УДК 550.837

ТРЕХСЛОЙНЫЕ КРИВЫЕ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В МЕТОДЕ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ ПРИ НЕТОЧНОМ ЗАДАНИИ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА

Вишнев В.С. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Приведены результаты расчетов кривых кажущегося сопротивления ($\rho_{k,mc}$) метода разведки недр блуждающими токами электрической железной дороги для случая бесконечно длинного, равномерно заземленного, неветвящегося рельсового пути, лежащего на горизонтально-однородном слоистом геоэлектрическом разрезе, при различных сочетаниях характерных параметров железнодорожного полотна, непосредственно влияющих на пространственную структуру регистрируемого в методе поля. Установлены пределы отклонения упомянутых параметров от истинных значений, соблюдение которых позволяет получать достоверные значения $\rho_{k,mc}$ почти на всех практически значимых отрезках расчетного профиля.

Кривые, кажущееся сопротивление, погрешность, параметр, железная дорога, расчет, графики.

APPARENT RESISTIVITY THREE-LAYERED CURVES OF THE STRAY CURRENT METHOD AT THE INEXACT PARAMETER ASSIGNMENT OF A SOURCE

Vishnev V.S. – Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Results of apparent resistivity curves calculations of the stray current prospecting method of electric railway stray current for a case infinitely long, uniformly earthed, unbranching tracks lying on horizontally homogeneous layered geoelectric section are presented, at the various combinations of typical parameters of railroad tracks directly influencing spatial structure of the field used in a method. Deviation limits of the mentioned parameters from the true values are established. It allows to obtain reliable values $\rho_{k,mc}$ almost on all practically significant survey profile segment.

Curves, apparent resistivity, accuracy, parameter, railway, calculation, graphs.

Введение

Известно (Вишнев, 1989; 2003), что из совокупности измерений апериодических импульсных помех от тяговой сети электрической железной дороги (ЭЖД) можно выделять однотипные по структуре источника (полезные) сигналы. Эти сигналы поддаются пересчету в значения параметра $\rho_{k,mc}$ (ρ_k – кажущееся сопротивление; *mc* – тяговая сеть), профильные распределения которого легко интерпретировать как качественно, так и количественно. Однако для построения кривых $\rho_{k,mc}$ необходимо знать некоторый набор величин, характеризующих соответствующий участок ЭЖД. К ним, прежде всего, относятся: координата места изменения режима энергопотребления электровозов (l_0), инициирующих используемые импульсы; длина секции контактного провода (L), питающая упомянутые локомотивы; и, наконец, значение корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов ($r_р$) к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($r_п$), т.е. параметр $k = (r_р/r_п)^{1/2}$.

Статья посвящена выяснению погрешностей задания перечисленных характеристик, обеспечивающих получение достоверных кривых $\rho_{k,mc}$.

О теоретической основе и методике исследований

Математические выражения, преобразующие данные полевых измерений помех от ЭЖД в величины $\rho_{k,mc}$, были представлены кратко в депонированной работе (Вишнев, 1989). В развернутом виде, однако, только для случая одностороннего энергоснабжения электровозов, они опубликованы в статье (Вишнев, 2010). Здесь, чтобы было понятно, как получен обсуждаемый материал, приведем их еще раз, но без вывода и применительно лишь к варианту, когда питание электрических локомотивов двухстороннее.

Общая формула, по которой рассчитываются кривые $\rho_{k,mc}$, имеет вид:

$$\rho^{ij}_{k,mc} = \frac{G^j_0}{P^i_0}\cdot\frac{\Delta E_i}{\Delta H_j},\ i = x, y;\ \ j = y, x, \qquad (1)$$

где G^j_0 / P^i_0 – соотношение, играющее роль коэффициента электроразведочной установки; ΔE_i – составляющая по оси x или y прямолинейных координат импульса напряженности электрического поля, измеренного на рядовом пункте; ΔH_j – составляющая по оси y или x – импульса напряженности магнитного поля, измеренного на базисном либо том же рядовом пункте наблюдения; $\rho^x_{k,mc}$ – «поперечные» (x – поперек дороги); $\rho^y_{k,mc}$ – «продольные» кривые $\rho_{k,mc}$.

Для случая двухстороннего питания электровозов

$$P^x_0 = \frac{k}{4\pi}\left[\int_0^{l_0} Q_1\frac{x_i}{R^3} + \int_{l_0}^{L} Q_2\frac{x_i}{R^3} + \int_{-\infty}^{0} Q_3\frac{x_i}{R^3} + \int_{L}^{\infty} Q_4\frac{x_i}{R^3}\right]dl, \qquad (2)$$

$$P^y_0 = \frac{k}{4\pi}\left\{\int_0^{l_0} Q_1\frac{(y_i - l)}{R^3} + \int_{l_0}^{L} Q_2\frac{(y_i - l)}{R^3} + \int_{-\infty}^{0} Q_3\frac{(y_i - l)}{R^3} + \int_{L}^{\infty} Q_4\frac{(y_i - l)}{R^3}\right\}dl, \qquad (2`)$$

$$G^y_0 = \frac{k}{8\pi}\left[\int_0^{l_0} Q_1\frac{x_i}{r^2} + \int_{l_0}^{L} Q_2\frac{x_i}{r^2} + \int_{-\infty}^{0} Q_3\frac{x_i}{r^2} + \int_{L}^{\infty} Q_4\frac{x_i}{r^2}\right]dl, \qquad (3)$$

$$G^x_0 = \frac{-k}{8\pi}\left\{\int_0^{l_0} Q_1\frac{y_i - l}{r^2} + \int_{l_0}^{L} Q_2\frac{y_i - l}{r^2} + \int_{-\infty}^{0} Q_3\frac{y_i - l}{r^2} + \int_{L}^{\infty} Q_4\frac{y_i - l}{r^2}\right\}dl + J_x, \qquad (3`)$$

где

$$J_x = -\frac{h}{4\pi(x_i^2 + h^2)}\left\{\frac{y_i(1 - l_0/L)}{(x_i^2 + y_i^2 + h^2)^{1/2}} - \frac{(y_i - l_0)(1 - l_0/L)}{[x_i^2 + (y_i - l_0)^2 + h^2]^{1/2}} - \frac{(y_i - l_0)(l_0/L)}{[x_i^2 + (y_i - l_0)^2 + h^2]^{1/2}} + \frac{(y_i - L)(l_0/L)}{[x_i^2 + (y_i - L)^2 + h^2]^{1/2}}\right\},$$

$$Q_1 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{+kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_2 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{-kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2};$$

$$Q_3 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{+kl} + e^{+kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_4 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{-kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{-kl_2};$$

$l_1 = l - l_0$, $l_2 = l - L$, $r = \left\{x_i^2 + (y_i - l)^2\right\}^{1/2}$,

$R = \left\{x_i^2 + (y_i - l)^2 + z_i^2\right\}^{1/2}$, $k = (r_p/r_п)^{1/2}$;

$x_м$, $y_м$, $z_м$ – прямоугольные декартовы координаты пункта наблюдения M с началом в точке подсоединения к рельсам одной из питающих электровоз (Э) тяговых подстанций, например А, осью y, направленной от А к Э, осью z – вниз, перпендикулярно поверхности горизонтально-однородного геоэлектрического разреза; h – высота подвеса контактного провода; l – текущая координата железнодорожного полотна (при $x = 0$, $l = y$, при $z_м = 0$, $R = r$); Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – доли токов утечки различных участков рельсового пути; P^i_0 и G^j_0 – величины, характеризующие геометрию электрической и магнитной компоненты поля ЭЖД; J_x – часть G^x_0, обусловленная токами секции контактного провода.

Определение допустимых погрешностей задания выше перечисленных параметров модели источника БТ при преобразовании данных измерений помех от ЭЖД в профильные распределения кажущегося сопротивления производилось путем сравнения теоретических трехслойных и двухслойных кривых $\rho_{k,mc}$, полученных с точным и ошибочным значением одного из них. Погрешности вводились поочередно в дробь G^j_0 / P^i_0 математического выражения (1). Величины импульсов ΔE_i, ΔH_j, имитирующих полевые измерения, рассчитывались по формулам, изложенным в работах (Вишнев, 2007, с. 39; Вишнев, 2010, с. 13), с заданием тех же параметров, но без ошибок.

Математические операции выполнялись на ПК Intel Core 2 Quad с использованием системы компьютерной математики – Mathematica 7.

Результаты вычислений

1. ***Особенности кривых*** $\rho^{ij}_{k,\text{оп}}$ ***при ошибочных значениях L***

Символом L в математических выра-

жениях (1–3′) обозначена длина секции контактного провода. Ее размеры, безусловно, указаны в документации на любой участок ЭЖД и с достаточно высокой точностью. Однако при расчете кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ железную дорогу зачастую приходится считать прямой, даже если она на используемом участке имеет некоторые зигзаги, поэтому важно оценить, какие максимальные отклонения модельной L от ее реального значения еще не портят конечный результат. Примеры поведения соответствующих распределений $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ изображены на рис. 1, 2.

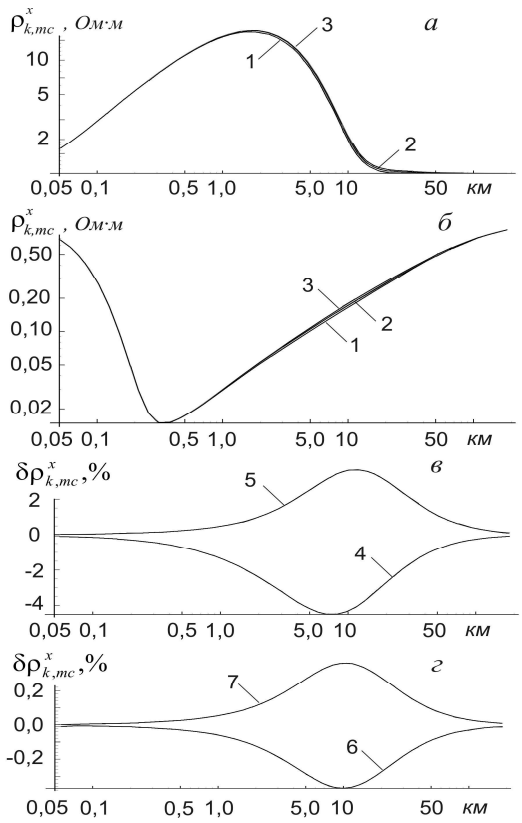

Рис. 1. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^x_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибке задания длины секции контактного провода ($L\pm\Delta L$): *а* – трехслойный геоэлектрический разрез типа «*K*»: $\rho_1 = 1$ Ом·м; $h_1 = 0{,}05$ км; $\rho_2 = 100$ Ом·м; $h_2 = 0{,}5$ км; $\rho_3 = 1$ Ом·м; $h_3 = \infty$ км; *б* – трехслойный геоэлектрический разрез типа «*H*»: $\rho_1 = 1$ Ом·м; $h_1 = 0{,}05$ км; $\rho_2 = 0{,}01$ Ом·м; h_2=0,5 км; $\rho_3 = 1$ Ом·м; $h_3 = \infty$ км (1 – при ΔL = -5 км; 2–при $\Delta L = 0$ км; 3–при ΔL = +5 км); *в*, *г* – графики относительных погрешностей значений $\rho^x_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ (4 – при ΔL = -5 км; 5 – при ΔL = +5 км; 6 – при ΔL = -0,5 км; 7–при ΔL = +0,5 км).
Параметры источника БТ и координаты точек расчета: $l_0 = 8$ км; $k = 0{,}14$ км$^{-1}$; $L\pm\Delta L = (20\pm\Delta L)$ км; x = (0,05–183 км); $y = 5$ км

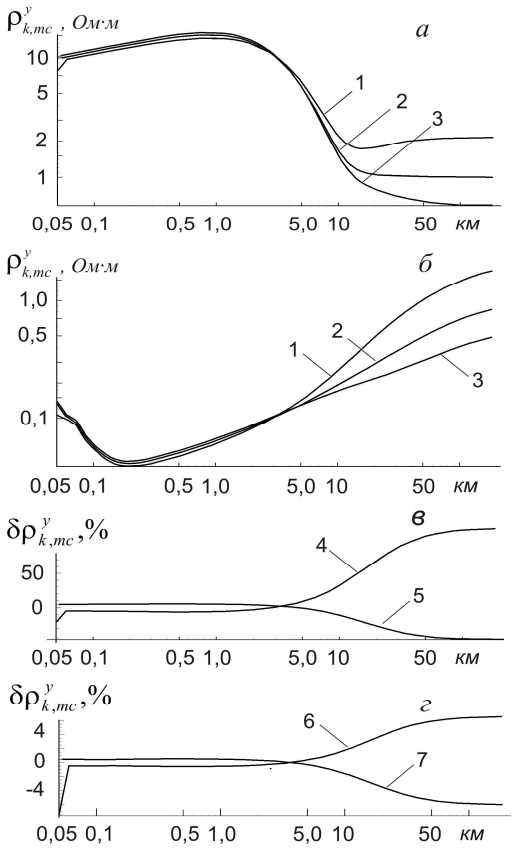

Рис. 2. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^y_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибке задания длины секции контактного провода ($L\pm\Delta L$): высота подвеса контактного провода – 0,006 км. Расчетные параметры см. рис. 1

Рассматривая рис. 1 и 2, не трудно заметить, что все кривые $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ с заниженными (шифр 1) или завышенными (шифр 3) значениями L отличаются от их идеального хода (шифр 2), но эти отличия, даже при 25 % погрешности в L, в целом, сравнительно малы. В случае профильных распределений $\rho^x_{k,\partial\tilde{n}}$ во всех точках (рис. 1*а*, *б*), а в случае профильных распределений $\rho^y_{k,\partial\tilde{n}}$ на расстояниях от ЭЖД приблизительно до 4,5 км (рис. 2*а*, *б*), обсуждаемые расхождения не превосходят 5 % (рис. 1*в*, 2*в*). И лишь на удалениях более 4,5 км (и только в величинах $\rho^y_{k,\partial\tilde{n}}$) они становятся значительными. Однако L, используя, в частности, любую географическую карту не очень мелкого масштаба, можно определять гораздо точнее, чем 25 %, например, не хуже ±2,5 % (что, если взять расчетные параметры отношений G^j_0 / P^i_0 рис. 1, 2, соответствует абсолютной ошибке

$\Delta L = \pm 0{,}5$ км). При этом искажения исследуемых кривых на их практически значимых отрезках (рис. 1*г*, 2*г*) будут существенно меньше точности съемки поля БТ (5–10 %).

Значит, реальные ошибки задания параметра L (такие, как $100\Delta L/L = 2{,}5$ % и меньше) особого препятствия трансформации данных измерения помех от ЭЖД в кривые $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ не представляют.

2. *Влияние погрешностей величины l_0 на вид кривых* $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$

Параметр l_0 – это координата места изменения тяговой нагрузки электровозов, инициирующих полезные сигналы ΔE_i, ΔH_j, по амплитудам которых и рассчитываются $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$. Ее основной особенностью является то, что от импульса к импульсу поля ЭЖД, участвующего в формировании средних значений ΔE_i / ΔH_j формулы (1), она варьирует в каких-то сравнительно небольших, но точно неизвестных пределах.

При оценке влияния возможных ошибок в l_0 на профильные распределения $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ был использован заведомо завышенный интервал Δl_0. В частности на рис. 3*а*, *б*; 4*а*, *б* Δl_0 составляет ±1 км.

Из анализа рис. 3, 4 вытекает, что общий ход осложненных распределений $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ (кривые 1, 3) остается подобным ходу неосложненных (кривые 2 рис. 3*а*, *б*; 4*а*, *б*). Но неточные $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ с расстояний примерно 0,5–0,7 км от ЭЖД начинают заметно отклоняться от точных (при $\Delta l_0 = -1$ км – в сторону увеличения, при $\Delta l_0 = +1$ км – в сторону уменьшения), достигая уже на 5 км погрешности несколько большей +15 % (график 4) и -10 % (график 5 рис. 4*в*). Примерно в том же месте расчетного профиля осложненные значения $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$ так же отклоняются от неосложненных, однако эти отклонения не превышают ±3 % (графики 5 и 4 рис. 3*в*), что заведомо лучше требуемой точности стандартных полевых электроразведочных измерений.

Следовательно, даже отягощенные значительными ошибками параметра l_0 кривые $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$ можно использовать для изучения геоэлектрического разреза как по вертикали, так и по горизонтали, а $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ –

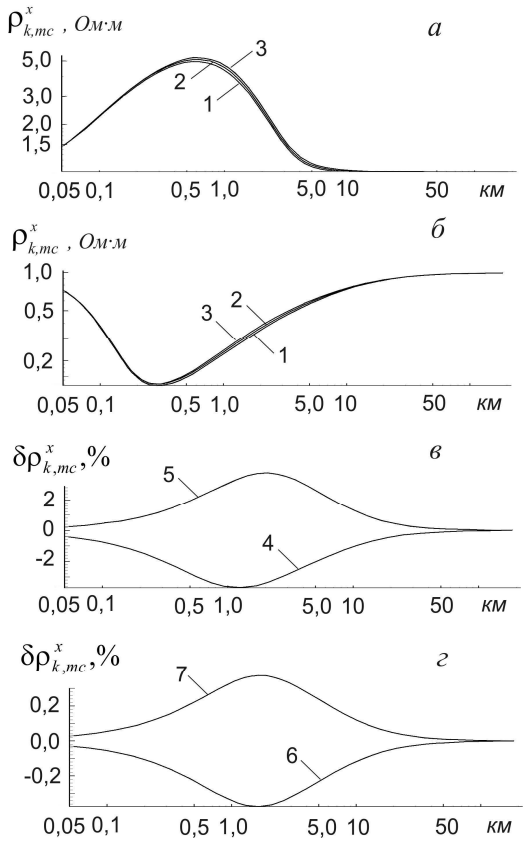

Рис. 3. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибке задания координаты места изменении режимов энергопотребления электровозов ($l_0 \pm \Delta l_0$): *а* – $\rho_2 = 10$ Ом·м; *б* – $\rho_2 = 0{,}1$ Ом·м (1 – при $\Delta l_0 = -1$ км; 2 – при $\Delta l_0 = 0$ км; 3 – при $\Delta l_0 = +1$ км); *в*, *г* – (4 – при $\Delta l_0 = -1$ км; 5 – при $\Delta l_0 = +1$ км; 6 – при $\Delta l_0 = -0{,}1$ км; 7 – при $\Delta l_0 = +0{,}1$ км). Параметры источника БТ и координаты точек расчета: $l_0 \pm \Delta l_0 = (7 \pm \Delta l_0)$ км; $k = 0{,}14$ км$^{-1}$; $L = 20$ км; $x = (0{,}05–183)$ км; $y = 5$ км. Остальные расчетные параметры см. рис. 1

для изучения геоэлектрического разреза по горизонтали, потому что отклонение последних кривых от нормального хода монотонное и, очевидно, не затеняет аномалий от латеральных неоднородностей геологической среды. При реальных погрешностях в l_0 данный вывод становится еще очевиднее (рис. 3г, 4 г), т.к. на практике значения Δl_0 намного меньше километра. Используя, например, любой GPS – навигатор, величину l_0 в большинстве случаев легко определить с точностью не только до сотни, как на рис. 3*г*, 4*г*, но и до одного–трех десятков метров.

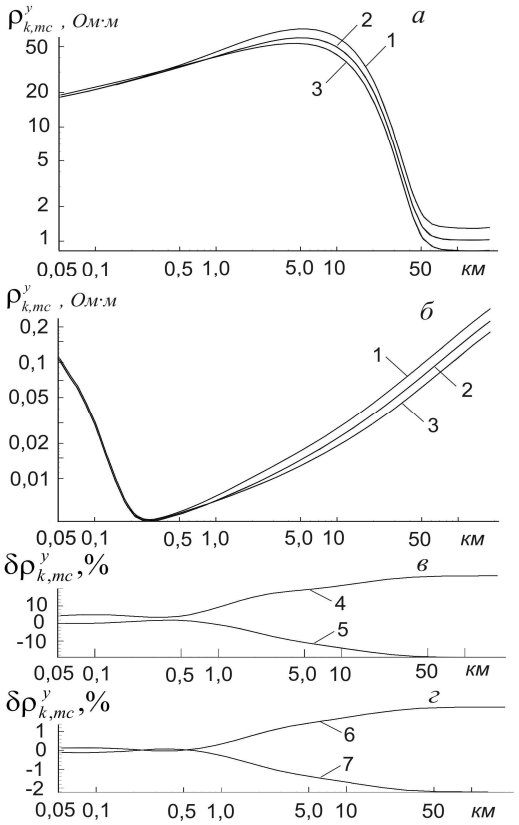

Рис. 4. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибке задания координаты места изменении режимов энергопотребления электровозов ($l_0 \pm \Delta l_0$): *а* – $\rho_2 = 1000$ Ом·м; *б* – ρ_2=0,001 Ом·м; высота подвеса контактного провода – 0,006 км. Остальные расчетные параметры см. рис. 3

Отсюда напрашивается вывод: для того, чтобы все участки профильных распределений $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ можно было интерпретировать количественно, координата l_0 должна определяться (если соблюдены прочие условия) с погрешностями не хуже десятков–первой сотни метров, а $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$ – с погрешностями до нескольких сотен метров, обеспечить которые вполне вероятно.

3. *Кривые* $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ *в случае неточного задания параметра k*

Параметр *k*, как было замечено ранее, равен корню квадратному из отношения погонного сопротивления рельсов ($r_р$) к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($r_п$). Из литературных источников известно (Марквардт, 1965), что погонное сопротивление одного рельсового пути ($r_р$) с учетом стыков и размеров сечения профиля рельсов (*S*) ориентировочно равно 0,0155 (при *S* = 82,9); 0,0195 (при *S* = 65,8); 0,0224 (при *S* = 57,0 см^2) Ом/км, погонное переходное ($r_п$) – колеблется (в зависимости от сезона и состояния железнодорожного полотна) между 0,15 и 100 Ом·км (но при плюсовой температуре не превосходит первые единицы ом-километра). Таким образом, величина *k* может изменяться от 0,0124 до 0,3864 км$^{-1}$. Однако если все измерения производить в одно и то же время года, например, летом и на участке, где состояние дороги нормальное, то интервал возможных значений *k* будет намного уже. Положим его равным 0,07–0,28 км$^{-1}$ (что также значительно шире, чем на магистральных дорогах в реальности), а в качестве наиболее вероятного *k* возьмем число 0,14 км$^{-1}$ (т.е. [0,0195 (Ом/км) /1 (Ом·км)]$^{1/2}$).

Результаты расчетов кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ с $(r_р/r_п)^{1/2} = 0{,}14$ км$^{-1}$ и погрешностями Δk, равными $+2k$, $-k/2$, показаны на рис. 5, 6.

Рассматривая их, видим: неточности значений $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$, даже при абсолютных ошибках, больших или меньших величины *k* в два раза, нигде не превосходят ±10 % (рис. 5*в* графики 5, 4). Кривые же $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ ведут себя иначе. На расстояниях от ЭЖД вплоть до нескольких первых километров их отклонения от нормального хода очень большие (рис. 6) и только далее 3 км становятся меньше 10 %. Но, если Δk снизить до 5–10 %, то интервал пригодных для электроразведки значений $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ будет сильно расширен и охватит все практически значимые участки расчетного профиля. Это подтверждается графиками 6, 7 рис. 6. Оценку параметра *k* с точностью до 5–10 % можно, вероятно, произвести, используя, например, данные измерения магнитных составляющих поля – помех на ближних к ЭЖД пунктах местности (Вишнев, 2007), или, анализируя сведения о степени изношенности рельсов, вещественном составе балласта (гравий, песок, щебенка), погодных условиях проведения полевых работ и т.п.

Таким образом, незнание точной вели-

чины параметра k, также как и незнание точных величин L и l_0, фатального препятствия целесообразности преобразования данных измерения помех от ЭЖД в кривые $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ не представляет.

4. *Кривые* $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ *при различных значениях L и одной и той же величине погрешности* δL % (Δl_0 либо Δk)

Длины секций контактного провода (L) на магистральных электрических железнодорожных ветках варьируют от первых тысяч метров (фидерные зоны узловых станций и электродепо) до нескольких десятков километров (Марквард, 1965),

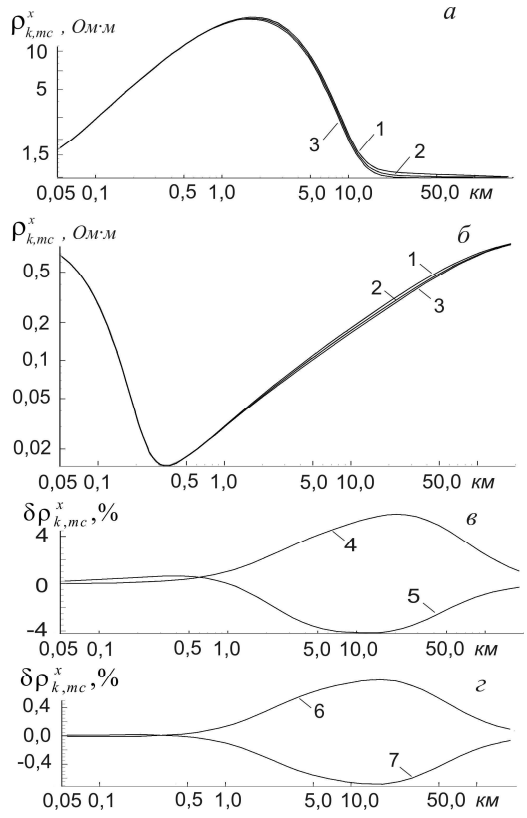

Рис. 5. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^x_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибке задания величины корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k\pm\Delta k$): *б* – (1 – при Δk = -0,07 км$^{-1}$; 2 – при Δk = 0 км$^{-1}$; 3 – при Δk = +0,14 км$^{-1}$); *в*, *г* – (4 – при Δk = -0,07 км$^{-1}$; 5 при Δk = +0,14 км$^{-1}$; 6 – при Δk = -0,014 км$^{-1}$; 7 – при Δk = +0,014 км$^{-1}$.
Параметры источника БТ и координаты точек расчета: l_0 = 8 км; $k \pm \Delta k$ = (0,14 ± Δk) км$^{-1}$; L = 20 км; x = (0,05–183) км; y = 7,5 км. Остальные параметры см. рис. 1

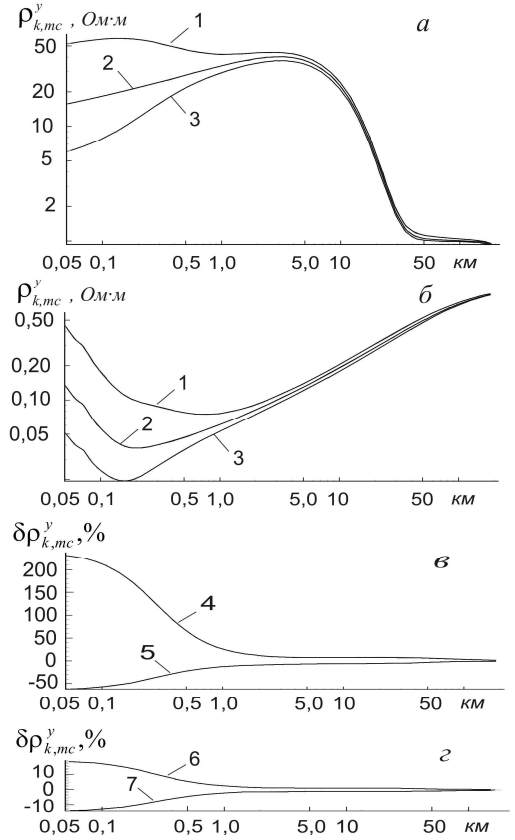

Рис. 6. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^y_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибке задания величины корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k\pm\Delta k$); *а* – ρ_2 = 500 Ом·м. Параметры источника БТ и координаты точек расчета: l_0 = 7 км; высота подвеса контактного провода – 0,006 км; x=(0,05–183) км; y=5 км

поэтому необходимо знать, как действуют погрешности δL % (Δl_0 либо Δk) на ход кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ в случаях больших и малых L.

Из анализа результатов соответствующих расчетов следует:

4.1. Ход графиков погрешностей $\delta\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ при уменьшении или увеличении L (если величины l_0 и y изменяются пропорционально L, а δL % остается прежней) в общих чертах такой же, как на рис. 1*в*, *г*; 2*в*, *г*, однако с ростом L зоны малых ошибок $\rho^y_{k,\partial\tilde{n}}$ расширяются, а с уменьшением – сужаются. Но, даже, когда L = 1 км, δL меньше 2,5 %, в поперечных кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ соответствующие ошибки нигде не превосходят ±1 %, а в продольных – ±7 %. Значит, и в

этом случае кривые $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ и $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ можно интерпретировать количественно.

4.2. Примерно так же ведут себя графики погрешностей $\delta\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$, если неточно задан параметр l_0, а величины l_0, y и Δl_0 изменены во столько же раз, что и L. С увеличением L зоны малых ошибок $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ расширяются, с уменьшением – сужаются, а при $L = 1$ км, $\Delta l_0 = \pm 10$ м – $\delta\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$ нигде не превосходит ±1 %, $\delta\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ – ±5 %.

4.3. То же самое можно сказать и тогда, когда ошибка произошла в задании параметра k, с той лишь разницей, что при $L = 1$ км, $\Delta k = \pm 10$ % – $\delta\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$ нигде не превосходит ±1 %, $\delta\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$ – нигде, кроме первых пяти сотен метров от ЭЖД, не превосходит ±10 %, становясь на удалениях более 1 км значительно ниже ±5 %.

5. *Суммарное воздействие модельных ошибок на кривые* $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$

Из сопоставления рис. 1–6 между собой ясно, что экстремальные искажения распределений $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ погрешностями параметров L, l_0 и k располагаются на различных участках расчетного профиля. Однако с уменьшением L они имеют тенденцию все большего взаимного наложения. Выясним, каковы их максимальные суммарные значения.

Иллюстративный материал, соответствующий случаю, когда заданы ошибки во всех трех параметрах модели источника используемого в МБТ поля, приведен на рис. 7, 8.

Рассматривая их, видим, что, если погрешности L, l_0 и k не превосходят выше упомянутых оптимальных величин, то осложненные кривые $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ практически везде (в пределах точности полевых электроразведочных измерений) совпадают с неосложненными (рис. 7*а*, *б*; 8*а*, *б*). Исключение составляют первые 500 м от ЭЖД и только у составляющей $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$. Однако далее 500 м искажения модельными ошибками $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$, даже при $L = 1$ км, становятся меньше 10, а на расстояниях 1000 метров и дальше – меньше 5 %. Значит, из-за незнания точных величин L, l_0 и k преобразование данных измерения помех от ЭЖД в параметр кажущееся сопротивление не может ухудшить геологическую информативность метода БТ.

6. *Зависимость искажений кривых* $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ *от типа слоистого геоэлектрического разреза при заданной величине* δL % (Δl_0 *либо* Δk)

Изучение всевозможных отклонений осложненных кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ от нормального хода показало, что графики распределения

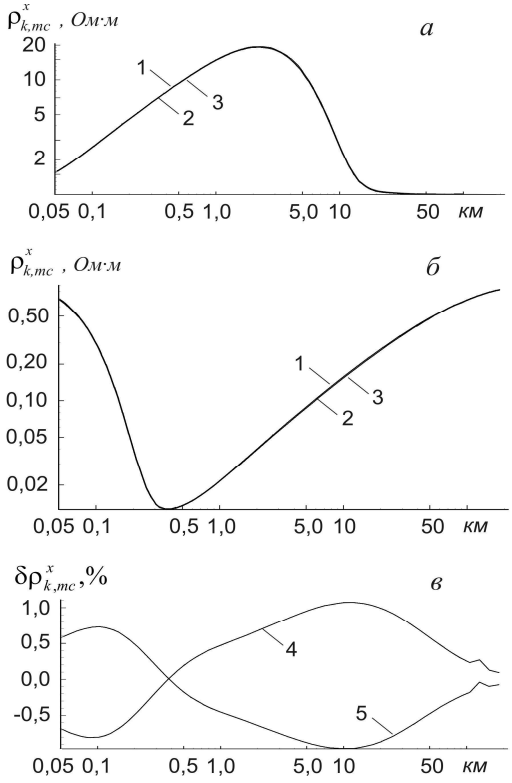

Рис. 7. Особенности хода «поперечных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибках задания длины секции контактного провода ($L \pm \Delta L$), координаты места изменения режимов энергопотребления электровозов ($l_0 \pm \Delta l_0$) и корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k \pm \Delta k$): *б* – (1 – при $\Delta L = +25$ м; $\Delta l_0 = -25$ м и $\Delta k = -0{,}014$ км$^{-1}$; 2 – при $\Delta L = 0$ км; $\Delta l_0 = 0$ м и $\Delta k = 0$ км$^{-1}$; 3 – при $\Delta L = -25$ м; $\Delta l_0 = +25$ м и $\Delta k = +0{,}014$ км$^{-1}$); *в* – графики относительных погрешностей значений $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}$ (4 – при $\Delta L = +25$ м; $\Delta l_0 = -25$ м и $\Delta k = -0{,}014$ км$^{-1}$; 5 – при $\Delta L = -25$ м; $\Delta l_0 = +25$ м и $\Delta k = +0{,}014$ км$^{-1}$).
Параметры источника БТ и координаты точек расчета: $l_0 \pm \Delta l_0 = (0{,}4 \pm \Delta l_0)$ км; $k \pm \Delta k = (0{,}14 \pm \Delta k)$ км$^{-1}$; $L \pm \Delta L = (1{,}0 \pm \Delta L)$ км; $x = (0{,}05–183)$ км; $y = 0{,}25$ км.
Остальные расчетные параметры см. рис. 1

относительных ошибок $\delta\rho$ % при одних и тех же условиях возбуждения (т.е. одних и тех же L, l_0, k, δL % (либо Δl_0, Δk)) различных горизонтально-однородных геологических сред в мельчайших подробностях совпадают. Иначе говоря, являются одинаковыми как, например, для разрезов типа «*K*», так и для разрезов типа «*H*», «*A*» или «*Q*». Это позволило распределения 4 (5) для кривых 1 (3) разрезов типа «*K*» и «*H*» изобразить на рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 в совмещенном виде. То же относится и к графикам 6, 7 этих рисунков, т.к. искажения кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$, возникающие за счет погрешности δL % (Δl_0 либо Δk), от типа слоистого геоэлектрического разреза не зависят.

Заключение

Подводя итоги, необходимо отметить:

1. Неточности параметров модели источника полезного сигнала, выделяемого из импульсных помех от ЭЖД, действуют на кривые $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ и $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ неодинаково. Наиболее сильное влияние они оказывают на профильные распределения величины $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$.

2. Ошибками параметра k искажаются, в основном, левые ветви $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ и правые части второй (от ЭЖД) трети профиля $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$, а ошибками в L и l_0 – правые ветви $\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$ и, соответственно, левые и средние части аналогичной трети профиля $\rho^{x}_{k,\partial\tilde{n}}(x)$.

3. Для получения практически значимых кривых $\rho^{ij}_{k,\partial\tilde{n}}$ достаточно обеспечить: задание длины секции контактного провода (L) с погрешностью до нескольких единиц процентов, задание координаты места изменения тяговой нагрузки электровозов (l_0) – с погрешностью до нескольких десятков–первых сотен метров, задание параметра k – с погрешностью до десяти процентов.

4. Выявленные требования к точности величин L, l_0 и k довольно мягки и в благоприятных случаях постановки метода БТ вполне выполнимы.

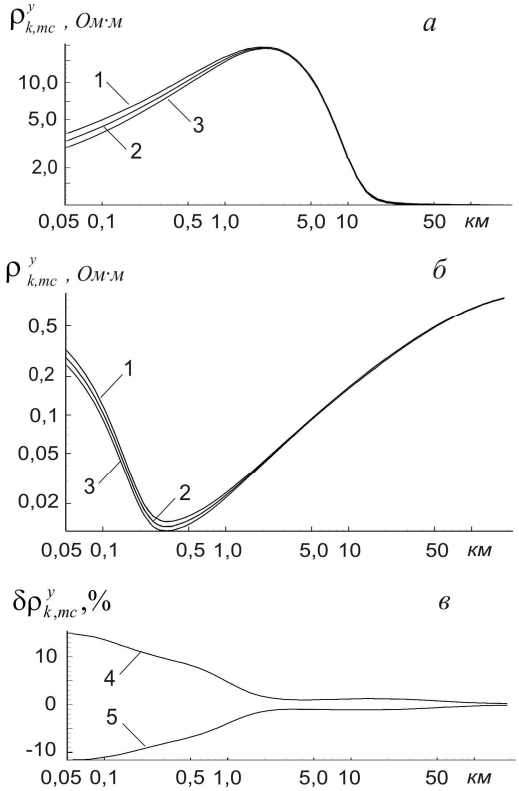

Рис. 8. Особенности хода «продольных» кривых кажущегося сопротивления ($\rho^{y}_{k,\partial\tilde{n}}$) при ошибках задания длины секции контактного провода ($L\pm\Delta L$), координаты места изменения режимов энергопотребления электровозов ($l_0\pm\Delta l_0$) и корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k\pm\Delta k$); высота подвеса контактного провода – 0,006 км. Остальные расчетные параметры см. рис. 7

Автор выражает благодарность аспиранту Горшкову В.Ю. за помощь по организации расчетов на двухядерном компьютере.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований по УрО РАН (№ 09-Т-5-1024).

Литература

Вишнев В.С. Об использовании поля тяговой сети электрической железной дороги для электрозондирования // Электрометрические исследования на Урале. Свердловск, 1989. С. 2–27. – Рукопись деп. в ВИНИТИ № 4380–89.

Вишнев В.С. Некоторые характеристики техногенного электромагнитного импульсного поля тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. 2003. № 5. С. 16–23.

Вишнев В.С. Результаты математического моделирования электроразведочного сигнала, выделяемого из импульсных помех от тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. 2007. № 2, 3 (11, 12). С. 35–47.

Вишнев В.С. Определение кажущегося сопротивления слоистой среды в методе блуждающих токов // Уральский геофизический вестник. 2010. № 1. С. 10–16.

Марквардт К.Г. Энергосбережение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965. 464 с.