

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**Prof. dr inż. ANDRZEJ AJDUKIEWICZ, *andrzej.ajdukiewicz@polsl.pl*Dr inż. LESZEK SZOJDA, *leszek.szojda@polsl.pl*

Katedra Inżynierii Budowlanej, Politechnika Śląska Gliwice

ZAGROŻENIA I ZABEZPIECZENIA SŁUPÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH LINII PRZESYŁOWYCH W WARUNKACH DEFORMACJI PODŁOŻA

HAZARD AND PROTECTION OF ELECTRICAL POWER TRANSMISSION LINE PYLONS IN CASE OF SUBSOIL DEFORMATION

Streszczenie Linie elektroenergetyczne znajdujące się w rejonach deformacji podłoża narażone są na zwiększone obciążenia. W przypadku braku zabezpieczenia oraz odpowiedniego zapasu nośności może dojść do awarii pojedynczego słupa lub całej sekcji linii. Obecnie, ze względu na dobrze rozpoznane niebezpieczne wpływy oraz na podstawie dokładnych prognoz deformacji podłoża wywołanych podziemną eksploatacją górnictwem, możliwe jest określenie dodatkowych oddziaływań na słupy. Parametry opisujące nieckę osiadań górnictwem pozwalają określać zmiany długości przęseł linii, jak również towarzyszące dodatkowe obciążenia w punktach zawieszenia przewodów. Z drugiej strony, przemieszczenia podpór gałęzi słupa mogą powodować dodatkowe obciążenia dolnej części słupów. Szczegółowa analiza wszystkich oddziaływań i zastosowanie odpowiednich metod zabezpieczenia konstrukcyjnego zapobiegają katastrofom, ale pewne drugorzędne uszkodzenia konstrukcji są nieuniknione.

Abstract Electrical power transmission lines erected in regions of subsoil deformations are endangered with increase of loading. In case of lack of protection or lack of proper safety margin the damages of an individual pylon or a whole section of the line may happen. Nowadays, due to well recognized danger impacts and on the basis of accurate prognoses of subsoil deformations caused by underground mining activity, the determination of additional actions on pylons is possible. The parameters describing the mining subsidence trough allow to define changes of span lengths of the line, as well as corresponding additional loads in points of conductors suspension. On the other hand, displacements of supports of the pylon legs may cause additional loading of the lower part of the pylon structure. The detailed analysis of all actions and application of proper methods of structural protection are taking precautions against collapses, but some secondary structural damages are unavoidable.

1. Wprowadzenie do tematu

W polskiej gospodarce przemysł górnictwa i energetyka są ze sobą nierozdzielnie połączone. Strategia rozwoju polskiej energetyki opiera się z konieczności na wzroście produkcji energii elektrycznej uzyskiwanej z węgla. Należy liczyć się więc z dalszym rozwojem wydobywania tej kopaliny, a co za tym idzie, rozszerzaniem się obszarów poddanych deformacjom pochodzenia górnictwem. Dotychczas większość elektroenergetycznych linii wysokiego napięcia o wartości 220 kV i 400 kV zlokalizowana była poza obszarami aktywności górnictwem – okalały one Górnictwo Śląskie i tylko nieliczne z nich przecinały ten obszar. W wyniku przeglądów paszportów linii pod zarządem PSE Południe pozostaje 1048 słupów z czego 135

obiektów linii 220 kV i 5 linii 400 kV może znajdować się w strefie deformacji terenu pochodzenia górniczego (stan na rok 1999). W krajowych warunkach oddziaływania deformującego się podłoża na konstrukcje występują nie tylko w rejonach wpływów górnictwa węglowego, ale również górnictwa rud i innych kopalni, a także na skutek zmian warunków wodnych, jak i zjawisk o charakterze katastrofalnym np. powodzi lub osuwisk. Rozpatrywanie wpływu deformacji podłoża pochodzenia górniczego jako głównych oddziaływań podłoża na konstrukcje budowlane jest jednak podyktowane tym, że są one najsilniejsze w naszym kraju, a zarazem najdokładniej rozpoznane i opisane. Można więc w prosty sposób adaptować je w części lub w całości do rozważań innych przypadków oddziaływań budowla-podłoże.

Górnice deformacje podłoża można podzielić na kilka części. Największą ich część stanowią deformacje o charakterze ciągłym. W znacznie mniejszym zakresie występują deformacje nieciągłe, które jednak charakteryzują się bardzo dużą lokalną intensywnością, a zabezpieczenie konstrukcji linii przed takimi wpływami jest bardzo kosztowne i trudne. Z tego też powodu w trakcie projektowania unika się prowadzenia linii elektroenergetycznych przez takie tereny. Inną grupę oddziaływań stanowią wstrząsy pochodzenia górniczego, zaliczane do obciążeń wyjątkowych transmitowanych przez podłoże, które jednak są stosunkowo mało niebezpieczne dla linii elektroenergetycznych.

Ciągłe deformacje terenu opisane są pięcioma parametrami. Zalicza się do nich: W – osiadanie, T – pochylenie, K – krzywiznę terenu, U – poziome przemieszczenie terenu, ε – odkształcenie poziome terenu. Do wyznaczenia tych parametrów zostały zastosowane zależności geometryczno-całkowe przedstawione w fundamentalnych pracach Budryka [1] i Knothego [2], z niewielkimi późniejszymi modyfikacjami.

Powyższe zależności można opisać wzorami:

$$W_x = \frac{W_{\max}}{r} \cdot \int_x^{\infty} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} dx \quad (1)$$

$$T_x = \frac{dW_x}{dx} = -\frac{W_{\max}}{r} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (2)$$

$$K_x = \frac{d^2W_x}{dx^2} = \frac{2\pi x W_{\max}}{r^3} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (3)$$

$$U_x = B \frac{dW_x}{dx} = \frac{W_{\max}}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = \frac{dU}{dx} = \frac{\sqrt{2\pi} x W_{\max}}{r^2} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (5)$$

gdzie: W_{\max} – maksymalne osiadanie terenu [m],
 r – promień zasięgu wpływów [m]

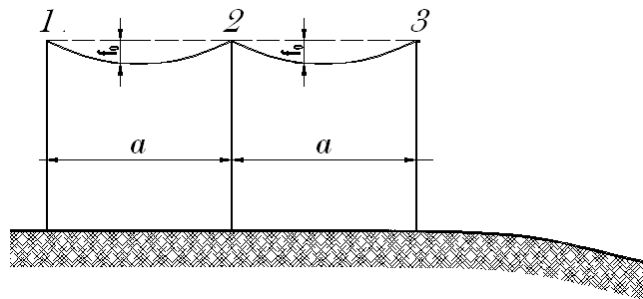
W obiektach kubaturowych wpływ na konstrukcję mają przede wszystkim: odkształcenie poziome terenu ε i krzywizna terenu K . W przypadku linii elektroenergetycznych znaczna wysokość słupów, a także duża ich odległość między sobą powodują, że linie te są wrażliwe na pochylenie terenu T oraz poziome przemieszczenie podłoża U , które wywołują zmiany długości przęseł i naciągów przewodów. Z tych powodów deformacje pochodzenia górniczego wywołują w konstrukcji znaczny wzrost wartości sił wewnętrznych, co może doprowadzić do uszkodzenia pojedynczego słupa lub całej sekcji linii o kilku przęsłach.

2. Wpływ deformacji podłoża na zmianę długości przęsła

Projektowanie konstrukcji wsporczych linii napowietrznych należy do zadań złożonych. Przeznaczenie obiektów powoduje, że istnieje konieczność spełnienia wymagań ochrony przeciwporażeniowej i zachowania odpowiednich odległości od przekraczanych przeszkód. Jest to przyczyną, dla której projektowanie odbywa się na podstawie odrębnych norm. W obecnym czasie obowiązuje norma europejska [3] wraz z przygotowanym załącznikiem krajowym [4]. W ramach tych dokumentów konstrukcje wsporcze słupów projektuje się jako tzw. „mocne” – rozgraniczające sekcje robocze, oraz „przelotowe” – podtrzymujące przewody na odcinkach prostych linii. Każdy rodzaj słupów analizowany jest dla różnego rodzaju kombinacji obciążeń, które z racji charakteru konstrukcji są w decydującej części wywołane ciężarem oraz naciągiem przewodów. Normy zakładają również konieczność uwzględnienia obciążeń wywoływanych przez wpływy środowiskowe – wiatr i oblodzenie konstrukcji słupów i przewodów. Należy również uwzględnić możliwość powstania zakłóceń w postaci różnych kombinacji zerwania przewodów, jak również obciążeń związanych z montażem konstrukcji i całej linii.

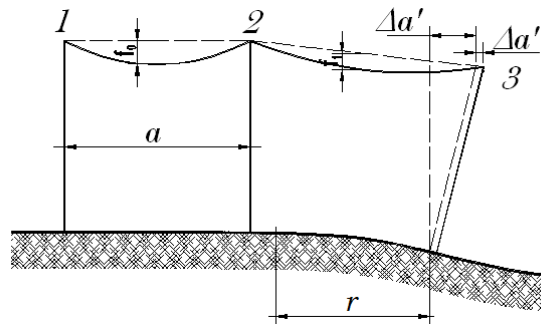
Wpływy deformacji podłoża powodują zmiany naprężeń w przewodach, na które rzutują łącznie pochylenia konstrukcji T oraz przemieszczenia poziome obiektów U w okresie przechodzenia krawędzi niecki, związanej z przechodzeniem frontu eksploatacji podziemnej. Sytuacja powstawania dodatkowych naprężeń od odkształceń podłoża jest zazwyczaj dynamiczna i po przejściu frontu eksploatacyjnego powraca w przybliżeniu do stanu pierwotnego. Wyjątkiem SA słupy znajdujących się na krawędzi zasięgu eksploatacji, gdzie sytuacja odkształceń podłoża jest trwała. Analizując wpływ deformacji na prosty odcinek linii można wyróżnić następujące fazy:

FAZA I – położenie linii na skraju zasięgu wpływów. Początkowa geometria zawieszenia przewodów (rys. 1). Stan wyjściowy do dalszej analizy.



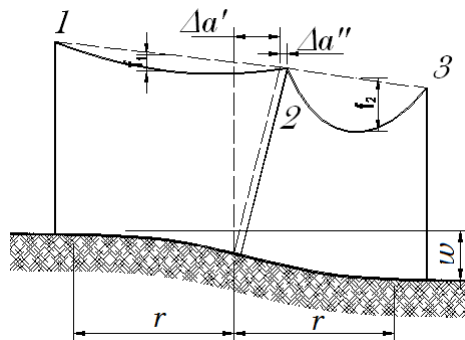
Rys. 1. Wpływ przejścia niecki na linię energetyczną – Faza I

FAZA II – linia wchodzi w strefę deformacji podłoża, następują zmiany zwisów i naprężeń wywołane zmianą rozpiętości przęsła (rys. 2). Zmiana odległości spowodowana jest pochyleniem T słupa ($\Delta a'$) oraz przemieszczeniem poziomym gruntu U w stosunku do sąsiadujących słupów ($\Delta a''$).



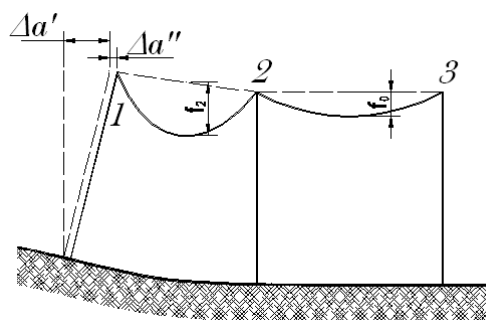
Rys. 2. Wpływ przejścia niecki na linię energetyczną – Faza II

FAZA III – słup przejściowo wchodzi w strefę symetrii wobec punktu przegięcia niecki (rys. 3). W przypadku rozpiętości przęsła a mniejszych niż promień zasięgu wpływów r jednakowe przemieszczenia gruntu U i przechyły słupów T sprawiają, że przęsło wraca do quasi normalnych warunków pracy. Dla rozpiętości a słupa większych od promienia zasięgu wpływów r powstaje największe oddziaływanie zmiany Δa naprężeń przewodów na słup



Rys. 3. Wpływ przejścia niecki na linię energetyczną – Faza III

FAZA IV – wyjście rozpatrywanego słupa/przęsła ze strefy wpływów deformacji terenu (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ przejścia niecki na linię energetyczną – FAZA IV

Analizę nasuwania się niecki osiadania przeprowadza się przy założeniu kilku uproszczeń ułatwiających ilustrację zjawisk. Należą do nich: równoległy kierunek nasuwania się niecki do kierunku linii, sztywna (nie sprężysta) konstrukcja wsporcza, przewody zamocowane na słupach w sposób nieprzesuwny. Przedstawiony model obejmuje skrajnie niekorzystny przypadek układu obciążeń, zachodzący dla dwóch sąsiadujących sekcji jednoprzęsłowych.

Wyznaczenie sił wewnętrznych w konstrukcji w ten sposób daje oszacowanie z nadmiarem. W celu dokładnego określenia wzrostu naprężeń w przewodach należy uwzględnić sprężyste ugięcie konstrukcji słupa, a co za tym idzie przemieszczenia punktów zawieszenia przewodów. To zaś spowoduje zmianę siły wywołującej przemieszczenie. Z tego powodu należy wyznaczyć rzeczywiste zmiany sił wywołane deformacjami podłoża na drodze iteracyjnej.

3. Wyznaczenie zmian naprężeń w przewodach

Zmianę odległości między punktami zawieszenia przewodów związaną z pochyleniem słupa wyznacza się z zależności:

$$\Delta a' = h T_{\max} \quad (6)$$

gdzie: h – wysokość zawieszenia rozpatrywanego przewodu [m]

W przypadku, gdy linia elektroenergetyczna wchodzi w zasięg wpływów eksploatacji górniczej, dla rozpiętości przęsła $a \geq r$:

$$\Delta a'' = U_{\max} = 0,4 W_{\max} \quad (7)$$

Dla przęsła o rozpiętości $0,4r < a < r$:

$$\Delta a'' = 0,4 \cdot W_{\max} - 0,6 \cdot W_{\max} \left(\frac{r-a}{a} \right)^2 \quad (8)$$

Znając całkowitą wielkość wydłużeń $\Delta a = \Delta a' + \Delta a''$ oraz przyjmując, że zmianom długości przęsła odpowiadają zmiany długości przewodu można wyprowadzić uproszczone równanie stanów przęsła o rozpiętości a , które przedstawia się następująco, wg [5]:

$$\frac{a^2}{24} \left[\left(\frac{g}{\sigma} \right)^2 - \left(\frac{g_0}{\sigma_0} \right)^2 \right] = \alpha(t-t_0) + \frac{(\sigma - \sigma_0)}{E} \pm \frac{\Delta a}{a} \quad (9)$$

gdzie: g_0, g – ciężar przewodu na jednostkę długości i jednostkę przekroju w stanie początkowym i aktualnym [kN/m^3],

σ_0, σ – naprężenie początkowe i aktualne w przewodzie [MPa],

α – współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej materiału przewodu [$1/^\circ\text{C}$],

E – moduł sprężystości materiału przewodu [MPa].

Z powyższego równania wyznacza się naprężenie aktualnie panujące w przewodzie σ , co stanowi podstawę do wyznaczenia sił naciągu obciążających bezpośrednio konstrukcję słupa. Należy zauważyć, że wpływ zmiany naprężeń w przewodach wywołany deformacjami górnymi jest tym większy im krótsze jest przęsło lub sekcja robocza. Z tego powodu wskazane jest stosowanie w takich obszarach sekcji roboczych o kilku długich przęsłach, w skład których wchodzi słupy przelotowe.

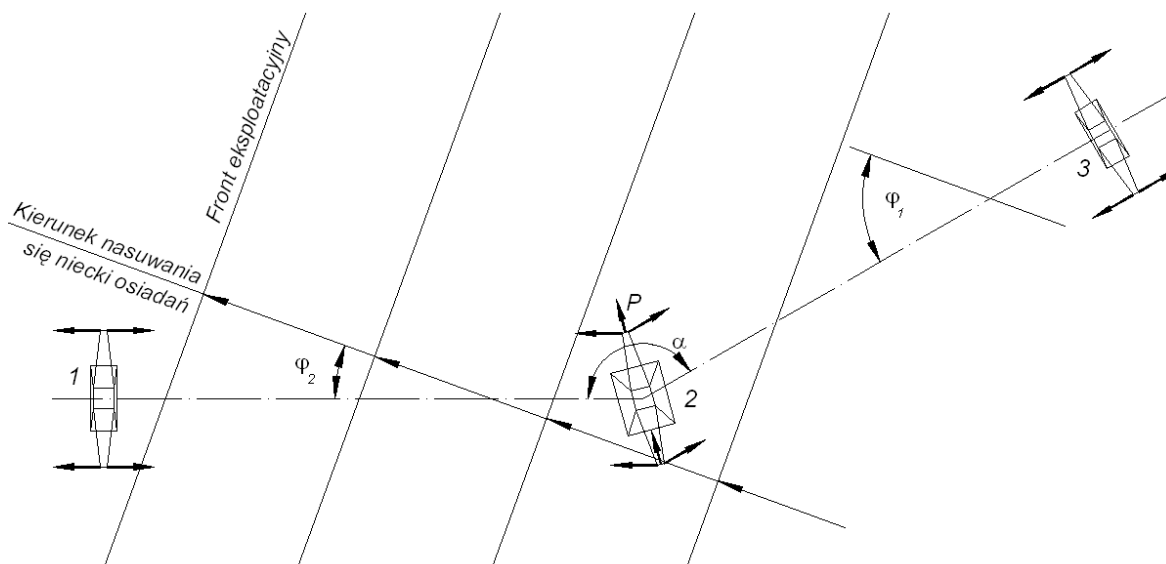
W większości przypadków nasuwanie się niecki odkształceń przebiega ukośnie w stosunku do trasy linii. Jeżeli odcinek trasy linii tworzy z kierunkiem nasuwania się niecki kąt φ to można przyjąć:

$$\begin{aligned} \Delta a'_s &= \Delta a' \cos \varphi_n \\ \Delta a''_s &= \Delta a'' \cos \varphi_n \end{aligned} \quad (10)$$

stąd:

$$\frac{\Delta a_s}{a} = \frac{\Delta a}{a} \cos \varphi_n \quad (11)$$

W sytuacji eksploatacji ukośnej wielkość wspomnianego kąta φ ma szczególnie duże znaczenie przy określaniu wpływów na słupy narożne. Jak pokazano na rysunku 5 wartości odkształceń w przęsła pomiędzy słupami „2” i „3” będą mniejsze niż w przęsła „1” i „2”.



Rys. 5. Wpływ kierunku eksploatacji na linię energetyczną

W praktyce nie zawsze dokładnie znany jest kierunek przesuwania się frontu eksploatacji, a tym bardziej przesuwania się niecki osiadań. W sytuacji braku tych danych do analizy przyjmuje się kierunek najbardziej niekorzystny z uwagi na przyrost deformacji.

4. Wpływ deformacji terenu na konstrukcję słupa

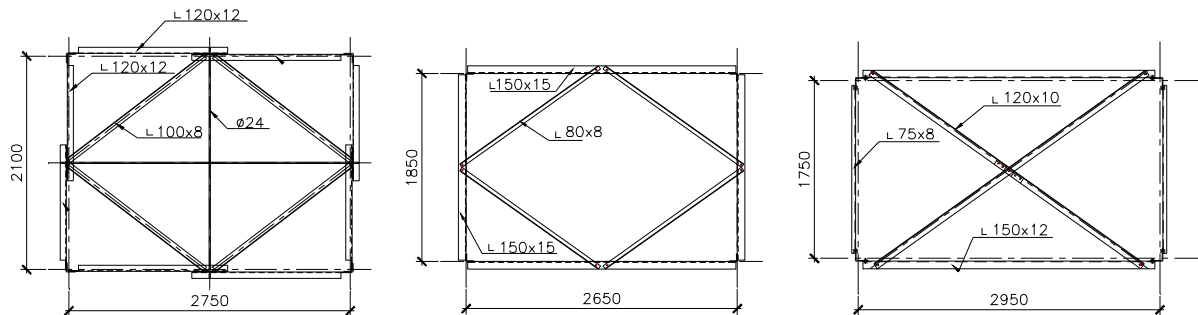
Słupy linii elektroenergetycznych o napięciach 220 kV i 400 kV wykonane są zazwyczaj jako stalowe przestrzenne konstrukcje prętowe. Ze względu na znaczne obciążenia oraz konieczność umieszczania przewodów na stosunkowo dużych wysokościach (ochrona przeciw przeskokowi napięcia) podstawy konstrukcji mają zazwyczaj duże wymiary w rzucie. Z tego powodu fundamenty gałęzi słupów tych linii są niezależne i w zależności od wielkości obciążeń wykonuje się je na miejscu budowy lub w zakładzie prefabrykacji. Znaczne rozmiary podstawy, a tym samym duże odległości pomiędzy poszczególnymi fundamentami powodują, że konstrukcje te podlegają takim samym wpływom, jak obiekty kubaturowe [6], [7], [8], [9]. Najbardziej niekorzystne wpływy to poziome odkształcenia podłoża ε oraz krzywizna terenu K (promień krzywizny $R=1/K$). Pochylenia T w przypadku analizy odosobnionego obiektu i nie połączonego z pozostałymi konstrukcjami słupów, nie wywołują znacznych zmian naprężeń, ponieważ sama konstrukcja stalowa nie jest ciężka, a zmiany położenia rzutu środka ciężkości w stosunku do środka podstawy są niewielkie.

Słupy linii o mniejszych napięciach (np. 110 kV) mają konstrukcję trzonów o mniejszych wymiarach i posadowione są zwykle na jednym wspólnym fundamencie. W ostatnim czasie pojawiają się konstrukcje pełnościenne – rurowe, które również posadowione są na pojedynczym fundamencie. Dla tego rodzaju posadowienia obiektów nie ma zagrożenia wywołanego odkształceniem poziomym podłoża ε oraz krzywizną terenu K . Ma natomiast znaczenie pochylenie T ze względu na mały, w porównaniu z liniami 220 kV i 400 kV, rzut podstawy.

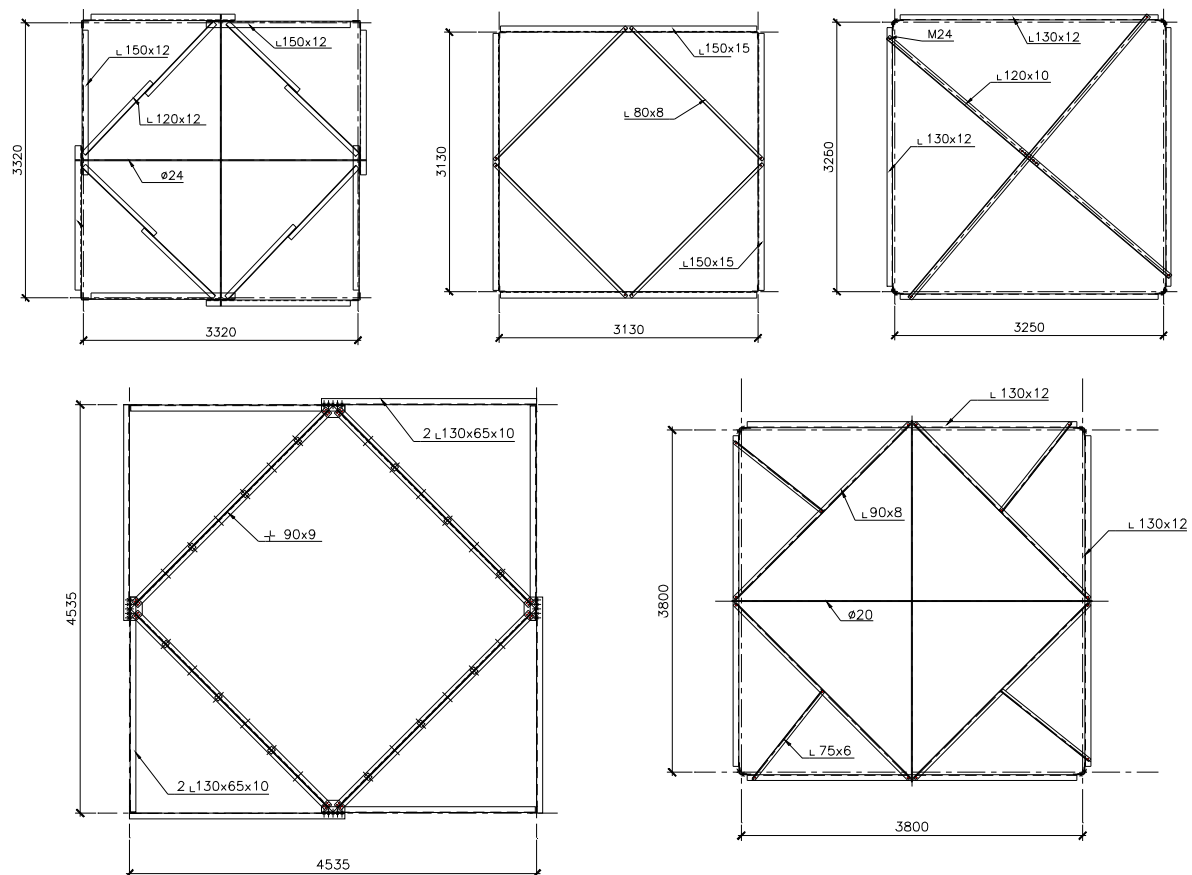
W ramach wytycznych dla projektantów została opracowana instrukcja [10], mająca na celu wskazanie najważniejszych rozwiązań konstrukcyjnych oraz określenie dodatkowych obciążeń wynikających z deformacji terenu. W opracowaniu tym określono sposoby zabezpieczenia i elementy zabezpieczające w zależności od intensywności prognozowanych wpływów deformacji podłoża. Wyróżniono kilka przypadków intensywności wpływów.

PRZYPADEK I – odkształcenia poziome terenu $0,5\% < \varepsilon < 1,5\%$, promień krzywizny terenu $R > 20\text{km}$

Przy takich deformacjach wystarczy zabezpieczyć dolną część słupa za pomocą poziomych stalowych stężeń. Przykłady takich ram przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Przykłady stalowego stężenia korony fundamentów dla słupów przelotowych o małej podstawie



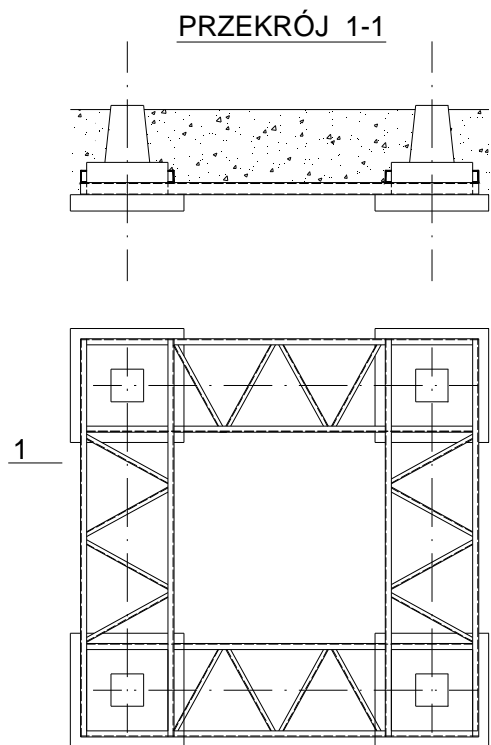
Rys. 7. Przykłady stalowego stężenia korony fundamentów dla słupów odporowo-naróżnych o średniej podstawie

W przypadkach znacznych wymiarów rzutu podstawy słupa należy stosować stężenia wykonane na podstawie indywidualnych projektów. Elementy stalowe wymagają zastosowania trwałych powłok antykorozyjnych, gdyż położone są bezpośrednio przy gruncie.

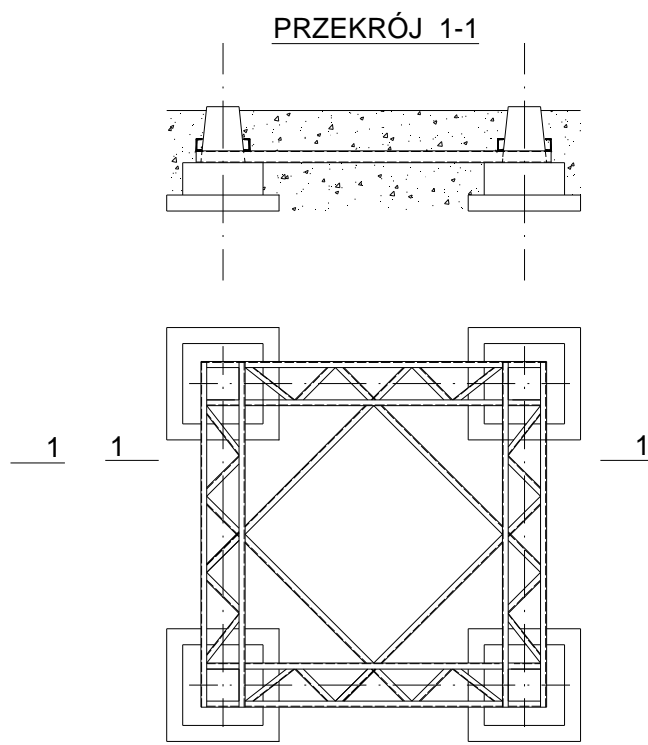
PRZYPADK II – odkształcenia poziome terenu $1,5\% < \varepsilon < 3,0\%$, promień krzywizny terenu $20\text{km} > R > 12\text{km}$

Dla przewidywanych znacznych poziomych deformacji terenu konieczne jest zastosowanie stężeń w poziomie stóp fundamentowych.

Najbardziej uzasadnione ze względów eksploatacyjnych i technologicznych jest zastosowanie stężeń w postaci stalowych kształtowników o odpowiednich przekrojach. Połączenia kształtowników stalowych ze stopami fundamentowymi można zrealizować poprzez stalowe obejmy fundamentów (rys. 8 i 9). W obydwu typach rozwiązań konieczne jest wykonanie stężeń wzdłuż boków prostokąta wyznaczonego przez rzut podstawy, ale także zapewnienie niezmienności rzutu, na przykład przez wprowadzenie stężeń równoległych do przekątnych (rys. 9).



Rys. 8. Stalowa rama usztywniająca w poziomie odsadzki fundamentu

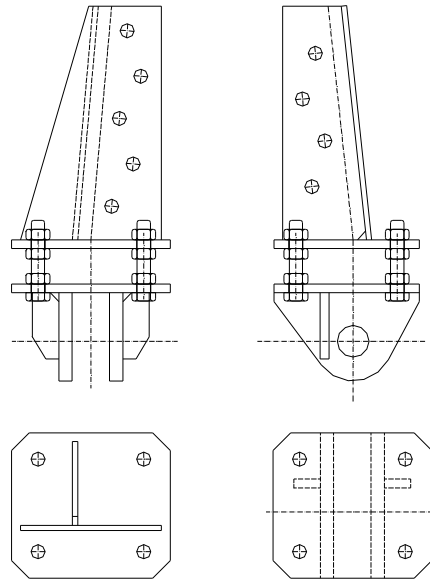


Rys. 9. Stalowa rama usztywniająca w poziomie korony fundamentu

PRZYPADK III – odkształcenia poziome terenu $3,0\% < \varepsilon < 9,0\%$, promień krzywizny terenu $12\text{km} > R > 4\text{km}$

Przy tak dużej intensywności deformacji konieczne jest nie tylko zamontowanie ram stężących, lecz także zabezpieczenie konstrukcyjne przed osiadaniem. Zastosowanie stężeń w poziomie stóp fundamentowych nie zabezpiecza konstrukcji przed osiadaniem terenu. Równomierne osiadanie terenu, to znaczy takie, gdy płaszczyzna wyznaczona przez przeguby nie ulegnie deplanacji, nie zagraża bezpośrednio konstrukcji słupa. Bardzo niebezpiecznym zjawiskiem jest nierównomierne osiadanie podpór, ponieważ prowadzi do znaczących zmian sił w elementach słupa. Proces nierównomiernych osiadań przebiega stosunkowo wolno w czasie, a zatem już we wstępnej fazie powinien być zaobserwowany w pomiarach kontrolnych (niwelacyjnych). W przypadku pojawienia się nierównomiernych osiadań lub stwierdzonych zagrożeń wystąpienia deformacji nieciągłych (ujawnienie się uskoków i lejów) należy podjąć działania zabezpieczające. Jedynym sposobem pozwalającym na eliminację tego typu oddziaływań w istniejących konstrukcjach słupów jest zastosowanie rektyfikacji położenia przegubów słupów. Przykład rektyfikatora, który można zastosować w miejsce istniejących

przegubów słupów przedstawiono na rysunku 10. Każdorazowo należy dostosować konstrukcję rektyfikatora do istniejącego układu podparcia nóg słupa

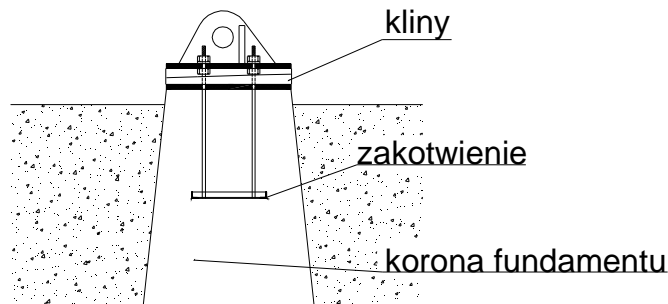


Rys. 10. Rektyfikator do zamontowania w podstawie istniejącego słupa

PRZYPADEK IV – przekroczenie parametrów deformacji podłoża określonych w Przypadku III oraz istnienie możliwości wystąpienia deformacji nieciągłych

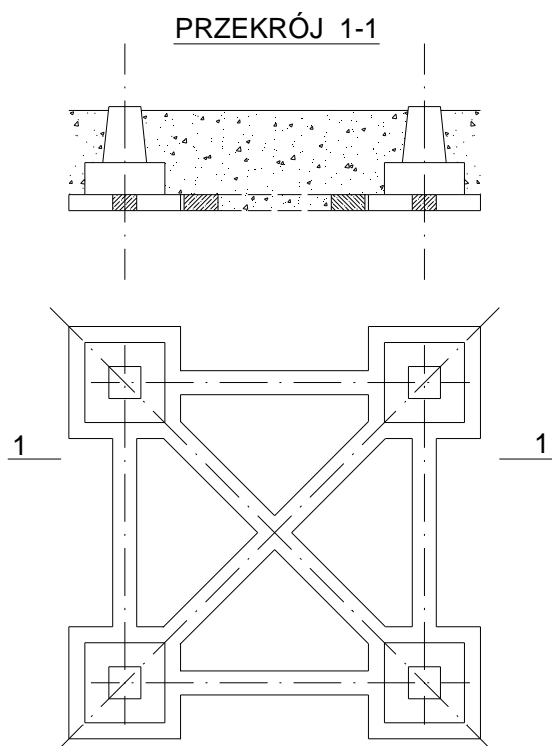
W przypadkach prognoz znacznych ciągłych deformacji terenu należy przewidzieć możliwość zmiany przebiegu linii elektroenergetycznej. Jeżeli ze względów lokalizacyjnych nie jest możliwa zmiana przebiegu linii należy zastosować fundamenty słupów, które umożliwiają regulację kompensującą nierównomierne pionowe ruchy terenu. W tego typu rozwiązaniach przewiduje się wykorzystanie dotychczas stosowanych stóp fundamentowych wykonywanych w miejscu ich posadowienia. Stopy takie muszą być jednak między sobą połączone za pomocą żelbetonowych ściągnięć ułożonych w poziomie posadowienia. Ściągą powinny łączyć stopy fundamentowe także po przekątnej rzutu. Przykładowe rozwiązanie tego typu przedstawiono na rysunku 12. Jest to analogia do zabezpieczeń innych obiektów budowlanych na terenach górniczych [6], które mają już wieloletnią tradycję.

Rozwiązanie takie nie zabezpiecza konstrukcji przed nierównomiernym osiadaniem podpór. Konieczne jest zastosowanie takiego sposobu połączenia konstrukcji stalowej słupa z fundamentami, które umożliwiłoby rektyfikację podpór. Połączenie części stalowej słupa z fundamentem, które powoduje najmniejsze zmiany w wykonywaniu konstrukcji przedstawiono w Przypadku III (rys. 10). Innym rozwiązaniem opartym na tej samej zasadzie jest wykonanie stopy fundamentowej z osadzonym przegubem, który ma możliwość przemieszczeń pionowych (rys. 11).

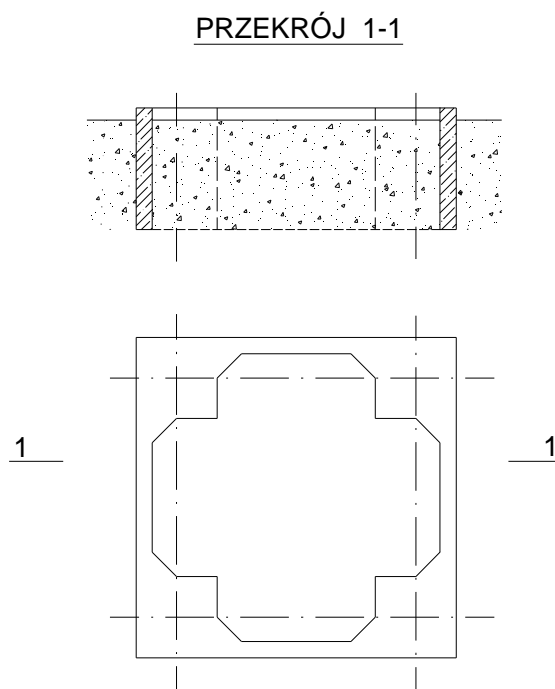


Rys. 11. Rektyfikator wbudowany w fundament nowoprojektowanego słupa

Sposób rektyfikacji słupa, prowadzonej pomiędzy stopą fundamentową a przegubem, powoduje jedynie zmianę konstrukcji elementu zabetonowanego w stopie, pozostawiając nie zmienioną część stalową konstrukcji.



Rys. 12. Żelbetowe stężenie fundamentów



Rys. 13. Żelbetowa pół-skrzynia fundamentowa

W przypadkach tak dużych osiadań lub deformacji nieciągłych, że sama rektyfikacja słupa będzie niewystarczająca, najwłaściwsze jest zastosowanie – oprócz rektyfikatorów – wspólnego nieodkształcalnego fundamentu, w postaci żelbetowej pół-skrzyni pod wszystkimi podpórnikami słupa. Przykład takiego fundamentu pokazano na rysunku 13. Powierzchnia rzutu fundamentu jest zbliżona do powierzchni czterech stóp fundamentowych. Dążyć tu należy do wykorzystania dopuszczalnych nacisków na grunt, bowiem na terenach górniczych niewielkie uplastycznienia podłoża pod fundamentami są zjawiskiem korzystnym, wyrównującym naciski i redukującym wpływy na konstrukcję. Punkty podparcia połączone są między sobą pionową ścianą na wysokość całego fundamentu. Dodatkowe skosy przy połączeniu ścian fundamentowych mają na celu stworzenie sztywnego węzła ramy, który ma zabezpieczać fundament przed zmianą kształtu. W projekcie takiego fundamentu można przewidzieć także możliwość usunięcia się gruntu pod częścią rzutu (w przypadku wpływów nieciągłych) i odpowiednio wzmocnić jego konstrukcję. W takim sztywnym fundamencie nie jest konieczne stosowanie przegubów z możliwością rektyfikacji, ponieważ płaszczyzna podparcia konstrukcji stalowej nie ulegnie wygięciu, a przechyłka całego słupa łącznie z fundamentem nie ma znaczącego wpływu w zakresie obserwowanych wielkości pochylenia terenu.

W wyjątkowym przypadku, gdy pochylenia słupów są jednak zbyt duże i nie jest możliwe zmniejszenie oddziaływań przewodów na konstrukcję poprzez zmianę naciągu, konieczne jest zastosowanie metody prostowania konstrukcji poprzez podcinanie gruntu.

5. Podsumowanie

Projektowanie linii wysokiego napięcia na terenach poddanych deformacjom podłoża jest bardzo złożone. Wymaga to od projektanta wzięcia pod uwagę, niezależnie od kilkunastu kombinacji obciążeń normowych, dodatkowych oddziaływań wynikających z okresowych lub trwałych przemieszczeń podłoża. Wyznaczenie tych dodatkowych oddziaływań najlepiej jest wykonać na podstawie metod stosowanych w rejonach aktywności górniczej, bazując na prognozach deformacji, wynikających z planów eksploatacji zakładów górniczych. Prognozy te obecnie w zadowalający sposób oddają rzeczywiste deformacje gruntu. W ramach tych prognoz wyróżnia się deformacje ciągłe, nieciągłe oraz zjawiska dodatkowe, takie jak wstrząsy czy zalewiska. Dwa ostatnie wpływy są sporadyczne, a ze względu na intensywność deformacji nieciągłych tereny te są omijane w procesie projektowania linii. Najczęstszym oddziaływaniem odkształcającego się podłoża, wymagającym uwzględnienia w projektowaniu, są deformacje ciągłe. Parametry określające te deformacje zobowiązują projektanta zarówno do rozważania konstrukcji linii jako całości, jak też pojedynczego słupa.

W wyniku pochyłeń T oraz poziomych przemieszczeń terenu U zmieniają się długości przęseł, czyli odległości pomiędzy punktami zawieszenia przewodu. Wywołuje to zmiany naprężeń, co wiąże się z dodatkowymi siłami przyłożonymi w miejscu zawieszenia przewodów. Zmiany naprężeń w przewodzie wyznacza się na podstawie równania stanu przewodu. Wyniki obliczeń przeprowadzonych w ten sposób dają wartości z nadkładem. W celu dokładnego określenia naprężeń w przewodzie obliczenia należy przeprowadzać iteracyjnie. Ze względu na skończoną sztywność konstrukcji wsporczej (słupów), dochodzi do ugięcia konstrukcji i zmiany położenia punktów zawieszenia przewodów. Powoduje to spadek naprężeń w przewodzie, co wywołuje mniejsze ugięcie słupa. Stąd potrzeba iteracji. Dodatkowym utrudnieniem w dokładnym określeniu zmiany naprężeń w przewodzie jest właściwe uwzględnienie kierunku odkształceń podłoża w stosunku do linii elektroenergetycznej.

Oddziaływania deformacji podłoża wpływające na samą konstrukcję słupa to odkształcenia poziome ε oraz krzywizna terenu K . Obydwa parametry wywołują znaczące wzrosty sił wewnętrznych w dolnych elementach trzonu konstrukcji kratowej – krawężnikach i skratowaniach. Konstrukcja stalowa nie jest w stanie przenieść tych oddziaływań bez dodatkowych elementów zabezpieczających. W zależności od intensywności oddziaływań należą do nich stalowe ramy w poziomie przegubów – połączenie z fundamentami, aż do żelbetowej skrzyni fundamentowej pod wszystkimi podporami. Skutecznym sposobem eliminacji deplanacji rzutu podstawy konstrukcji wywołanej krzywizną terenu K jest zastosowanie rektyfikatorów.

Wszystkie powyższe przyczyny powodują, że projektowanie linii w obszarze spodziewanych deformacji podłoża jest szczególnie złożone. Nie ma jednoznacznych wytycznych pokazujących ścieżkę przeprowadzania analiz. Instrukcja [10] nie ma charakteru obowiązującego, a jedynie ukierunkowujący projektanta, co do konieczności uwzględnienia dodatkowych obciążeń. Wymagane jest więc od projektanta lub eksperta zajmującego się analizą konstrukcji przyłożenie szczególnej uwagi i wyczucia, tak aby nie wyciągnąć pochopnych niewłaściwych wniosków.

Przedstawiony tu materiał został zebrany ze źródeł wykorzystywanych w projektach i ekspertyzach wykonywanych przez autorów oraz we współpracy badawczej z Polskimi Liniami Energetycznymi. W przeszłości niektóre indywidualne przypadki awarii były już prezentowane, np. w pracy [11].

Literatura

1. Budryk W.: Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa 1953, t.1, z.1.
2. Knothe S.: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa 1953, t.1, z.1.
3. PN-EN 50341-1:2005 „Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45kV. Część 1: Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne”.
4. PN-EN 50341-3-xx „Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45kV. Część 3-xx: Zbiór normatywnych warunków krajowych. Normatywne warunki krajowe Polski” – projekt po ankietyzacji (wrzesień 2007 r.).
5. Kończykowski S., Mayzel B.: Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych, Arkady, Warszawa 1962 r.
6. Instrukcja ITB nr 286 – Wytyczne – projektowania budynków o ścianowym układzie nośnym podlegających wpływowi eksploatacji górniczej. Warszawa 1989 r.
7. Instrukcja ITB nr 416/2006 – Projektowanie budynków na terenach górniczych. Warszawa 2006 r.
8. Instrukcja ITB nr 364/2007 – Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. Warszawa 2007 r.
9. „Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych”, praca zbiorowa pod kierunkiem J. Kwiatka, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 1997 r.
10. Instrukcja zabezpieczeń i napraw linii przesyłowych na terenach górniczych, Warszawa 1999 r. materiały wewnętrzne PSE Warszawa.
11. Ajdukiewicz A., Broł J., Górski M., Krzywoń R., Szojda L.: Stany awaryjne słupów energetycznych linii przesyłowych na terenach górniczych. XIX Konferencja Naukowo-Techniczna *Awarie Budowlane*, Szczecin-Międzyzdroje, 19–22 maja 1999, t.1, s. 31–38.