

УДК 550.83

Применение сейсмoeлектрического метода при геодинамическом контроле в природно-технических системах*

Быков А.А., Кузичкин О.Р.

В работе разработаны базовые геоэлектрические модели с учетом сейсмoeлектрического эффекта для применения в алгоритмах обработки геодинамической информации, позволяющие повысить достоверность оценок при контроле геодинамических процессов и явлений в приповерхностных слоях геологической среды. Рассмотрены модели при действии продольной и поперечной мод сейсмической волны на малую частицу среды, а также рассмотрена одномерная модель среды под совместным действием продольной и поперечной мод сейсмической волны. Проведено математическое моделирование раздела двух сред при действии продольного упругого деформационного воздействия. Построены зависимости относительного изменения коэффициента передачи для раздела двух сред от контрастности электрических параметров сред, как удельного сопротивления, так и диэлектрической проницаемости. На основании полученных данных математического моделирования доказана высокая эффективность применения сейсмoeлектрического эффекта в системах геодинамического контроля.

Ключевые слова: геодинамика, геоэлектрический метод, сейсмический метод, алгоритм обработки данных.

The use of the seismoelectric method in natural and technical systems geodynamic control

Bykov A.A., Kuzichkin O.R.

The article developed the basic geoelectric models that take into account the seismoelectrical effect. These models are used in processing algorithms of the geodynamic information that can increase the accuracy of the estimates under the control of geodynamic processes and phenomena in the surface layers of the geological environment. The simulation of the action of longitudinal and transverse modes of seismic waves on the small particle environment. Describes the behavior of a one-dimensional model of the environment under the joint action of the longitudinal and transverse modes of seismic waves. Implemented a mathematical model of the two media under the action of longitudinal elastic deformation effects. The dependences of the relative change in the transmission coefficient for the two media from the electrical parameters of contrast media as resistivity and dielectric constant. Based on the findings of mathematical modeling proved high efficiency of seismoelectric effect in systems geodynamic control.

Keywords: geodynamics, geoelectric method, seismic method, monitoring system, data processing algorithms.

Введение

Геодинамические вариации приповерхностного слоя геологической среды, вызываемые экзогенными процессами и усиленные постоянно возрастающей техногенной нагрузкой в природно-технических системах (ПТС), являются опасными факторами возможного развития экологических катастроф. Поэтому, в последнее время, появление экологических проблем во многом связано с

увеличением и ускорением темпов влияния техногенных процессов на геологическую среду в ПТС. Применение систем геодинамического контроля, особенно при расположении ПТС в зонах, имеющих естественные и искусственные неустойчивые геодинамические структуры с возможной техногенной активизацией экзогенных процессов, позволяет значительно повысить эксплуатационную защищенность промышленных объектов [1].

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-05-97506 p_центр_a.

Разработка и применение новых методов в системах геодинамического контроля зон расположения техногенных объектов позволяет своевременно получить оперативную информацию о текущем состоянии геологической среды и принимать оперативные решения при возникновении катастрофических ситуаций на объектах. Отдельно следует выделить методы геофизической разведки, основанные на сейсмоэлектрических эффектах в горных породах. Их применение при построении систем геодинамического контроля позволяет повысить селективную чувствительность к малым геодинамическим вариациям в среде [2,3].

Как показали многочисленные исследования, электрические параметры горных пород проводимость σ и диэлектрическая проницаемость ε легко изменяют свои значения в зависимости от внешних упругих воздействий, как естественного, так и природного происхождения. Известно, что по этой причине электрические параметры приповерхностного слоя имеют сильную климатическую зависимость, и на них сильное влияние оказывают температура, давление, влажность и другие факторы. Основой этого влияния является установленная взаимосвязь электрических и упругих параметров горных пород [4]. При геодинамических исследованиях эта взаимосвязь двояка: с одной стороны, наведенные сейсмические воздействия на исследуемую геологическую среду носят помехообразующий характер, вызывая при этом искажение регистрируемых сигналов [5,6], с другой стороны, сейсмическая составляющая несет в себе информацию о возможных катастрофических напряжениях в среде.

Целью работы является разработка базовых геоэлектрических моделей с учетом сейсмоэлектрического эффекта для применения в алгоритмах обработки геодинамической информации, позволяющих повысить достоверность оценок при контроле геодинамических процессов и явлений в приповерхностных слоях геологической среды.

Связь электрических и упругих параметров горных пород

Установлено, что в пределах закона Гука существует формальная зависимость между удельным сопротивлением ρ и модулем Юнга χ горных пород [7]. Предположим, что на участок длиной l однородного слоя геологической среды с поперечным сечением S и плотностью δ , находится под совместным воздействием деформационного воздействия F и равномерной плотности тока j . По сути дела в рамках обобщенного закона Ома можно утверждать, что компоненты плотности тока j в произвольной точке среды есть линейные и однородные функции компонентов градиента потенциала ΔE в той же точке, и наоборот. Аналогично на основании обобщенного закона Гука деформация слоя среды Δu линейна по отношению к силе деформационного воздействия F можно записать:

$$\Delta u = \frac{l}{\chi S} F, \quad \Delta E = \rho \frac{l}{S} j. \quad (1)$$

На основании (1) можно сделать важный вывод, что для однородного и изотропного слоя среды при возникновении упругой волны, градиент потенциала будет аномально перераспределяться под воздействием деформирующих сил, в соответствии со следующим выражением:

$$\frac{\partial E}{\partial u} = \rho \frac{\chi}{F} j. \quad (2)$$

Уравнение движения изотропной среды под действием упругой волны имеет следующий вид [8]:

$$\delta \ddot{u} = \frac{\chi}{2(1+\mu)} \Delta \ddot{u} + \frac{\chi}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \text{grad div} \ddot{u}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

В предположении малости деформаций среды, для плоской волны в неограниченной изотропной среде, уравнение (3) распадается на волновые уравнения:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{1}{c_n^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{1}{c_n^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

где $c_n = \sqrt{\frac{\chi(1-\mu)}{\delta(1+\mu)(1-2\mu)}}$, $c_t = \sqrt{\frac{\chi}{2\delta(1+\mu)}}$.

Уравнение (4) показывает, что упругая плоская волна в среде распадается на две независимо распространяющиеся упругие волны: продольную моду со скоростью c_n и поперечную моду со скоростью c_t . Эту особенность необходимо учитывать при построении систем геодинамического контроля на основе сейсмoeлектрического эффекта.

Продольные деформационные волны

Рассмотрим прямоугольный изотропный элемент среды под действием продольной моды плоской деформационной волны S_n (рис.1). Пусть элемент имеет прямоугольную форму размером $l_x \times l_y \times l_z$ и смещение происходит только по орту \vec{x} на величину Δx .

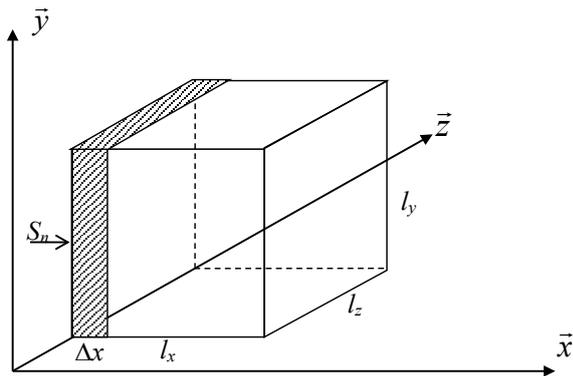


Рис. 1. Элемент среды под действием продольной деформационной моды.

Под действием силы сжатия (растяжения) S_n происходит смещение (упругая деформация) элементов среды:

$$l'_x = l_x + \Delta x = l_x \left(1 + \frac{\Delta x}{l_x} \right) = l_x (1 + u_x), \quad (5)$$

где u_x – элемент тензора деформации по орту \vec{x} в соответствии с волновыми уравнениями (3-4).

Представим элемент среды в виде геоэлектрической модели несовершенного диэлектрика (рис.2).

Комплексная форма записи модели характеризует наличие токов смещения, и соответ-

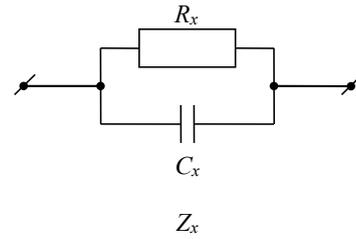


Рис. 2. Модель элемента среды в виде несовершенного диэлектрика.

ственно необходимости учета мнимой составляющей сопротивления среды при геодинамическом контроле [9]:

$$\dot{Z}_x = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} \quad (6)$$

В уравнении (6) элементы R_x и C_x описывают электрические и геометрические параметры элемента среды по орту \vec{x} :

$$R_x = \rho \frac{l_x}{l_y l_z} = \rho \frac{l_x}{S_{yz}}, \quad C_x = \varepsilon \frac{S_{yz}}{l_x}. \quad (7)$$

При деформационном воздействии сил сжатия (растяжения) продольной волны, электрические параметры элемента среды (7) примут следующий вид:

$$R'_x = \rho \frac{l_x(1+u_x)}{S_{yz}}, \quad C'_x = \varepsilon \frac{S_{yz}}{l_x(1+u_x)},$$

$$R'_x \cdot C'_x = \rho \varepsilon \frac{l_x(1+u_x)}{S_{yz}} \cdot \frac{S_{yz}}{l_x(1+u_x)} = \rho \varepsilon \quad (8)$$

Исходя из (8) для уравнения (6) окончательно получим:

$$Z'_x = \frac{1}{1 + j\omega \rho \varepsilon} \rho \frac{l_x(1+u_x)}{S_{yz}} = \frac{\rho l_x}{S_{yz}(1 + j\omega \rho \varepsilon)} \cdot (1 + u_x) \quad (9)$$

Как видно из выражения (9) комплексное сопротивление элемента среды под действием продольного упругого деформационного воздействия изменяется по модули пропорционально тензору смещения.

Поперечные деформационные волны

Для простоты анализа предположим, что на элемент среды действующих два одноосных поперечных деформационных смещения S_z и S_y , независимо действующих по направлению ортов \vec{y} и \vec{z} (рис.3).

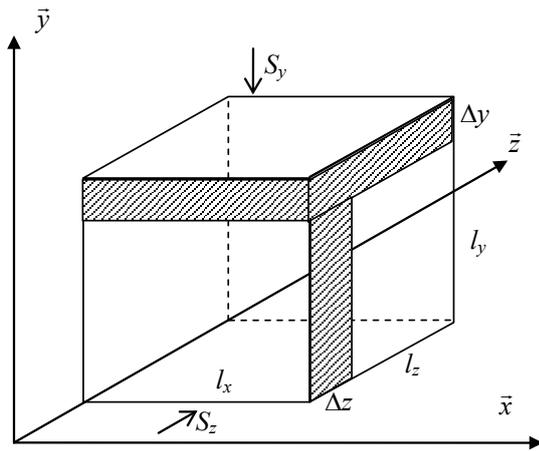


Рис. 3. Элемент среды под действием поперечной деформационной моды.

В соответствии с уравнением (7) выразим электрические параметры элемента среды при действии поперечных деформационных смещений Δy и Δz :

$$R'_x = \rho \frac{l_x}{(l_y + \Delta y)(l_z + \Delta z)},$$

$$C'_x = \varepsilon \frac{(l_y + \Delta y)(l_z + \Delta z)}{l_x}, \quad R'_x \cdot C'_x = \rho \varepsilon. \quad (10)$$

В предположении малости упругих деформационных смещений, получим:

$$Z'_x = \frac{\rho l_x}{S_{yz}(1 + j\omega\rho\varepsilon)} \cdot \frac{1}{1 + u_y + u_z}. \quad (11)$$

Возможность геодинамического контроля на основе сейсмoeлектрического эффекта

В классических методах электроразведки (электропрофилеировании и электроразведки) информационным параметром является кажущее сопротивление. При геодинамическом контроле изучаются вариации передаточных функций геоэлектрического разреза [10]. При использовании сейсмoeлектрического эффекта для контроля сред в качестве передаточной функции необходимо рассматривать общее сопротивление контролируемого участка среды.

Для простоты рассмотрим одномерную модель контролируемого участка среды, представив ее в виде последовательного соединения n элементарных элементов среды,

находящихся под совместным деформационным воздействием продольной и поперечной мод упругой волны. В соответствии с (9) и (11) запишем:

$$H(j\omega) = Z'_n = \sum_{i=1}^n Z'_i =$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i l_{xi}}{S_{yz}(1 + j\omega\rho_i\varepsilon_i)} \cdot \frac{1 + u_x^i}{1 + u_y^i + u_z^i}, \quad (12)$$

где ρ_i, ε_i – электрические параметры i -той ячейки; u_x^i, u_y^i, u_z^i – элементы тензор деформации i -той ячейки.

В случае однородной среды и одномерных ячеек уравнение (12) примет следующий вид:

$$H(j\omega) = \frac{\rho l_x}{S_{yz}(1 + j\omega\rho\varepsilon)} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(1 + u_x^i)}{1 + u_y^i + u_z^i}, \quad (13)$$

где $\rho_i = \rho, \varepsilon_i = \varepsilon$.

Используя несложные преобразования для упругой волны выражение (13) можно записать в линейном виде:

$$H(j\omega) = \frac{\rho l_x}{S_{yz}(1 + j\omega\rho\varepsilon)} \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^n (u_x^i - u_y^i - u_z^i) \right) \quad (14)$$

При наличии неоднородности в среде уравнение (14) примет следующий вид:

$$H(j\omega) = \frac{l_x}{S_{yz}} \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\rho_i}{(1 + j\omega\rho_i\varepsilon_i)} \cdot (1 + u_x^i - u_y^i - u_z^i) \right\} \quad (15)$$

Геодинамический контроль раздела двух сред с помощью продольных упругих волн

Предположим, что изучаемый объект представлен в виде модели раздела двух сред с параметрами ρ_1, ε_1 и ρ_2, ε_2 расположенными на расстоянии $a = k\Delta x$ от начала координат, где $l < k < n$. В соответствии с этими предположениями уравнение (15) запишется как:

$$H(j\omega) = \frac{l_x}{S_{yz}} \cdot \left\{ \frac{\rho_1}{1 + j\omega\rho_1\varepsilon_1} \sum_{i=1}^{k-1} (1 + u_x^i) + \frac{\rho_2}{1 + j\omega\rho_2\varepsilon_2} \sum_{i=k}^n (1 + u_x^i) \right\} \quad (16)$$

Воспользуемся частным решением волнового уравнения для продольной моды упругой волны (4) для узкополосного сейсмиче-

ского цуга колебаний с несущей частотой Ω и длительностью T :

$$S(\Omega, t, x) = S_n(t, x) \cos(\Omega t - kx + \varphi), \quad (17)$$

где $S_n(t, x) = S_0$ при $x \in [c_n t, c_n(t+T)]$ и $S_n(t, x) = 0$ при $x \notin [c_n t, c_n(t+T)]$. Волновое число k определится из условия, что длина волны $\lambda = m\Delta x$, где $m \ll n$:

$$k = \frac{2\pi}{m\Delta x}.$$

При упрощении $\varphi = 0$, вектор продольного смещения в изучаемом разделе двух сред в соответствии с уравнением (17) примет вид:

$$u_x^i = S_n^i(t) \cos(\Omega t - \frac{2\pi}{m} i), \quad (18)$$

где $S_n^i = S_0$ при $x \in [\text{int}(\frac{c_n t}{\Delta x}), \text{int}(\frac{c_n(t+T)}{\Delta x})]$ и

$$S_n^i(t) = 0 \text{ при } x \notin [\text{int}(\frac{c_n t}{\Delta x}), \text{int}(\frac{c_n(t+T)}{\Delta x})].$$

Результаты математического моделирования и выводы

На рис. 4 приведена временная зависимость действительной части коэффициента передачи раздела двух сред, полученная в результате математического моделирования на частоте регистрации геодинамических вариаций $\omega = 100$ Гц и при параметрах сейсмического воздействия $\Omega = 1000$ Гц и $c_n = 5000$ м/с, $T=0,1$.

На рис. 5 приведены данные фильтрации на несущей частоте сейсмического воздействия, что позволило устранить резкие всплески при переходе цуга колебаний продольной моды сейсмической волны через раздел двух сред.

На рис. 6 приведены результаты моделирования для различных значений коэффициентов контрастности сред

$$k_1 = \rho_2 / \rho_1 \text{ и } k_2 = \varepsilon_2 / \varepsilon_1.$$

Как видно из полученных зависимостей, что положение раздела двух сред хорошо определяется даже при незначительных раз-

личиях в электрических параметрах сред. При малых значениях k_1 и k_2 геодинамическая чувствительность предложенного метода имеет высокое значение. Например, при $k_1 = 1.32$ и $k_2 = 1$ относительное изменение коэффициента передачи $\Delta H / H = 0.1$. Что показывает хорошие перспективы для применения сейсмоэлектрического эффекта в системах геодинамического контроля.

Литература

1. *Королев В.А.* Мониторинг геологической среды. – М.: Изд-во МГУ, 1995.
2. *Светов Б.С.* К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки // Геофизика, 2000, № 1. – С. 28–39.
3. *Кузичкин О.Р., Быков А.А., Кутузов А.С.* Комплексирование сейсмических и геоэлектрических методов при геодинамическом контроле // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2012, № 14. – С. 45–48.
4. *Чантуришвили Л.С., Челидзе Т.Л., Челишвили М.Л.* Горные породы в физических полях. – Тбилиси: Из-во ТГУ, 1971.
5. *Орехов А.А., Кузичкин О.Р.* Влияние помехообразующих факторов на проведение электромагнитного контроля геодинамических объектов // Радиопромышленность, 2012, № 2. – С. 138–147.
6. *Цаплев А.В., Кузичкин О.Р., Камшилин А.Н.* Исследование влияния климатических помех в многоканальных устройствах измерения параметров геоэлектрических сигналов // Радиотехника, 2008, № 9. – С. 129–133.
7. *Потапов О.А., Лизун С.А.* Основы сейсмоэлектроразведки. – М.: Недра, 1995.
8. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теория упругости. – М.: Наука, 1968.
9. *Кузичкин О.Р.* Оценка влияния токов смещения на результаты обработки временных рядов геомониторинга карста // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2006, № 7. – С. 59–64.

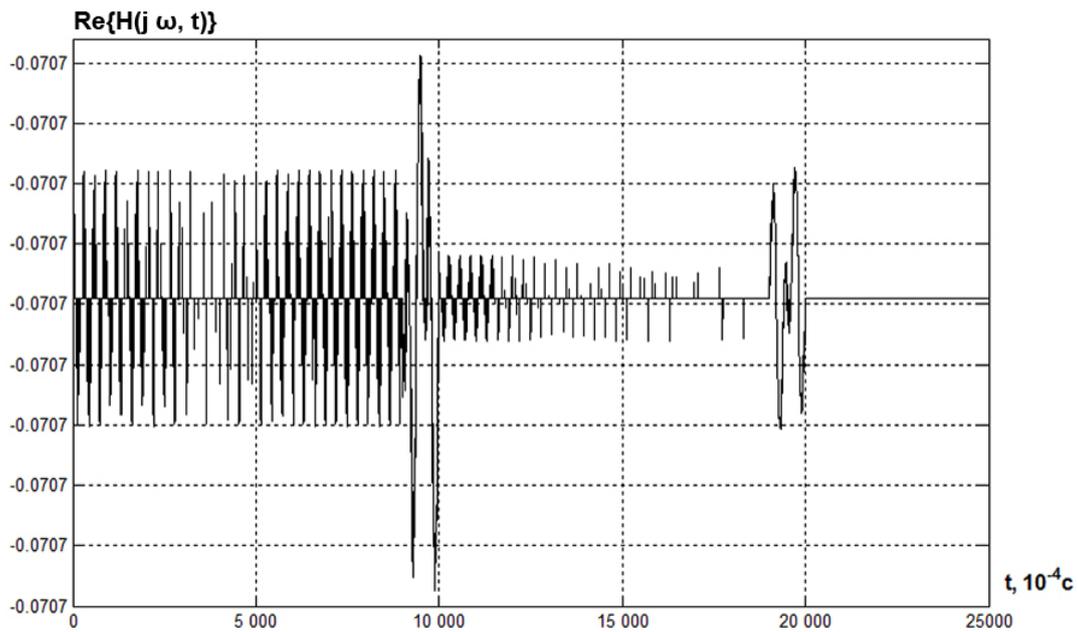


Рис. 4. Временные вариации коэффициента передачи контакта двух сред.

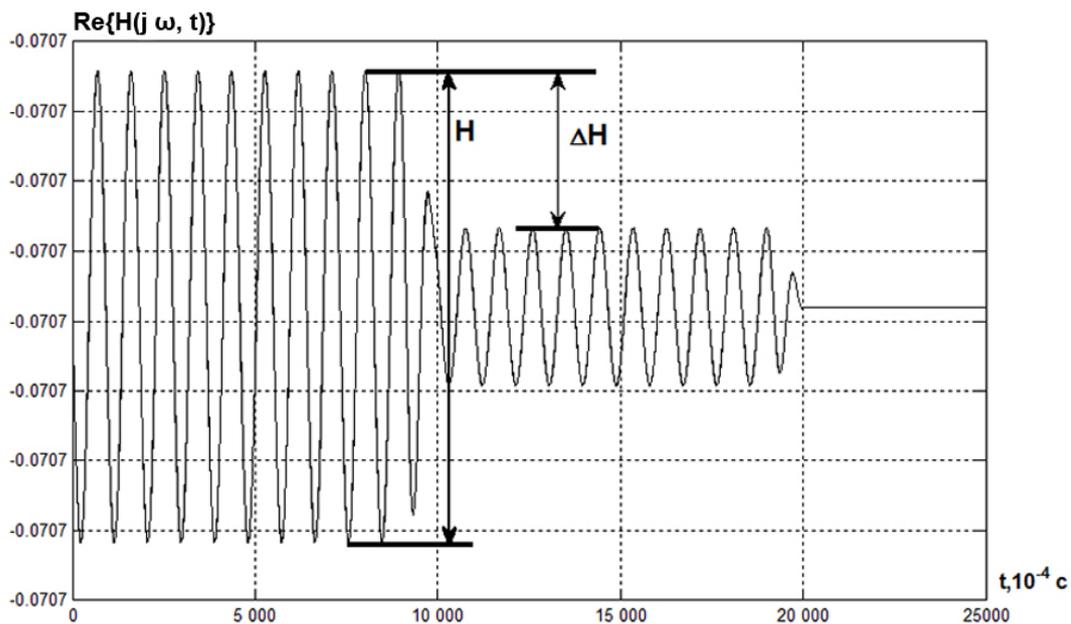


Рис. 5. Временная зависимость коэффициента передачи после узкополосной фильтрации.

10. Константинов И.С., Кузичкин О.Р. Организация систем автоматизированного электромагнитного контроля геодинамических объектов // Информационные системы и технологии, 2008, № 4. – С. 13-16.

References

1. Korolev V.A. Monitoring of the geological environment. – Moscow: Moscow State University Press, 1995.

2. Svetov B.S. On the theoretical justification of the seismoelectric method of geophysical prospecting // Geo-Physics, 2000, № 1. – P. 28-39.

3. Kuzichkin O.R., Bykov A.A., Kutuzov A.S. Integration of seismic and geoelectric methods in geodynamics control // Methods and devices information transmitting and processing, 2012, № 14. – P. 45-48.

4. Chanturishvili L.S., Chelidze T.L., Chelishvili M.L. The rocks in the physical fields. – Tbilisi: Tbilisi State University Press, 1971.

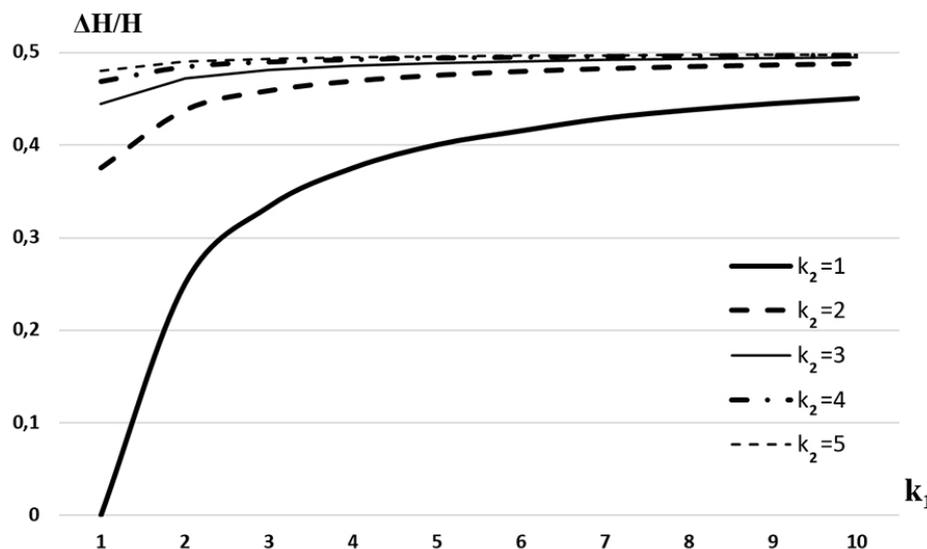


Рис. 6. Зависимость относительного изменения коэффициента передачи от контрастности электрических параметров сред.

5. Orekhov A.A., Kuzichkin O.R. Effects of interference form factors on the holding of the electromagnetic testing geodynamic objects // Radioindustry, 2012, № 2. – P. 138-147.

6. Tsaplev A.V., Kuzichkin O.R., Kamshilin A.N. Study the impact of climate interference in multi-channel measurement device geoelectric signals // Radiotechnics, 2008, № 9. – P. 129-133.

7. Potapov O.A., Lizun S.A. Fundamentals seismic research. – Moscow: Nedra, 1995.

8. Landau L.D., Lifshitz E.M. The theory of elasticity. – Moscow: Nauka, 1968.

9. Kuzichkin O.R. Assessing the impact of the bias currents to the results of the processing time series geomonitoring karst // Methods and devices information transmitting and processing, 2006, № 7. – P. 59-64.

10. Konstantinov I.S., Kuzichkin O.R. The organization aided electromagnetic testing geodynamic objects // Information Systems and Technology, 2008, № 4. – P. 13-16.

Статья поступила в редакцию 21 мая 2013 г.

Быков Артем Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». E-mail: bykov_a_a@list.ru

Кузичкин Олег Рудольфович – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». E-mail: electron@mivlgu.ru

Bykov Artem Aleksandrovich – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University. E-mail: bykov_a_a@list.ru

Kuzichkin Oleg Rudolfovich – Professor, Murom Institute of Vladimir State University. E-mail: electron@mivlgu.ru