

значення шести реалізацій АЧХ середовища під будівельним майданчиком і побудована їх обвідна (рис. 4).

Обвідна амплітудної частотної характеристики середовища під будівельним майданчиком в м. Одесі, вул. Французький бульвар 60/1 була використана для моделювання впливу локальних ґрунтових умов при

побудові розрахункових акселерограм, необхідних для врахування потенційно можливих сейсмічних впливів (динамічних) при проектуванні сейсмостійкої 24-поверхової будівлі оздоровчого комплексу з апартаментами та паркінгом.

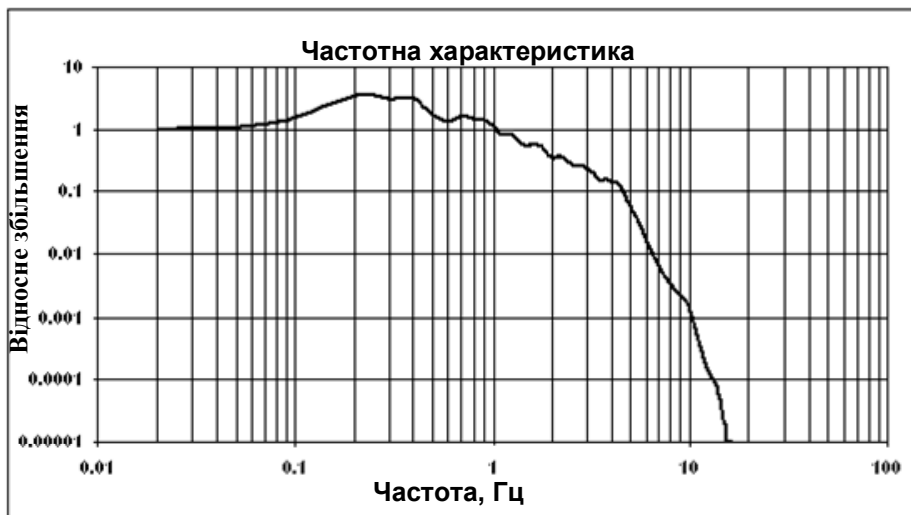


Рис. 4. Обвідна АЧХ середовища, що моделюється вертикально-неоднорідним шаруватим середовищем з поглинанням під будівельним майданчиком в м. Одесі по вул. Французький бульвар, 60/1

Представлена на рис. 4 обвідна АЧХ середовища під будівельним майданчиком, що моделюється вертикально-неоднорідним шаруватим середовищем з поглинанням (див. табл. 1), буде використана при побудові розрахункових акселерограм для проектування сейсмостійкого будинку в м. Одесі по вул. Французький бульвар, 60/1. Наявність частотних характеристик, які максимально адекватно відображають вплив ґрунтової товщі під майбутньою спорудою, дозволяють значно зменшити її вартість шляхом прийняття відповідних проектних заходів з недопущення збігу власної частоти проектованої споруди з частотою максимуму частотної характеристики.

1. Сейсмическое микрорайонирование / Под ред. С.В.Медведева // М., 1977. 2. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / Отв. ред. О.В.Павлов – М., 1988. 3. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. (Part A – IASPEI_Handbook_CD1, Part 2 – IASPEI_Handbook_CD2 and CD3) / Mi-

chael F. Diggles – IASPEI, 2002. 4. Патникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослойных средах. – М., 1973. 5. Крамнин П.И., Чернов Ю.К., Штейнберг В.В. Ускорения колебаний скальных и рыхлых грунтов при сильных землетрясениях. – В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, вып.19. М., 1978. 6. Idriss I.M. and Seed H.B. Seismic Response of Horizontal Soil Layers. – Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No. SM4, July, 1968. – Pp. 1003-1031. 7. Schnabel P.B. Lysmer J. and Seed H.B.. SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. – Report No. UCB. EERC-72/12. University of California, Berkeley. December, 1972 – 102 p. 8. Сейсмическое микрорайонирование (под ред. Павлова О.В. и Рогожина В.А.). – М., 1984. 9. Ishibashi I. Discussion to "Effect of soil plasticity on cyclic response," by M. Vucetic and R. Dobry, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, 1992. – Pp. 830-832. 10. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M. and Tokimatsu K. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 11, 1986. – Pp. 1016-1032. 11. Haskell N.A. The dispersion of surface waves multilayered media. – Bull. Seismol. Soc. America, 1953, 43, N1. 12. Thomson W.T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. – J. Appl. Phys., 950, 21, 89. 13. Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М., 1974.

Надійшла до редколегії 18.12.09

УДК 550.837

М. Рева, канд. фіз.-мат. наук,
В. Онищук, асп., І. Онищук, канд. геол. наук

ПРО ЗАСТОСУВАННЯ ДИПОЛЬНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АНІЗОТРОПНИХ ГЕОЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРІЗІВ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-наук, проф. С.А. Вижвою)

В статті приведений розв'язок задачі про електричне поле диполя в анізотропному середовищі. Показана значно більша чутливість дипольних екваторіальних установок, стосовно фіксації наявності анізотропії, у порівнянні з традиційно використовуваними симетричними установками.

The article brought solution of the problem of electric dipole field in the anisotropic medium. Much greater sensitivity of the dipole equatorial settings is shown, for fixing the availability of anisotropy, in comparison with traditionally used symmetric settings.

В практиці електрометричних досліджень при вивченні зсувних процесів та моніторингу небезпечних геологічних явищ часто використовують кругове електропрофілювання з метою дослідження анізотропії гірських масивів. Це пояснюється тим, що напружено-

деформований стан середовища, безперечно, тісно пов'язаний з його анізотропією. Однак, ця анізотропія може бути слабко вираженою (наприклад, початковий етап розвитку зсуву) і симетричні установки АМNB, які

зазвичай використовують для кругових електропрофілювань, не завжди мають достатню чутливість для фіксації наявності анізотропії. В цьому відношенні дипольні установки, вочевидь, мають значно більші перспективи, хоча вони, практично, для виконання кругових профілювань не застосовуються. В даній роботі представлений розв'язок задачі про електричне поле дипольного джерела в анізотропному півпросторі та наведений розрахунок кругових діаграм для дипольних екваторіальних кругових профілювань і їх порівняльний аналіз з круговими діаграмами традиційно використовуваних симетричних кругових профілювань.

Відомо [1, 3] що потенціал U електричного поля однополярного точкового джерела зі струмом I , розташованого на поверхні однорідного анізотропного півпростору (триосна анізотропія) в системі декартових координат (x, y, z) , координатні напрямки якої співпадають з головними напрямками анізотропії, виражається:

$$U(x, y, z) = \frac{I\sqrt{\rho_x\rho_y\rho_z}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2}}, \quad (1)$$

де ρ_x, ρ_y, ρ_z – питомі електричні опори вздовж головних напрямків анізотропії.

Потенціал електричного поля дипольного джерела U_D визначиться за правилом

$$U_D = -(\vec{d}\vec{l} \cdot \text{grad}U) = -dl \left(\frac{\partial U}{\partial x} \text{Cos}\alpha_l + \frac{\partial U}{\partial y} \text{Cos}\beta_l + \frac{\partial U}{\partial z} \text{Cos}\gamma_l \right), \quad (2)$$

де $\vec{d}\vec{l}$ – лінійний векторний елемент диполя: $\vec{d}\vec{l} = dl \cdot \vec{d}\vec{l}^0$; $dl = AB$ – розмір живильного диполя AB ; $\vec{d}\vec{l}^0 = \text{Cos}\alpha_l \vec{i} + \text{Cos}\beta_l \vec{j} + \text{Cos}\gamma_l \vec{k}$ – орт лінійного векторного елементу $\vec{d}\vec{l}$ (напрямку моменту диполя); $\text{Cos}\alpha_l, \text{Cos}\beta_l, \text{Cos}\gamma_l$ – направляючі косинуси вектора $\vec{d}\vec{l}$; U – потенціал електричного поля однополярного точкового джерела (ф.1). В результаті маємо:

$$U_D = \frac{I\sqrt{\rho_x\rho_y\rho_z}}{2\pi} \cdot \frac{\rho_x x \cdot \text{Cos}\alpha_l + \rho_y y \cdot \text{Cos}\beta_l + \rho_z z \cdot \text{Cos}\gamma_l}{[\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2]^{3/2}}, \quad (3)$$

На практиці, зазвичай, розглядається двохосна анізотропія, спричинена мікросхаруватістю осадової товщі, мікросланцюватістю чи мікротріщинуватістю гірських масивів, або ж направленою дією на них тиску. Припустимо, тепер, що ми маємо двохосно-анізотропний півпростір з кутом падіння шаруватої пачки θ (рис. 1). Просторова система координат вибирається таким чином, що вісь x спрямована на поверхні землі вздовж простягання анізотропного півпростору, вісь y – по падінню, вісь z – перпендикулярно шаруватості (рис. 1).

Тоді для такого двохосно-анізотропного півпростору $\rho_x = \rho_y = \rho_t$ – є тангенціальний питомий опір (опір в напрямку вздовж нашарування), а $\rho_z = \rho_n$ – нормальний питомий опір (опір в напрямку, перпендикулярному нашаруванню), і співвідношення (3) в просторовій системі координат (x, y, z) набуде вигляду:

$$U_D = \frac{I_0 \rho_m}{2\pi} \cdot \frac{x \cdot \text{Cos}\alpha_l + y \cdot \text{Cos}\beta_l + \lambda^2 z \cdot \text{Cos}\gamma_l}{[x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2]^{3/2}}, \quad (4)$$

де $\rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_t}$ – середньоквадратичний питомий опір, $\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t}$ – коефіцієнт анізотропії двохосно-анізотропного середовища.

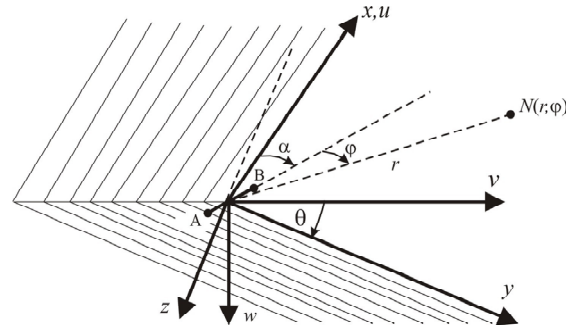


Рис. 1. Модель двохосно-анізотропного півпростору р з просторовою та поверхневою системами координат

У співвідношенні (4) перейдемо до поверхневих декартових координат u і v , в яких напрямком u співпадає з напрямком простягання анізотропного півпростору, тобто з напрямком x просторової системи координат, а напрямком v зорієнтований поперек простягання анізотропної пачки (рис. 1). Для цього скористаємося очевидними замінами: $x=u$; $y=v \cdot \text{Cos}\theta$; $z=v \cdot \text{Sin}\theta$. В результаті співвідношення (4) у поверхневій системі координат запишеться:

$$U_D = \frac{I_0 \rho_m}{2\pi} \cdot \frac{u \text{Cos}\alpha_l + v (\text{Cos}\beta_l \text{Cos}\theta - \lambda^2 \text{Sin}\theta \text{Cos}\gamma_l)}{[u^2 + v^2 (\text{Cos}^2\theta + \lambda^2 \text{Sin}^2\theta)]^{3/2}} \quad (5)$$

В подальшому задача полягає у визначенні направляючих косинусів $\text{Cos}\beta_l$ та $\text{Cos}\gamma_l$ через кут $\alpha = \alpha_l$ (кут між віссю диполя AB і напрямком простягання u анізотропної товщі) і кут падіння θ анізотропного середовища відносно поверхні землі. Для цього введемо в розгляд додаткову просторову систему координат (u, v, w) , де вісь w ортогональна денній поверхні (рис. 1). В даній системі координат орт моменту диполя виразиться:

$$\vec{d}\vec{l}^0 = \text{Cos}\alpha \vec{e}_u + \text{Sin}\alpha \vec{e}_v \quad (6)$$

де \vec{e}_u і \vec{e}_v – орти координатних напрямків u і v . Відповідно, орти координатних напрямків z і y просторової системи координат (x, y, z) в системі координат (u, v, w) виразяться:

$$\vec{e}_z = \text{Cos}(\theta + \pi/2) \vec{e}_v + \text{Cos}\theta \vec{e}_w = -\text{Sin}\theta \vec{e}_v + \text{Cos}\theta \vec{e}_w \quad (7)$$

$$\vec{e}_y = \text{Cos}\theta \vec{e}_v + \text{Cos}(\pi/2 - \theta) \vec{e}_w = \text{Cos}\theta \vec{e}_v + \text{Sin}\theta \vec{e}_w \quad (8)$$

Використавши (6-8), визначимо $\text{Cos}\beta_l$ і $\text{Cos}\gamma_l$:

$$\text{Cos}\beta_l = (\vec{e}_y \cdot \vec{d}\vec{l}^0) = \text{Cos}\theta \cdot \text{Sin}\alpha, \quad (9)$$

$$\text{Cos}\gamma_l = (\vec{e}_z \cdot \vec{d}\vec{l}^0) = -\text{Sin}\theta \cdot \text{Sin}\alpha \quad (10)$$

Підставивши (9) і (10) у (5), отримаємо в точках денної поверхні значення потенціалу U_D електричного поля дипольного джерела, заземленого на поверхні двохосно-анізотропного середовища, у вигляді:

$$U_D = \frac{I_0 \rho_m}{2\pi} \cdot \frac{u \text{Cos}\alpha + v \text{Sin}\alpha (1 + \lambda_{\Pi}^2)}{[u^2 + v^2 (1 + \lambda_{\Pi}^2)]^{3/2}}, \quad (11)$$

де $\lambda_{\Pi} = \sqrt{\lambda^2 - 1} \cdot \text{Sin}\theta$ – коефіцієнт "позірної анізотропії".

Виразимо поверхневі координати u і v точки N , в якій визначається потенціал, в полярній системі координат (r, φ) , прив'язаній до орієнтованого дипольного джерела AB (рис. 1):

$$u = r \text{Cos}(\alpha + \varphi); \quad v = r \text{Sin}(\alpha + \varphi), \quad (12)$$

де φ – кут між радіусом-вектором r на точку N , в якій визначається потенціал електричного поля, і віссю дипольного джерела (полярний кут установки). Підставивши (12) в (11), маємо наступне співвідношення для потенціалу електричного поля в полярній системі координат:

$$U_D = \frac{I_0 \rho_m}{2\pi r^2} \cdot \frac{\text{Cos}\varphi + \lambda_{\Pi}^2 \text{Sin}\alpha \text{Sin}(\alpha + \varphi)}{[1 + \lambda_{\Pi}^2 \text{Sin}^2(\alpha + \varphi)]^{3/2}}. \quad (13)$$

Знаючи потенціал електричного поля дипольного джерела, розташованого на поверхні двохосно-анізотропного півпростору, визначимо радіальну E_r та азимутальну E_φ компоненти вектора напруженості електричного поля:

$$E_r = -\frac{\partial U_D}{\partial r} = \frac{I_0 \rho_m}{\pi r^3} \cdot \frac{\cos \varphi + \lambda_{\pi}^2 \sin \alpha \sin(\alpha + \varphi)}{\left[1 + \lambda_{\pi}^2 \sin^2(\alpha + \varphi)\right]^{3/2}}, \quad (14)$$

$$E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial U_D}{\partial \varphi} = \frac{I_0 \rho_m}{2\pi r^3} \cdot \frac{F_1(\alpha, \varphi) + F_2(\alpha, \varphi)}{\left[1 + \lambda_{\pi}^2 \sin^2(\alpha + \varphi)\right]^{5/2}}, \quad (15)$$

де

$$F_1(\alpha, \varphi) = \left[\sin \varphi - \lambda_{\pi}^2 \sin \alpha \cos(\alpha + \varphi) \right] \cdot \left[1 + \lambda_{\pi}^2 \sin^2(\alpha + \varphi) \right],$$

$$F_2(\alpha, \varphi) = 3\lambda_{\pi}^2 \sin(\alpha + \varphi) \cos(\alpha + \varphi) \left[\cos \varphi + \lambda_{\pi}^2 \sin \alpha \sin(\alpha + \varphi) \right].$$

При практичному застосуванні дипольних установок в методах опору найбільш технологічними і вживаними із них є дипольна осьова та дипольна екваторіальна градієнт-установки. Підставивши в (14) і (15) значення азимутального кута для осьової установки $\varphi=0$, а для екваторіальної установки $\varphi=\pi/2$, отримаємо осьову E_{oc} та екваторіальну $E_{екв}$ складові напруженості поля у вигляді:

$$E_{oc} = \frac{I_0 \rho_m}{\pi r^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_{\pi}^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (16)$$

$$E_{екв} = \frac{I_0 \rho_m}{2\pi r^3} \cdot \frac{1 + \lambda_{\pi}^2 - 2\lambda_{\pi}^4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{\left[1 + \lambda_{\pi}^2 \cos^2 \alpha\right]^{5/2}}. \quad (17)$$

Для визначення позірних опорів, вимірюваних осьовою та екваторіальною установками, необхідно прономувати співвідношення (16) і (17) по нормальних значеннях напруженостей осьової $E_{oc,0}$ та екваторіальної $E_{екв,0}$ компонент (під нормальними значеннями розуміємо напруженості поля дипольного джерела в однорідному півпросторі з питомим опором $\rho_0=1$ Ом·м). Для осьової та екваторіальної компонент електричного поля дипольного джерела їх нормальні значення виражаються:

$$E_{oc,0} = \frac{I_0 \rho_0}{\pi r^3}; \quad E_{екв,0} = \frac{I_0 \rho_0}{2\pi r^3}. \quad (18)$$

Отже, поділивши (16) і (17) на відповідні норми (18), врахувавши при цьому, що $\rho_0=1$ Ом·м, отримаємо співвідношення, які виражають собою залежність позірних опорів, вимірних осьовою ($\rho_{П,oc}$) та екваторіальною ($\rho_{П,екв}$) установками, від кута α :

$$\rho_{П,oc}(\alpha) = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + \lambda_{\pi}^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (19)$$

$$\rho_{П,екв}(\alpha) = \rho_m \cdot \frac{1 + \lambda_{\pi}^2 - 2\lambda_{\pi}^4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{\left[1 + \lambda_{\pi}^2 \cos^2 \alpha\right]^{5/2}}. \quad (20)$$

Фактично вирази (19) і (20) представляють собою рівняння кругових діаграм позірних опорів, вимірних на поверхні двохосно-анізотропного півпростору дипольними осьовою (19) та екваторіальною (20) установками. Кругові діаграми виражені як функції кута α – кута між напрямком простягання анізотропної пачки та напрямком вісі дипольного джерела (рис. 1).

Для екваторіальної установки кругову діаграму можна також виразити як функцію кута $\psi = \alpha + \pi/2$ – кута між напрямком простягання анізотропної товщі та напрямком лінії екуатора дипольної установки (рис. 2). Тоді

рівняння (19) для позірного опору у вигляді функціональної залежності від кута ψ запишеться у вигляді:

$$\rho_{П,екв}(\psi) = \rho_m \cdot \frac{1 + \lambda_{\pi}^2 - 2\lambda_{\pi}^4 \sin^2 \psi \cos^2 \psi}{\left[1 + \lambda_{\pi}^2 \sin^2 \psi\right]^{5/2}}. \quad (21)$$

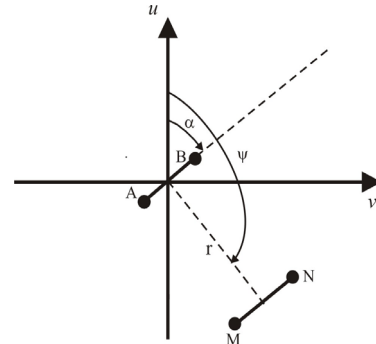


Рис. 2. Дипольна екваторіальна установка в системі поверхневих і полярних координат

Аналіз кругової діаграми (19) для осьової дипольної установки свідчить про те, що вона є тотожною круговій діаграмі, яку отримують традиційно використовуюваною симетричною чотириелектродною установкою AMNB [1-3]: Ця діаграма представляє собою еліпс, велика піввісь а якого спрямована вздовж простягання анізотропної товщі і кількісно дорівнює її середньоквадратичному опору ($a=\rho_m$), а мала піввісь b зорієнтована поперек простягання і кількісно дорівнює: $b = \rho_m / \sqrt{1 + \lambda_{\pi}^2}$.

Кругова діаграма для екваторіальної установки (вирази 19 і 21) описується дещо більш складним співвідношенням. Нами була розрахована низка діаграм дипольного екваторіального (ДЕКП) та симетричного (СКП) кругових профілювань для різних значень коефіцієнта "позірної анізотропії" (різних значень коефіцієнта дійсної анізотропії λ і кута падіння анізотропної товщі θ). Результати деяких розрахунків у порівнянні з круговими діаграмами для установок радіального типу представлені наведеному нижче рис. 3.

На наведеному рисунку суцільною лінією зображені кругові діаграми симетричного кругового профілювання (СКП), пунктирною – дипольного екваторіального кругового профілювання (ДЕКП) у функціональній залежності від кута α , лінією з кружками – кругові діаграми ДЕКП у функціональній залежності від кута ψ . Останні являють собою ті ж самі кругові діаграми, що і в функціональній залежності від кута α , але з ортогональною до них орієнтацією (повернені на кут $\pi/2$).

Порівняльний аналіз кругових діаграм СКП і ДКП свідчить про те, що кругові діаграми ДЕКП фіксують значно суттєвіші варіації позірного опору в залежності від орієнтації установок. В цілому виконані розрахунки дипольного екваторіального кругового профілювання (ДЕКП) для різних параметрів анізотропії та порівняння їх із діаграмами звичайних симетричних кругових профілювань (СКП), приводять до наступних висновків:

1. Витягнута вісь кругової діаграми ДЕКП, побудованої в функції кута α (кута між напрямком простягання анізотропного середовища та напрямком живильного і приймального диполів) спрямована поперек простягання анізотропної товщі, на відміну від симетричного кругового профілювання (СКП), де вона співпадає з напрямком простягання, що створює певний "парадокс анізотропії". В той же час витягнута вісь кругової діаграми позірного опору, побудованої в функції кута ψ (кута між напрямком простягання та екваторіальною лінією дипольної установки), спрямована в напрямку простягання анізотропного

півпростору, тобто так само, як і при симетричному чи дипольному осьовому круговому профілюванні.

2. Чутливість дипольних екваторіальних кругових профілювань відносно фіксації наявності анізотропії значно вища від симетричних кругових профілювань. Ця обставина, а також з урахуванням того, що глибинність досліджень дипольних екваторіальних установок

така ж, як і симетричних, надає дипольним екваторіальним круговим профілюванням суттєві переваги при вивченні напружено-деформованого стану гірських масивів в процесі моніторингу небезпечних геологічних процесів. Ці переваги, безперечно, повинні бути використані в практиці експериментальних досліджень.

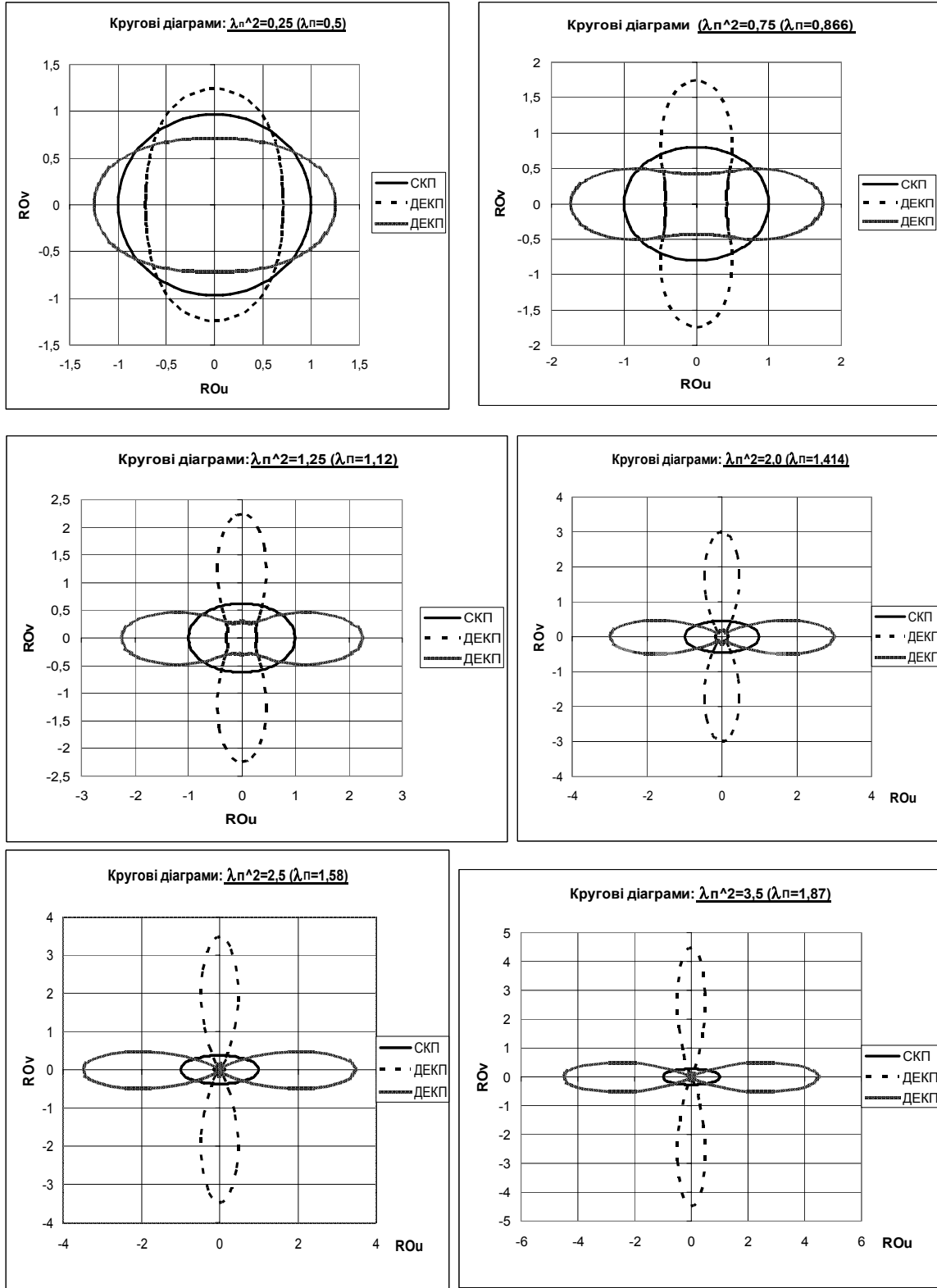


Рис. 3. Приклади діаграм дипольних екваторіальних кругових профілювань у порівнянні із діаграмами симетричних кругових профілювань при різних значеннях коефіцієнта "позірної анізотропії"

1. Бурсиан В.Р. Теория электромагнитных полей применяемых в электроразведке. – Л. 1972. 2. Рева Н.В. Об исследовании анизотропных геоэлектрических разрезов дипольными установками. // Мат. по

геологии, гидрогеологии, геохимии и геофизике Украины и РСФСР, 1977. – Вып. 13. 3. Хмельевской В.К. Электроразведка. – М., 1984.