



PAWEŁ LEWIŃSKI, *p.lewinski@itb.pl*

PRZEMYSŁAW WIĘCH, *p.wiech@itb.pl*

Institut Techniki Budowlanej, ul. Filtrowa 1, 00-611 Warszawa

PRZYCZYNY AWARII PODCZAS MONTAŻU SŁUPA KRATOWEGO NADLEŚNEGO „MOCNEGO” LINII 400 KV

CAUSES OF FAILURE UNDER ASSEMBLY OF TENSION FOREST LATTICE TOWER FOR 400 KV ELECTRIC LINE

Streszczenie W pracy opisano przyczyny awarii podczas montażu słupa kratowego nadleśnego „mocnego” linii 400 kV. Opisano proces montażu, okoliczności związane z awarią oraz wyniki obliczeń statycznych w zakresie obciążeń projektowych i montażowych. Przedstawiono wnioski końcowe.

Abstract Causes of the failure under assembly of tension forest lattice tower for 400 kV electric line are a subject of the paper. The process of assembly, the circumstances connected with failure and the results of static calculations for design and assembly actions are described. The final conclusions have been given.

1. Konstrukcja słupa

Przedmiotem referatu jest awaria słupa kratowego nadleśnego „mocnego” (tj. w tym przypadku – odporowo-naroznego) linii elektroenergetycznej 400 kV podczas montażu. Konstrukcja słupa nadleśnego typu „mocnego” została zaprojektowana dla dwutorowej linii 400 kV z przewodami roboczymi w postaci wiązki potrójnej typu $3 \times \text{AFL-8 } 350 \text{ mm}^2$ i odgromowymi typu $2 \times \text{AFL-1.7 } 70 \text{ mm}^2$. W obliczeniach przewidziano jednak również zastosowanie przewodu odgromowego ze światłowodem (typu OPGW) o przekroju sumarycznym 68 mm^2 . Słupy zaprojektowane zostały z uwzględnieniem obciążenia wiatrem i sadzią jak dla I strefy klimatycznej. W projekcie przewidziano odchylenie trasy linii elektroenergetycznej od osi o kąt wynoszący ok. 48° . Konstrukcja słupa została (według projektu) dostosowana do możliwości zawieszenia jednego toru po jednej stronie słupa. Rys. nr 4 przedstawia schemat konstrukcji słupa nadleśnego „mocnego”. Słup o wysokości całkowitej 71,4 m zaprojektowano jako stalową konstrukcję przestrzenną ramowo-kratownicową złożoną z kątowników łączonych ze sobą na budowie. Słup zaprojektowano z kształtowników ze stali 18G2A i St3SY łączonych śrubami klasy 5,8 i nakrętkami klasy 5, a także lokalnie spoinami pachwinowymi i czołowymi. Większość tzw. krawężników (por. [2]) wykonano z kątowników równoramiennych ze stali 18G2A. Krzyżulce, słupki i inne pręty skratowania wykonano przeważnie z kątowników równoramiennych (za wyjątkiem stężeń poziomych) ze stali St3SY. Blachy węzłowe walcowane na gorąco zostały zaprojektowane z tej samej stali. Poprzeczniki dla przewodów fazowych zostały dostosowane do wielopunktowego zawieszenia przewodów, a konstrukcja słupa – do montażu wysokościowego poszczególnymi segmentami. Konstrukcja została wyposażona w stopnie włazowe umieszczone na czterech krawężnikach. Na skratowaniu pionowym poprzecznika umieszczono

dotatkowo poziomy pręt bezpieczeństwa dla monterów. Słup nadleśny „mocny” o podstawie kwadratowej o wymiarach 13,5×13,5 m przewidziano do posadowienia na fundamentach żelbetonowych monolitycznych z zabetonowaną w nich kotwą kątownikową skośną, zaprojektowanych odpowiednio do występujących warunków gruntowo-wodnych. W obliczeniach omawianego słupa założono rozpiętość pręśła wiatrowego i ciężarowego 280 m, a współczynnik konsekwencji zniszczenia: $\gamma_n = 0,95$. Naprężenia przewodów odgromowych AFL-1.7 (w temperaturze -5° przy SN – tj. sadzi normalnej) oraz OPGW (-5° i SN) przyjęto, odpowiednio; 140 i 165 MPa, natomiast przewodów fazowych AFL-8 (-5° i SN): 70 MPa. Słup był projektowany według wymagań norm PN-E-05100-1:1998 [3], PN-B-03200:1990 [1] i PN-B-03205:1996 [2]. W czasie projektowania słupa nie obowiązywały jeszcze wymagania podane w normach serii PN-EN 50341.

2. Przebieg awarii

Przebieg awarii według notatki służbowej sporządzonej przez wykonawcę był następujący. Okoliczności zdarzenia, jakie miało miejsce w dniu 21.06.2005 r. o godzinie około 12:40 na słupie nr 125 linii elektroenergetycznej 400 kV w miejscowości Dąbrowa w centralnej Polsce, nie wskazują na zagrożenia klimatyczne, gdyż pogoda była słoneczna, bezwietrzna, temperatura około 22°C . Sytuacja podczas montażu przed zdarzeniem była następująca. Od stanowiska nr 126 (słup M1) do stanowiska nr 125 (słup NL M5) zamontowane zostały przewody robocze, przewód odgromowy i OPGW zgodnie z wykazem montażowym, tj. długość pręśła (125–126) wyniosła 347 m. Naprężenie przewodów roboczych wynosiło 70 MPa, odgromowego: 140 MPa, zaś OPGW: 165 MPa. Następnie na górnym poprzeczniku dla przewodów roboczych słupa nr 125 przymocowany został krążek zapasu przewodu OPGW. Poprzeczniki dla przewodów roboczych słupa nr 125 zostały zakotwione do ziemi linami stalowymi w kierunku słupa nr 124 w odległości 148 m. Natomiast ramiona poprzeczników przewodów roboczych zostały podwieszane naciągach z linek stalowych $\phi 10$ i śrubach rzymskich $\phi 16$ do trzonu słupa nr 125 typu NL M5 – zgodnie z instrukcją. Elektromonter wykonujący prace na wysokości potwierdził, że w/w ciągnąco na górnym poprzeczniku dla przewodów roboczych było w stanie lekkiego naciągu (zgodnie z instrukcją montażu tylko na jednym torze wiązkowych przewodów fazowych $3 \times \text{AFL } 8\text{-}350 \text{ mm}^2$, przewodów odgromowych oraz OPGW). Analogicznie zabezpieczono poprzeczniki dla przewodów roboczych słupów przelotowych nr 121–124. Ponadto na słupach przelotowych nr 121–124 zamontowano łańcuchy izolatorowe ŁPV wraz z potrójnymi rolkami montażowymi.

Kolejność wykonanych czynności związanych z montażem górnej wiązki przewodów roboczych w sekcji słupów nr 120–125 była następująca. W pierwszej kolejności ustawiono 3 bębny z przewodami roboczymi wraz z hamownikami przy słupie nr 120 NL M5. Ręcznie rozwinięto stalową linkę wstępną od stanowiska nr 120 do wciągarki usytuowanej za słupem 125 w odległości 136 m (por. rys. 3). Następnie zamontowano rolkę montażową na dolnym poprzeczniku słupa nr 125 w celu uniknięcia dalekiego cofnięcia przewodów od słupa podczas ich opuszczania, po przeciągnięciu wzdłuż całej sekcji. Przeciągnięcie to miało na celu zainstalowanie łańcucha izolatorów oraz uniknięcie naprężenia przewodów roboczych podczas luźnego wpięcia przedmiotowego łańcucha do poprzecznika słupa nr 125. Docelowe wpięcie sekcji odciągowej 120–125 z projektowanym naprężeniem miało nastąpić na słupie nr 120. W dalszej kolejności rozwinięto wciągarką potrójną wiązkę przewodów roboczych nad koronami drzew poprzez linkę wstępną i uchwyt orczykowy (siłą 35–45 kN), do momentu dojścia powyższego uchwytu orczykowego do dolnego poprzecznika słupa nr 125. Dalsze czynności obejmowały zluźnianie rozciągniętych przewodów roboczych na hamownikach w celu ich opuszczenia na ziemię oraz zluźnianie linki wstępnej na wciągarkę

w celu opuszczenia orczyka wraz z przypiętymi przewodami roboczymi – w celu umożliwienia wpięcia ich do łańcucha ŁO-2, montaż łańcucha ŁO-2 do opuszczonych przewodów roboczych poprzez uchwyty klinowe (z uwzględnieniem zapasu przewodów na mostki prądowe) i montaż rolek na górnym poprzeczniku słupa nr 125, a następnie przeciągnięcie dwóch linek stalowych od dwóch wciągarek i wpięcie ich do wcześniej przygotowanego łańcucha ŁO-2. Zastosowanie dwóch wciągarek wynika z dwupunktowego wpięcia łańcucha do poprzeczника. Po podniesieniu łańcucha ŁO-2 na wysokość ok. 2 m od ziemi zatrzymano pracę wciągarek w celu podwieszenia do osprzętu łańcucha izolatorowego zapasu przewodów niezbędnych do wykonania mostków prądowych. Następnie rozpoczęto dalsze wciąganie łańcucha ŁO-2 z przewodami roboczymi. Na wysokości łańcucha ok. 5 m od ziemi nastąpiło zniekształcenie, skrócenie i odchylenie trzonu oraz ramion górnych poprzeczników słupa nr 125 (por. rys. 1 i 2) – natychmiast zatrzymano pracę wciągarek. Zaistniała sytuacja spowodowała "miękkie" opadnięcie łańcucha ŁO-2 na ziemię, nie powodujące jego uszkodzenia. Według informacji operatorów wciągarek siła naciągu według wskaźników wynosiła około 3,0÷3,5 kN na każdej z maszyn. W czasie oględzin po zdarzeniu znaleziono śrubę rzymską z rozgiętym zaczepem, która wraz z linką stalową ϕ 10 była zabezpieczeniem górnego poprzeczника słupa 125. Następnie zabezpieczono rozwinięte przewody wraz z łańcuchem izolatorowym mocując je do nogi słupa nr 125 na wysokości około 20 m. Należy zaznaczyć, że w/w prace wykonywane były zgodnie z zatwierdzoną instrukcją, a użyty sprzęt i narzędzia (wciągarki, hamowniki, rolki i inne) były technicznie sprawne. Łączność radiowa pomiędzy kierującym pracami a obsługą sprzętu i pozostałymi członkami brygady była zachowana. Stwierdzono, że przewody robocze w przęstach 120–121–122–123–124 w czasie podciągania łańcucha ŁO-2 z przewodami celem wpięcia do górnego ramienia słupa 125 do momentu zaistniałego zdarzenia nie przemieściły się (pozostały na ziemi lub na koronach drzew). Wykorzystanie dolnego ramienia słupa 125 do przeciągnięcia przewodów roboczych (siłą 35÷45 kN) nie wywołało żadnych negatywnych skutków, takich jak uszkodzenie poprzeczника, zerwanie linki lub śruby rzymskiej zabezpieczającej ramię. Każdy z poprzeczników słupa 125, do których miały być wpięte przewody robocze, został w taki sam sposób zabezpieczony, jak opisano powyżej.

3. Wyniki analizy obliczeniowej słupa dla obciążeń montażowych

Przeprowadzono analizę obliczeniową słupa dla obciążeń montażowych, mających wpływ na przebieg awarii. Na górne poprzeczniki do przewodów odgromowych i fazowych działał układ sił montażowych odmienny, niż to jest przewidziane dla fazy eksploatacji. Były to siły pochodzące zarówno od linek wstępnych, jak i przewodów działające pod odmiennymi kątami. Zgodnie z normą PN-E-05100-1:1998 [5] p. 7.3.3 „Słupy należy obliczać na obciążenia montażowe zgodnie z przyjętą technologią stawiania słupów i montażu przewodów”. W obliczeniach sprawdzających uwzględniono m. in. następujące obciążenia:

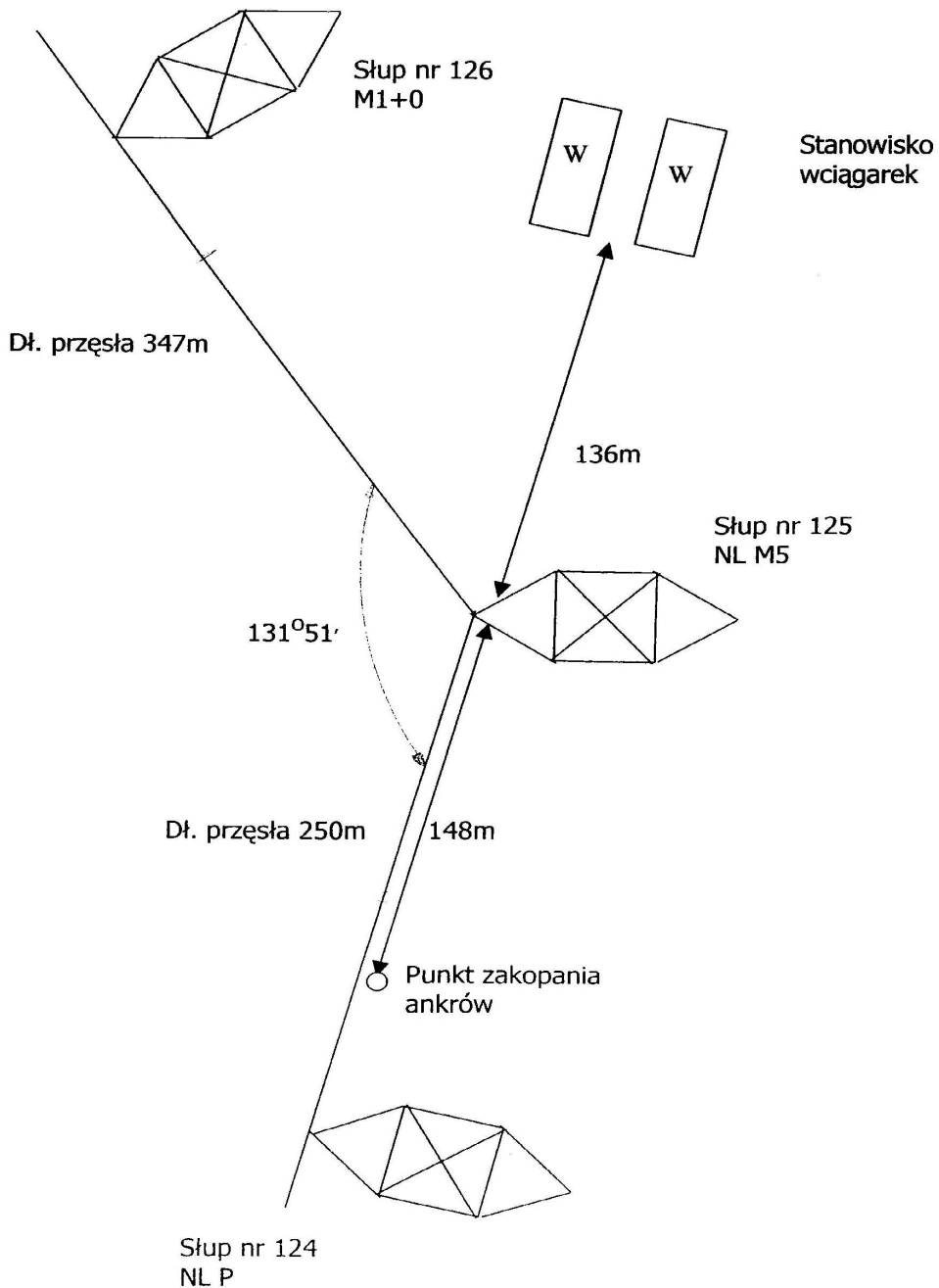
- ciężar i naciąg przewodów odgromowych,
- ciężar i naciąg od przewodów fazowych i izolatorów,
- naciąg od dwóch linek stalowych od dwóch wciągarek w odległości poziomej 136 m,
- naciąg od stalowej linki kotwiącej w odległości poziomej 148 m (por. rys. 3).



Rys. 1. Postać zniszczenia górnej części słupa

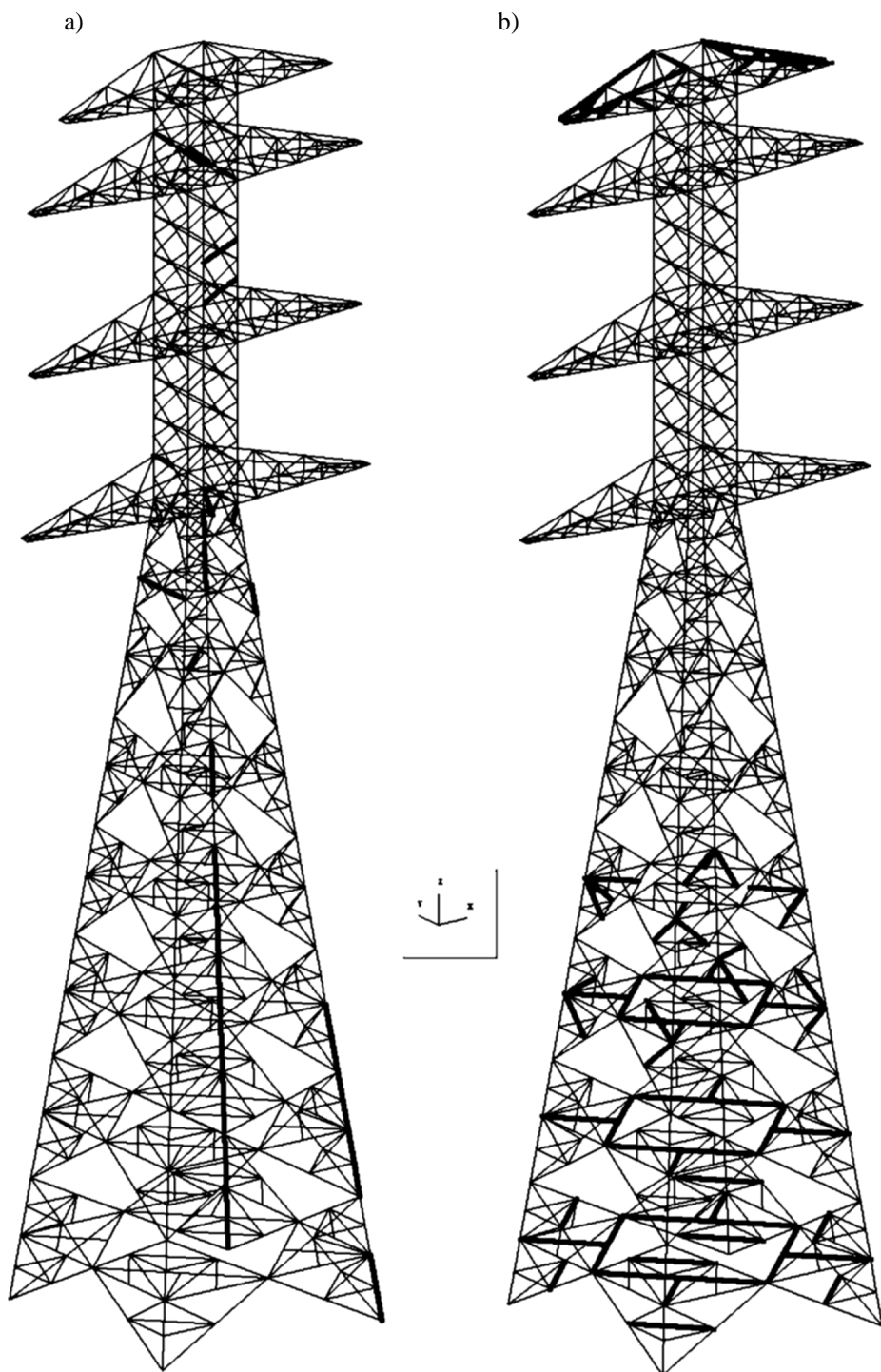


Rys. 2. Szczegół zniszczenia słupa na wysokości poprzecznika



Rys. 3. Szkic sytuacyjny zdarzenia na stanowisku nr 125

Po zestawieniu wszystkich sił obciążających podczas montażu przeprowadzono dodatkową sprawdzającą analizę statyczno-wytrzymałościową słupa nadleśnego metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu programu ROBOT Millenium w wersji 16.0.



Rys. 4. Schemat obliczeniowy słupa. a) graficzny wykaz prętów nadmiernie wyężonych,
b) graficzny wykaz prętów, dla których smukłość $\lambda > 250$

Podczas montażu siły spowodowane ciężarem i naciągiem od przewodów i izolatorów sumowały się z siłami naciągu od 2 linek stalowych od wciągarek oraz od stalowej linki kotwiącej; siły sumaryczne charakterystyczne od ciężaru przewodów i od sady normalnej na przewodach wynosiły 28,5 kN, podczas gdy siła pionowa działająca na ramię poprzecznika w momencie awarii wyniosła ok. 45,6 kN. Na obciążenie to składał się ciężar od przewodów fazowych i izolatorów z przęsła między słupami 125 i 126 (o rozpiętości 347 m): 19,1 kN, ciężar izolatora od strony słupa 124: 4,4 kN, składowa pionowa naciągu od stalowej linki kotwiącej jw. dla naciągu przewodów w temperaturze 20°C: 19,1 kN oraz składowa pionowa naciągu od 2 linek stalowych wciągarek (na podstawie notatki służbowej wykonawcy): 3 kN. Maksymalne obciążenie charakterystyczne, mogące oddziaływać w końcowej fazie operacji na ramię poprzecznika, otrzymane na podstawie obliczeń ITB, mogłoby wynosić 72,8 kN. Dodatkowo na ramię poprzecznika działał niezrównoważony poziomy naciąg od dwóch linek stalowych od wciągarek wynoszący ok. 6,3 kN. Zniszczenie nastąpiło więc przy obciążeniu poprzecznika siłą wynoszącą 1,6 maksymalnego obciążenia charakterystycznego. Obliczenia wykazały znaczne przekroczenie nośności w ukośnikach górnej części kolumny słupa, co potwierdziło przypuszczenie, że słup nie został sprawdzony obliczeniowo na obciążenia montażowe zgodne z przyjętą technologią stawiania słupów i montażu przewodów. Linka zabezpieczająca nie odegrała roli z uwagi na zniszczenie kolumny.

4. Wyniki analizy obliczeniowej słupa dla obciążeń projektowych

Przeprowadzono dodatkową analizę statyczno-wytrzymałościową słupa typu nadleśnego „mocnego” metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu programu ROBOT Millennium w wersji 16.0 dla obciążeń projektowych zgodnych z wymaganiami norm PN-E-05100-1:1998, PN-B-03200:1990 i PN-B-03205:1996. Obliczenia przeprowadzono przy przyjęciu schematu ramowo-kratownicowego, odwzorowującego konstrukcję słupa w sposób możliwie zbliżony do rzeczywistego. Przy przyjęciu tych założeń uzyskano zbliżone wyniki do tych, które można było uzyskać z podobnego modelu zastosowanego przez projektantów przy wykorzystaniu programu ROBOT w wersji 6.0. Jednakże w obecnych obliczeniach nie uwzględniono podwójnej redukcji obciążenia wiatrem; tj. przy zastosowaniu współczynnika konsekwencji zniszczenia $\gamma_n = 0,95$ [2] oraz, traktując obciążenie wiatrem jako drugie obciążenie zmienne, przy zastosowaniu współczynnika jednoczesności $\Psi_{oi} = 0,9$ [4]. Ponadto, zgodnie z wykazem montażowym długość przęsła 125–126 wyniosła 347 m, a długość przęsła 124–125: 250 m, a zatem są to wielkości sumarycznie biorąc większe od przewidzianych w projekcie. W konstrukcjach słupów wysokiego napięcia oddziaływanie wiatru stanowi zasadnicze obciążenie decydujące o wymiarowaniu krawężników. Ponieważ w obliczeniach uwzględniono różne warianty obciążeń i ich superpozycji, uzyskano też odmienne wyniki obliczeń, z których wynikają odmienne wnioski. Ponadto w obliczeniach projektowych wykorzystano program ROBOT w wersji 6.0, który umożliwiał sprawdzanie nośności prętów słupa kratowego wykonanych z kątowników o przekrojach klasy 3 wg normy [1], podczas gdy program ROBOT Millennium w wersji 16.0 zaliczał przekroje tych kątowników przeważnie do klasy 4, co oznacza możliwość utraty nośności wskutek miejscowej utraty stateczności [1]. Nie jest więc paradoksem to, że w obliczeniach sprawdzających ITB wielkości wyężień poszczególnych prętów, w porównaniu z wynikami obliczeń projektowych, mogły okazać się znacznie większe. Konstrukcja przeliczona dla kilku różnych kombinacji obciążeń wykazywała przekroczenie nośności w poszczególnych grupach elementów. Na rys. 4a przedstawiono graficzny wykaz prętów o nadmiernym

wyężeniu, które wytypowano do wzmocnienia. Z uwagi na wprowadzenie jedynie dodatniego zwrotu działania parcia wiatru całkowita liczba prętów słupa, które według obliczeń sprawdzających okazały się nadmiernie wyężone, była dwukrotnie większa niż ta, która została przedstawiona graficznie na schemacie statycznym konstrukcji (por. rys. 4a). Zalecono wymianę części elementów krawężników na kształtowniki o większym przekroju lub zmianę sposobu skratowania trzonu i kolumny.

Dość kontrowersyjny był także problem znacznej liczby prętów, dla których stwierdzono smukłość $\lambda > 250$. Według założeń projektu pręty te miałyby pracować jedynie jako ciężna lub jako pręty „zerowe”. Jest jednak szereg obiekcji, co do takiego podejścia, takich jak:

- w rzeczywistych konstrukcjach pręty te są zarówno rozciągane jak i ściskane, pręty „zerowe” w układzie kratownicowym są niezerowe w układzie ramo-kraty.
- obciążenie wiatrem, stanowiące w wielu przypadkach zasadnicze obciążenie decydujące o wymiarowaniu elementów konstrukcji słupów wysokiego napięcia, jest w rzeczywistości obciążeniem dynamicznym,
- dynamikę obciążeń wywołuje też podskok przewodów powodowany oderwaniem się od nich sadzi, co w obliczeniach przewodów jest uwzględniane jako obciążenie dynamiczne.

W przypadku takich elementów słupa, jak: pas górny i krzyżulce poprzecznika odgromowego, stężenia poziome niektórych członów oraz niektóre krzyżulce drugorzędne trzonu pręty miały nadmierną smukłość $\lambda > 250$, co było niezgodne z normą [1]. Graficzny wykaz prętów, dla których $\lambda > 250$, pokazano na rys. 4 b). Zalecono, aby pręty te zostały dodatkowo stężone lub wymienione na pręty o większych przekrojach.

Na podstawie obliczeń stwierdzono, że ugięcia wierzchołka słupa są dopuszczalne według normy, o ile konstrukcja słupa zachowuje się w sposób liniowo-sprężysty.

5. Wnioski z analizy obliczeniowej słupa

Z przeprowadzonej analizy obliczeniowej słupa wynikają następujące wnioski.

- Słup nie został zaprojektowany z uwagi na obciążenia montażowe zgodne z przyjętą technologią stawiania słupów i montażu przewodów.
- W projekcie słupa dokonano dwukrotnej redukcji obciążenia wiatrem stosując współczynnik konsekwencji zniszczenia $\gamma_n = 0,95$ i traktując obciążenie wiatrem jako drugie obciążenie zmienne, przy zastosowaniu współczynnika jednoczesności $\Psi_{oi} = 0,9$. Długość przęsła 125–126 wyniosła 347 m, zaś przęsła 124–125: 250 m, a zatem były to wielkości sumarycznie biorąc większe od przewidzianych w projekcie: 2×280 m.
- Podczas awarii siły sumaryczne spowodowane ciężarem i naciągiem od przewodów i izolatorów oraz siły naciągu od dwóch wciągarek oraz od stalowej linki kotwiącej były o 60% większe od sił projektowanych dla fazy eksploatacji. Awaria nastąpiła więc przy obciążeniu odpowiadającym wyczerpaniu nośności słupa podczas testów niszczących.

Literatura

1. PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
2. PN-B-03205:1996 Konstrukcje stalowe. Podpory linii elektroenergetycznych. Projektowanie i wykonanie.
3. PN-E-05100-1:1998 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa.
4. PN-B-02000:1982 Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.