

*А.А. Орехов, Н.В. Дорофеев*

(Муромский институт Владимирского государственного университета,  
e-mail: alexorems@yandex.ru)

## **ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА**

*Разработан способ оценки геодинамики неустойчивой геологической структуры на основе идентификации параметров её передаточной функции. Разработаны алгоритмы идентификации параметров контролируемого объекта как при настройке и первоначальном запуске системы геодинамического контроля, так и при оценке геодинамики объекта в процессе эксплуатации.*

*Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, геодинамический объект, передаточная функция, идентификация объектов, настраиваемая модель.*

*A.A. Orekhov, N.V. Dorofeev*

## **EVALUATION OF SURFACE INHOMOGENEITIES GEODYNAMICS ON THE BASIS OF IDENTIFICATION PARAMETERS OF MONITORING OBJECT**

*The evaluation method of unstable geological structure geodynamics on the basis of transfer function parameters identification is provided. Parameters identification algorithms of the monitoring object at the initial geodynamic monitoring system startup and evaluation of object geodynamics during operation are developed.*

*Key words: geoecological monitoring, geodynamic object, transfer function, object identification, adaptive model.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 31 марта 2014 г.

### **Введение**

В последнее время участились аварии и катастрофы на объектах, расположенных на территориях с неустойчивыми геологическими структурами. Серьёзной проблемой здесь является то, что такие явления, как карстово-суффозионные процессы могут никак не проявлять себя в течение многих лет, после чего в течение нескольких часов полностью разрушить грунтовые породы под сооружениями. Подтверждениями этому могут служить многочисленные примеры: провал жилого дома в Бутурлино (Нижегородская область, 2013), разрушение завода в Березниках (Пермский край, 2006), разрушение промздания 1982 г. (г. Дзержинск, Нижегородская область) и др. Подобные процессы, оказывающие влияние на геологические структуры, принято называть геодинамическими, а сами неустойчивые геологические структуры – геодинамическими объектами [7].

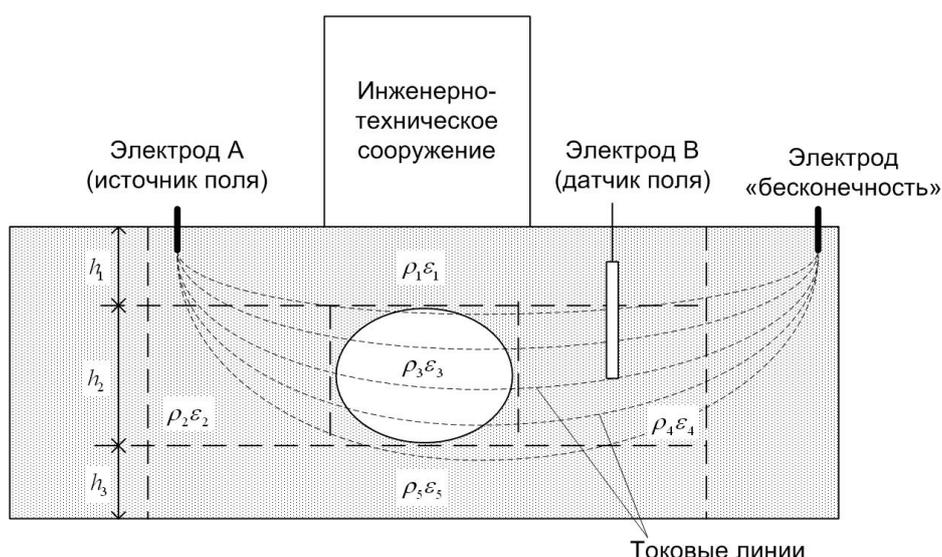
Многих катастроф можно избежать, заблаговременно выявив геодинамические процессы, возникшие в геологической среде. Поэтому актуальной проблемой является внедрение систем долговременного непрерывного автоматизированного контроля геодинамических объектов. Надёжная аппаратура для проведения подобных работ разработана и подробно описана в [2, 6, 9]. Однако, надёжных алгоритмов обработки зарегистрированных данных, позволяющих оценить геодинамику контролируемого объекта, до сих пор не создано.

Авторами настоящей статьи разработан способ оценки геодинамики контролируемого объекта на основе идентификации его параметров при использовании вертикальных геоэлектрических зондирований. Для этого необходимо:

- обосновать возможность аппроксимации геологического разреза элементарными геоэлектрическими моделями;
- построить эквивалентную схему замещения геологической среды;
- разработать алгоритм идентификации параметров контролируемого объекта при настройке и первоначальном запуске системы геодинамического контроля в эксплуатацию;
- разработать алгоритм идентификации параметров контролируемого объекта, а также оценки его геодинамики в процессе эксплуатации системы геодинамического контроля.

### **Геодинамический контроль с использованием геоэлектрических зондирований**

Установка для геоэлектрических зондирований, применяемая в системах геодинамического контроля (рис. 1), упрощённо представляет собой излучающий электрод А (источник поля), приёмный электрод В (датчик поля) и электрод "бесконечность" (общий провод) [4].



**Рис. 1.** Геоэлектрическое зондирование

В простейшем случае земная поверхность представляет собой горизонтально-слоистую структуру. Каждый слой характеризуется мощностью  $h_1$ , удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$  и удельной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ . Поле, регистрируемое датчиками, зависит от перечисленных выше параметров слоёв среды. Потенциал в слоях будет иметь вид [5]:

$$\varphi(r) = I \frac{\rho_1}{2\pi_0} \int_0^{\infty} \left( \frac{1 - R_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 + R_1 e^{-2\lambda h_1}} \right) J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

где  $R_1 = \frac{\rho_1 - \rho_2(1 - R_2 e^{-2\lambda h_2})(1 + R_2 e^{-2\lambda h_2})^{-1}}{\rho_1 + \rho_2(1 - R_2 e^{-2\lambda h_2})(1 + R_2 e^{-2\lambda h_2})^{-1}}$ , а  $R_2 = \frac{\rho_2 - \rho_3}{\rho_2 + \rho_3}$ ;

$r$  – расстояние от источника поля;

$J$  – векторная плотность тока;

$\lambda$  – постоянная распространения (размерность  $m^{-1}$ ).

Как показано в [5], в соответствии со спектральной теорией анализа систем, геоэлектрический разрез может быть функционально описан пространственно-временной передаточной функцией вида:

$$Y(x, y, z, t) = H(s)X(x, y, z, t),$$

где  $x, y, z$  – пространственные координаты;

$t$  – время;

$H(p)$  – передаточная функция геоэлектрического разреза;

$X$  – сигнал, пропускаемый через контролируемую среду;

$Y$  – регистрируемый сигнал;

$s = j\omega$  – оператор Лапласа.

Наличие в каком-либо из слоёв приповерхностной неоднородности (карстовой полости, например) существенно искажает электрическое поле в горизонтально-слоистой среде [4]. Поэтому геологическую среду с приповерхностной неоднородностью следует описывать как набор параллельно-последовательно соединённых элементарных объектов, каждый из которых характеризуется параметрами  $h_i, \rho_i, \varepsilon_i$ , определяющими передаточную функцию элементарного объекта.

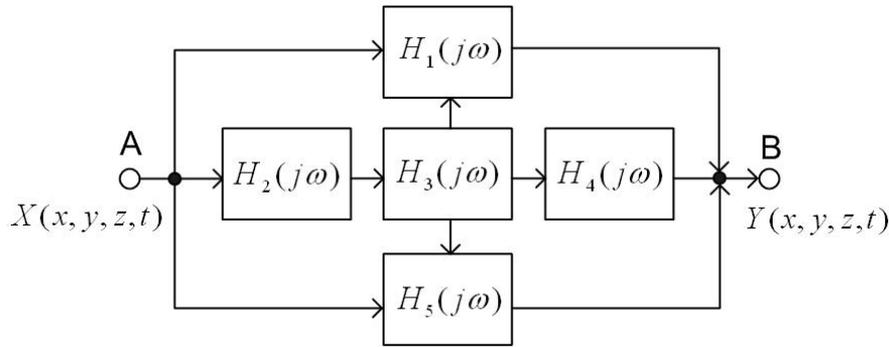
Изменение параметров, характеризующих каждый из слоёв, приводит к изменению передаточной функции  $H(s)$  и, соответственно, регистрируемого сигнала  $Y(t)$  при неизменном входном сигнале  $X(t)$ :

$$Y'(x, y, z, t) = [H(s) + \Delta H(s)]X(x, y, z, t).$$

При геодинамическом контроле нет необходимости пользоваться точными решениями электроразведочных задач типа (1), так как интерес представляют лишь относительные геодинамические изменения параметров передаточных функций геоэлектрического разреза.

## Эквивалентная схема замещения геологической среды

На рис. 2 представлена эквивалентная схема геологической среды с приповерхностной неоднородностью при геоэлектрическом зондировании.



**Рис. 2.** Эквивалентная схема геологической среды

В общем случае, результирующая передаточная функция будет иметь вид [3]:

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^g \prod_{j=1}^v H_{ij},$$

где  $g$  – количество слоёв в среде, охватываемых токовыми линиями (обычно не больше трёх);

$v$  – количество вертикальных разделов среды в каждом из слоёв (обычно также не больше трёх).

Следует отметить, что для решения задач геодинамического контроля эквивалентность функций геоэлектрического разреза должна обеспечивать совпадение характеристик не на всем бесконечном диапазоне частот и времён, а только на ограниченном отрезке. В соответствии с этим передаточная функция геоэлектрического разреза для фиксированного положения источника поля и точки регистрации имеет вид:

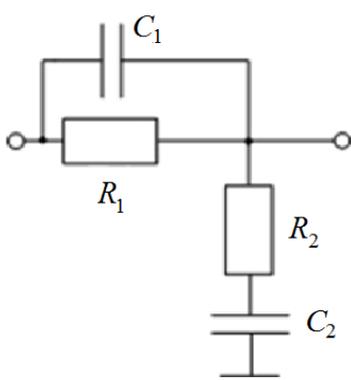
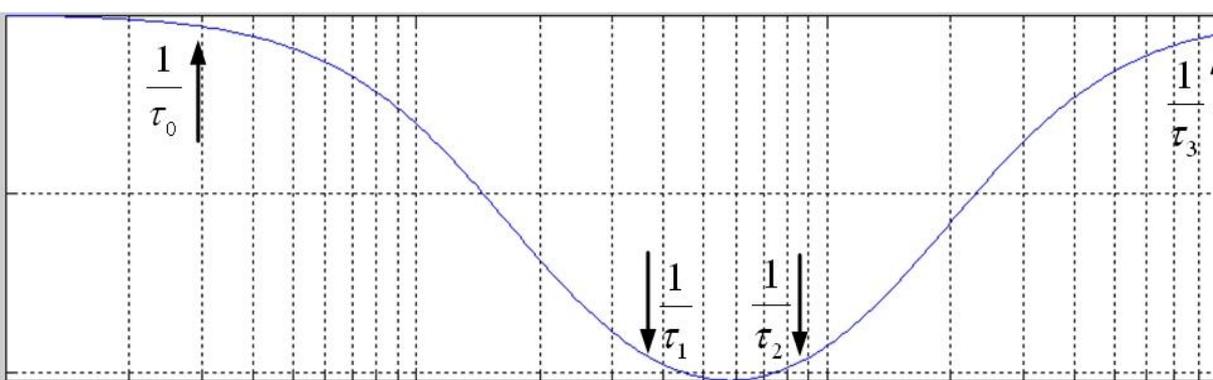
$$H(x, y, z, s) = \frac{b_n(x, y, z)s^n + \dots + b_1(x, y, z)s + b_0(x, y, z)}{a_m(x, y, z)s^m + \dots + a_1(x, y, z)s + a_0(x, y, z)}. \quad (2)$$

Передаточная функция задаёт совокупность дискретных электрических цепей, определяющих геодинамическую модель геоэлектрического разреза. Как известно, породы, слагающие геоэлектрический разрез, являются материалами, обладающими свойствами как диэлектриков, так и проводников. Их электромагнитные свойства определяются величинами удельного электрического сопротивления  $\rho$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . В работе [5] показано, что любой геологический разрез может быть аппроксимирован с помощью параллельно-последовательно соединённых  $RC$ -цепочек. В работе [8] приведены наиболее часто встречающиеся приповерхностные неоднородности и их эквивалентные элементарные геоэлектрические модели.

В табл. 1 представлена эквивалентная схема замещения приповерхностной неоднородности, её расчётная передаточная функция и амплитудно-частотная характеристика. Очевидно, что из данной схемы можно получить ряд более простых моделей путём приведения значений  $R$  и  $C$  к нулю либо к бесконечности. Как видно из рисунка, по форме **амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)** можно оценить постоянные  $\tau$ , по которым, в свою очередь, оценить значения  $R$  и  $C$ .

Таблица 1

**Эквивалентная схема, передаточная функция и АЧХ элементарной геоэлектрической модели**

Эквивалентная схема	Передаточная функция
	$H(s) = \frac{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}{(\tau_0 \cdot s + 1) \cdot (\tau_3 \cdot s + 1)},$ $\tau_1 = R_1 \cdot C, \quad \tau_2 = R_2 \cdot C,$ $\tau_0 = \frac{2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}{\tau - \sqrt{\tau^2 - 4 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}},$ $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3,$ $\tau_3 = \frac{\tau - \sqrt{\tau^2 - 4 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}}{2}$
	

### **Идентификация параметров геодинамического объекта с использованием временных функций**

При первоначальной настройке и вводе системы геодинамического контроля в эксплуатацию возникает проблема оценки параметров геологического разреза для выбора эквивалентной схемы замещения и алгоритма обработки информации. Из теории автоматического управления известно, что задача идентификации сводится к определению оператора модели, преобразующего входное воздействие на объект в выходные величины [3]. То есть идентифицировать геодинамический объект означает оценить параметры  $a$  и  $b$  передаточной функции  $H(x, y, z, s)$ .

Как известно, передаточную функцию объекта можно построить, анализируя его временные функции – переходную и импульсную. Переходная функция  $h(t)$  – реакция системы на единичное ступенчатое воздействие. Импульсная функция  $\omega(t)$  – реакция на единичное импульсное воздействие  $\delta(t)$ . Качество реализации этих воздействий определяется возможностью применяемой аппаратуры. Связь между временными и передаточными функциями реализуется следующими соотношениями:

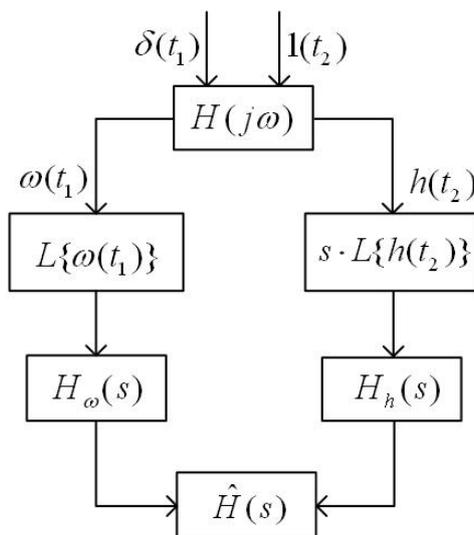
$$H_h(s) = s \cdot L\{h(t)\} = s \cdot \int_0^{\infty} h(t) e^{-st} dt;$$

$$H_{\omega}(s) = L\{\omega(t)\} = \int_0^{\infty} \omega(t) e^{-st} dt,$$
(3)

где  $L\{ \}$  – преобразование Лапласа;

$s = j \cdot \omega$  – переменная преобразования Лапласа.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма оценки передаточной функции  $H(s)$  объекта.



**Рис. 3.** Блок-схема алгоритма оценки передаточной функции объекта

Указанные воздействия оказываются на объект через некоторые достаточно большие промежутки времени  $t_1 - t_2$  с целью устранения взаимного влияния и завершения всех переходных процессов. Полученные с использованием каждого способа передаточные функции следует усреднить с целью устранения погрешности идентификации. Описанную процедуру следует повторить несколько раз для более точной идентификации передаточной характеристики.

## Идентификация параметров геодинамического объекта с использованием настраиваемой модели

Регулярные зондирования проводятся с использованием гармонического воздействия определённой частоты [10]. Значение этой частоты выбирается по форме частотных характеристик, построенных в процессе запуска системы геодинамического контроля в эксплуатацию. Гармоническое воздействие оказывается в течение некоторого времени с заданной периодичностью. Такая организация процесса делает довольно привлекательным применение имитационного моделирования для идентификации параметров объекта в процессе функционирования системы контроля. Имитационное моделирование предполагает вычисление параметров объекта на ЭВМ при последовательном приближении их к реальным с минимальной погрешностью.

Приведём передаточную функцию элементарной геоэлектрической модели таблицы 1 к виду (2):

$$H(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0},$$

а затем к виду:

$$H(s) = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s^2 + r_1 s + r_0}, \quad (4)$$

где  $q_2 = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_0 \tau_3}$ ,  $q_1 = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_0 \tau_3}$ ,  $q_0 = \frac{1}{\tau_0 \tau_3}$ ,  $r_1 = \frac{\tau_0 + \tau_3}{\tau_0 \tau_3}$ ,  $r_0 = \frac{1}{\tau_0 \tau_3}$ .

Очевидно, что такое преобразование можно выполнить над любыми функциями вида (2). В общем случае, коэффициенты  $b_0$  и  $a_0$  отличны от 1.

На вход объекта подаётся воздействие  $x(t)$ . Это же воздействие (виртуально) подаётся на звено с передаточной функцией  $H'(s) = \beta_4 s^2 + \beta_3 s + \beta_2$ . Сигнал с выхода объекта (его реакция на воздействие) подаётся на звено с передаточной функцией  $H''(s) = \beta_1 s + \beta_0$ . Разность сигналов с выходов звеньев образует сигнал ошибки  $e(t) = x(t) \cdot H'(s) - y(t) \cdot H''(s)$ , зависящий как от настраиваемых параметров  $B = \{\beta_0 \dots \beta_4\}$ , так и от неизвестных параметров объекта  $A = \{q_2, q_1, q_0, r_1, r_0\}$ . Критерий качества идентификации  $J(t, A, B) = e^2(t)$  достигает экстремума-минимума в точке  $A = B$ , то есть  $\{\beta_4, \beta_3, \beta_2, \beta_1, \beta_0\} = \{q_2, q_1, q_0, r_1, r_0\}$  [1].

Применяя градиентный метод [1] получим выражения для настраиваемых параметров:

$$\frac{d\beta_i}{dt} = -2 \cdot r_1 \cdot e \cdot y^{(i)}, \text{ при } i = 0, 1;$$

$$\frac{d\beta_i}{dt} = -2 \cdot r_1 \cdot e \cdot x^{(i)}, \text{ при } i = 2, 3, 4.$$

На рис. 4 приведена схема обработки информации, реализующая описанный алгоритм. Оператор  $\frac{1}{s}$  обозначает интегрирование.

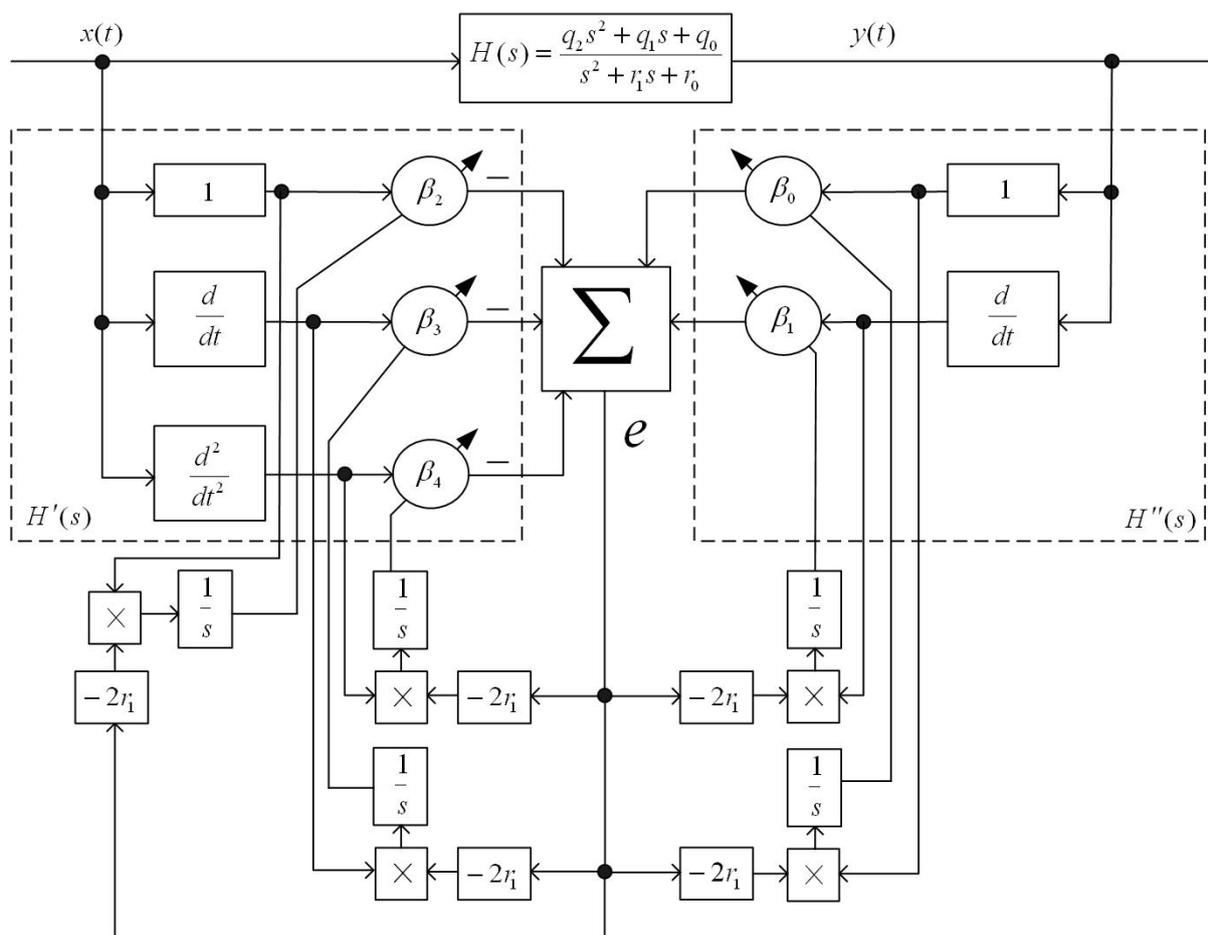
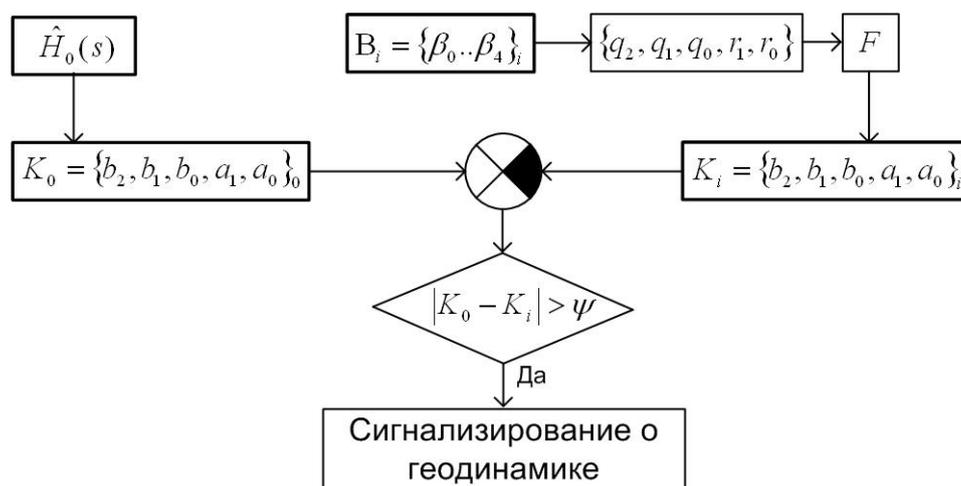


Рис. 4. Схема настройки параметров модели объекта

Следует отметить, что данный алгоритм может быть реализован и для более сложных моделей путём добавления в модель дополнительных настраиваемых параметров.

После оценки параметров  $A = \{q_2, q_1, q_0, r_1, r_0\}$  получим значения  $K_i = \{b_2, b_1, b_0, a_1, a_0\}_i$ , где  $i$  – текущее измерение. Наличие геодинамики можно оценить по разности значений  $K_i = \{b_2, b_1, b_0, a_1, a_0\}_i$  при текущем измерении и  $K_0 = \{b_2, b_1, b_0, a_1, a_0\}_0$  измерения при запуске системы в эксплуатацию. При превышении этой разностью некоторого заданного предела  $\psi$  производится сигнализирование о регистрации геодинамики объекта (рис. 5).



**Рис. 5.** Схема выявления геодинамических вариаций геологической среды

### Заключение

В данной статье разработан способ оценки геодинамики неустойчивой геологической структуры на основе идентификации параметров её передаточной функции при использовании вертикального геоэлектрического зондирования. Вследствие того, что геодинамический объект при геоэлектрическом зондировании представляется четырёхполюсником, параметры которого определяются электромагнитными свойствами среды, геодинамику объекта становится возможным фиксировать по вариациям значений этих свойств. Обосновано, что разрез любой сложности можно аппроксимировать элементарными геоэлектрическими моделями, наиболее общая из которых подробно рассмотрена. Построена эквивалентная схема замещения геологической среды с приповерхностной неоднородностью. На основании реакции на тестовые воздействия разработан алгоритм идентификации параметров контролируемого объекта при настройке и первоначальном запуске системы геодинамического контроля в эксплуатацию, позволяющий выбрать применяемую модель для дальнейшей обработки информации и оценить начальные значения параметров геологической среды. Разработан алгоритм идентификации параметров контролируемого объекта с использованием имитационной настраиваемой модели, а также оценки его геодинамики в процессе эксплуатации системы геодинамического контроля.

Приведённые в данной статье положения могут быть использованы для построения систем геодинамического контроля, позволяющих заблаговременно в полностью автоматизированном режиме выявить геодинамику неустойчивой геологической среды и, как следствие, предотвратить множество аварийных ситуаций.

*Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ "14-08-31570-мол\_а".*

## Литература

1. **Александров А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1989. 273 с.
2. **Дорофеев Н.В., Орехов А.А.** Обмен информацией в системе геодинамического контроля // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. 2012. № 4 (44). 3 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
3. **Ким Д.П.** Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. ФИЗМАТЛИТ, 2003. 288 с.
4. **Королев В.А.** Мониторинг геологической среды. М.: изд-во МГУ, 1995. 272 с.
5. **Кузичкин О.Р.** Выделение элементарных геоэлектрических неоднородностей спектральным методом // Радиотехника, электроника, информатика. Вып. 3. Муром: изд-во МИ ВлГУ, 2004. С. 18-20.
6. **Кузичкин О.Р., Орехов А.А.** Проектирование измерительного тракта системы геоэлектрического контроля // Проектирование и технология электронных средств. 2011. № 1. С. 25-30.
7. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Организационная структура геоэкологического мониторинга геодинамических объектов // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. 2012. № 4 (44). 5 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
8. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Геоэлектрическое моделирование приповерхностных геодинамических объектов с учётом воздействия эндогенных факторов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. Вып. 1 (26). Муром: Муромский институт (филиал) ВлГУ, 2014. С. 32-40.
9. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Информационно-измерительная система для проведения геоэлектрического контроля геодинамических объектов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 2, 2012. С. 60-62.
10. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В., Романов Р.В.** Техническая диагностика в блоках трансформаторных датчиков систем геодинамического контроля // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 2 (16). С. 29-32.