



Dr inż. Jacek HULIMKA
Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Inżynierii Budowlanej
Inż. Marcin SKWAREK
Mgr inż. Marcin DYREK
Pracownia Projektowa Marcin Skwarek, Zabrze

BŁĘDY W PROJEKTOWANIU, WYKONAWSTWIE I UTRZYMANIU WIEŻY TELEKOMUNIKACYJNEJ O WYSOKOŚCI 50m

ERRORS IN DESIGNING, MANUFACTURING AND MAINTENANCE OF THE 50m HIGH TELECOMMUNICATION TOWER

Streszczenie W referacie omówiono wady i uszkodzenia stalowej, kratowej wieży telekomunikacyjnej o wysokości 50m oraz projektowany sposób naprawy. Zwrócono tu uwagę na szereg błędów popełnionych w trakcie projektowania, wykonawstwa oraz eksploatacji obiektu. Czerpiąc z dotychczasowych doświadczeń zawodowych autorów w zakresie tego typu konstrukcji, przedmiotowy przypadek odniesiono ogólnie do problemów inżynierskich pojawiających się w procesie projektowania, budowy oraz utrzymania wież telekomunikacyjnych o niewielkiej wysokości. Mając na uwadze masową ilość tego rodzaju obiektów, wznoszonych w Polsce głównie w ostatnim dziesięcioleciu, co związane jest z szybkim rozwojem łączności bezprzewodowej, zasygnalizowane problemy mogą mieć charakter typowych.

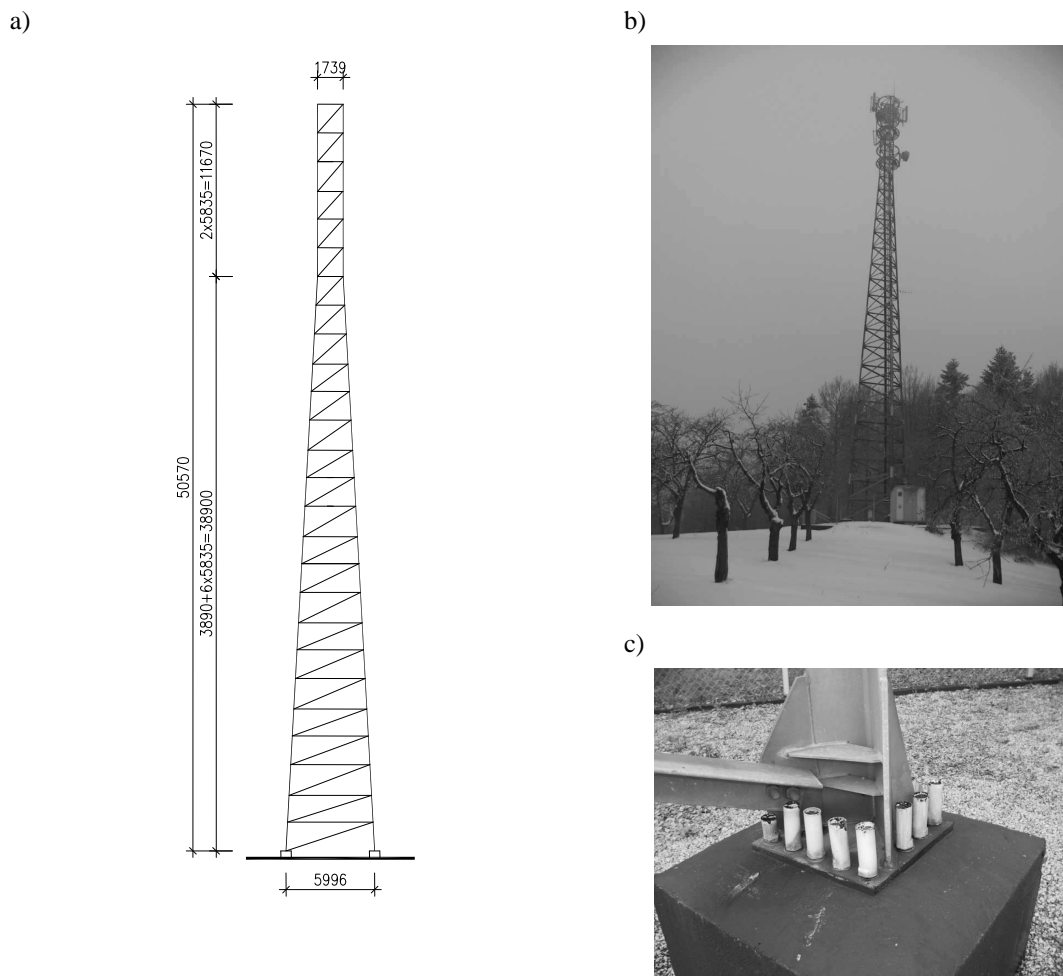
Abstract The paper presents defects and damages of the 50m steel truss tower for telecommunications, as well as planned method of fixing them. Number of errors, caused during designing, manufacturing and operation of the object, has been pointed out. Drawing from professional skills of authors of this type of constructions, the subject case has been referred mainly to engineering problems arising during a process of designing, erection and maintenance of small telecommunication towers. Considering a large number of objects of this kind erected in Poland during past ten years, which relates to the fast development of wireless communication, problems that has been indicated could be considered typical.

1. Krótki opis konstrukcji wieży

Opisywana wieża zlokalizowana jest w południowej Polsce, na pograniczu Pogórza Wiśnickiego i Rożnowskiego, w środkowym biegu rzeki Dunajec. Obiekt wzniesiony został w 2000r. na szczycie lokalnego wzniesienia, na wysokości około 462m npm.

Trzon wieży stanowi przestrzenna kratownica zbudowana na planie trójkąta równobocznego. Całkowita wysokość konstrukcji wynosi 50,57m, a długość boku zmienia się od 5,996m w poziomie fundamentów do 1,739m w poziomie 38,9m. Powyżej trzon wieży wykonany jest bez zbieżności. Pasy kratownicy przestrzennej – krawężniki wieży, wykonano z kątowników walcowanych równoramiennych, zmniejszających się od L200×200×20 przy podstawie do L120×120×10 na szczycie. Skratowania wykonano z kątowników walcowanych równoramiennych, od L150×150×12 przy podstawie do L90×90×10 w górnej części wieży. Zastosowano skratowania typu „N”, jednakowe we wszystkich ścianach wieży (krawężniki

przestrzennie sześcienne). Trzon kratowy podzielono na dziewięć segmentów montażowych o wysokości 3,890m dolny oraz 5,835m pozostałe. Wszystkie elementy konstrukcji wykonano ze stali węglowej St3SY. Połączenia prętów skratowania z krawężnikami wykonano jako zakładkowe, skręcane śrubami poprzez blachy węzłowe spawane do krawężników, usztywniane poprzecznymi żebrami. Krawężniki posiadają styki montażowe (przy połączeniach poszczególnych segmentów), które wykonano jako połączenia zakładkowe skręcane. Wszystkie połączenia wykonano na śruby o wysokiej wytrzymałości, klasy 8.8. Każdy krawężnik kotwiony jest w fundamencie z wykorzystaniem trzynastu kotew M30 wykonanych ze stali niskostopowej 18G2. Na podstawie ustaleń przeprowadzonych z właścicielem wynika, że wieża posadowiona jest na płycie fundamentowej kotwionej do podłoża skalnego, na której wykonano trzy słupy żelbetowe wyniesione ponad poziom gruntu, stanowiące bezpośrednie punkty oparcia trójkątnego trzonu kratowego. Zaznaczyć tu należy, że właściciel nie posiada dokumentacji wykonawczej fundamentu, a projekt budowlany zawiera jedynie lakoniczną notkę obliczeniową (wydruk programu komputerowego) w postaci jednej kartki formatu A4. Nie są zatem znane szczegóły wykonania fundamentu.



Rys.1. Przedmiotowa wieża a) schemat trzonu; b) widok; c) zakotwienie krawężnika

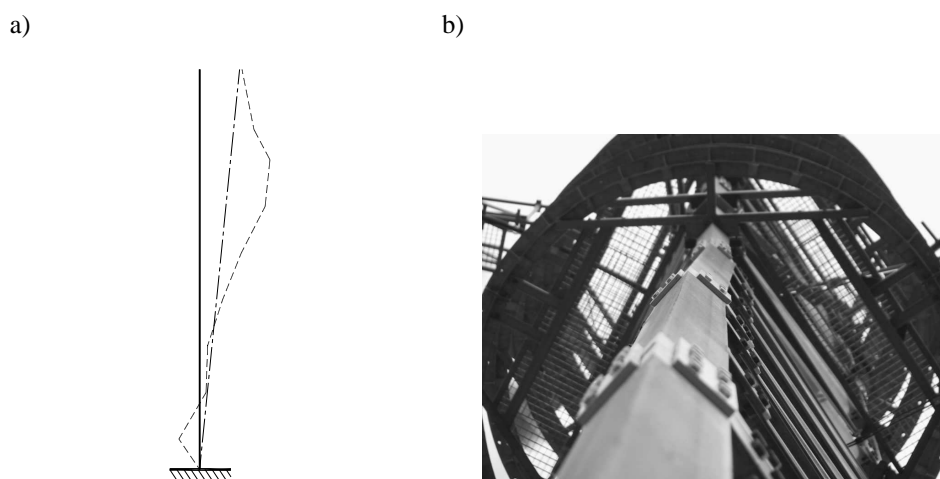
Wieżę wyposażono w odpowiednie konstrukcje wsporcze instalacji antenowych oraz drabinę wjazdową, umieszczoną wewnątrz trzonu.

Masa całej konstrukcji stalowej, łącznie z elementami wyposażenia (konstrukcje wsporcze anten, drabina) wynosi około 21 ton.

2. Opis zaobserwowanych wad i uszkodzeń

W zakresie wykonywanych przez autorów prac, przeprowadzono dwie wizje lokalne obiektu – pierwszą w marcu 2006r., obejmującą ogólne oględziny wieży oraz drugą, w maju 2006r., celem dokonania szczegółowego przeglądu konstrukcji oraz niezbędnych pomiarów, w tym geodezyjnego sprawdzenia pionowości trzonu wieży. Prace na obiekcie wykonywane były pod kątem ustalenia możliwości dodatkowego obciążenia konstrukcji.

Pierwszą stwierdzoną istotną wadą obiektu były znaczne wychylenia konstrukcji od pionu, przy równie znaczącej krzywiznie trzonu. Poniżej przedstawiono rysunek obrazujący wypadkowe wychylenia osi trzonu wieży oraz tabelę z wartościami pomierzonych przemieszczeń.



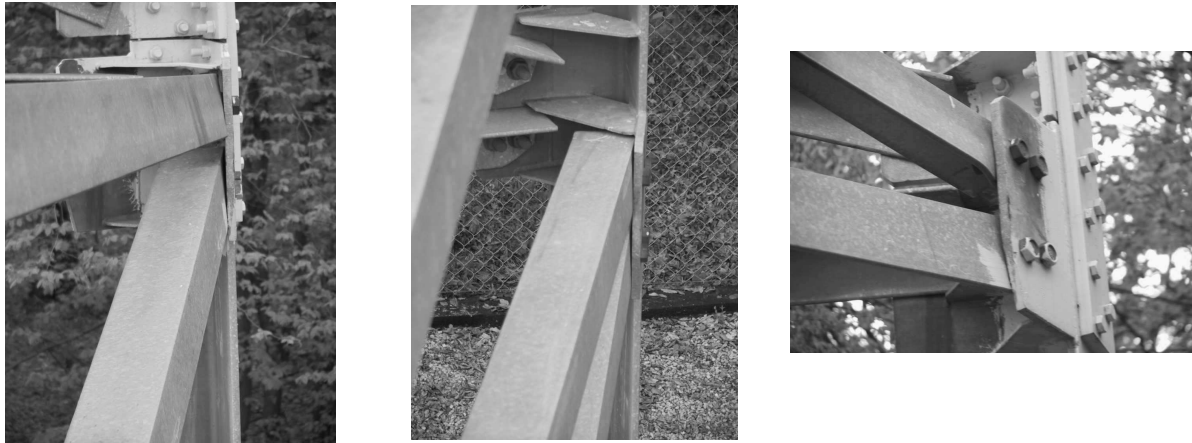
Rys.2. a) Wykres wychyleń wypadkowych trzonu wieży; b) widoczna krzywizna pojedynczego krawężnika

Na rysunku 2a linią osiową zobrazowano dopuszczalne wychylenie montażowe trzonu wieży zgodnie z PN-B-03204:2002, natomiast linią kreskową – pomierzone wychylenia konstrukcji z pionu.

Tablica 1. Wartości pomierzonych wychyleń wypadkowych oraz kątów skręcenia trzonu wieży

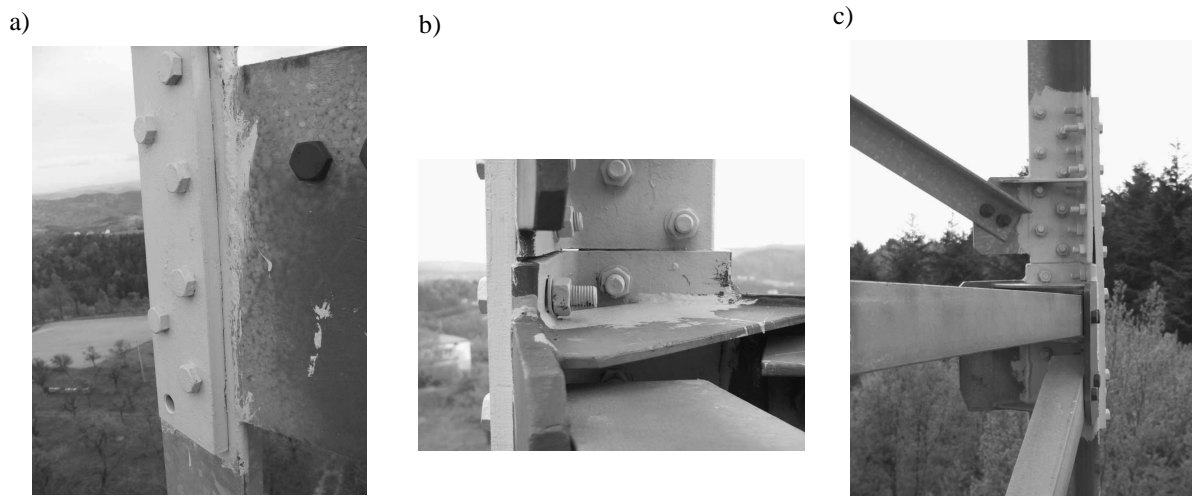
Poziom pomiarowy	Kąt skręcenia względem fundamentu	Wypadkowe wychylenie od pionu	Dopuszczalna wartość wychylenia $h/1000$
[m]	[°]	[mm]	[mm]
+3,80	0,239	36	4
+9,62	0,826	8	10
+15,48	0,860	10	15
+21,03	0,560	29	21
+27,03	0,575	52	27
+32,89	0,237	82	33
+38,72	1,544	88	39
+42,49	1,104	68	43
+50,01	0,057	53	50

Dopuszczalna wartość skręcenia trzonu wieży na całej wysokości nie powinna przekroczyć 5° , natomiast na odcinku 3m – $0,5^\circ$, widoczne jest zatem przekroczenie drugiego z podanych warunków. Istotnie przekroczone są dopuszczalne wychylenia w pośrednich poziomach pomiarowych.



Rys. 3. Przykłady skrzywienia prętów skratowania przy blachach węzłowych

Kolejnymi zaobserwowanymi uszkodzeniami i wadami omawianej konstrukcji są: skrzywienie prętów skratowań przy węzłach w trzech dolnych segmentach montażowych wieży (Rys. 3); brak łącznika w jednym ze styków montażowych i jednocześnie brak otworu na tę śrubę w kątowniku (Rys. 4a); błędnie zaprojektowane usztywnienia węzłów poziomymi przeponami z blach, z kolizją nakrętek ze spoiną (Rys. 4 b) oraz ułożenie spoin poprzecznych na pasach kratownicy (na elementach pracujących także jako rozciągane); uszkodzenie mechaniczne ścianki kątownika, powodujące niepełne przyleganie nakładki w styku montażowym (Rys. 4.c); luźne śruby w styku montażowym w miejscu zmiany zbieżności trzonu wieży, skutkujące wygięciem trzpieni śrub (Rys. 5).



Rys. 4. Przykłady błędów wykonawczych a) brak łącznika i otworu w kątowniku b) niewłaściwa konstrukcja węzła – nakrętka oparta na spoinie; c) uszkodzenie ścianki kątownika (krawężnika) – brak przylegania nakładki

Ponadto, stwierdzono niedokładne wykonanie wielu nakładek w połączeniach zakładkowych (stykach montażowych) krawężników. Większość z nich, zamiast prostokątnego, ma kształt rombu, co w wielu przypadkach spowodowało zmniejszenie odległości skrajnego łącznika od krawędzi blachy, poniżej dopuszczalnej wartości $1,5d$. Niedokładności w docięciu tych blach sięgają nawet 5mm.

Dodatkowo, należy zwrócić uwagę na nierzetelnie wykonywane przeglądy okresowe konstrukcji. Właściciel obiektu, do czasu wydania przez autorów stosownej opinii technicznej, a więc do maja 2006r., był przeświadczony, że przedmiotowa wieża znajduje się w co najmniej dobrym stanie technicznym. Wskazywały na to protokoły z przeglądów,

przekazywane rokrocznie przez firmę, której zlecono ich wykonywanie. Fakty wskazują natomiast na powstanie wymienionych wyżej uszkodzeń znacznie wcześniej. Świadczy o tym chociażby warstwa farby, widoczna na powierzchni blachy, łba śruby, nakrętki i podkładki w miejscu luźnych i wygiętych łączników (Rys. 5).



Rys. 5. Luźne łączniki i wygięte trzpienie śrub w styku montażowym

3. Obliczenia statyczno – wytrzymałościowe trzonu wieży

Kolejnym etapem prac nad przedmiotową wieżą, było przeprowadzenie analizy obliczeniowej, mającej na celu określenie nośności konstrukcji. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem licencjonowanego programu komputerowego Robot Millennium v 19.0, stosując przestrzenny model trzonu, z uciążlonymi pasami kratownicy przestrzennej.

Obciążenia zestawiono zgodnie z założeniami normy PN-B-03204:2002. Przedmiotowy obiekt zlokalizowany jest w trzeciej strefie obciążenia wiatrem wg PN-77/B-02011, w terenie typu A oraz w drugiej strefie obciążenia oblodzeniem wg PN-87/B-02013. Ponieważ wieża usytuowana jest na szczycie lokalnego wzniesienia (góry), analizowano ukształtowanie tego terenu w oparciu o mapy topograficzne w skali 1: 10 000. Ustalono, że w świetle postanowień normy PN-77/B-02011, lokalizacja wieży w pobliżu zboczy wzniesienia nie wpływa na zwiększenie ciśnienia prędkości wiatru, a zatem nie ma konieczności ustalania umownego poziomu posadowienia konstrukcji. Wybrane dwa profile przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Ukształtowanie terenu w pobliżu wieży – wybrane profile (na podstawie mapy topograficznej 1:10 000)

Obliczenia przeprowadzono na teoretycznym modelu konstrukcji, nie uwzględniającym znacznych jej deformacji montażowych. Weryfikację nośności prętów trzonu kratowego wieży wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-90/B-03200, uwzględniając możliwość utraty stateczności ogólnej, jak i miejscowej przy ściskaniu. Przyjęto przy tym możliwość dowolnego kierunku wyboczenia pasów kratownicy przestrzennej, uwzględniając najmniejszy

promień bezwładności przekroju. Największy wyznaczony współczynnik wykorzystania nośności obliczeniowej przekroju krawężników wynosi 0,90, natomiast skratowań 0,49. Największe poziome sprężyste przemieszczenie węzłów wierzchołka konstrukcji pod działaniem wiatru wynosi 24,0cm, przy wartości dopuszczalnej wg PN-B-03204 równej $H/100 = 50,57\text{cm}$. Największy kąt obrotu węzła konstrukcji w płaszczyźnie pionowej (kąt nachylenia stycznej do odkształconej) wynosi $0,49^\circ$, przy wartości dopuszczalnej równej $0,5^\circ$ przyjmowanej ze względu na zapewnienie właściwych warunków pracy systemów antenowych (wartość dopuszczalna wg normy wynosi 1°). Współczynnik wykorzystania nośności połączeń nie przekracza wartości 0,91. Należy jednak zwrócić uwagę na niewłaściwą konstrukcję styków montażowych krawężników. Wymiary, rozmieszczenie i pole przekroju nakładek dobrano bowiem w taki sposób, że środek ciężkości grupy nakładek nie pokrywa się ze środkiem ciężkości przekroju, tworząc dodatkowy mimośród o wielkości około 10mm. Ponadto, pole przekroju nakładek dobrano mniejsze od pola przekroju krawężnika (szczególnie w dolnych segmentach). Nie pozawala to na pełne wykorzystanie nośności przekroju, co można uznać za nieprawidłowość.

4. Analiza przyczyn powstania uszkodzeń

Ponieważ opisane wyżej obliczenia wieży przeprowadzono stosując normowe wartości obciążeń, w celu uzyskania poglądu na faktyczne warunki dotychczasowej pracy konstrukcji, na zamówienie autorów, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej przygotował dane z najbliższej stacji meteorologicznej, w zakresie maksymalnych chwilowych prędkości porywów wiatru w kolejnych kwartałach lat 2000 – 2006. Dane te zebrano w tablicy 2. Należy jednak podkreślić, że są to dane ze stacji meteorologicznej położonej około 25km od przedmiotowej wieży, na wysokości 292m npm, w obszarze o nieco innym ukształtowaniu i chropowatości podłoża (gęstość zabudowy, rozmiary budynków, rodzaje zadrzewienia i upraw na powierzchni ziemi, rzeźba terenu). Uzyskane dane można zatem traktować jedynie jako poglądowe, dające obraz kształtowania się prędkości wiatrów w stosunku do wartości normowych.

Ponieważ podane niżej wartości to prędkości chwilowe, aby móc je porównać z wartościami normowymi należy wykonać przeliczenie na prędkość średnią dziesięciominutową. Takiego przeliczenia można dokonać stosując tzw. współczynnik porywistości wiatru, będący stosunkiem maksymalnej prędkości chwilowej w pewnym czasie t do prędkości średniej z tego samego czasu t . Dla czasu uśrednienia 10 minut wartość współczynnika porywistości należy przyjąć od 1,5 do 1,6. Oznacza to, że podczas dotychczasowej eksploatacji wieży, przy największej odczytanej z tabeli prędkości chwilowej 57m/s, maksymalna charakterystyczna prędkość wiatru (średnia dziesięciominutowa) wyniosła $35,6\div 38,0\text{m/s}$. Przy drugiej co do wartości prędkości chwilowej 36m/s, wartość średnia dziesięciominutowa wynosi $22,5\div 24,0\text{m/s}$. Dla porównania, normowa wartość charakterystycznej prędkości wiatru dla lokalizacji stacji meteorologicznej wynosi 25,8m/s. Przypuszczać zatem należy, że podczas eksploatacji wieży mogło dojść do przekroczenia normowej wartości obciążenia wiatrem.

Analizując przyczyny powstania uszkodzeń, należy podzielić je na trzy grupy. Pierwszą z nich tworzą nieprawidłowości powstałe na skutek błędów projektowych. Do grupy tej należą: niewłaściwa konstrukcja węzłów (Rys. 4.b) oraz skrócenie prętów skratowań przy węzłach i uplastycznienie przekrojów (Rys. 3), co spowodowane zostało zaprojektowaniem połączenia o zbyt dużym mimośrodku. Kątowniki równoramienne o przekroju $L150\times 150\times 12$, $L130\times 130\times 12$ oraz $L120\times 120\times 12$ połączono z blachami węzłowymi jak pozostałe pręty (o mniejszym przekroju), jednym rzędem śrub w środku szerokości półki.

Tablica 2. Największe chwilowe prędkości porywów wiatru w trakcie eksploatacji wieży [m/s]
(dane pochodzące z najbliższej stacji meteorologicznej, położonej około 25km od obiektu)

rok	kwartał			
	I	II	III	IV
2000	22	20	21	14
2001	36	19	15	19
2002	26	14	16	30
2003	17	18	18	17
2004	21	25	16	31
2005	17	57	16	23
2006	16	19	–	–

Drugą grupę uszkodzeń tworzą błędy wykonawcze, a więc niedokładna prefabrykacja konstrukcji i niedbały jej montaż, co stało się przyczyną znacznych wychyleń montażowych wieży (Rys 2), braku śruby i otworu (Rys. 4.a), uszkodzenia krawężnika (Rys. 4.c) oraz pozostawienia luźnych łączników (Rys. 5). Przypuszcza się, że skręcenie prętów skratowań oraz wygięcie trzpieni luźnych śrub nastąpiło przy największych prędkościach wiatru z czasu eksploatacji obiektu, mogących nawet przekraczać wartości normowe. Stwierdzono przy tym, że deformacje (wychylenia) trzonu wieży mają charakter imperfekcji montażowych i musiały powstać podczas jej wznoszenia, bowiem, prócz opisanego skręcenia części skratowań przy węzłach, nie znaleziono innych widocznych uszkodzeń mogących sugerować utratę stateczności bądź nośności prętów (szczególnie w wyższych partiach trzonu).

Trzecią i ostatnią grupą nieprawidłowości są błędy w utrzymaniu obiektu. Problem niezetelności firmy wykonującej przeglądy poruszono już wyżej. Wspomnieć należy jeszcze o zbytnim uproszczeniu kwestii kontroli pionowości wieży. Otóż kontrolowano tu jedynie wychylenia wierzchołka wieży, uznając warunek normowy $h/1000$ jako odnoszący się tylko i wyłącznie do całej wysokości konstrukcji, podczas gdy norma wyraźnie precyzuje, że h oznacza kolejne poziomy trzonu wieży. Abstrahując od zapisów normowych można tu mówić o zwykłym braku wyobraźni, bądź słabym przygotowaniu merytorycznym do prowadzenia tego rodzaju prac.

5. Projektowany sposób naprawy

Po zebraniu wszystkich danych i wyników wykonanych prac przedstawiono je właścicielowi wieży. Położono tu nacisk na obecny stan techniczny konstrukcji, a przede wszystkim znaczne odkształcenia trzonu. Opisano ponadto wyniki obliczeń, z których wynika niemal pełne wykorzystanie jednego z warunków SGU (obrót węzłów).

Biorąc pod uwagę planowane dodatkowe obciążenie wieży, poprzez instalację dodatkowych anten, właściciel zdecydował o wymianie konstrukcji wieży, która przeprowadzona ma zostać do maja 2007r. Zlecono autorom wykonanie projektu nowego trzonu wieży na istniejących fundamentach oraz doraźnego zabezpieczenia istniejącej konstrukcji.

W zakresie doraźnego zabezpieczenia istniejącej wieży zalecono: wymianę skręconych prętów skratowania, z zastosowaniem zaprojektowanego jarzma przestawnego, spinającego pasy kratownicy w miejscu demontażu pręta, mocowanego do krawężników obejmami; założenie spoin pachwinowych w połączeniach skratowań z blachami węzłowymi w trzech dolnych segmentach wieży, w celu zabezpieczenia prętów przed możliwością drugorzędowego skręcania; wymianę wygiętych śrub w styku montażowym; kontrolę pionowości wieży co najmniej raz na kwartał, do czasu jej demontażu.

Jako rozwiązanie docelowe zaprojektowano nową konstrukcję wieży. Podstawowym założeniem projektu była konieczność posadowienia wieży na istniejących fundamentach. Ponieważ właściciel nie dysponuje dokumentacją fundamentu, założono, że nowa konstrukcja wieży musi być tak zaprojektowana, aby przekazywała na punkty podparcia reakcje o mniejszych wartościach obliczeniowych, niż ma to miejsce w przypadku oryginalnej konstrukcji. Geometrię trzonu nowej wieży ustalono w oparciu o szereg analiz, mających na celu spełnienie podanego wyżej założenia. Zaprojektowano konstrukcję wykonaną w całości z rur okrągłych, rezygnując z trzonu o zmiennej zbieżności, celem ograniczenia wartości momentów drugorzędnych w przekrojach krawężników. W efekcie otrzymano wypadkowe obciążenie charakterystyczne wiatrem trzonu wieży o wartości 44,33kN, przy wartości 125,3kN dla istniejącej konstrukcji, na co złożyły się: zmniejszenie powierzchni działania wiatru, zmniejszenie wartości współczynnika dynamicznego oraz odpowiedni dobór przekrojów prętów celem poprawienia parametrów opływu i w efekcie zmniejszenie współczynnika aerodynamicznego. Podstawowe wyniki obliczeń projektowanego trzonu to: maksymalny współczynnik wykorzystania nośności pojedynczego pręta 0,53; największe sprężyste przemieszczenie węzłów wierzchołka wieży 12,9cm; największy kąt obrotu węzła w płaszczyźnie pionowej 0,25°; największa reakcja wciskająca 691,1kN przy wartości w stanie istniejącym 1089,7kN; największa reakcja wyrwywająca 599,2kN przy wartości w stanie istniejącym 943,9kN. Całkowita masa zaprojektowanej konstrukcji (łącznie z wyposażeniem) wynosi około 17 ton. Ponadto, po zdemontowaniu istniejącej wieży zalecono wykonanie odkrywki fundamentu celem określenia jego stanu technicznego, co powinno zostać potwierdzone wpisem do dziennika budowy – przed montażem nowej konstrukcji.

6. Podsumowanie

W następstwie wykonanych przeglądów i pomiarów stwierdzono, że konstrukcja przedmiotowej wieży $H=50\text{m}$ znajduje się w złym stanie technicznym i jest obciążona licznymi wadami, a znacznie odbiegające od dopuszczalnych wartości pomierzonych wychyleń wypadkowych trzonu od pionu nie pozwalają na dalszą bezpieczną eksploatację obiektu. Mając w planie instalację kolejnych anten właściciel zdecydował o wykonaniu nowej konstrukcji wieży na istniejących fundamentach, z doraźnym zabezpieczeniem istniejącego obiektu. W następstwie takiej decyzji wykonano stosowną dokumentację.

Przypadek przedmiotowej konstrukcji, będącej w istocie niezbyt skomplikowanym zagadnieniem inżynierskim, każe zastanowić się w nieco szerszym zakresie nad kwestią projektowania, wykonania i utrzymania tego typu obiektów. Niezwykle dynamiczny rozwój łączności bezprzewodowej, jaki obserwujemy w ostatnim dziesięcioleciu, spowodował bowiem duże zapotrzebowanie rynku na usługi w tym zakresie. W efekcie, zauważyć można, że część firm lub osób zajmujących się poruszonymi tu zagadnieniami, zdaje się nie posiadać dostatecznego przygotowania merytorycznego. Skutkiem tego, jak w przypadku opisywanej wieży, bywa konieczność demontażu konstrukcji po bardzo krótkim okresie eksploatacji lub jej generalnego remontu. Spodziewać się można, że w miarę upływu czasu podobne problemy będą pojawiać się coraz częściej.