



Dr hab. inż. Bernard WICHTOWSKI, prof. PS
Politechnika Szczecińska

REKTYFIKACJA STALOWYCH WIEŻ ANTENOWYCH NA PODSTAWIE INSPEKCJI OKRESOWYCH

THE RECTIFICATION OF STEEL AERIAL TOWERS ON THE GROUND THE PERIODICAL INSPECTIONS

Streszczenie: Stan techniczny i bezpieczeństwo obiektów budowlanych zależy głównie od zachowania określonych odchylek geometrycznych ich elementów konstrukcyjnych w czasie i przestrzeni. Badane konstrukcje 11 wież telekomunikacyjnych miały odchylenia osi trzonów od pionu większe od dopuszczalnych. Przeprowadzana rektyfikacja ich trzonów jest tematem referatu.

Abstract: The technical state and safety of building objects depended from respect of definite deviations geometrical their structural member in time and space. The eleven telecommunications towers had from plumb-line the deviation of axis of trunk greater from admissible. The subject of paper is conducted rectification of towers trunks.

1. Wprowadzenie

Diagnostyka budowli dotyczy oceny stanu technicznego obiektów budowlanych. Badania obiektów mogą mieć charakter badań doraźnych albo systematycznych [1]. W odniesieniu do wież telekomunikacyjnych wymagania dotyczące terminów i sytuacji, w których jest konieczne wykonanie opracowań diagnostycznych o ich stanie oraz zakres wymaganej analizy podaje „Instrukcja ER-01. Eksploatacja wież i masztów” [2]. Instrukcja ta przewiduje wykonanie następujących czynności:

- inspekcji podstawowych i okresowych,
- napraw bieżących i głównych,
- pomiarów i regulacji oraz konserwacji okresowych.

Inspekcja podstawowa ma charakter inspekcji wewnętrznej i powinna być wykonana jeden lub dwa razy w roku oraz doraźnie po huraganach. Inspekcja okresowa ma charakter inspekcji zewnętrznej, a częstotliwość jej wykonywania zależy od kategorii wieży. Z pewnymi wyjątkami [2] kategoria I obejmuje wieże do wysokości 45 m, a kategoria II konstrukcje o wysokości większej.

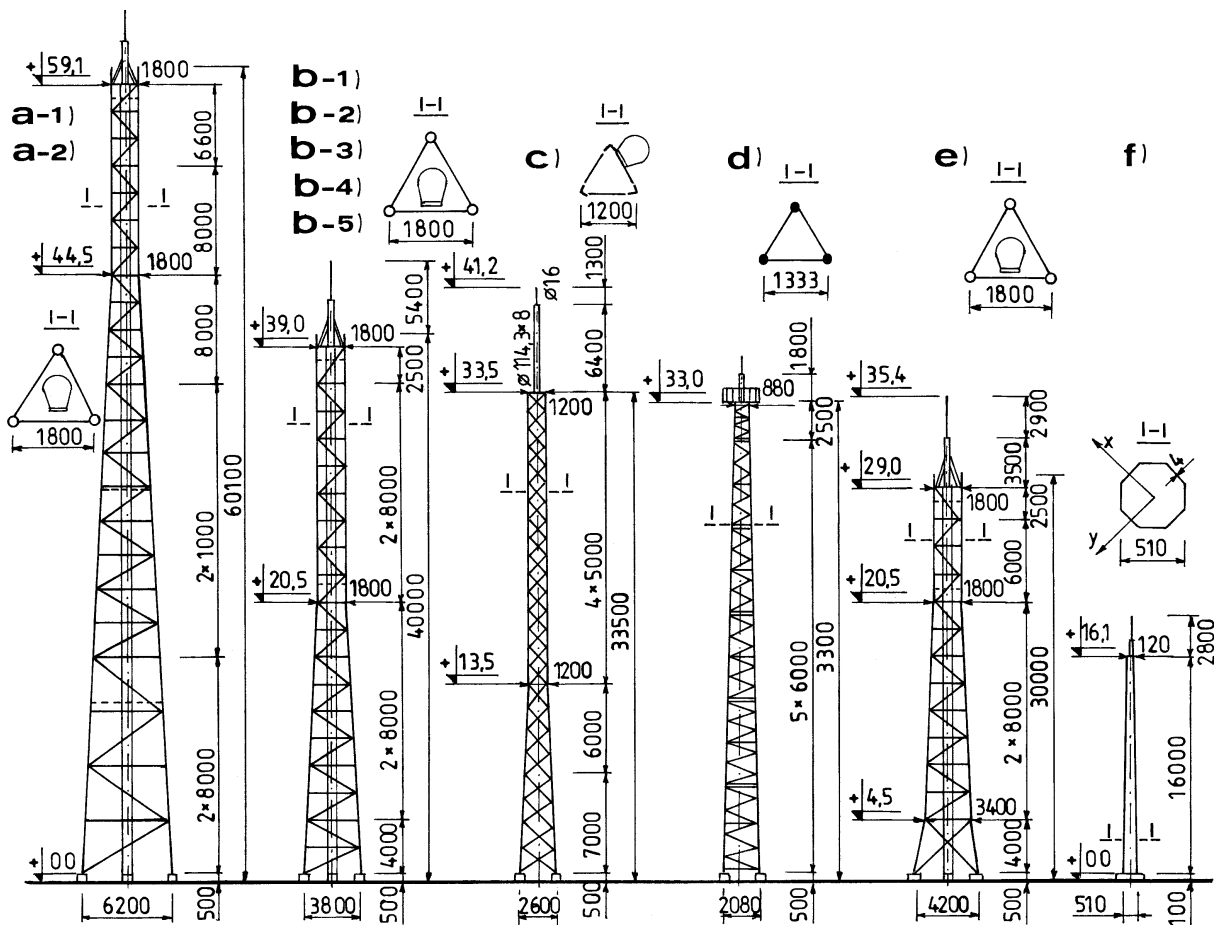
Konstrukcje stalowe wież należy wykonywać i odbierać zgodnie z postanowieniami i zaleceniami normy PN-B-06200:2002 [3], a odchyłki ich montażu nie powinny przekraczać wartości granicznych podanych w PN-B-03204:2002 [4]. Wszelkiego rodzaju geometryczne imperfekcje wykonania i montażu lub też uszkodzeń eksploatacyjnych mają wpływ na stopień

bezpieczeństwa ich użytkowania. Zagadnienia te omówiono szczegółowo, m.in. w pracach [5, 6, 7, 8]. „Instrukcja ER-01” [2] odchylenia osi trzonu wieży od pionu większe od $L/750$, gdzie L jest długością pomiarową, zalicza do wad zagrażających bezpieczeństwu konstrukcji i wymagające niezwłocznej naprawy, a odchylenia większe od $L/1000$ do wad pogarszających stan konstrukcji, których naprawę należy przeprowadzić w ciągu roku.

Prowadzone pomiary odchylenia osi trzonów wież od prostoliniowości i pionowości wykazują bardzo często znaczne przekroczenie normowych wartości odchyłek dopuszczalnych [10]. W referacie na przykładzie jedenastu wież telekomunikacyjnych, które były przedmiotem inspekcji okresowych, przedstawiono wyniki z pomiarów ich geometrii, która wymagała przeprowadzenia rektyfikacji trzonów. Podane uwagi i wnioski mogą być przydatne przy interpretacji wyników z prowadzonych badań podobnych konstrukcji.

2. Charakterystyka badanych wież i wyniki pomiarów geodezyjnych

Wielokrotne pomiary geodezyjne pozwalają wyznaczyć wielkość i przebieg deformacji, którym ulegają obiekty w czasie oraz umożliwiają oszacowanie zgodności ich geometrii z założeniami projektowymi. W trakcie inspekcji okresowych przeprowadzono pomiary odkształceń konstrukcji jedenastu wież przedstawionych na rys. 1, których dane techniczne zamieszczono w tabl. 1.



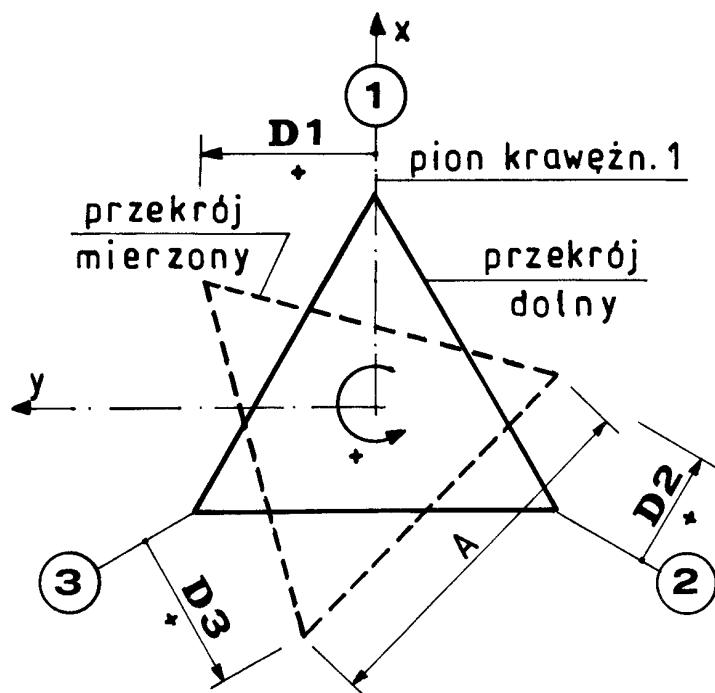
Rys. 1. Konstrukcja badanych wież

Dziesięć wież ma kratownicową konstrukcję przestrzenną o przekroju poprzecznym w postaci trójkąta równobocznego, a wieża „f” to rurowy słup ośmioboczny o ściance z blachy grubości 4 mm. Dwie wieże „a”, cztery „b” oraz wieże „c” i „e” mają zbieżne ściany w dolnych odcinkach o długości od 44,0 do 13,0 m. Na pozostałych odcinkach o długości od 8,5 m (wieża „e”) do 20,0 m (wieża „c”) ściany są pionowe i mają długość boków $a = 1,2$ m (wieża „c”) i 1,8 m (wieża „a”, „b”, „e”). Wieże „d” i „f” mają ściany zbieżne na całej wysokości 32,5 i 16,0 m. Poszczególne wieże kratownicowe wykonano z segmentów o długości od 10,0 do 2,5 m, a ich liczba waha się od 7 („a”) do 5 („e”). Pręty krawężnikowe segmentów 8 wież („a”, „b”, „e”) wykonane są z rur okrągłych bez szwu, w wieży „c” z kątowników równoramiennych 120×12, 120×10, 100×10 i 80×8 mm, a wieży „d” z prętów okrągłych pełnych $\phi 65$, 45 i 40 mm. Segmenty dziewięciu wież kratownicowych połączone są między sobą kołnierzowo na śruby a w wieży „c”, o krawężnikach z kątowników, zakładkowo na śruby.

Skratowania, o zróżnicowanej konstrukcji (rys. 1), zostały wykonane z prętów rurowych i kątowników w wieżach typu „a”, z prętów pełnych w wieży „d” oraz z kątowników równoramiennych w wieżach pozostałych. We wszystkich wieżach kratownicowych, połączenia skratowania z prętami krawężnikowymi wykonane są na śruby z użyciem blach węzłowych. Wieże typu „a”÷„e” wykonane są ze stali: R35, St3S (elementy o $t > 12$ mm) i St3SY (elementy o $t \leq 12$ mm), a wieża słupowa „f”, typu BELIER, ze stali 18G2.

W latach 2004 i 2005 dokonano pomiarów geodezyjnych geometrii przedmiotowych 11 wież. Zgodnie z wymogami „Instrukcji ER-01” [2] pomiary geodezyjne miały na celu określić: odchyłki trzonu wieży od pionu i skręcanie konstrukcji trzonu.

Pomiaru powyższych parametrów dokonano w punktach charakterystycznych danej wieży, którymi dla omawianych konstrukcji były styki poszczególnych segmentów montażowych oraz wierzchołek wieży. Mierzono wartości przemieszczeń poszczególnych krawężników wież trójściennych z 3 stanowisk ustawianych w punktach 1, 2, 3, a przemieszczenia wieży słupowej „f” z 2 stanowisk ustawionych prostopadłe na osiach x i y (rys. 2).



Rys. 2. Przemieszczenie masztu trójściennego

$$d = \frac{1}{3} (D1 + D2 + D3) \quad (a)$$

$$e = \frac{d \sqrt{3}}{A} \quad (b)$$

$$\alpha = \arcsin e \quad (c)$$

(1)

$$\bar{x} = (D2 - D3) \sqrt{3} \quad (d)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{3} (2 D1 - D2 - D3) \quad (e)$$

$$\bar{w} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (f)$$

Tablica 1. Dane techniczne konstrukcji wież

Wieża (rys. 1)	Wysokość [m]	Konstrukcja, bok trójkąta [mm]	Elementy konstrukcyjne [mm]		
			Krawężniki	Wykratowanie (rozstaw węzłów)	Słupki
1	2	3	4	5	6
a-1 a-2	59,10	trójścienna a = 6200÷1800	od ϕ 139,7/16 do ϕ 88,9/5	od ϕ 114,3/5 do ϕ 88,9/5 +L80×80×6 (2000÷2200)	od L120×12 do L60×6
b-1 b-2 b-3 b-4 b-5	39,00	trójścienna a = 3800÷1800	od ϕ 114,3/8 do ϕ 88,9/5	od L 100×8 do L 80×6 (2000÷2500)	od L80×6 do L60×6
c	33,50	trójścienna a = 2600÷1200	od L 120×12 do L 80×8	od L 60×5 do L 50×4 (1750÷1250)	---
d	33,00	trójścienna a = 2080÷880	ϕ 65÷ ϕ 40	ϕ 35÷ ϕ 16 (795÷495)	ϕ 45÷ ϕ 16
e	29,00	trójścienna a = 4200÷1800	od ϕ 114,3/10 do ϕ 88,9/5	od L 90×6 do L 80×6 (2250÷2000)	od L90×6 do L60×6
f	16,10	ośmiobok o boku a = 210÷25	Typu BELIER ścianka t = 4	---	---

Wykorzystując wartości pomierzonych przemieszczeń poszczególnych krawężników $D1$, $D2$, $D3$ na poziomach pomiarowych, obliczono kąty skręcenia trzonu wieży α wg (1c) oraz wychylenia wypadkowe osi wieży wg (1f). W referacie, z uwagi na ograniczoną liczbę stron, przeprowadzono jedynie analizę odchylenia osi trzonu od pionu na dwóch górnych wierzchołkowych poziomach (tabl. 2, kol.2). Pomierzone wychylenia wierzchołkowego odcinka poszczególnej wieży trójściennej zamieszczono w tabl. 2, kol. 3÷5, a obliczone wychylenia wypadkowe \bar{w} w kol. 6 (wartości w nawiasach). Należy zauważyć, że obliczone wychylenia każdorazowo przekraczają normowe wartości dopuszczalne z kol. 11. Przekroczenie to dla wierzchołka wież trójściennych, waha się od 1,2 do 11,8 razy, a dla wieży rurowej 14,4 razy. W związku z powyższym użytkownik wież zlecił ich rektyfikację celem przywrócenia geometrii do wymogów normowych.

Przeprowadzona, przed pracami regulacyjnymi, analiza odchylenia osi trzonów od pionu \bar{w} wykazała błędność ich wartości. Błędnie została określona wartość odchylenia \bar{x} wg wzoru (1d). Wypadkowe wychylenia \bar{w} mają zróżnicowane wartości w zależności od usytuowania osi xy na rys. 2. Przykładowo dla wieży „a-1” na poziomie 59,1 m wartości wychylenia \bar{w} wynoszą odpowiednio 116, 223 i 280 mm. Po przestudiowaniu przedmiotowej literatury technicznej stwierdzono, że na fakt błędności wzoru (1d) zwrócona uwagę w pracy [11], wygłoszonej na konferencji w Łęgowie we wrześniu 2001 roku. Analizując podane na rys. 3 przemieszczenia poziome krawężników trzonu w układzie Oxy wprowadzono tam wzór (2) na wielkość odchylenia osi wieży od pionu.

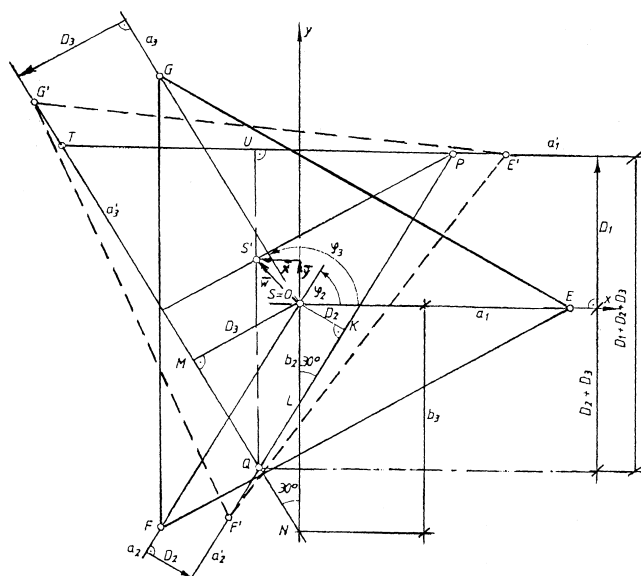
Tablica 2. Pomiar wychyleń wierzchołkowego odcinka wieży, wychylenia wypadkowe i dopuszczalne

Wieża (rys.1)	Poz. pom. [m]	Wychylenie krawężników i osi wieży [mm]								
		pierwotne				po rektyfikacji				$\overline{w}^{2)}$ dop.
		D1	D2	D3	$\overline{w}^{1)}$	D1	D2	D3	$\overline{w}^{2)}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a-1	59,1	43	-118	-80	98 (116)	-26	-32	8	25 (69)	59
	52,5	25	-75	-55	61 (69)	-36	-15	-7	18 (22)	53
a-2	59,1	-135	88	-12	129 (208)	-27	-20	14	26 (61)	59
	52,5	-130	44	-32	101 (159)	-20	-6	-43	21 (64)	53
b-1	39,0	66	62	92	18 (52)	9	20	6	9 (24)	39
	36,5	32	55	-74	25 (39)	13	22	-2	14 (42)	37
b-2	39,0	-75	79	-30	91 (200)	-40	20	5	36 (44)	39
	36,5	-70	51	-21	71 (136)	-40	-9	-3	23 (25)	37
b-3	39,0	-84	55	-5	84 (154)	1	35	13	20 (40)	39
	36,5	-70	62	-17	75 (123)	-36	19	0	32 (44)	37
b-4	39,0	-122	-70	89	127 (165)	44	12	42	20 (53)	39
	36,5	-100	-50	96	117 (258)	55	10	57	30 (82)	37
b-5	39,0	90	-18	92	73 (158)	44	11	38	21 (49)	39
	36,5	82	-15	74	62 (193)	38	10	34	18 (43)	37
c	33,5	-24	-31	-106	52 (133)	-10	-40	-53	25 (34)	34
	28,5	-34	-20	-70	30 (95)	-5	-36	-51	28 (37)	29
d	32,5	290	-221	-71	303 (390)	-2	0	-1	1 (2)	33
	24,3	230	-186	-53	245 (327)	-6	3	-4	6 (13)	24
e	30,0	67	36	55	18 (36)	-2	1	-18	12 (33)	30
	27,5	33	29	23	6 (11)	-6	-2	-16	8 (24)	28
f ³⁾	16,1	x = 33, y = 228			230	x = 8, y = -4			9	16
	9,8	x = 34, y = 126			131	x = 11, y = -18			21	10

1) obliczone wartości wychylenia bez nawiasów wg [2], a w nawiasach wg [1]

2) wartości dopuszczalne wychylenia równe L/1000

3) pomiary wykonano w dwóch prostopadłych płaszczyznach



$$\overline{x} = (D2 - D3) \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (a)$$

$$\overline{y} = (2D1 - D2 - D3) \frac{1}{3} \quad (b) \quad (2)$$

$$\overline{w} = \sqrt{\overline{x}^2 + \overline{y}^2} \quad (c)$$

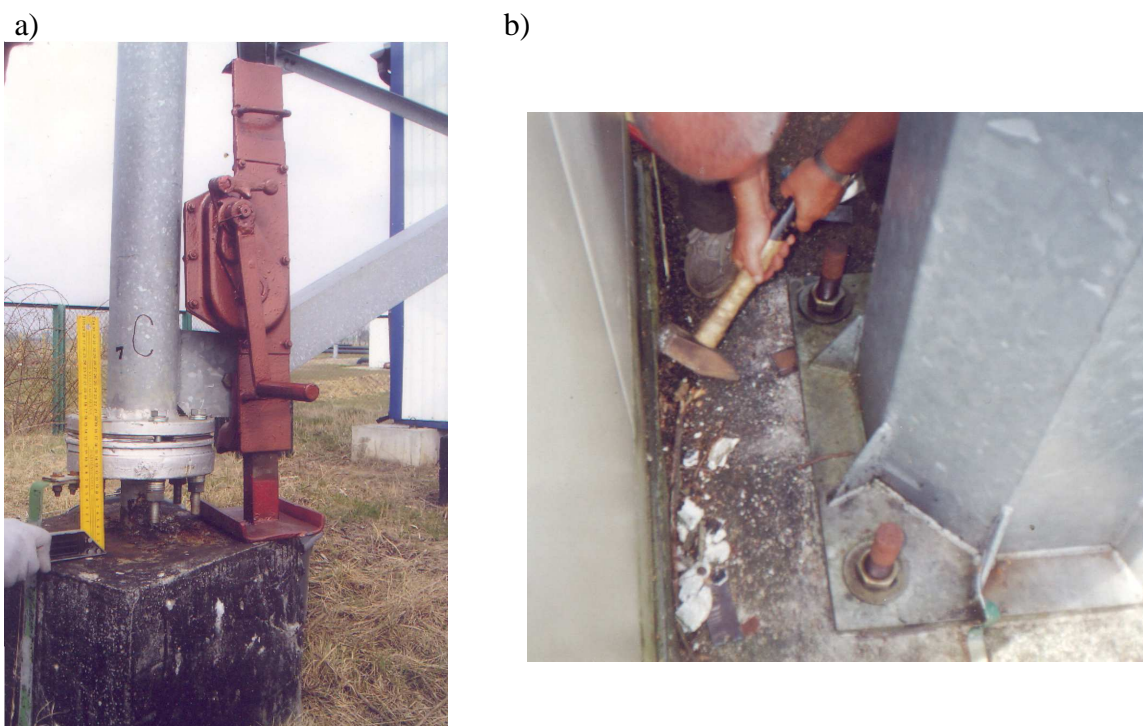
Rys. 3 Przemieszczenia poziome punktów badanej wieży w układzie 0xy [11]

Okazało się, że w „Instrukcji ER-01” [2] podano błędnie wzór (1d) na obliczenie współrzędnej \bar{x} . Obliczone wychylenie wypadkowe \bar{w} wg wzoru (2c), przyjmuje jednakowe wartości niezależnie od usytuowania osi xy na rys. 2. Są to wartości bez nawiasów zamieszczone w tabl. 2, kol. 6. Porównując też wartości z normowymi wartościami przemieszczeń dopuszczalnych z kol. 11, okazuje się, że dwie wieże („b-1” i „e”) nie wymagały przeprowadzenia rektyfikacji ich trzonów.

3. Rektyfikacja trzonów wież

Usunięcie odchylenia trzonów wież dokonano przez podniesienie odpowiednich podpór (przy poluzowanych nakrętkach na śrubach fundamentowych) i podłożeniu stosowanych podkładek (rys. 4). Podniesienie podpór wieży „d” dokonano za pomocą dźwigników hydraulicznych, w pozostałych 9 wieżach trójściennych dźwignikami mechanicznymi, a w wieży „f” za pomocą przechylenia trzonu linami odciągowymi zamocowanymi na poziomie +9,0 m. Grubość założonych podkładek korygujących na poszczególnych podporach wież była zróżnicowana i w skrajnym wypadku dla wież kratownicowych wynosiła 20 i 22 mm (wieża „a-1” i „a-2”).

Pracochłonna okazała się rektyfikacja wieży „f”. Według normy [3]: „Łączna powierzchnia pakietów podkładek stalowych powinna stanowić co najmniej 15% powierzchni podstawy słupa, z tym że na każdą śrubę kotwiącą powinny przypadać po dwa pakiety”. Ostatecznie przy poszczególnej śrubie kotwiącej założono po dwa pakiety blach o grubościach 8,5; 12; 18 i 30 mm.



Rys. 4. Podpory wież podczas prac rektyfikacyjnych: a) wieża „b-3”, b) wieża „f”

Pionowanie wież kratownicowych prowadzono przy ciągłej obserwacji geodezyjnej z trzech stanowisk pomiarowych, po jednym dla każdego krawężnika, a wieży słupowej „f” z dwóch stanowisk usytuowanych na osiach xy (rys. 1f). Każdorazowo azymut ustalano względem pionu przechodzącego przez środek dolnego końca krawężnika lub środek boku ściany wieży na podporze.

Zestawienie pomierzonych odchyłek osi wierzchołkowych odcinków poszczególnych krawężników wież, od pionowości, przedstawiono w tabl. 2., kol. 7, 8 i 9, a obliczone wypadkowe odchylenia osi trzonu podano w kol. 10. Odchylenia obliczono wg wzory (2c) – (wartości bez nawiasów) i wg wzoru (1f) z błędnie określoną wartością \bar{x} – (wartości w nawiasach). Należy zauważyć, że przeprowadzona rektyfikacja doprowadziła geometrię górnych, przywierzchołkowych odcinków wszystkich wież do wymogów normowych. Każdorazowo odchylenie osi trzonu od pionu jest mniejsze od dopuszczalnych wartości montażowych z kol. 11. Odchylenia wierzchołków wież wahają się od 1 do 36 mm. Wartości te stanowią odpowiednio 0,03 i 92% wartości montażowych odchyłek dopuszczalnych [2, 4]. Niestety na poziomach niższych od +12 do +20 m, w czterech wieżach odchylenia przekraczają wartości dopuszczalne. Są to wieże: „a1”, „a2”, „b1” i „b2”, w których odchylenia poziome przekraczają wartość dopuszczalną odpowiednio: 77,8; 23,5; 69,2 i 61,5%. Przekroczenia te są spowodowane nieprostoliniowością prętów krawężnikowych – rys. 5.



Rys. 5. Wykrzywione krawężniki wieży „a-2”

4. Wnioski

- Na błędność wzoru do wyznaczania przemieszczenia wieży trójściennej wg „Instrukcji ER-01” zwrócono uwagę w 2001 roku, tj. po siedmiu latach jej użytkowania.
- Należy żałować, że wielu ekspertów do dnia dzisiejszego przemieszczenia masztów i wież trójściennych określa z wykorzystaniem błędnego wzoru (1d).
- Rodzi się pytanie: ile wież i masztów poddano niepotrzebnej rektyfikacji, a na ilu jej nie przeprowadzono pomimo istnienia takiego wymogu?
- Wykonana regulacja pionowości 11 przedmiotowych wież telekomunikacyjnych doprowadziła ich wychylenia pionowe na odcinkach górnych, wierzchołkowych, do wartości dopuszczalnego wychylenia normowego.

- Pomijając wieże „d”, wychylenia od pionu osi pozostałych wież stanowią wartości od H/1083 (wieża „b-2”) do H/4333 (wieża „b-1”), co oznacza, że są one każdorazowo mniejsze od wartości H/1000.
- Rektyfikację trzonów wszystkich wież trójściennych przeprowadzono na podstawie pomiarów geodezyjnych wykonanych w latach 2004 i 2005, których wyniki opracowano z wykorzystaniem błędnego wzoru (1d) przy obliczaniu współrzędnych \bar{x} .

Literatura

1. Kawecki J.: Perspektywy rozwoju diagnostyki budowli. Inżynieria i Budownictwo nr 9/1998.
2. Instrukcja ER-01. Eksploatacja wież i masztów. Załącznik do zarządzenia nr 31 Prezesa Zarządu TP S.A. z dnia 30.06.1994 r., Warszawa 1994.
3. PN-B-06200:2002. Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru. Wymagania podstawowe.
4. PN-B-03204:2002. Konstrukcje stalowe. Wieże i maszty. Projektowanie i wykonanie.
5. Kozłowski T.: Stalowe maszty i wieże radiowe i telewizyjne. Arkady, Warszawa 1965.
6. Grochowski I., Kazek M.: Przyczyny zagrożenia nośności kilkunastu stalowych wież oświetleniowych. XII Sympozjum n.t. Badanie przyczyn i zapobieganie awariom konstrukcji budowlanych, Szczecin-Świnoujście 1991.
7. Grochowski I., Kazek M.: Wpływ imperfekcji rodzaju nieprostoliniowości osi prętów na siły i przemieszczenia. Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane, Szczecin Międzyzdroje 1995.
8. Pałkowski Sz.: Obliczanie, projektowanie i wykonanie stalowych masztów i wież telekomunikacyjnych. XIX Ogólnopolska Konferencja WPPK, Ustroń 2004.
9. Rykaluk K.: Konstrukcje stalowe. Kominy, wieże, maszty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
10. Wichtowski B.: Geometria stalowych wież i masztów radiowo-telewizyjnych na podstawie inspekcji okresowych. Budownictwo PN PS, nr 561/2002.
11. Jankowska B.: Błąd wzoru do wyznaczenia przemieszczenia masztu 3-ściennego wg Instrukcji ER-01. Konferencja Katedr i Zakładów Geodezji na wydziałach Niegeodezyjnych. Zielona Góra-Łagów 2001.