



BERNARD WICHTOWSKI, *marek.wichtowski@zut.edu.pl*

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

ROMUALD HAŁAS, *r.halas@data.pl*

ITA TELECOM POLSKA Sp. z o.o.

PRZYCZYNY STANU PRZEDAWARYJNEGO ALUMINIOWYCH MASZTÓW ANTENOWYCH W ŚWIETLE BADAŃ

CAUSES OF PRE-FAILURE STATE OF AERIAL ALUMINIUM MASTS IN THE LIGHT OF INSPECTION

Streszczenie Do przekazywania sygnału internetowego drogą radiową bardzo przydatne mogą być smukłe i lekkie konstrukcje aluminiowych masztów antenowych przedstawione w referacie. Niekiedy są one wykonywane przez firmy z naruszeniem podstawowych zasad sztuki budowlanej. Omówiony stan przedawaryjny trzech masztów jest wynikiem jednoczesnego wystąpienia uchybień projektowych, wykonawczych, montażowych i eksploatacyjnych.

Abstract To transmit Internet signal through the radio there can be very useful slender and light aerial aluminium masts that are presented in this paper. Sometimes the masts are produced with breaking of the fundamentals of building art. The pre-failure state of three masts described in the paper was the result of simultaneous negligence in design, workmanship, erection and operational use.

1. Wprowadzenie

Maszty z odciągami to konstrukcje wznoszone od blisko dwóch stuleci. Z racji przeznaczeń funkcjonalnych budowane były głównie na terenach odludnych, z dala od miejsc, w których katastrofy byłyby zagrożeniem dla istnień ludzkich. Obecnie coraz więcej buduje się masztów bliżej zbiorowisk ludzkich. Jest to związane z dynamicznym rozwojem telefonii komórkowej, a w ostatnim okresie z rozwojem internetu. Z uwagi na małą masę anten przekazujących sygnał internetowy maszty tego typu wykonuje się o dużej smukłości oraz małej ich masie ułatwiającej montaż konstrukcji [1, 2].

Duże zapotrzebowanie rynku na konstrukcje tego rodzaju jest powodem, że część firm lub osób zajmujących się tym zagadnieniem zdaje się nie posiadać dostatecznego przygotowania merytorycznego. Do takiego stwierdzenia upoważnia autorów referatu przedstawiony stan techniczny trzech aluminiowych masztów o wysokości 24 i 40 m (rys. 1). Po dwuletnim okresie ich eksploatacji wystąpiła konieczność: w dwóch obiektach wykonania generalnego remontu oraz demontażu konstrukcji obiektu trzeciego.

W pozycji [3], przyczyny awarii konstrukcji zebrano w cztery grupy. Są to: – wadliwy lub niewłaściwie zastosowany materiał, – błędy projektu, – błędy wytwarzania i montażu, – niewłaściwa lub zbyt długa eksploatacja. W omawianych masztach, ich stan przedawaryjny został spowodowany przyczynami zaliczanymi do w/w wszystkich czterech grup. Niestety wszystkie przyczyny są wynikiem niskiego poziomu projektowania oraz wykonawstwa i montażu konstrukcji.



Rys 1. Widok trzech aluminiowych masztów antenowych – A i B o $H = 24,0$ m, maszt C o $H = 40,0$ m

2. Projektowana i rzeczywista konstrukcja masztów

Ogólne dane dotyczące omawianych trzech masztów aluminiowych przedstawiono na rys. 2 i w tabl. 1. Według założeń projektowych konstrukcje zostały wykonane ze stopu aluminium PA38, stan T6 o $R_m = 245$ MPa i $R_{o,2} = 200$ MPa, a wytrzymałości obliczeniowe na rozciąganie i ściskanie przyjęto o wartości $f_{dt} = f_{dc} = R_m/1,65 = 148$ MPa.

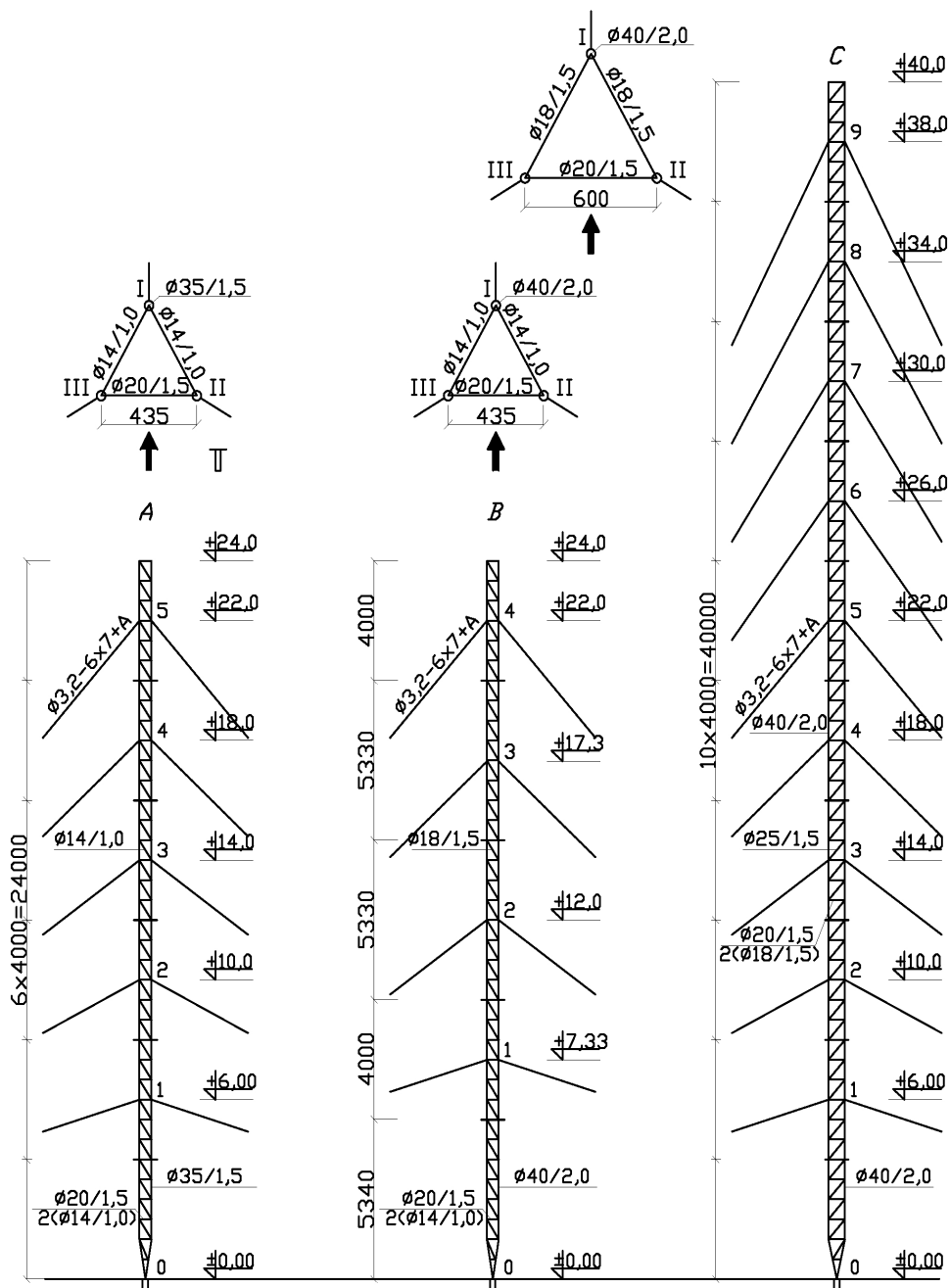
Trzony o wysokości 24,0 m dla masztów A i B oraz 40,0 m dla masztu C to kratownice przestrzenne trójścienne o stałym przekroju poprzecznym po wysokości, z wyjątkiem zbieżnego odcinka podporowego o długości ok. 1,40 m w segmencie dolnym (rys. 2). Przekroje poprzeczne trzonów to trójkąty równoboczne o bokach 435 i 600 mm. Pręty krawężnikowe wykonano z rur ciągnionych $\phi 35/1,5$ mm w masztach A i B oraz $\phi 40/2,0$ mm w maszcie C, a skratowanie z rur $\phi 14/1,0$; $\phi 18/1,5$ i $\phi 20/1,5$ mm. Słupki skratowania mają zmienny przekrój w poszczególnych ścianach masztów. W dwóch ścianach masztów A i B są to rury $\phi 14/1,0$ mm, a w maszcie C rury $\phi 18/1,5$ mm; natomiast w ścianie trzeciej słupki mają przekrój $\phi 20/1,5$ mm. Słupki z rur $\phi 20/1,5$ mm są jednocześnie stopniami włączowymi na maszt, których rozstaw osiowy po wysokości masztu wynosi około 600–650 mm.

Ogólne dane techniczne omawianych trzech masztów przedstawiono w tabl.1 i na rys.2. W tablicy 1 podano parametry masztów istniejących oraz, w nawiasach, parametry konstrukcji projektowanych. Łatwo zauważyć, że wszystkie obiekty, w mniejszym lub większym stopniu, zostały wykonane niezgodnie z projektem budowlanym.

W maszcie A w miejsce projektowanych krzyżulców z rur $\phi 20/1,5$ mm zastosowano rury $\phi 14/1,0$ mm. Przy przyjętej według projektu sile ściskającej $N = 0,975$ kN oznacza to wzrost wartości naprężeń z $\bar{\sigma} = 58,9$ do $\bar{\sigma} = 206,4$ MPa $> f_d$ ($\bar{\sigma} = 1,39f_d$).

W maszcie B niezgodności wykonawcze w porównaniu z projektowanymi dotyczą:

- liczby i długości segmentów trzonu; zaprojektowany maszt składał się z sześciu segmentów czterometrowych, a maszt istniejący ma 5 segmentów o długości 4,0 m i 5,33 m,
- liczby poziomów odciągów, będących konsekwencją zmiany liczby segmentów trzonu; maszt ma cztery poziomy odciągów (rys. 2),
- zmiany przekroju prętów krawężnikowych z projektowanych $\phi 35/1,5$ mm na pręty zamontowane $\phi 40/2,0$ mm,
- zmiany przekroju prętów wykratowania (krzyżulców) z $\phi 20/1,5$ mm na $\phi 18/1,0$ mm.



Rys. 2. Schematy omawianych masztów

Tablica 1. Dane konstrukcyjne masztów eksploatowanych i (projektowanych)

Maszt	Wysokość [m]	Liczba i długość sekcji [mm]	Bok trójkąta [mm]	Liczba poziomów odciągów	Elementy konstrukcyjne [mm]			
					krawężniki	krzyżulce	Słupki w 2 ścianach	słupki w 1 ścianie
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	24,0	6×4000	435	5	φ 35/1,5	φ 14/1,0 (φ 20/1,5)	φ 14/1,0	φ 20/1,5
B	24,0	2×4000 +3×5330 (6×4000)	435	4 (5)	φ 40/2,0 (φ 35/1,5)	φ 18/1,5 (φ 20/1,5)	φ 14/1,0	φ 20/1,5
C	40,0	10×4000 (8×000)	600 (435)	9 (7)	φ 40/2,0	φ 25/1,5 (φ 20/1,5)	φ 18/1,5 (φ 14/1,5)	φ 20/1,5

W maszcie C różnice między konstrukcją istniejącą a projektowaną dotyczą:

- zwiększonego rozstawu krawężników masztu z 435 mm do 600 mm,
- zmienionej liczby i długości segmentów masztu, jest 10 segmentów o długości 4,0 m każdy, w zamian za 8 projektowanych segmentów o długościach 5,0 m,
- zmienionej liczby poziomów odciągów, z siedmiu poziomów projektowanych na 9 poziomów w konstrukcji istniejącej,
- zwiększonych przekrojów wykratowania trzonu; krzyżulce to rury φ 25/1,5 mm a słupki w dwóch płaszczyznach to rury φ 18/1,5 mm, w zamian za przekroje φ 20/1,5 mm i φ 14/1,0 mm (tabl. 2, kol. 7 i 8).

Podczas przeglądów in situ konstrukcji trzonów masztów stwierdzono wiele niedociągnięć wykonawczych dotyczących spoin pachwinowych, łączących rurowe pręty wykratowania z prętami krawężnikowymi (rys. 3). W spoinach tych stwierdzono: zewnętrzne niedokładności spawalnicze oraz niepełne obwodowe wykonanie pewnej liczby spoin – niezgodność spawalnicza typu 511 wg. PN-EN ISO 6520-1:2009.

Niepełne wykonanie spoin obwodowych dotyczyło w zasadzie górnego ich odcinka z uwagi na utrudniony dostęp elektrody. Przez występujące tam szczeliny do prętów dostaje się woda opadowa, która po zamarznięciu powoduje ich pęknięcie (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Pęknięcie pręta w maszcie C



Rys. 4. Pęknięcie jak na rys.3, poz.+4,65m

Oparcie masztów A i B na stopie fundamentowej przedstawiono na rys. 5. Konstrukcja podporowa umożliwia przechyl trzonu w dwóch prostopadłych płaszczyznach. Podobną konstrukcję przewidziano dla masztu C, jednakże „tymczasowo” posadowiono go w sposób

odmienny (rys. 6). Przyfundamentowy odcinek segmentu dolnego masztu, z rury $\phi 100/6$ mm, jest mocowany do „przegubowej” konstrukcji podporowej przyspawanej do płyty stalowej o wymiarach 600×800 mm i grubości 4 mm. Płyta ta jest bezpośrednio położona na gruncie w odległości około 1,5 m od projektowanej konstrukcji „przegubowej” zamontowanej na stopie żelbetowej. Rozwiązanie takie było prawdopodobnie spowodowane świeżością betonu fundamentu i jako tymczasowe jest użytkowane przez okres dwóch lat.



Rys. 5. Oparcie trzonu masztu $H = 24,0$ m na stopie fundamentowej



Rys. 6. Aktualne i projektowane oparcie masztu C o $H = 40,0$ m

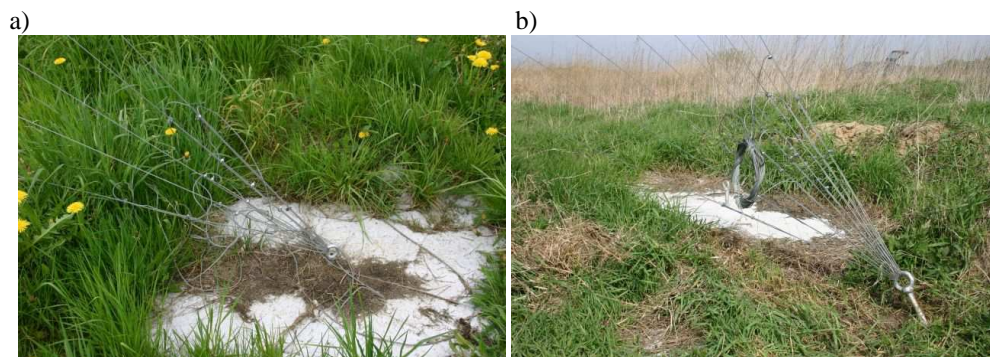
3. Stalowe liny odciągowe

W projektach konstrukcyjnych przedmiotowych masztów przyjęto zasadę montowania odciągów w połowie wysokości poszczególnych segmentów trzonu, z wyjątkiem segmentu podporowego (rys. 2). W konsekwencji tej zasady zmiana liczby segmentów trzonu masztów B i C spowodowała zmniejszenie liczby poziomów odciągów w maszcie B oraz ich zwiększenie w maszcie C. Na odciągi zastosowano liny stalowe ocynkowane o średnicy nominalnej 3,2 mm, typu 6×7 z rdzeniem organicznym A_0 z drutów jednakowej średnicy $\phi 0,34$ mm, wg PN-69/M-80206. Normowe dane tych lin wynoszą:

- przybliżony przekrój metaliczny drutu w linie – $A_m = 3,81$ mm²,
- nominalna wytrzymałość drutu na rozciąganie – $R_m = 1570$ MPa,
- nominalna obliczeniowa siła zrywająca – $N = 5,974$ kN,
- przybliżona masa (waga) 1 m liny – 0,037 kg.

Do krawężników trzonów masztów liny mocowane są w sposób pokazany na rys. 1 oraz zabezpieczone dwoma zaciskami linowymi wielkości 5 wg PN-73/M-80241. W dolnej przygruntowej strefie liny masztów A i B mocowane są do kotwi $\phi 20$ mm zabetonowanej w fundamencie (rys. 7a), a liny masztu C do kotwi osadzonej w gruncie i mocowanej tymczasowo według projektu, do blachy o wymiarach $10 \times 600 \times 600$ mm, wzmocnionej ceownikiem 60 (rys. 7b).

Mocowanie wszystkich 54 lin odciągowych do kotwi $\phi 20$ mm wykonane jest bez użycia kauszy oraz szakli. Przy dolnych mocowaniach odciągów stwierdzono również zsuwanie się zacisków oraz niedostateczną ich liczbę na poszczególnej linie. Jedynie na 19 odciągach, stanowiących 35,2% ich ogólnej sumy, liczba zacisków była nie mniejsza od wymaganych trzech (PN-73/M-80241). W strefach przyfundamentowych żadna lina masztów nie ma wmontowanej śruby rzymskiej do jej napinania.



Rys. 7. Połączenie odciągów w fundamencie: a) maszty A i B, b) maszt C

Podczas inspekcji terenowej stwierdzono także znaczny zwis wszystkich lin odciągowych oraz zerwanie trzech dolnych odciągów masztu C, na poziomach: +6,00; +6,00 i +10,00 m. Powyższy stan techniczny odciągów dotyczy lin o średnicy ϕ 3,2mm, która jest niezgodna z przekrojami lin projektowanych. Projekty konstrukcyjne masztów przewidywały odciągi z lin analogicznej konstrukcji lecz o innych średnicach (tabl. 2).

We wszystkich masztach zaprojektowane liny ϕ 4,0 mm spełniały wymogi normowe (kol. 8 i 9, tabl. 2). Występujące w nich naprężenia wahały się od 260 do 341 MPa, a współczynnik ich pewności był każdorazowo większy od wymaganego dla lin kotwiących współczynnika $m = 4$. Warunków normowych nie spełniały projektowane liny ϕ 5,0 mm trzech poziomów na górnym 15 metrowym odcinku masztu C. Naprężenia w tych linach $\bar{\sigma} = 729$ MPa były o 85,5% większe od wartości $R_m/m = 393$ MPa.

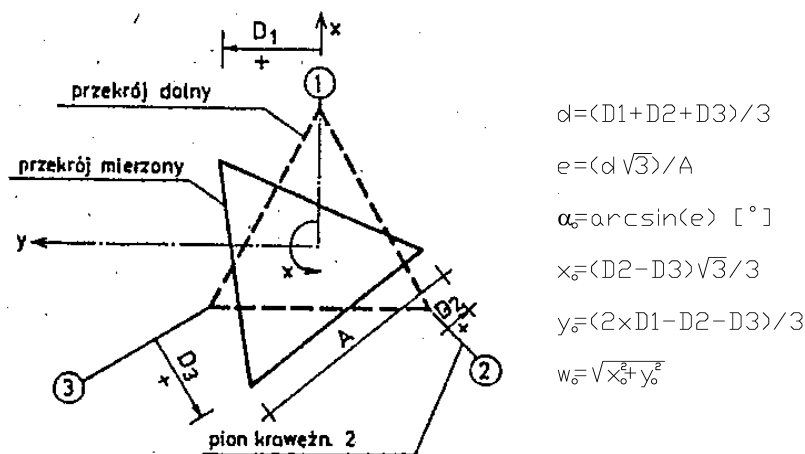
Zamontowane liny ϕ 3,2 mm nie spełniają wymogów wytrzymałościowych we wszystkich trzech masztach. Występujące w nich naprężenia (kol. 8) wahają się od 597 do 2112 MPa i przekraczają wartość dopuszczalną = 393 MPa od 1,52 do 5,37 razy, a ich współczynnik bezpieczeństwa jest każdorazowo mniejszy od 4 i waha się od 2,62 do 0,74.

Tablica 2. Dane techniczne lin odciągowych zamontowanych i (projektowanych)

Maszt	Wysokość [m]	Liczba poziomów odciągów	Dane normowe			Wartości obliczone		
			średnica ϕ [mm]	przekrój A_m [mm ²]	siła N [kN]	siła rozcz. [kN]	naprężenie [MPa]	współczynnik $n = 6/7$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	24,0	5	3,2 (4,0)	3,81 6,67	5,97 10,3	2,275 (2,275)	597 341	2,62 (4,57)
B	24,0	4 (5)	3,2 (4,0)	3,81 6,67	5,97 10,3	2,873 (2,275)	754 341	2,08 (4,57)
C	40,0	9 (4) (3)	3,2 (4,0) (5,0)	3,81 6,67 10,00	5,98 10,3 16,2	8,046 (1,732) (7,292)	2112 260 729	0,74 (6,00) (2,23)

4. Geodezyjne pomiary geometrii masztów

Pomiar pionowości trzonów masztów wykonano na poziomie ich wierzchołków oraz na poziomach mocowania odciągów. Zgodnie z „Instrukcją ER-01” [4] pomiary prowadzono z 3 stanowisk teodolitu, a przemieszczenia i kąt skręcenia określono według zawartych tam wzorów (rys. 8).



Rys. 8. Szkic pomiaru przemieszczeń i wzory obliczeniowe wychylenia poziomego oraz kąta skręcenia trzonu masztu

Obliczone z pomiarów wychylenia wypadkowe w_0 i kąty skręcenia α_0 , dla trzech górnych poziomów pomiarowych poszczególnego masztu, podano w tabl. 3, kol. 3 i 6. W kolumnach 4 i 7 podano natomiast wartości normowego wychylenia dopuszczalnego $w = \pm h/1000$ oraz skręcenia na odcinku 3 m – $\alpha = 0,5^\circ$ i na całej wysokości $\alpha = 5^\circ$ [5], a w kol. 5 i 8 ilorazy tych wartości otrzymanych z pomiarów do wartości dopuszczalnych.

Tablica 3. Wchylenie osi masztu od pionu i skręcenie trzonu

Maszt	Poziom [m]	Wchylenie [mm]			Skręcenie [°]		
		w_0	$w[5]$	w_0/w	α_0	$\alpha [5]$	α_0/α
1	2	3	4	5	6	7	8
A	24,0	106	24	4,42	28,542	5,00	5,71
	22,0	99	22	4,50	25,469	3,67	6,94
	18,0	94	18	5,22	18,575	3,00	6,19
B	24,0	430	24	17,92	10,554	5,00	2,11
	22,0	414	22	18,82	12,650	3,67	3,45
	17,3	338	17	19,88	12,650	2,89	4,38
C	40,0	68	40	1,70	0,110	5,00	0,02
	38,0	67	38	1,76	0,165	5,00	0,03
	34,0	64	34	1,88	0,772	5,00	0,15

Na trzech górnych odcinkach masztów A, B i C, odpowiednio o długościach 6,0; 6,7 i 6,0, obliczone wychylenie wypadkowe waha się od 64 do 430 mm i przekracza każdorazowo

wartość wychylenia dopuszczalnego od 1,7 do 19,9 razy. Obliczone skręcenie trzonu masztu C na całej wysokości nie przekracza dopuszczalnej wartości normowej, a w masztach A i B, na odcinkach wierzchołkowych, przekracza tę wartość odpowiednio 6,94 i 4,38 razy. Największe odkształcenia dotyczą masztów A i B; wychylenia ich wierzchołków wynoszą 106 i 430 mm, a kąty skręcenia $\alpha_o = 28,54^\circ$ i $\alpha_o = 10,54^\circ$ (kol. 3 i 6).

5. Podsumowanie

Mała masa masztów aluminiowych (masa trzonów masztów: A, B, C = 50; 75 i 155 kg) ułatwia ich montaż, praktycznie w każdym terenie. Między innymi z tego powodu obiekty te powinny być preferowane do przekazu sygnału internetowego drogą radiową, a ich rozwiązania konstrukcyjne szczegółowo rozpracowane i dokładnie wykonane można stypizować.

Wykonawca we wszystkich trzech masztach dokonał samowolnych zmian konstrukcyjnych i wykonawczych (tabl.1 i 2), które:

- zmieniły schematy obliczeniowe masztów B i C,
- spowodowały niewiarygodnymi obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wszystkich trzech obiektów,
- zmieniły liczbę poziomów odciągów w masztach B i C oraz założenie wszystkich lin odciągowych o zmniejszonych średnicach, w porównaniu z projektowanymi,
- spowodowały wzrost naprężeń w krzyżulcach wykratowania masztu A do wartości o 39% większej od wytrzymałości obliczeniowej f_d , a w linach masztu C do wartości o 35% większej od wytrzymałości drutu na rozciąganie R_m ,
- doprowadziły do zerwania trzech odciągów w maszcie C,
- pozwoliły, za zgodą projektanta, posadzić maszt C oraz zakotwić jego odciaży na gruncie, w sąsiedztwie żelbetowych bloków fundamentowych,
- usytuowały w sposób niezgodny z projektem i zaleceniami normowymi fundamenty do mocowania lin odciągowych,
- uniemożliwiły wprowadzenia w liny odpowiednich sił naciągu wstępnego.

Zdaniem autorów referatu wszystkie niedopracowania projektowe oraz wykonawcze „innowacje konstrukcyjne i eksploatacyjne” w omówionych masztach tłumaczy tytuł jednego rozdziału z artykułu Michała Wińczy [6]: „Analfabetyzm techniczny wyższego szczebla”.

Literatura

1. Rykaluk K.: Konstrukcje stalowe, kominy, wieże, maszty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
2. Wichtowski B.: Geometria stalowych wież i masztów radiowo-telewizyjnych na podstawie inspekcji okresowych. Prace Naukowe PS, Nr 561 III nr34, Budownictwo, Szczecin 2000.
3. Augustyn J., Śledziewski E.: Awarie konstrukcji stalowych. Arkady, Warszawa 1976.
4. Instrukcja ER-01. Eksploatacja wież i masztów. Załącznik do Zarządzenia nr 31 Prezesa Zarządu TP S.A. z 30.06.1994 r.
5. PN-B-03204:2002. Konstrukcje stalowe. Maszty oraz wieże radiowe i telewizyjne. Wymagania i badania.
6. Wińczy M.: Analfabetyzm techniczny-rzeczywistość, czy fikcja (analiza problemu). Przegląd Spawalnictwa, nr 6/2008.