} \quad (5)$$

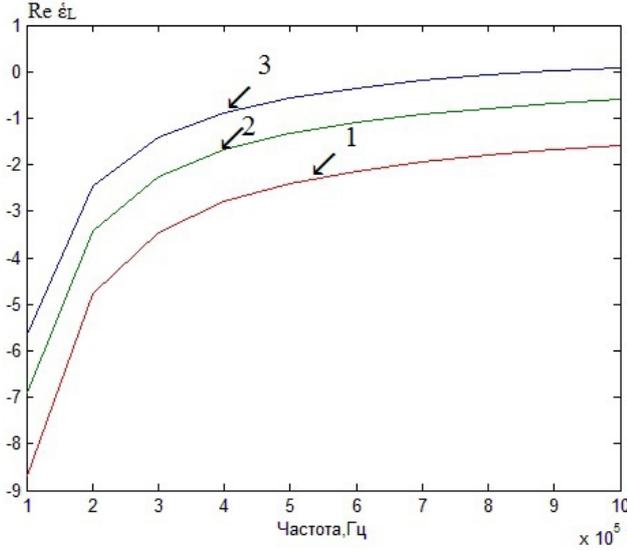


Рис. 1. Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_L = \psi(f)$: 1 - для $\epsilon_r = 3$; 2 - для $\epsilon_r = 17$; 3 - для $\epsilon_r = 27$

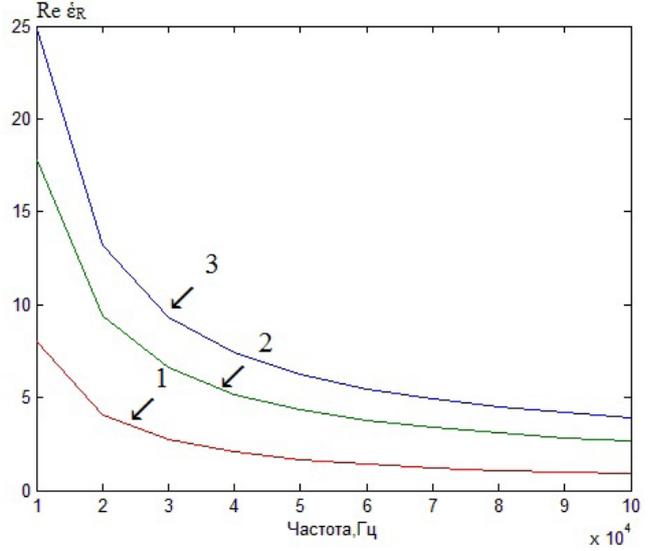


Рис. 2. Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$: 1 - для $\epsilon_r = 3$; 2 - для $\epsilon_r = 17$; 3 - для $\epsilon_r = 27$

$$-i \frac{w_{ni}^2}{w} \left. \begin{aligned} & \frac{F i(w + n \Omega_1) + v}{[i(w + n \Omega_1) + v]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right\}, \\ \vec{j}_Z = i \omega_2 \epsilon_0 E_Z \left[\epsilon_r F \left(1 + \frac{n \Omega_1}{w} \right) - \right. \\ & \left. - i \left[\frac{w_{ni}^2}{w} F \frac{1}{i(w + n \Omega_1) + v} + \frac{\delta_r F}{w \epsilon_0} \right] \right]. \end{aligned}$$

Координатное разложение напряженности электрического поля с учетом (5) позволяет записать компоненты тензора диэлектрической проницаемости в виде:

$$\hat{\epsilon}_1 = \epsilon_r F \left(1 + \frac{n \Omega_1}{w} \right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{F w_{ni}^2}{w} \times \right. \\ \times \frac{(w + n \Omega_1) [w_{\Gamma i}^2 - (w + n \Omega_1)^2 - v_i^2]}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n \Omega_1)^2]^2 + 4(w + n \Omega_1)^2 v_i^2} - \\ \left. - i F \left[\frac{w_{ni}^2}{w} v_i \times \right. \right. \\ \times \frac{(w + n \Omega_1)^2 + v_i^2 + w_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n \Omega_1)^2]^2 + 4(w + n \Omega_1)^2 v_i^2} + \\ \left. \left. + \frac{\delta_r F}{w \epsilon_0} \right] \right\}, \\ \hat{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{w_{ni}^2}{w} F w_{\Gamma i} \times \right.$$

$$\times \frac{v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n \Omega_1)^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n \Omega_1)^2]^2 + 4(w + n \Omega_1)^2 v_i^2} - \\ \left. - 2i \frac{w_{ni}^2}{w} F w_{\Gamma i} v_i \times \right. \\ \left. \times \frac{w + n \Omega_1}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n \Omega_1)^2]^2 + 4(w + n \Omega_1)^2 v_i^2} \right\}, \\ \hat{\epsilon}_3 = \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n \Omega_1}{w} \right) \times \right. \\ \times \left[\epsilon_r - \frac{w_{ni}^2}{w} \frac{1}{(w + n \Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - \\ \left. - i \left[\frac{w_{ni}^2}{w} F v_i \frac{1}{(w + n \Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_2 F}{w \epsilon_0} \right] \right\}.$$

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon}_R(\omega) &= \hat{\epsilon}_1 + \hat{\epsilon}_2 = \text{Re } \hat{\epsilon}_R + j \text{Im } \hat{\epsilon}_R = \\ &= \text{Re } \hat{\epsilon}_R + j \text{Arg } \hat{\epsilon}_R, \\ \hat{\epsilon}_L(\omega) &= \hat{\epsilon}_1 - \hat{\epsilon}_2 = \text{Re } \hat{\epsilon}_L + j \text{Im } \hat{\epsilon}_L = \\ &= \text{Re } \hat{\epsilon}_L + j \text{Im } \hat{\epsilon}_L. \end{aligned} \tag{7}$$

2. Результаты исследований

Проведен частотный анализ амплитудных характеристик (вещественные части выражений (7)), представленных на рис. 1, 2 и фазовых характеристик (мнимые части выражений (7)), показанных на рис. 3.

Во всем исследуемом диапазоне частот свойственны отрицательные значения разностной

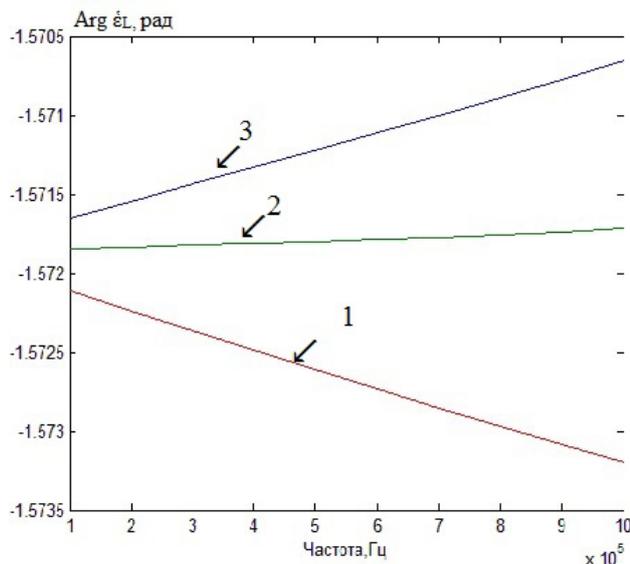


Рис. 3. Зависимости $\text{Arg } \hat{\epsilon}_L = \psi(f)$: 1 – для $\epsilon_r = 3$; 2 – для $\epsilon_r = 17$; 3 – для $\epsilon_r = 27$

компоненты $\text{Re } \hat{\epsilon}_L$. При увеличении диэлектрической проницаемости среды амплитудная характеристика стремится к нулю. Компонента $\text{Re } \hat{\epsilon}_R$ имеет положительную величину на всем отрезке частот и противоположный характер по сравнению с комбинационной составляющей $\text{Re } \hat{\epsilon}_L$. Влияние диэлектрической проницаемости среды наиболее ощутимо на низких частотах зондирующих сигналов. Вариация частоты радиоимпульсных сигналов позволит повысить информативность методов поиска углеводородов.

Фазовые характеристики комбинационных составляющих тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для правой и левой круговых поляризаций не несут информационной значимости. Различия характеристик не существенны при вариации параметров зондирующих сигналов.

Был проведен анализ идентификации сред с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_r = 2, 3, 4$ (рис. 4). Установлено, что применение радиоимпульсных сигналов с данными параметрами дает возможность различения данных сред.

Двухканальная схема определения комбинационных составляющих ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями позволяет повысить производительность методов электроразведки, поскольку полученные результаты дают возможность выделения АС на фоне других сред.

Заключение

В результате исследований следует отметить:

– проведенный анализ взаимодействия импульсных сигналов со средой над УВЗ показал,

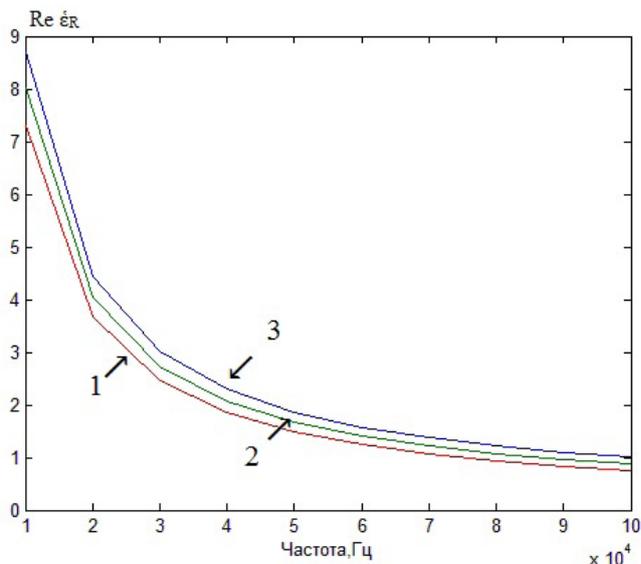


Рис. 4. Зависимости $\text{Re } \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$: 1 – для $\epsilon_r = 2$; 2 – для $\epsilon_r = 3$; 3 – для $\epsilon_r = 4$

что в компонентах тензоров диэлектрической проницаемости появляются дополнительные составляющие, зависящие от параметров сигналов. Все это приводит к расширению функциональных зависимостей компонентов тензоров от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ;

– исследования могут быть применены для определения характеристик среды над залежью при распространении ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, что повышает информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ;

– рассчитанные зависимости амплитудных характеристик комбинационных составляющих тензора при изменении диэлектрической проницаемости среды могут быть использованы для идентификации УВЗ.

Список литературы

1. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. 2002. № 1. С. 49-54.
2. Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna. May 20–22, 1991. Vol. 1. P. 240–244.
3. Гололобов Д.В., Калинин С.В., Янушкевич В.Ф. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. 2010. № 4. С. 98–101.
4. Макаров А.М., Лунева Л.А., Макаров К.А. Об особенностях волновых процессов в устройствах радиоэлектрони-

- ки с анизотропной рабочей средой // Наука и образование: научное издание. 2016. № 11. С. 88–98.
5. Александров Ю.М., Яцышен В.В. Расчет элементов тензора комплексной диэлектрической проницаемости для анизотропных материалов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 1. С. 23–27.
 6. Levashov S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition. Paris, France, 7–10 June 2003.
 7. Adamovskiy E., Yanushkevich V. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research. In 3 Parts. – Part 3. Technology. PSU, Novopolotsk, 2016. Vol. 179–183.
 8. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов / В.Ф. Янушкевич [и др.] // Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. 2016. № 12. С. 45–50.
 9. Иванова К.И., Янушкевич В.Ф. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. Материалы XV Международной НТК. Санкт-Петербург, 4 октября 2016. Т. 1. С. 107–111.
 10. Васильев И.С., Козлов И.П. Распространение электромагнитной волны в плоскостом диэлектрике вблизи нуля диэлектрической проницаемости // Труды МАИ. Вып. 41. 2010. С. 1–6.
 11. Взаимодействие радиоимпульса с анизотропной средой / Д.Л. Василенко [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств. Сборник материалов IV Международной НТК. Новополоцк, 25–26 мая 2006. Т. 2. С. 77–80.

Peculiarities of distribution of radioimpulse signals in the anisotropic medium on hydrocarbon deposits

V.F. Yanushkevich

The article analyzes the interaction of electromagnetic waves in the regime of radio-impulse signals with an anisotropic medium over hydrocarbon deposits. The amplitude and phase characteristics of the combination components of the dielectric permittivity of the medium above hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations are derived and analyzed on the basis of a quasihydrodynamic approach using multiparticle electron-ion currents. It is shown that the results of research can be used to identify the environment over deposits by the nature and magnitude of the total and difference components of the dielectric constant of the anisotropic layer.

Keywords: radio impulse signal, anisotropic medium, hydrocarbon deposit.

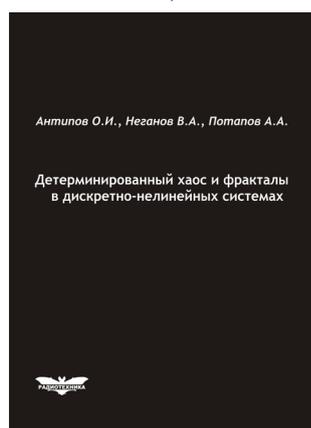
Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96



В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.