

Rafał WIŚNIEWSKI, Stanisław STRYCZEK
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WYBRANE ASPEKTY PROJEKTOWANIA TRAJEKTORII OSI OTWORÓW KIERUNKOWYCH WIERCONYCH Z PODZIEMNYCH WYROBISK GÓRNICZYCH

Streszczenie. Dla potrzeb górnictwa podziemnego częściej wykorzystuje się otwory kierunkowe wykonywane z podziemnych wyrobisk górniczych. Skuteczność aplikacji tej technologii uwarunkowana jest poprawnością zaprojektowania i odwiercenia trajektorii otworu. Przebieg osi otworu kierunkowego jest pochodną takich czynników, jak: warunki geologiczne i hydrogeologiczne, geometria wyrobisk górniczych, obecność i wielkość filarów ochronnych, istniejąca infrastruktura napowierzchniowa i podpowierzchniowa oraz techniczne i technologiczne możliwości wykonania otworu. Na podstawie przyjętych danych projektowych podejmuje się decyzję o rodzaju przestrzennego przebiegu trajektorii otworu kierunkowego. W artykule zaproponowano klasyfikację otworów kierunkowych oraz przedstawiono opracowane na Wydziale Wiertnictwa, Nafty Gazu AGH zasady wyznaczania współrzędnych przestrzennych trajektorii otworu kierunkowego projektowanej zarówno w przestrzeni dwu- jak i trójwymiarowej. W celu realizacji tego zagadnienia opisano profile osi otworów wiertniczych, stosowane w praktyce inżynierskiej oraz podano podstawy matematyczne, umożliwiające wielowariantowe wyznaczanie wielkości charakteryzujących odcinki prosto- i krzywoliniowe projektowanych trajektorii.

SELECTED ASPECTS OF DESIGNING TRAJECTORIES OF HDD WELLS DRILLED IN UNDERGROUND WORKINGS

Summary. The trajectory of a directional well is a derivative of such factors as: geologic and hydrogeologic conditions, morphology, existing surface and underground infrastructure, as well as technical and technological feasibility. Basing on the assumed design data, a decision can be made as to the type of spatial trajectory of a directional well. The paper presents principles of determining spatial coefficients of directional well's trajectories for 2D and 3D spaces, worked out at the Faculty of Drilling, Oil and Gas, AGH-UST. Accordingly, profiles of drilling wells used in the engineering practice as well as mathematical bases for multivariant determining parameters characterizing rectilinear and curvilinear trajectories, were presented. The proposed methods are recommended to be used for engineering applications.

1. Wprowadzenie

Rozwój wiedzy w obszarze mechaniki, inżynierii materiałowej, elektroniki, automatyki, informatyki i telekomunikacji umożliwia tworzenie i aplikację nowych rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi wierzących, sprzętu i osprzętu wiertniczego, systemów pomiarowych i sterujących procesem wiercenia. Wzrost możliwości technicznych wpływa na rozwój nowych technologii wiercenia, pozwalających na wykonywanie przestrzennie zorientowanych trajektorii osi otworów wiertniczych. Możliwość odwiercenia otworu według ściśle zaplanowanego przestrzennego przebiegu staje się szczególnie atrakcyjna w przypadku konieczności wykonywania wierceń z podziemnych wyrobisk górniczych.

2. Podział otworów kierunkowych wykonywanych z podziemnych wyrobisk górniczych

W zależności od przyjętego kryterium oceny można przedstawić różne sposoby podziału otworów kierunkowych wykonywanych z podziemnych wyrobisk górniczych. Niezależnie od przeznaczenia otworów wiertniczych kategoriami klasyfikacyjnymi mogą być: możliwości kierowania i kontroli trajektorii osi otworu, przyjęte kierunki i płaszczyzny odniesienia przebiegu osi otworu kierunkowego, profile trajektorii, wielkość promieni krzywizny odcinków krzywoliniowych, rozmieszczenie i geometria otworów, wielkość docelowej średnicy otworu kierunkowego oraz rodzaj punktu docelowego.

Analizując sposób kierowania i kontroli trajektorii osi otworu, wyróżnia się otwory kierunkowe:

- bez możliwości sterowania przebiegiem osi otworu (niesterowalne);
- z możliwością sterowania trajektorią otworu (sterowalne).

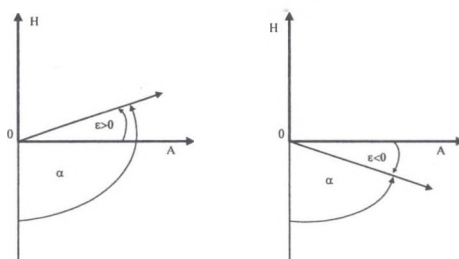
Otwory kierunkowe niesterowalne w założeniu techniczno-technologicznym umożliwiają wykonywanie jedynie prostoliniowych instalacji. Ze względu jednak na zmienne warunki geologiczne odwiercana trajektoria może zbiec z wyznaczonego dla niej kierunku. W takim przypadku, stosując technologię bez możliwości sterowania trajektorią osi otworu, powrót do pierwotnego kierunku nie jest już możliwy.

Otwory kierunkowe sterowalne to odwiercane wyrobiska górnicze, w których przewiduje się możliwość rejestracji i zmiany przebiegu osi wykonywanego otworu. W tym celu stosuje się różne systemy kontrolno – pomiarowe, umożliwiające śledzenie przebiegu osi otworu oraz

pozwalające na odpowiednią orientację stosowanych narzędzi wierzących i odchylających. Podstawą klasyfikacyjną systemów sterowania jest sposób przekazu informacji o przebiegu osi otworu od układu pomiarowego do układu odbiorczego. Do najczęściej stosowanych obecnie rozwiązań techniczno-technologicznych zaliczyć należy systemy: radiowe, kablowe, optyczne oraz płuczkowe.

Rozważając płaszczyzny odniesienia przestrzennego przebiegu trajektorii osi otworu wiertniczego wyróżnić można: otwory kierunkowe o trajektorii odchylonej od pionu oraz otwory kierunkowe poziome. Odniesieniem dla otworów kierunkowych o trajektorii odchylonej od pionu jest kierunek pionowy, a poszczególne odcinki trajektorii osi otworu charakteryzowane są następującymi wielkościami: kątem odchylenia od pionu (α), azymutem (β) oraz głębokością (H). Jako odniesienie dla przebiegu trajektorii poziomych otworów kierunkowych przyjmuje się płaszczyznę poziomą, a wielkościami charakteryzującymi przestrzenne usytuowanie osi otworu są: dodatni lub ujemny kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej (ϵ), azymut (β) oraz głębokość (H). Zależności geometryczne pomiędzy kątami α oraz ϵ przedstawiono na rys. 1, a związek ilościowy opisuje równanie:

$$\epsilon = \alpha - 90^\circ \quad (1)$$



Rys. 1. Zależność pomiędzy kątem odchylenia od pionu (α) a kątem odchylenia od płaszczyzny poziomej (ϵ)

Fig. 1. Deflection angle from vertical (α) vs. deflection angle from horizontal (ϵ)

Analizując przestrzenny przebieg trajektorii osi otworów wiertniczych, otwory kierunkowe dzieli się na: otwory wiercone w jednej płaszczyźnie pionowej oraz otwory, których trajektoria jest przestrzennie zorientowaną krzywą. Otwory kierunkowe wiercone w jednej płaszczyźnie są najczęściej stosowanymi rozwiązaniami. Aplikacyjność tego typu konstrukcji wynika z faktu występowania mniejszych wielkości sił tarcia w porównaniu z otworami wierconymi w przestrzeni R^3 , co w znacznym stopniu pozwala na bezawaryjne wykonanie i orurowanie otworu. W praktyce wiertniczej istnieje jednak często konieczność wykonania trajektorii osi otworu w postaci przestrzennie zorientowanej krzywej. Stosując

wówczas specjalistyczny sprzęt wiertniczy i pomiarowy należy uwzględnić dodatkowe koszty wykonania zarówno poziomego, jak i pionowego otworu kierunkowego.

Rozważając kształt osi otworu kierunkowego wyróżnić można otwory o profilach typu J oraz typu S. Trajektorie osi otworów kierunkowych składają się z odcinków prostoliniowych i krzywoliniowych wykonywanych w różnych konfiguracjach. Otwory typu J nie posiadają w przebiegu trajektorii punktu przegięcia. Otwory typu S to otwory, w których trajektoria charakteryzuje się co najmniej jednym punktem przegięcia.

Biorąc za kryterium wielkość krzywizny odcinków krzywoliniowych otworu kierunkowego wymienić należy otwory o: długim, średnim oraz krótkim promieniu krzywizny [1]. Przyjmując założenie, że w praktyce wiertniczej częściej operuje się pojęciem intensywności przestrzennego skrzywienia (DLS) niż wielkością promienia krzywizny (R) oraz uwzględniając ścisły związek wielkości promienia krzywizny z wielkością intensywności przestrzennego skrzywienia, proponujemy stosowanie następującego podziału krzywoliniowych trajektorii osi otworów kierunkowych:

- Trajektorie o długim promieniu krzywizny i małej intensywności przestrzennego skrzywienia: $R \in (\geq 200 \text{ m}), DLS \in (\leq 9^\circ/30,48 \text{ m})$;
- Trajektorie o średnim promieniu krzywizny i średniej intensywności przestrzennego skrzywienia: $R \in (50 \text{ m} \div 200 \text{ m}), DLS \in (9^\circ/30,48 \text{ m} \div 35^\circ/30,48 \text{ m})$;
- Trajektorie o krótkim promieniu krzywizny i dużej intensywności przestrzennego skrzywienia: $R \in (6 \text{ m} \div 12 \text{ m}), DLS \in (150^\circ/30,48 \text{ m} \div 300^\circ/30,48 \text{ m})$;
- Trajektorie o bardzo krótkim promieniu krzywizny i bardzo dużej intensywności przestrzennego skrzywienia: $R \in (0,3 \text{ m} \div 0,6 \text{ m}), DLS \in (2900^\circ/30,48 \text{ m} \div 5800^\circ/30,48 \text{ m})$.

Jako kryterium podziału otworów kierunkowych można przyjmować również geometrię otworów i ich rozmieszczenie. Rozróżnia się więc otwory pojedyncze i grupowe. Otwory pojedyncze mogą występować w rozwiązaniach konstrukcyjnych z jednym dnem lub wielodennie rozgałęzione. Otwory grupowe to wykonywane z jednego stanowiska w niewielkiej odległości od siebie wiązki otworów jednodennych.

Do kryteriów klasyfikacyjnych otworów kierunkowych zaliczyć należy również kryterium wielkości średnicy kolumny eksploatacyjnej lub średnicy nieoruwanego otworu wiertniczego. Wśród otworów kierunkowych wyróżnia się:

- otwory o małej średnicy: $d_o \leq 100 \text{ mm}$,
- otwory normalnośrednicowe: $100 < d_o \leq 500 \text{ mm}$,
- otwory wielkośrednicowe: $d_o > 500 \text{ mm}$.

Rozważając rodzaj punktu docelowego, otwory kierunkowe należy klasyfikować jako:

- przelotowe,
- ślepe.

Otwory przelotowe to takie, których trajektoria przebiega pomiędzy dwoma wyrobiskami górniczymi. Do ślepych otworów kierunkowych zaliczać należy instalacje rozpoczynające się w wyrobisku górniczym i kończące się w górotworze.

Skuteczność aplikacji otworu kierunkowego uwarunkowana jest poprawnością zaprojektowania i wykonania trajektorii otworu. Projektując przebieg trajektorii otworu wiertniczego, należy wyznaczyć przestrzenne usytuowanie jej punktów charakterystycznych (początek i koniec krzywienia) oraz parametry odcinków prosto- i krzywoliniowych (długość, kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej lub pionowej, azymut, intensywność skrzywienia). Następnie z zadaniem skokiem długości otworu (Δl) powinno się określić współrzędne przestrzenne punktów tworzących oś otworu lub obliczyć wielkości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej (ϵ_L) lub pionowej (α_L) i kąta azymutu (β_L) stycznej do trajektorii w wyznaczanych punktach.

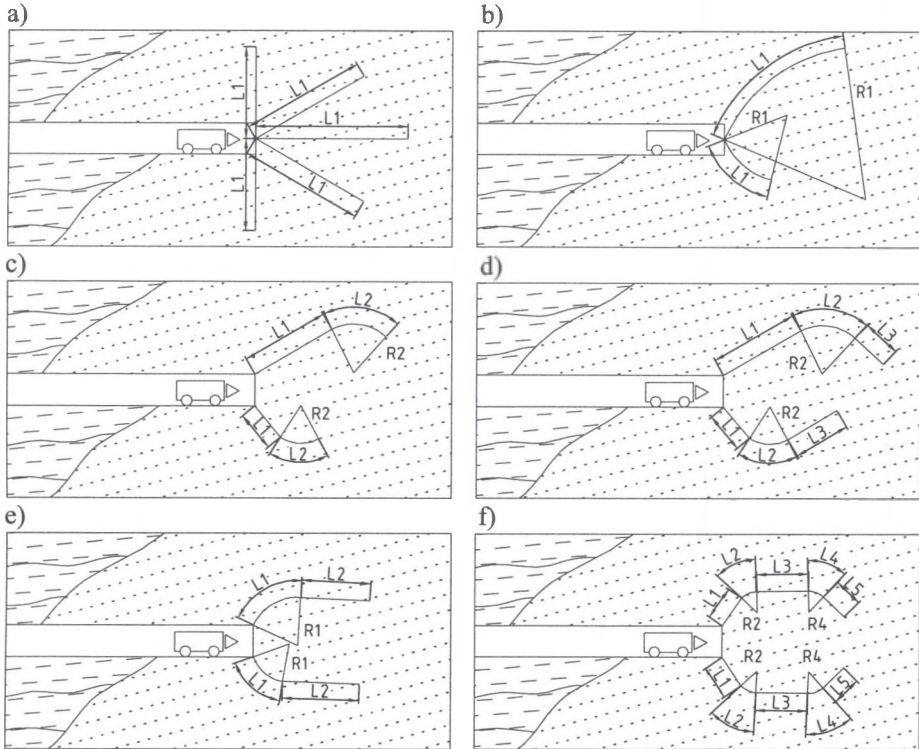
Najczęściej przyjmowanym założeniem projektowym podczas ustalania przebiegu osi otworu kierunkowego wykonywanego z podziemnych wyrobisk górniczych jest wzajemne usytuowanie punktu końcowego względem początkowego. Założenie to wynika z istniejącej i przyjętej do obliczeń geometrii wyrobisk górniczych oraz filarów ochronnych i sprowadza się do apriorycznego ustalenia wartości przemieszczenia pionowego (H) oraz przemieszczenia poziomego (A) punktu końcowego względem punktu początkowego. Ilość i rodzaj dodatkowych danych projektowych (wielkości kątów startowego i docelowego, odległości przejścia: pod, nad, lub obok ewentualnych przeszkód, znajdujących się w górotworze, dopuszczalne wartości promieni krzywizny odcinków krzywoliniowych) oraz przyjęty algorytm obliczeń zależą od typu trajektorii otworu kierunkowego i są pochodną takich czynników, jak: warunki geologiczne i hydrogeologiczne, geometria wyrobisk górniczych, istniejąca podziemna infrastruktura techniczna oraz techniczne i technologiczne możliwości wykonania otworu.

Na podstawie przyjętych danych projektowych podejmuje się decyzję o rodzaju przestrzennego przebiegu otworu kierunkowego. Rozważa się następujące warianty projektowania [2]:

- projektowanie trajektorii w przestrzeni dwuwymiarowej (płaszczyźnie pionowej),
- projektowanie trajektorii w przestrzeni trójwymiarowej.

3. Projektowanie trajektorii otworów kierunkowych w płaszczyźnie pionowej

Przebieg osi otworów kierunkowych wykonywanych z podziemnych wyrobisk górniczych można zaprojektować jako odcinek prostoliniowy (rys 2a), krzywoliniowy o stałym promieniu krzywizny (rys.2b) lub kombinację odcinków prosto- i krzywoliniowych (rys. 2c), (rys.2d), (rys. 2e), (rys.2f).



Rys. 2. Profile osi otworów kierunkowych wykonywanych z podziemnych wyrobisk górniczych, będące kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych; a) odcinek prostoliniowy; b) łuk o stałym promieniu krzywizny; c) odcinek prostoliniowy i łuk o stałym promieniu krzywizny; d) odcinek prostoliniowy, łuk o stałym promieniu krzywizny, odcinek prostoliniowy; e) łuk o stałym promieniu krzywizny, odcinek prostoliniowy i łuk o stałym promieniu krzywizny; f) odcinek prostoliniowy, łuk o stałym promieniu krzywizny, odcinek prostoliniowy, łuk o stałym promieniu krzywizny i odcinek prostoliniowy

Fig. 2. Profiles of directional wells drilled from underground workings, being a combination of straight and curvilinear sections; a) straight section; b) arc of constant radius of curvature; c) straight line and arc of constant angle of curvature; d) straight line, arc of constant angle of curvature, straight line; e) arc of constant angle of curvature, straight section and arc of constant angle of curvature; f) straight section, arc of constant angle of curvature, straight section, arc of constant angle of curvature and straight line

Dla wszystkich trajektorii otworów kierunkowych, będących kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych, wykonywanych w płaszczyźnie pionowej można wyznaczyć zależności ogólne. Wykorzystywane wzory zależne będą od przyjętego układu odniesienia.

Przyjmując za układ odniesienia płaszczyznę poziomą oraz definiując wielkość i znak kąta odchylenia (ε) stycznej do trajektorii osi otworu wiertniczego od płaszczyzny poziomej (rys. 1) ustala się:

- przemieszczenie pionowe punktu końcowego względem punktu początkowego otworu kierunkowego:

$$H = \sum_{j=1}^n H_j \quad (2)$$

- przemieszczenie poziome punktu końcowego względem punktu początkowego otworu kierunkowego:

$$A = \sum_{j=2}^n A_j \quad (3)$$

- długość trajektorii otworu kierunkowego:

$$L = \sum_{j=1}^n L_j \quad (4)$$

W celu określenia przebiegu odcinków krzywoliniowych wyznacza się:

- promień krzywizny:

$$R_j = \frac{180}{\pi \cdot DLS_j} \quad (5)$$

- kąt przestrzennego skrzywienia

$$\delta_j = \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1} \quad \text{dla } \varepsilon_j > \varepsilon_{j-1} \quad (6a)$$

$$\delta_j = \varepsilon_{j-1} - \varepsilon_j \quad \text{dla } \varepsilon_j < \varepsilon_{j-1} \quad (6b)$$

- rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę pionową:

$$H_j = R_j \cdot (\cos \varepsilon_{j-1} - \cos \varepsilon_j) \quad \text{dla } \varepsilon_j > \varepsilon_{j-1} \quad (7a)$$

$$H_j = R_j \cdot (\cos \varepsilon_j - \cos \varepsilon_{j-1}) \quad \text{dla } \varepsilon_j < \varepsilon_{j-1} \quad (7b)$$

- rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę poziomą:

$$A_j = R_j \cdot (\sin \varepsilon_j - \sin \varepsilon_{j-1}) \quad \text{dla } \varepsilon_j > \varepsilon_{j-1} \quad (8a)$$

$$A_j = R_j \cdot (\sin \varepsilon_{j-1} - \sin \varepsilon_j) \quad \text{dla } \varepsilon_j < \varepsilon_{j-1} \quad (8b)$$

- długość odcinka:

$$L_j = \frac{\pi}{180} \cdot \delta_j \cdot R_j \quad (9)$$

Dla odcinków prostoliniowych określa się:

- rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę pionową:

$$H_j = L_j \cdot \sin \varepsilon_j \quad (10)$$

- rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę poziomą:

$$A_j = L_j \cdot \cos \varepsilon_j \quad (11)$$

- długość odcinka:

$$L_j = \sqrt{A_j^2 + H_j^2} \quad (12)$$

Przyjmując za układ odniesienia płaszczyznę pionową oraz definiując wielkość i znak kąta odchylenia od pionu (α) stycznej do trajektorii osi otworu wiertniczego (rys. 1) można wykorzystywać wzory od (2) do (12) uwzględniając w nich zależność (1).

Analizując poszczególne typy profili trajektorii osi otworów kierunkowych wykonywanych z podziemnych wyrobisk górniczych, w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH wyprowadzono dodatkowe zależności matematyczne oraz opracowano algorytmy umożliwiające przeprowadzanie wielowariantowych symulacji przebiegu osi otworu kierunkowego [2].

Mając wyznaczone punkty charakterystyczne $P_j(A_j, H_j)$ dowolnego typu trajektorii osi otworu kierunkowego, wykonywanego w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu, można z zadaniem skokiem długości otworu (Δl) określić współrzędne przestrzenne punktów pośrednich P_L , znajdujących się pomiędzy punktami charakterystycznymi oraz wielkości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej (ε_L) i kąta azymutu (β_L) stycznej do trajektorii w punktach pośrednich.

W tym celu niezbędne jest przyjęcie globalnego lewoskrętnego kartezyjskiego układu współrzędnych w punkcie początkowym otworu oraz orientacja poszczególnych jego osi w kierunkach: OX-geograficznym wschodnim, OY-geograficznym północnym, OZ- pionowym.

Konieczne jest również określenie azymutu płaszczyzny (β), w której przebiegać będzie projektowana trajektoria. Kąt ten jest wielkością stałą dla całej trajektorii ($\beta_L = \beta$).

Wartości kąta od płaszczyzny poziomej (ε_L) stycznej do trajektorii w punkcie pośrednim P_L , znajdującym się pomiędzy punktami charakterystycznymi P_{j-1} oraz P_j w odległości od początku otworu L_L , mierzonej wzdłuż trajektorii, określa się z zależności:

- dla punktu P_L leżącego na odcinku prostoliniowym, ($\varepsilon_j = \varepsilon_{j-1}$):

$$\varepsilon_L = \varepsilon_j \quad (13a)$$

- dla punktu P_L leżącego na odcinku krzywoliniowym, ($\varepsilon_j > \varepsilon_{j-1}$):

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \quad (13b)$$

Współrzędne przestrzenne punktu pośredniego P_L , znajdującego się pomiędzy punktami charakterystycznymi P_{j-1} oraz P_j proponujemy wyznaczać ze wzorów:

- dla punktu P_L leżącego na odcinku prostoliniowym ($\varepsilon_j = \varepsilon_{j-1}$):

$$X_L = \left(\sum_{i=1}^{j-1} A_i + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot \cos \varepsilon_j \right) \cdot \sin \beta \quad (14a)$$

$$Y_L = \left(\sum_{i=1}^{j-1} A_i + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot \cos \varepsilon_j \right) \cdot \cos \beta \quad (15a)$$

$$Z_L = \sum_{i=1}^{j-1} H_i + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot \sin \varepsilon_j \quad (16a)$$

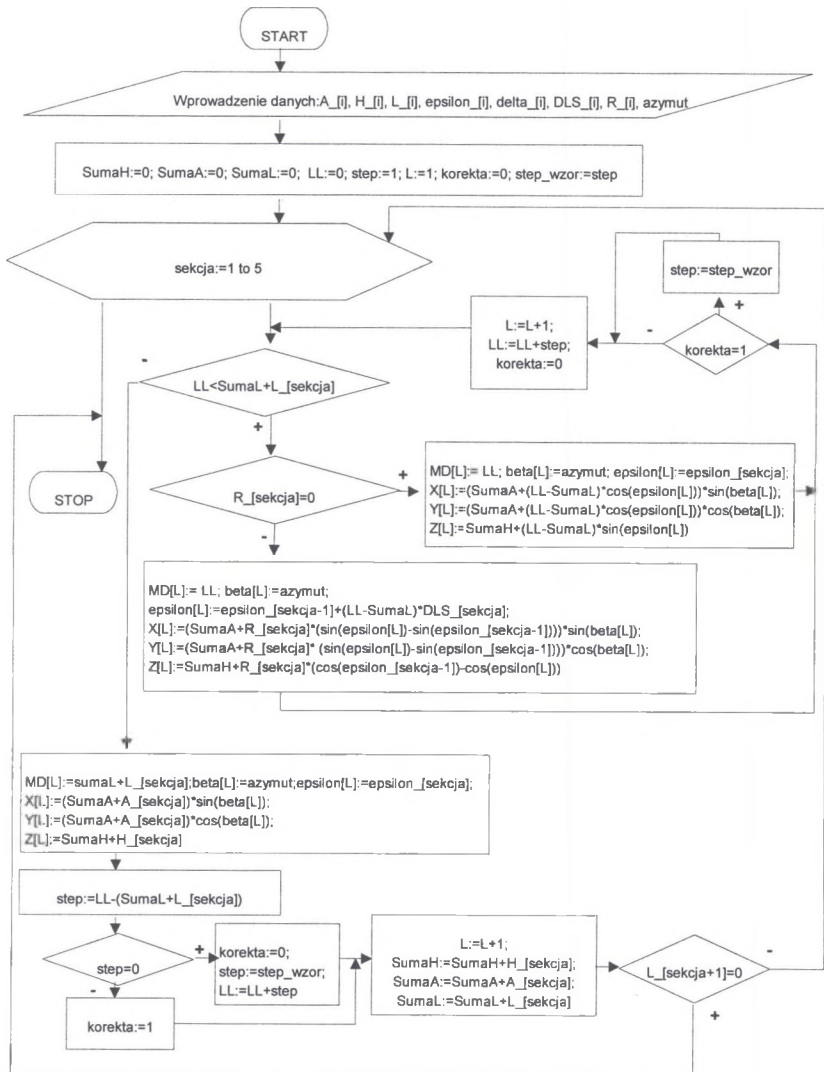
- dla punktu P_L leżącego na odcinku krzywoliniowym, dla którego ($\varepsilon_j > \varepsilon_{j-1}$):

$$X_L = \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} A_i + R_j \cdot \left[\sin \left(\varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \right) - \sin \varepsilon_{j-1} \right] \right\} \cdot \sin \beta \quad (14b)$$

$$Y_L = \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} A_i + R_j \cdot \left[\sin \left(\varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \right) - \sin \varepsilon_{j-1} \right] \right\} \cdot \cos \beta \quad (15b)$$

$$Z_L = \sum_{i=1}^{j-1} H_i + R_j \cdot \left[\cos \varepsilon_{j-1} - \cos \left(\varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \right) \right] \quad (16b)$$

Algorytm obliczania przestrzennych współrzędnych osi otworu wierconego w jednej płaszczyźnie i będącej kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Algorytm obliczania przestrzennych współrzędnych otworu kierunkowego o przebiegu będącym kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych

Fig. 3. Algorithm for spatial coordinates of a directional well having a trajectory consisting of straight and curvilinear sections

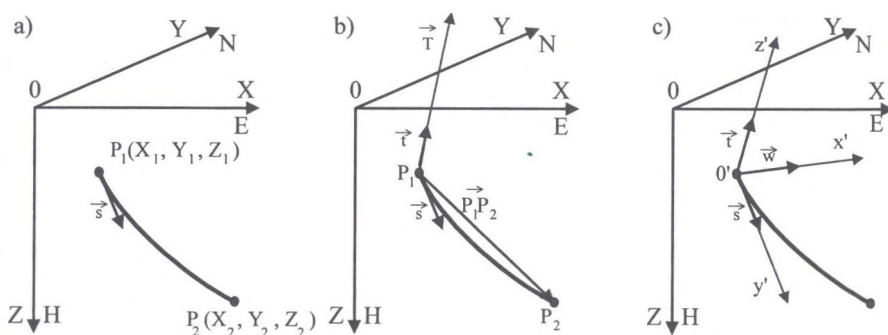
4. Projektowanie trajektorii otworów kierunkowych w przestrzeni R^3

W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano metodykę projektowania trajektorii osi otworu kierunkowego, wykonywanego w przestrzeni trójwymiarowej [2]. Przebieg osi otworu proponuje się projektować jako

złożenie kilku połączonych ze sobą elementów, z których każdy może przebiegać w innej płaszczyźnie. Pojedynczy fragment trajektorii osi otworu kierunkowego, zawartej między dwoma punktami, P_j oraz P_{j+1} , może być odcinkiem prostoliniowym, krzywoliniowym lub ich kombinacją. Płaszczyznę projektową dla tego fragmentu trajektorii wyznacza się przyjmując współrzędne przestrzenne punktów P_j i P_{j+1} oraz wartości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej i azymutu w punkcie początkowym P_j .

W celu wyznaczenia przestrzennego przebiegu elementu trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy dwoma punktami, P_1 oraz P_2 , w proponowanej metodyce należy przyjąć następujące założenia projektowe:

- lokalizację globalnego prawoskrętnego kartezjańskiego układu współrzędnych w punkcie wylotu otworu oraz orientację poszczególnych jego osi w kierunkach: OX-geograficznym wschodnim, OY-geograficznym północnym, OZ- pionowym (rys. 4a);
- określenie w układzie OXYZ współrzędnych punktu początkowego $P_1(x_1, y_1, z_1)$ i końcowego $P_2(x_2, y_2, z_2)$;
- ustalenie wartości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej ε_1 i azymutu β_1 odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego w punkcie początkowym P_1 ;
- ustalenie, że projektowana trajektoria osi otworu przebiegać będzie w płaszczyźnie wyznaczonej przez wektor stycznej do osi otworu w punkcie początkowym P_1 oraz punkt końcowy P_2 , a jej profil będzie łukiem, odcinkiem prostoliniowym lub ich kombinacją.



Rys. 4. Wyznaczanie lokalnego układu współrzędnych: a-orientacja punktów w układzie globalnym OXYZ; b- wyznaczenie wektora \vec{T} prostopadłego do płaszczyzny, w której przebiega odcinek trajektorii osi otworu; c- kreślenie osi lokalnego układu współrzędnych $o'x'y'z'$

Fig. 4. Determining local coordinates system: a-orientation of point in the global system OXYZ; b-determining vector \vec{T} perpendicular to the surface containing the well's trajectory; c- determining axis of local coordinates system $o'x'y'z'$

Aby określić przestrzenne współrzędne projektowanego odcinka trajektorii osi otworu należy zdefiniować lokalny prawoskrętny układ współrzędnych o początku w punkcie P_1 . W tym celu wyznacza się cosinusy kierunkowe wektorów \vec{s} , \vec{t} oraz \vec{w} .

$$\left. \begin{aligned} s_x &= \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 \\ s_y &= \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 \\ s_z &= \sin \varepsilon_1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} t_x &= \frac{(Y_2 - Y_1) \sin \varepsilon_1 - (Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1}{|\vec{T}|} \\ t_y &= \frac{(Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 - (X_2 - X_1) \sin \varepsilon_1}{|\vec{T}|} \\ t_z &= \frac{(X_2 - X_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 - (Y_2 - Y_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1}{|\vec{T}|} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

gdzie:

$$|\vec{T}| = \sqrt{[(Y_2 - Y_1) \sin \varepsilon_1 - (Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1]^2 + [(Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 - (X_2 - X_1) \sin \varepsilon_1]^2 + [(X_2 - X_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 - (Y_2 - Y_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1]^2}$$

$$\left. \begin{aligned} w_x &= s_y t_z - s_z t_y \\ w_y &= s_z t_x - s_x t_z \\ w_z &= s_x t_y - s_y t_x \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

W celu określenia przestrzennego przebiegu odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy punktami P_1 , i P_2 należy:

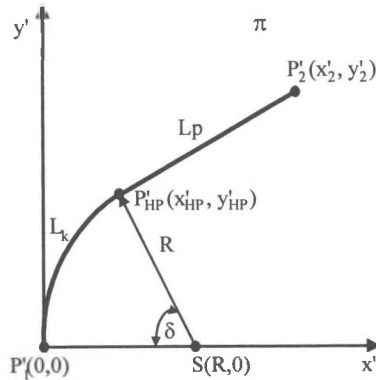
- transponować współrzędne punktów P_1 oraz P_2 z układu globalnego OXYZ do układu lokalnego $o'x'y'z'$;
- wyznaczyć przebieg odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego na płaszczyźnie π określonej przez osie $o'x'$ i $o'y'$;
- transponować współrzędne odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego z układu płaskiego $o'x'y'$ do układu globalnego OXYZ związanej z wylotem otworu.

Transformacja dowolnego punktu z układu OXYZ do układu $o'x'y'z'$ jest złożeniem translacji i obrotu, a jego współrzędne w układzie lokalnym wyznacza się według wzoru:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x & w_y & w_z \\ s_x & s_y & s_z \\ t_x & t_y & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_1 \\ Y - Y_1 \\ Z - Z_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Profil trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy punktem początkowym a docelowym może być łukiem o stałym promieniu krzywizny, odcinkiem prostym lub

dowolną ich kombinacją. Przebieg osi otworu na płaszczyźnie π wyznacza się wykorzystując zależności geometryczne przedstawione na rys. 5.



Rys. 5. Przebieg trajektorii osi otworu kierunkowego składającej się z odcinka krzywoliniowego i prostoliniowego na płaszczyźnie π

Fig. 5. Trajectory of a HDD well's axis consisting of curvilinear and straight sections in plane π

Przyjmując profil elementu osi otworu kierunkowego jako trajektorię leżącą w płaszczyźnie π (rys. 7), składającą się z odcinka krzywoliniowego o stałym promieniu R i odcinka prostoliniowego o znanej długości L_p , można określić:

- wielkość promienia krzywizny:

$$R = \frac{(x'_2)^2 + (y'_2)^2 - L_p^2}{2x'_2} \quad (21)$$

- współrzędne punktu P'_{HP} , wyznaczającego koniec odcinka krzywoliniowego i początek odcinka prostoliniowego:

$$\left. \begin{aligned} x'_{HP} &= R \frac{Rx'_2 + L_p^2 - L_p y'_2}{R^2 + L_p^2} \\ y'_{HP} &= \sqrt{2x'_{HP} R - x'^2_{HP}} \end{aligned} \right\} \text{ dla } y'_2 \geq 0 \quad (22a)$$

$$\left. \begin{aligned} x'_{HP} &= R \frac{Rx'_2 + L_p^2 + L_p y'_2}{R^2 + L_p^2} \\ y'_{HP} &= \sqrt{2x'_{HP} R - x'^2_{HP}} \end{aligned} \right\} \text{ dla } y'_2 < 0 \wedge x'_2 \geq 2R \quad (22b)$$

$$\left. \begin{aligned} x'_{HP} &= R \frac{Rx'_2 + L_p^2 + L_p y'_2}{R^2 + L_p^2} \\ y'_{HP} &= -\sqrt{2x'_{HP} R - x'^2_{HP}} \end{aligned} \right\} \text{ dla } y'_2 < 0 \wedge x'_2 < 2R \quad (22c)$$

– wielkość kąta przestrzennego skrzywienia :

$$\delta = \arctg\left(\frac{y'_{HP}}{R - x'_{HP}}\right) \quad \text{dla warunku } (x'_{HP} < R) \wedge (y'_{HP} \geq 0) \quad (23a)$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} \quad \text{dla warunku } (x'_{HP} = R) \wedge (y'_{HP} > 0) \quad (23b)$$

$$\delta = \pi - \arctg\left(\frac{y'_{HP}}{x'_{HP} - R}\right) \quad \text{dla warunku } (x'_{HP} > R) \wedge (y'_{HP} \geq 0) \quad (23c)$$

$$\delta = \pi + \arctg\left(\frac{|y'_{HP}|}{x'_{HP} - R}\right) \quad \text{dla warunku } (x'_{HP} > R) \wedge (y'_{HP} < 0) \quad (23d)$$

$$\delta = \frac{3\pi}{2} \quad \text{dla warunku } (x'_{HP} = R) \wedge (y'_{HP} < 0) \quad (23e)$$

$$\delta = 2\pi - \arctg\left(\frac{|y'_{HP}|}{R - x'_{HP}}\right) \quad \text{dla warunku } (x'_{HP} < R) \wedge (y'_{HP} < 0) \quad (23f)$$

– długość łuku odcinka krzywoliniowego:

$$L_k = R\delta \quad (24)$$

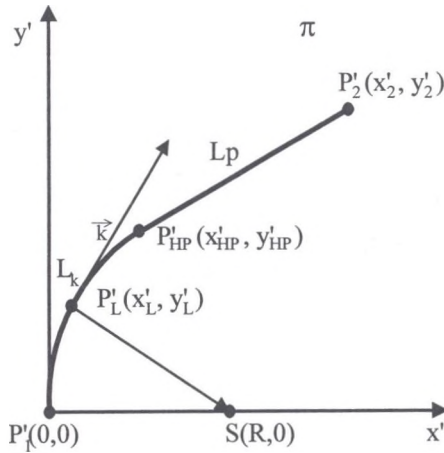
– całkowitą długość trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy punktami P_1 oraz P_2 :

$$L_c = L_k + L_p \quad (25)$$

Punkty tworzące odcinek trajektorii osi otworu kierunkowego w układzie lokalnym $o'x'y'z'$ mają współrzędne $P'_i(x'_i, y'_i, 0)$, a ich transformacja z układu $o'x'y'z'$ do układu OXYZ będzie złożeniem obrotu i translacji. Współrzędne punktów trajektorii osi otworu kierunkowego w układzie OXYZ wyznacza się z zależności:

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} x'_L \\ y'_L \\ z'_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x & s_x & t_x \\ w_y & s_y & t_y \\ w_z & s_z & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_L \\ y'_L \\ z'_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Przy obecnie stosowanych technikach pomiarowych i nawigacyjnych, wykorzystywanych podczas wiercenia otworów kierunkowych, zachodzi konieczność dokładnego określenia wielkości kątów odchylenia od płaszczyzny poziomej ϵ i azymutów β dla poszczególnych odcinków trajektorii osi otworu kierunkowego. W celu określenia kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej ϵ i azymutu β stycznej do odcinka osi otworu w zadanym punkcie P_L , leżącym na krzywoliniowym odcinku trajektorii, należy rozważyć zależności przedstawione na rys. 6. Na płaszczyźnie π tworzy się wektor $\vec{P'_L S}(R - x'_L, -y'_L)$.



Rys. 6. Zależności geometryczne umożliwiające wyznaczenie wektora \vec{k} stycznego do trajektorii osi otworu kierunkowego w pkt. P'_L

Fig. 6. Geometric dependences for determining vector \vec{k} tangent to the trajectory of HDD well's axis at point P'_L

Wykorzystując przekształcenie:

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{2} & -\sin \frac{\pi}{2} \\ \sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R - x'_L \\ -y'_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R - x'_L \\ -y'_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_L \\ R - x'_L \end{bmatrix} \quad (27)$$

dokonuje się obrotu w lewo wektora $\vec{P}'_L S$ o kąt 90^0 , uzyskując wektor $\vec{k}(y'_L, R - x'_L)$ styczny do trajektorii osi otworu kierunkowego.

Współrzędne wektora \vec{k} w układzie globalnym wyznaczyć można z zależności:

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} y'_L \\ R - x'_L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x & s_x & t_x \\ w_y & s_y & t_y \\ w_z & s_z & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y'_L \\ R - x'_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Współrzędne wektora stycznego do odcinka prostoliniowego trajektorii osi otworu kierunkowego określa się z zależności:

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} x'_2 - x'_{HP} \\ y'_2 - y'_{HP} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x & s_x & t_x \\ w_y & s_y & t_y \\ w_z & s_z & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_2 - x'_{HP} \\ y'_2 - y'_{HP} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Kąt odchylenia trajektorii osi otworu kierunkowego od płaszczyzny poziomej w dowolnym punkcie P_L obliczać należy ze wzoru:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{k_z}{|k|} \quad (30)$$

Wielkość azymutu wyznacza się z zależności:

$$\beta = 0 \quad \text{-dla } k_x=0 \wedge k_y=0 \quad (31a)$$

$$\beta = \beta_0 \quad \text{-dla } k_x \geq 0 \wedge k_y > 0 \quad (31b)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} \quad \text{-dla } k_x > 0 \wedge k_y = 0 \quad (31c)$$

$$\beta = \pi - \beta_0 \quad \text{-dla } k_x \geq 0 \wedge k_y < 0 \quad (31d)$$

$$\beta = \pi + \beta_0 \quad \text{-dla } k_x \leq 0 \wedge k_y < 0 \quad (31e)$$

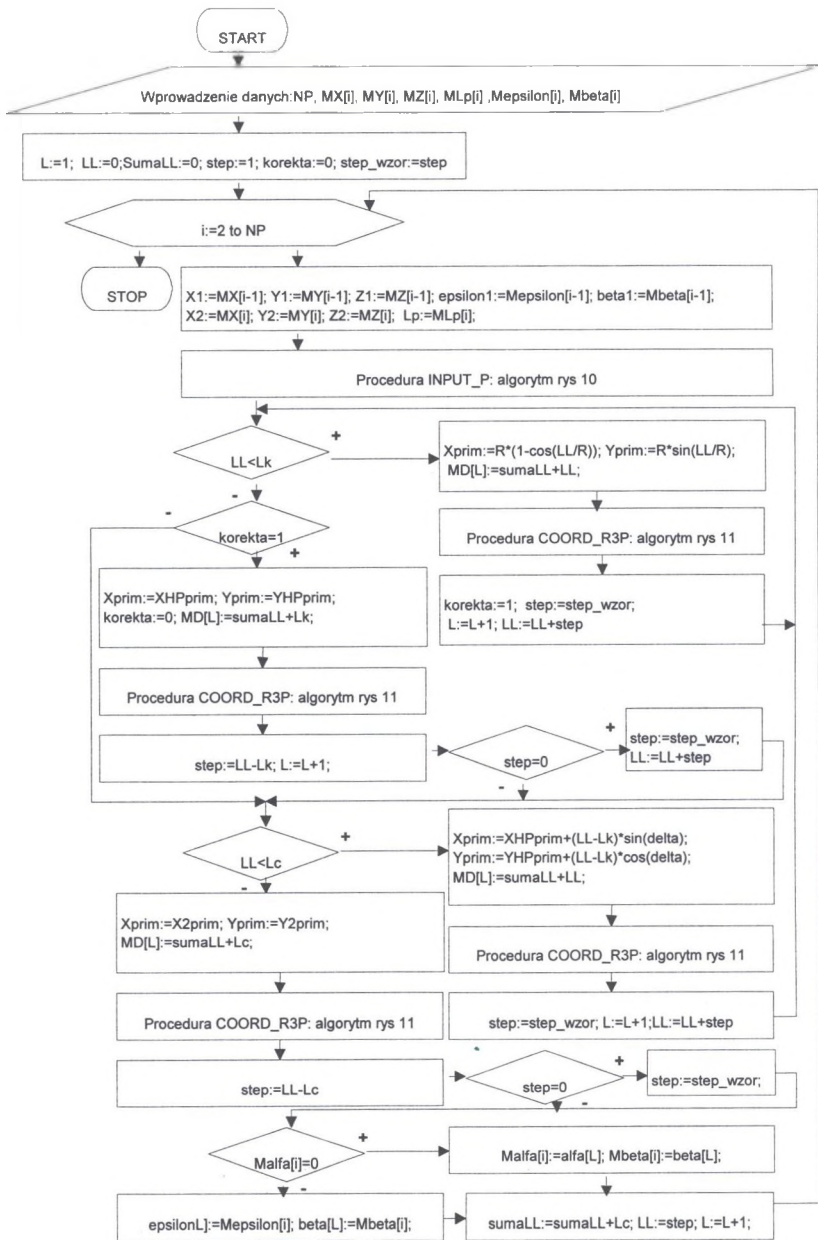
$$\beta = \frac{3}{2}\pi \quad \text{-dla } k_x < 0 \wedge k_y = 0 \quad (31f)$$

$$\beta = 2\pi - \beta_0 \quad \text{-dla } k_x \leq 0 \wedge k_y > 0, \quad (31g)$$

gdzie:

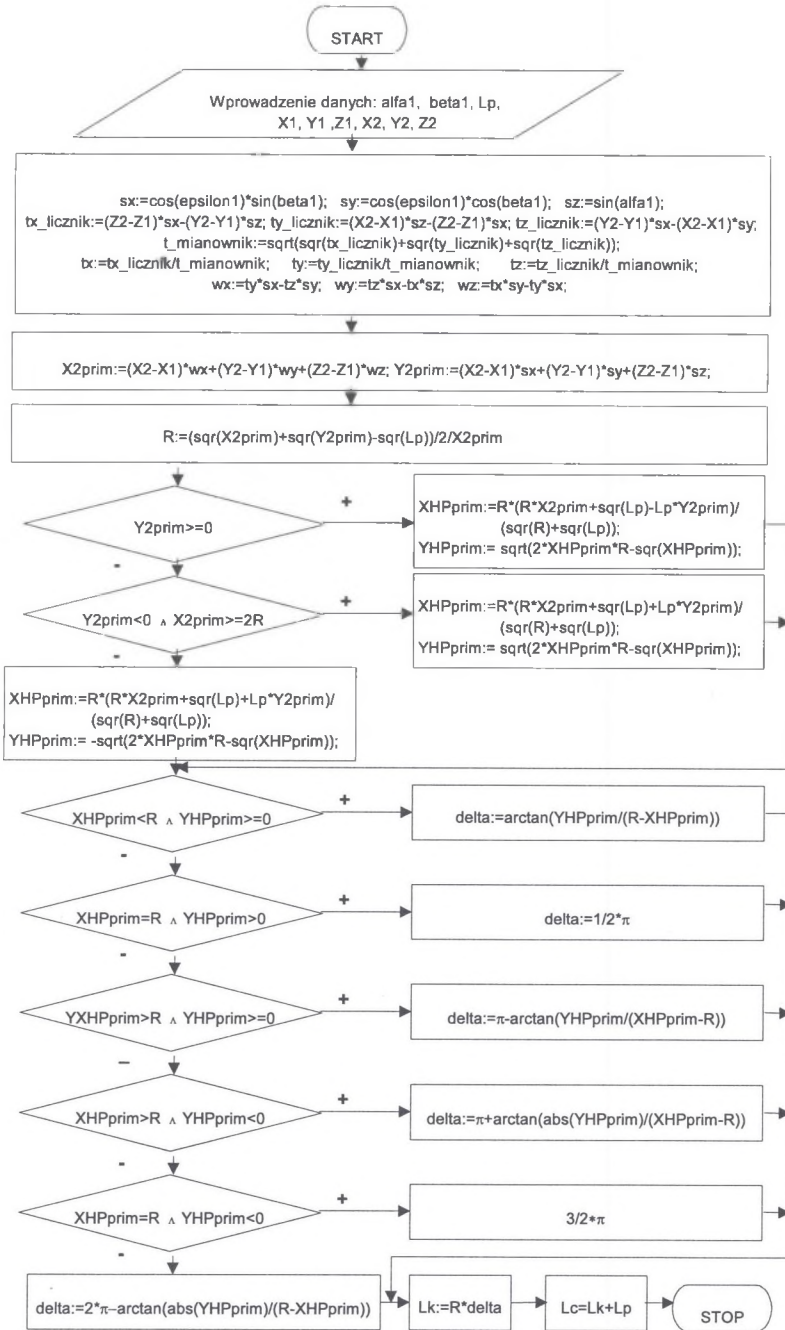
$$\left. \begin{aligned} &-\frac{\pi}{2} \leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{2} \\ &\beta_0 = \arctan \left| \frac{k_x}{k_y} \right| \wedge \left(0 \leq \beta_0 \leq \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Algorytm obliczania przestrzennych współrzędnych osi otworu wierconego w przestrzeni R^3 przedstawia rys. 7, a wykorzystywane w nim procedury zawarto na rys. 8 oraz 9.



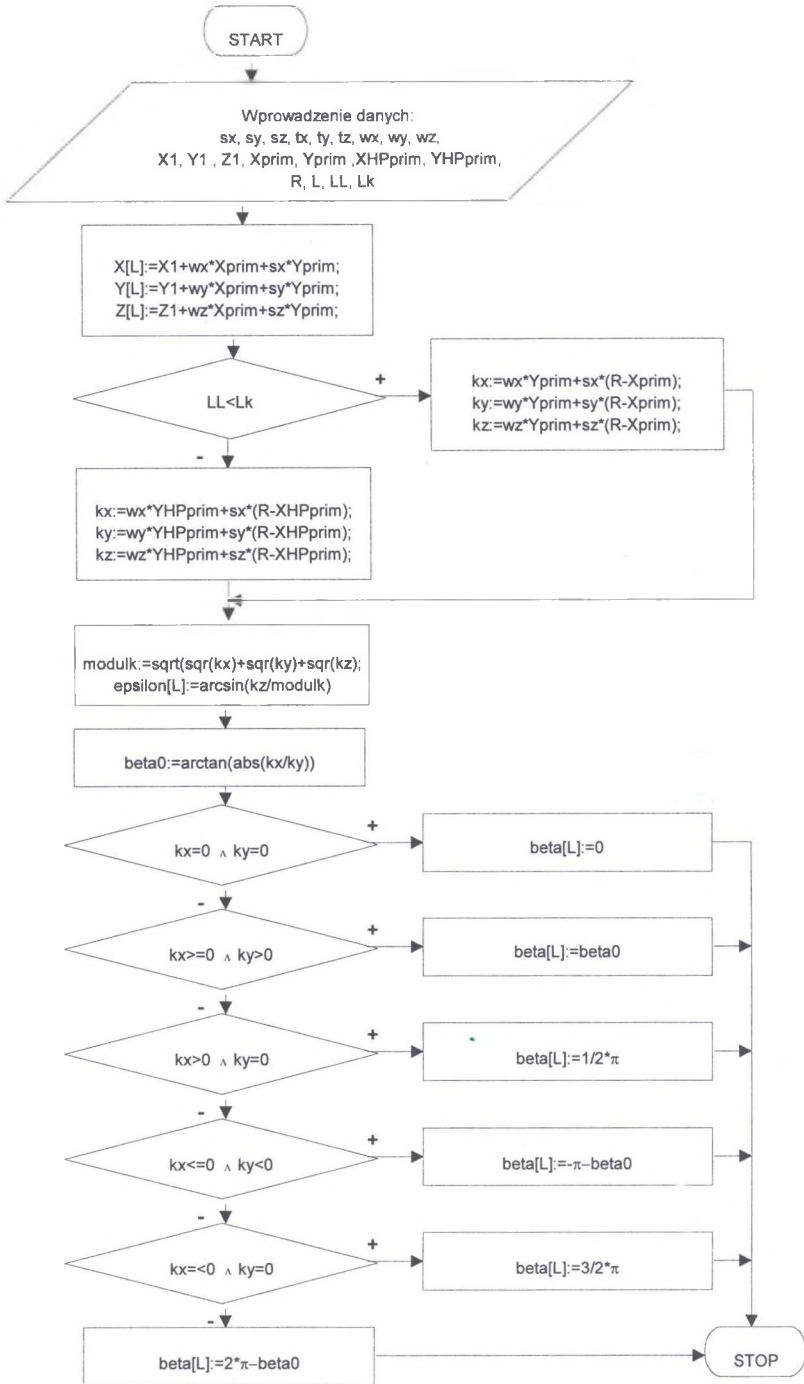
Rys. 7. Algorytm obliczania przestrzennych współrzędnych osi otworu kierunkowego (PROCEDURA: R3POCZ)

Fig. 7. Algorithm for spatial coordinates of horizontal wells axis (PROCEDURA: R3POCZ)



Rys. 8. Algorytm obliczania podstawowych parametrów trajektorii osi otworu kierunkowego przy zadanych parametrach stycznej do trajektorii w punkcie początkowym (PROCEDURA INPUT_P)

Fig. 8. Algorithm for basic parameters of directional well's trajectory at given parameters of a tangent at point of origin (PROCEDURA INPUT_P)



Rys. 9. Algorytm obliczania przestrzennych współrzędnych osi otworu kierunkowego przebiegającej pomiędzy dwoma punktami przy zadanych parametrach stycznej do trajektorii w punkcie początkowym (PROCEDURA: COORD_R3P)

Fig. 9. Algorithm for spatial coordinates of HDD well's axis between two points at given parameters of a tangent at point of origin (PROCEDURA: COORD_R3P)

5. Podsumowanie

Dobór rodzaju profilu trajektorii osi otworu kierunkowego, wykonywanego z podziemnych wyrobisk górniczych, zależy od techniczno-technologicznych możliwości jego wykonania oraz wyników przeprowadzonej kompleksowej analizy ekonomicznej przedsięwzięcia.

Podczas projektowania trajektorii osi otworu kierunkowego należy alternatywnie rozważyć jej przebieg w przestrzeni dwu- lub trójwymiarowej.

Aktualny poziom rozwoju techniki wiertniczej umożliwia wykonywanie otworów kierunkowych, których trajektoria jest przestrzennie usytuowaną krzywą, jednakże w większości przypadków przebieg osi otworów kierunkowych projektuje się w jednej płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu. Tak zaprojektowana trajektoria osi otworu kierunkowego jest bowiem łatwiejsza i tańsza w wykonaniu.

Coraz częściej istnieje konieczność projektowania i wykonywania otworów kierunkowych z podziemnych wyrobisk górniczych w przestrzeni R^3 .

Projektując osł otworu kierunkowego o trajektorii przebiegającej w przestrzeni R^2 lub R^3 , proponuje się stosować zależności matematyczne oraz algorytmy postępowania opracowane w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH.

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych WWiNiG

LITERATURA

1. Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S.: Applied Drilling Engineering. SPE Textbook, Richardson 1986.
2. Wiśniowski R.: Wybrane aspekty projektowania konstrukcji otworów kierunkowych z wykorzystaniem technik numerycznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, seria: Rozprawy. Monografie nr 112, Kraków 2002.

SPIS OZNACZEŃ

β_1 – azymut trajektorii osi otworu kierunkowego w punkcie początkowym, [°];

ε_1 – kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej trajektorii osi otworu kierunkowego w punkcie początkowym, [°];

ε_j – kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej trajektorii osi otworu kierunkowego w j-tym punkcie charakterystycznym, [°];

- ε_L – kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej trajektorii osi otworu kierunkowego w odległości L od wylotu otworu [°];
 δ_j – kąt przestrzennego skrzywienia ustalany pomiędzy j -tym a $j-1$ -ym punktem charakterystycznym;
 A – przemieszczenie poziome punktu końcowego względem punktu początkowego otworu kierunkowego, [m];
 A_j – rzut j -tego odcinka na kierunek poziomy, [m];
 DLS_j – intensywność przestrzennego skrzywienia j -tego krzywoliniowego odcinka otworu kierunkowego, $DLS_j = \delta_j / L_j$ [°/m];
 H_j – rzut j -tego odcinka na kierunek poziomy, [m];
 \vec{k} – wektor styczny do trajektorii osi otworu kierunkowego, [-];
 L_c – całkowita długość odcinka trajektorii otworu kierunkowego, [m];
 L_j – długość j -tego odcinka, [m];
 L_k – długość odcinka krzywoliniowego trajektorii otworu kierunkowego, [m];
 L_L – długość trajektorii otworu kierunkowego mierzona od wylotu otworu do punktu pomiarowego, [m];
 L_p – długość odcinka prostoliniowego trajektorii otworu kierunkowego, [m];
 R_j – promień krzywizny j -tego odcinka;
 \vec{s} – wersor osi $o'y'$ lokalnego układu współrzędnych, [-];
 \vec{t} – wersor osi $o'z'$ lokalnego układu współrzędnych, [-];
 x'_1, y'_1, z'_1 – współrzędne punktu początkowego wyznaczanego odcinka trajektorii w lokalnym układzie współrzędnych, [m];
 x'_2, y'_2, z'_2 – współrzędne punktu docelowego wyznaczanego odcinka trajektorii w lokalnym układzie współrzędnych, [m];
 $x'_{HP}, y'_{HP}, z'_{HP}$ – współrzędne końca odcinka krzywoliniowego i początku odcinka prostoliniowego w lokalnym układzie współrzędnych, [m];
 x'_L, y'_L, z'_L – współrzędne punktu P_L w lokalnym układzie współrzędnych, [m];
 X_1, Y_1, Z_1 – współrzędne punktu początkowego wyznaczanego odcinka trajektorii w globalnym układzie współrzędnych, [m];
 X_2, Y_2, Z_2 – współrzędne punktu docelowego wyznaczanego odcinka trajektorii w globalnym układzie współrzędnych, [m];
 X_{HP}, Y_{HP}, Z_{HP} – współrzędne końca odcinka krzywoliniowego i początku odcinka prostoliniowego w globalnym układzie współrzędnych, [m];
 X_L, Y_L, Z_L – współrzędne punktu P_L w globalnym układzie współrzędnych, [m];
 \vec{w} – wersor osi $o'y'$ lokalnego układu współrzędnych, [-].

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Franciszek Plewa