

dr inż. Jarosław Michalek¹⁾
ORCID: 0000-0002-4242-9054

Błędy wykonawcze linii SN przyczyną destrukcji słupa energetycznego

MV line workmanship errors the cause of power pole destruction

DOI: 10.15199/33.2022.11.36

Streszczenie. Podczas pionowania energetycznych słupów z betonu wirowanego w linii średniego napięcia doszło do złamania jednego z nich. Komisja badająca przyczyny zdarzenia stwierdziła, że zastosowana żerdź E15/4,3 była wadliwa. Przeanalizowano sposoby posadawienia słupów energetycznych, sprawdzono nośność przedmiotowej żerdzi oraz poddano oględzinom złamany fragment. Na podstawie analiz stwierdzono, że złamanie żerdzi nastąpiło w wyniku zastosowania błędnej „techniki siłowego” pionowania słupów w linii, a nie wad żerdzi.

Słowa kluczowe: linia energetyczna SN; słup energetyczny; beton wirowany; destrukcja.

Abstract. During the verticalization of spun concrete power poles on a medium voltage line, one of them broke. The committee investigating the cause of the incident found that the pole E15/4.3 which was used was defective. The methods of foundation of power poles were analysed, the bearing capacity of the pole in question was checked, and the broken fragment was inspected. Based on these analyses, it was found that the pole was broken as a result of the incorrect "force technique" of verticalization the poles in line and not defects of the pole.

Keywords: MV power line; power pole; spun concrete; destruction.

Przyczyną awarii i uszkodzeń linii energetycznych często są anomalie pogodowe i ekstremalne warunki atmosferyczne: opady mokrego śniegu, oblodzenia, intensywne opady deszczu, wichury i burze [1-4]. Liczne są również awarie spowodowane błędami eksploatacyjnymi, a także wadami konstrukcyjno-montażowymi. Uszkodzenia napowietrznych sieci elektroenergetycznych polegają na: zerwaniu przewodów, złamaniu słupów, uszkodzeniu konstrukcji stalowych oraz izolatorów. Awaryjne awarie linii napowietrznych w niekorzystnych warunkach atmosferycznych często przyczyniają się w awarie sieciowe o znacznej skali.

W artykule przedstawiono przypadek destrukcji żerdzi elektroenergetycznej stanowiącej słup przelotowy w linii energetycznej SN.

Opis zaistniałego zdarzenia

Podczas usuwania przez pracowników firmy wykonawczej usterek gwarancyjnych polegających na pionizacji nadmiernie odchylonych żerdzi elektroenergetycznych jedna z nich (E15/4,3) uległa złamaniu. Prace prowadzono na czynnej linii energetycznej średniego napięcia [5], co mogło stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia ekip wyko-

nawczych. Po wcześniejszym wypionowaniu kilku słupów przystąpiono do pionowania słupa nr 12. Tak jak w przypadku poprzednich słupów został odkopany fundament żerdzi na głębokość ok. 0,6 m. Następnie do górnej części słupa przywiązano linę i uruchomiono wciągarkę. Po naprężeniu liny żerdź uległa złamaniu i przewróciła się. Odłamała się część górna słupa od dolnej o długości ok. 1,8 m stanowiącej utwierdzenie żerdzi w gruncie. Zdziałyły zabezpieczenia ziemnozwarciowe oraz nastąpiło wyłączenie reklozera. Prace zostały przerwane. Zdecydowano o wymianie słupa. W tym samym dniu słup postawiono (a dokładnie odłamaną górną część żerdzi E15/4,3 o długości ok. 13 m).

Sprawę uznano za zamkniętą i gdyby nie zgłoszenia odbiorców o przerwie w dostawie energii nie zajęto by się tą awarią. Powołano komisję ds. wyjaśnienia przyczyny przerwy w dostawie energii. Firma wykonawcza opisała zdarzenie, a komisja badająca zaistniałą sytuację stwierdziła, że *zastosowana żerdź E15/4,3 była wadliwa – z oględzin odłamanej części słupa wynika, że brakuje w niej równomiernie rozmieszczonego zbrojenia, a ilość widocznych drutów zbrojenia jest niewystarczająca* [5]. Dodatkowo postanowiono *w celu uniknięcia w przyszłości zastosowania niepełnowartościowych urządzeń oraz podobnych zdarzeń zobowiązać Wykonawcę do powiadomienia o zdarzeniu produ-*

centa słupów i wyjaśnić, czy złamana żerdź faktycznie była wadliwie wykonana [5].

Analiza posadawienia słupów

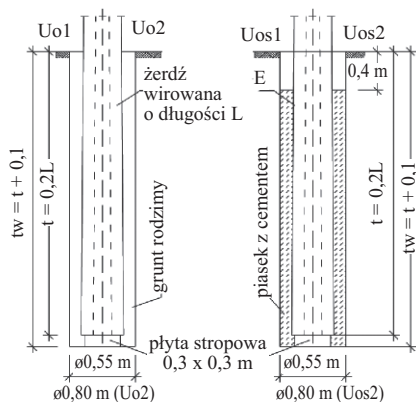
Strunobetonowe słupy z żerdzi typu E mocowane są w gruncie z wykorzystaniem rozwiązania podanego w katalogach i projektach typowych [6], albo projektuje się je indywidualnie zgodnie z zaleceniami normy [7]. W przypadku sił wierzchołkowych $P_k \leq 10$ kN (w tym przypadku $P_k = 4,3$ kN) wirowane słupy energetyczne są osadzane bezpośrednio w gruncie w otworze wierconym $\varnothing 0,5 \div 0,8$ m (rysunek 1) bądź kopanym metodami tradycyjnymi na głębokość $t = 0,2$ L [8].

W fundamentach słupowych wykonywanych w gruntach słabych, gliniastych i łąkach przestrzeń między słupem a gruntem powinna zostać wypełniona piaskiem zmieszany z cementem (fundamenty Uos1 i Uos2 – rysunek 1). W przypadku gruntów mocnych i średnich można ją zasypać niespoistym gruntem rodzimym lub piaskiem ubijanym warstwami o grubości $0,2 \div 0,3$ m. W gruntach słabych można stosować fundamenty słupowe z płytami ustrojowymi U lub belkami B [6, 8]. Na rysunku 2 cyfrą 1 oznaczono płyty żelbetowe U-85 lub U-130, a cyfrą 2 ocynkowane obejmy stalowe mocujące płyty U z żerdzią. W gruntach pylastych pod żerdzią

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; jaroslaw.michalek@pwr.edu.pl

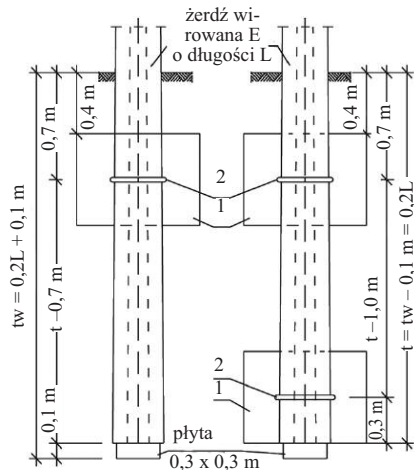
należy umieścić płytę betonową albo belkę kątową B-90z [6].

Żerdź E15/4,3 została osadzona bezpośrednio w gruncie w otworze wierconym, a przestrzeń między słupem a gruntem zasypana niespoistym gruntem rodzimym ubijanym warstwami (rysunek 1). Średnica otworu wierconego pod żerdź E15/4,3 powinna wynosić $\varnothing 0,8$ m, ze względu na średnicę jej podstawy $D_p = 443$ mm. Głębokość posadowienia żerdzi w tym przypadku może być zmniejszona do $t = 0,16 \cdot 15,0 = 2,4$ m ze względu na grunty spoiste, które występują w strefie przebiegu linii energetycznej. Nadmierne odchylenie od pionu słupów w analizowanej linii energetycznej SN mogło powstać w wyniku błędów na etapie projektowania (niewłaściwa lub niepełna ocena nośności gruntu) i/lub wykonania posadowienia słupów (np.



Rys. 1. Fundamenty słupowe Uo1 i Uo2 oraz Uos1 i Uos2

Fig. 1. Uo1 and Uo2 as well as Uos1 and Uos2 columnar foundations



Rys. 2. Fundamenty z płytami U-85 i U-130 (opis w tekście)

Fig.2. Foundations with U-85 and U-130 plates (description in text)

zbyt płytko osadzona żerdź w gruncie, niewłaściwe wypełnienie i zagęszczenie przestrzeni pomiędzy słupem a gruntem).

Analiza projektu technicznego żerdzi E15/4,3

Z analizy projektu technicznego [9] wynika, że nośność obliczeniową na zginanie M_{Rd} w poszczególnych przekrojach żerdzi E15/4,3 obliczono zgodnie z normą [10] oraz [11]. W przekroju poprzecznym żerdzi E15/4,3 przyjęto 12 drutów sprężających $\varnothing 7,5$ mm o symbolu Y1670C w rozstawie kątowym: 25,7; 51,4; 77,2; 102,9; 128,6; 154,3; 205,7; 231,4; 257,2; 282,9; 308,9; 334,3 [9]. W płaszczyźnie otworu wentylacyjnego $\varnothing 40$ mm w przekroju odległym o 2,0 m od nasady słupa nośność żerdzi E15/4,3 na zginanie wynosi $M_{Rd,y} = 99,388$ kNm. W płaszczyźnie prostopadłej nośność graniczna na zginanie wynosi natomiast $M_{Rd,x} = 101,882$ kNm (czyli jest większa od $M_{Rd,y}$, ale tylko o 2,5%).

Z nośności $M_{Rd,y}$ żerdzi E15/4,3 na zginanie można określić zastępczą siłę użytkową $P_{kt,y} = M_{Rd,y} / [(L - 2,0 - 0,2) \cdot \gamma_f] = 99,388 / [(15,0 - 2,0 - 0,2) \cdot 1,3] = 5,97$ kN w przypadku współczynnika obciążeń $\gamma_f = 1,3$ lub $P'_{kt,y} = 99,388 / [(15,0 - 2,0 - 0,2) \cdot 1,5] = 5,18$ kN dla $\gamma_f = 1,5$ (P_k to zastępcza siła charakterystyczna, jaką można przyłożyć w odległości 0,2 m od szczytu żerdzi). Rzeczywista nośność użytkowa żerdzi E15/4,3 jest większa od deklarowanej przez producenta $P_k = 4,3$ kN o 38,8% w przypadku współczynnika $\gamma_f = 1,3$ (żerdź odporowa) i o 20,5% – współczynnika $\gamma_f = 1,5$ (żerdź przelotowa obciążona parciem wiatru na przewody, poprzecznik z izolatorami i trzon słupa).

Żerdzie wirowane nie muszą mieć równomiernie rozmieszczonego zbrojenia, żeby spełniały założone warunki nośności i użyteczności [11, 12]. Uwaga podana w protokole [5], że zastosowana żerdź E15/4,3 była wadliwa – z oględzin odlamanej części słupa wynika, że brakuje w niej równomiernie rozmieszczonego zbrojenia, a ilość widocznych drutów zbrojenia jest niewystarczająca jest nieprawdziwa. Nie brakuje zbrojenia w żerdzi E15/4,3, a jego przekrój jest wręcz o 20% większy niż potrzeba do zapewnienia nośności użytkowej $P_k = 4,3$ kN. Żerdź E15/4,3 uległa złamaniu, ponieważ moment utrzymujący

jący żerdź w ustabilizowanym gruncie okazał się większy od nośności żerdzi na zginanie.

Analiza części odziomkowej złamanej żerdzi E15/4,3

Uzyskano dostęp do części odziomkowej o długości ok. 1,8 m żerdzi E15/4,3 złamanej podczas tzw. pionowania (fotografia 1). Stwierdzono, że w nasadzie żerdź ma średnicę $D_p = 443$ mm, a grubość ścianki wynosi $t_p = 115$ mm. Żerdź została zbrojona podłużnie 12 drutami sprężającymi $\varnothing 7,5$ mm (fotografia 2). Zbrojenie poprzeczne stanowi spirala z drutu $\varnothing 3,5$ mm.



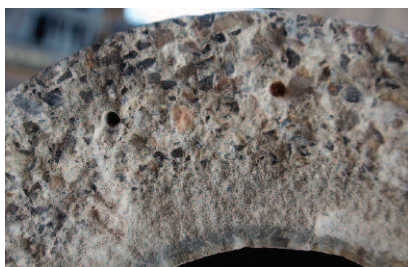
Fot. 1. Odziomkowa część żerdzi E15/4,3
Photo 1. The lower part of the pole E15/4.3



Fot. 2. Żerdź E15/4,3 od strony zniszczonej
Photo 2. The E15/4.3 pole from the damaged side

W strefie zniszczenia żerdzi grubość ścianki wyniosła $t = 112$ mm, a beton wirowany charakteryzował się zwartą strukturą, co świadczy o jego dobrej jakości w słupie. Zbrojenie sprężające zostało umieszczone prawidłowo w warstwie gruboziarnistego betonu z otuliną $c = 33 \div 34$ mm. W analizowanej strefie przekroju poprzecznego sześć drutów sprężających w strefie rozciąganej zostało zerwanych (o czym świadczą otwory po drutach – fotografia 3), a pozostałe sześć w strefie ściskanej betonu zostało powyginane (fotografia 2) i odcięte po złamaniu słupa. Zerwanie sześciu drutów sprężających w strefie rozciąganej świadczy o dużej wytrzymałości na ściskanie betonu wirowanego.

Na długości odziomkowego odcinka żerdzi E15/4,3 po stronie rozciąganej w odległości ok. 1,28 m od nasady stwier-



Fot. 3. „Puste” otwory po zerwanych drutach sprężających; widoczna jest uwarstwiona struktura betonu wirowanego
Photo 3. „Empty” holes after broken prestressing wires; the layered structure of spun concrete is visible

dzono rysę prostopadłą (fotografia 4) do osi żerdzi o szerokości rozwarcia $w = 0,8$ mm. Tak duża rozwartość rysy oraz zerwane ciągną w strefie rozciąganej świadczą o osiągnięciu granicy plastyczności w stali sprężającej (stąd zanik siły sprężającej w strefie odłamanej żerdzi z rysą $w = 0,8$ mm), a następnie zerwaniu sześciu drutów sprężających w strefie rozciąganej przekroju. Żerdź E15/4,3 uległa zatem zniszczeniu podczas zginania momentem w utwierdzeniu $M_n \geq 137,6$ kNm, co odpowiada sile wierzchołkowej $P_{nt} = 1,8 \cdot P_{kt} = 1,8 \cdot 5,97 = 10,75$ kN albo sile $P'_{nt} \geq 21,5$ kN w linii zaczepionej w odległości $0,5 \cdot 12,8 + 0,2 = 6,6$ m od szczytu.



Fot. 4. Rysa poprzeczna o szerokości $w = 0,8$ mm w odległości ok. 1,28 m od nasady świadcząca o przeciążeniu żerdzi podczas próby jej pionowania
Photo 4. A transverse crack with a width of $w = 0,8$ mm at a distance of about 1.28 m from the base of the pole proving its overload during the verticalization attempt of the pole

Wnioski

Stwierdzony podczas oględzin części odziomkowej żerdzi E15/4,3 układ drutów sprężających $\varnothing 7,5$ mm oraz zmierzone otuliny wskazują na bardzo dobrą jakość słupa i zgodność jego wykonania z projektem [9]. Stoi to w sprzeczności do wniosków podanych przez komisję wyjaśniającą. Rzeczywista nośność użytkowa żerdzi E15/4,3 jest większa od deklarowanej przez producenta

$P_k = 4,3$ kN o 38,8% w przypadku współczynnika obciążeń $\gamma_f = 1,3$ ($P_{kt} = 5,97$ kN) i o 20,5% współczynnika $\gamma_{ft} = 1,5$ ($P_{kt} = 5,18$ kN). Zatem w przypadku normalnej eksploatacji żerdzi E15/4,3 jako przelotowej w linii SN występują znaczne zapasy nośności użytkowej i na pewno nie doszłoby do jej zniszczenia.

Obraz zniszczenia żerdzi E15/4,3 można odtworzyć na podstawie oględzin części odziomkowej o długości ok. 1,8 m. Żerdź doznała najpierw znacznego wyężenia zgięciowego podczas próby pionowania przy użyciu liny zaczepionej do części nadziemnej, o czym świadczy rysa poprzeczna do osi żerdzi (fotografia 4) zlokalizowana po stronie rozciąganej przekroju. Rysa ta wskazuje na osiągnięcie przez druty sprężające naprężeń plastycznych. Przy dalszym obciążaniu żerdź uległa złamaniu w wyniku zerwania sześciu drutów sprężających w strefie rozciąganej przekroju oraz wykruszeniu się betonu strefy ściskanej podczas upadku odłamanej części nadziemnej. Pozostałe sześć drutów w strefie ściskanej zostało powyginane wskutek obrotu części nadziemnej w stosunku do odziomka. Zatem, aby zniszczyć żerdź E15/4,3 ze zbrojeniem jak w projekcie [9], należało przyłożyć w szczycie żerdzi siłę niszczącą $P_{nt} = 10,75$ kN, która jest o 38,8% większa od siły $P_n = 1,8 \cdot P_k = 1,8 \cdot 4,3 = 7,74$ kN deklarowanej przez producenta. Podczas pionowania przy użyciu liny bez kontroli siły w linii, bardzo łatwo można żerdź przeciążyć albo zniszczyć. Należy zauważyć, że obraz zniszczenia żerdzi E15/4,3 (zerwanie drutów sprężających w strefie rozciąganej) świadczy o dużej wytrzymałości na ściskanie betonu w żerdzi.

Należy podkreślić, że winę za złamanie słupa przelotowego nr 12 w napowietrznej linii SN wykonanego z żerdzi E15/4,3 ponosi ekipa realizująca tzw. pionowanie słupów. Zastosowana „technika siłowego” pionowania słupów w linii jest błędna i prowadzi do uszkodzeń lub zniszczenia słupów. W celu wyeliminowania podobnych zdarzeń należy przeszkolić projektantów w zakresie posadawiania słupów energetycznych z betonu wirowanego, a także uczulić na potrzebę przeprowadzania z odpowiednią częstotliwością badań geotechnicznych

wzdłuż trasy projektowanej linii energetycznej. Przeszkolone powinny zostać także ekipy montujące słupy jednożerdziowe z betonu mocowane bezpośrednio w gruncie w celu wyeliminowania błędnego ich posadawienia w postaci wychyleń od pionu.

Fotografie: Autor

Literatura

- [1] Fouad FH, Scott NL, Calvert E, Donovan M. Performance of spun prestressed concrete poles during Hurricane Andrew, PCI Journal. 1994, <https://doi.org/10.15554/pci.03011994.102.110>.
- [2] Kliukas R, Daniunas A, Gribniak V, Lukoseviciene O, Vanagas E, Patapavicius A. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: inspection, field-testing, and performance assessment, Structure and Infrastructure Engineering, Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance. 2017, doi.org/10.1080/15732479.2017.1402068.
- [3] Acosta FJ, Esquilin-Mangual O, Wood SG, Long WR, Valdes D. Lessons learned from the evaluation of concrete pole failures following Hurricane Maria, Dimensión Ingeniería y Agrimensura, Revista del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIARP). 2018, No 32, Vol. 1, 35-39.
- [4] Zeynalian M, Khorasgani MZ. Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network, Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.005>.
- [5] Michałek J, Łodo A. Opinia dotycząca przyczyn złamania słupa nr 12 (żerdź E15/4,3) podczas jego pionowania w linii SN. Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Raport serii SPR nr 7/2020, Wrocław 2020.
- [6] Kubiak J, Łodo A, Michałek J. Projekt prefabrykatów żelbetonowych przeznaczonych na ustoje fundamentowe dla żerdzi elektroenergetycznych ŻN i E. Raport serii U nr 55/2011, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2011.
- [7] PN-B-03322:1980 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Fundamenty konstrukcji wsporczych. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [8] Kubiak J, Łodo A, Michałek J. Fundamenty strunobetonowych słupów elektroenergetycznych SN i nn. Materiały Budowlane. 2014; (6): 48 – 49.
- [9] Kubiak J, Łodo A, Michałek J. Projekt techniczny elektroenergetycznych żerdzi z betonu wirowanego typu E 13,5/2,5; E 13,5/4,3; E 13,5/15c; E 15/2,5; E15/4,3 i E15/15c. Pracownia Doradztwa Projektów Ekspertyz Budowlanych Compendium, Wrocław 2012.
- [10] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [11] Łodo A, Michałek J. Stany graniczne nośności zginanych elementów strunobetonowych o przekroju pierścieniowym. W: KS2015: Konstrukcje Sprężone: Konferencja Naukowo-Techniczna, Kraków, 16-17 kwietnia 2015. Kraków: Pracownia Konstrukcji Sprężonych. Politechnika Krakowska, 2015. 1-7.
- [12] Kubiak J, Łodo A, Michałek J. Metodyka badań żerdzi elektroenergetycznych z betonu. Materiały Budowlane. 2013; (3): 32 – 34.

Przyjęto do druku: 27.09.2022 r.