

DETERMINANTY FORM SYSTEMÓW KONSTRUKCYJNYCH W ARCHITEKTURZE OBIEKTÓW PRZEMYSŁOWYCH PROJEKTOWANYCH Z ZASTOSOWANIEM NOWOCZESNYCH ANALIZ NUMERYCZNYCH

Jarosław MIKOŁAJEWSKI

Wydział Architektury CONDIX S.A.
Sady k. Poznania, ul. Poznańska 11b
60-080 Tarnowo Podgórne, Polska

E-mail: design@condix.pl, URL: www.condix.pl

Słowa kluczowe: *architektura, system konstrukcyjny, model obliczeniowy, BIM*

ABSTRAKT

W referacie na przykładzie konstrukcji wsporczej pod taśmociąg wapienia w jednej z fabryk papieru w Rosji, przedstawiony został sposób projektowania opartego na wzorcach zaczerpniętych z przyrody. Konstrukcje tego typu podobnie, jak ich niedoścignione oryginały, posiadają stopień złożoności w ścisłym związku funkcją którą pełnią w swoim otoczeniu na różnych stadiach: tworzenia, montażu i eksploatacji. Pewnym uszczegółowieniem tzw. projektowania naturalnego, przedstawionym również w referacie, są przestrzenne konstrukcje homoidalne tzn. obiekty o kształcie nawiązującym do budowy ciała człowieka. Konstrukcje tego typu z uwagi na swoje duże możliwości adaptacyjne mogą stanowić znaczne ułatwienie w dopasowaniu do kolejnych założeń - będąc pewną determinantą formy przyjętego systemu konstrukcyjnego

1. ZAŁOŻENIA PROJEKOWE - WARUNKI BRZEGOWE

Konstrukcja wsporcza taśmociągu została zaprojektowana na terenie pracującego zakładu. Trasę mostu technologicznego wytyczono w trudnym obszarze pomiędzy: istniejącymi estakadami rurowymi, linią kolejową, i drogą pożarową - patrz rys. 21. Obiekt zlokalizowano w terenie o słabo zinwentaryzowanej infrastrukturze podziemnej, z możliwością zaistnienia nierównomiernych osiadań.

Całość układu konstrukcyjnego wyróżnia się możliwością regulacji geometrycznej, pozwalającej kompensować wpływ nadmiernych osiadań i wywołanych przezeń - dodatkowych naprężeń. Zdolność tą należało sprawdzić wstępnie na modelach numerycznych.

Most technologiczny ze względów transportowych, logistycznych i celnych starano się rozwiązać w sposób najbardziej czytelny, w maksymalnym stopniu prefabrykacji. Pozbawiono go tym samym szeregu drobnych elementów i zminimalizowano czynności montażowe w trudnych warunkach klimatycznych.

2. PRZYJĘTE ROZWIĄZANIE GEOMETRYCZNE

Zaproponowano rozwiązanie w swojej zasadniczej części tradycyjne. Dwie linie galeryjne z wieżą przesypową - patrz rys.1 i 2, która to rozwiązywała dwa zasadnicze problemy: zmianę kąta przebiegu taśmociągu w planie i ustalonej różnicy wysokości początku i końca mostu galerii – zachowując przy tym stały kąt nachylenia taśmociągu.

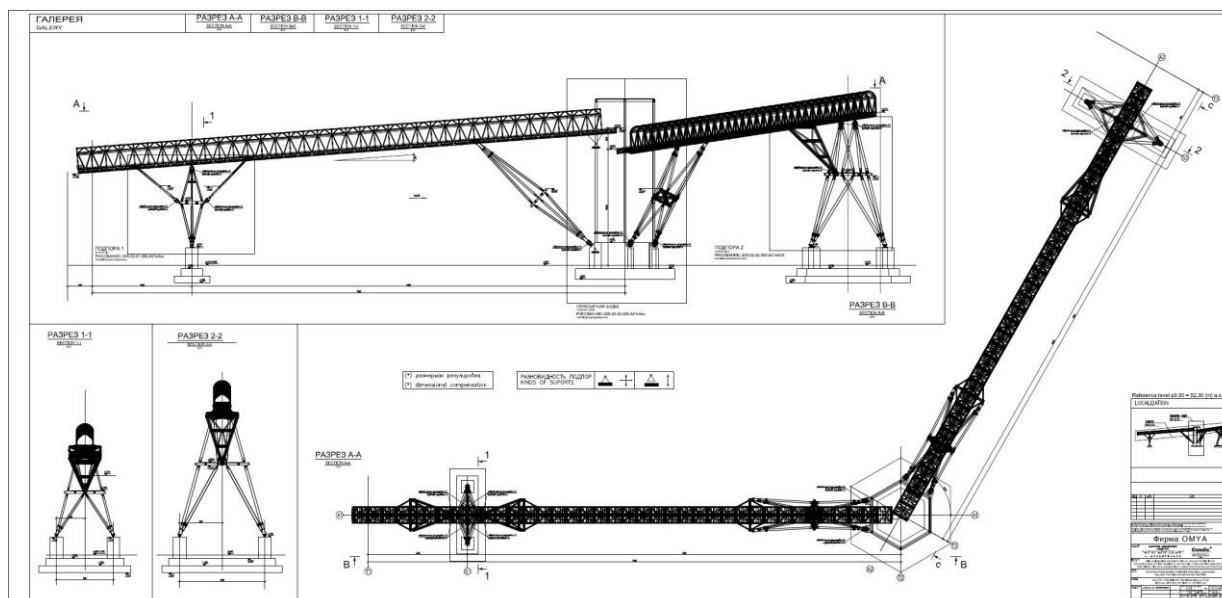
Wieża przesypowa stanowiła punkt stały, podpory skrajne zaprojektowano jako podpory wahaczowe o konstrukcji strukturalnej - kształtem przypominające obiekty homoidalne - patrz rys.1,3,17,18. Średnia wysokość taśmociągu to ok. 20m. Most galerii liczący w linii prostej około 160m podparto jedynie na trzech głównych podporach pionowych: dwóch skrajnych słupach wahaczowych i środkowej wieży przesypowej. Wynikało to głównie z racji ograniczenia możliwych kolizji fundamentowych z infrastrukturą podziemną, oraz z lepszego wykorzystania nośności geometrycznej mostu na większych rozpiętościach. Z uwarunkowań lokalnych wyniknęło nietypowe załamanie przebiegu taśmociągu w punkcie wieży przesypowej o kąt w przybliżeniu równy 60 stopni.

Przyjęty homoidalno-strukturalny system konstrukcyjny dla słupów wahaczowych, okazał się charakteryzować dużą sztywnością gięto-skrotną na wysokości podpory, pozostawiając jednocześnie możliwość obrotu w miejscach połączeń z fundamentem i galerią. Miało to zasadnicze znaczenie dla sprawnego przeprowadzenia montażu. Dodatkowo jak na dość wysoką podporę układ wsporczy zawierał niewiele elementów prętowych, co między innymi wpłynęło na efektywność przeprowadzanych obliczeń numerycznych.

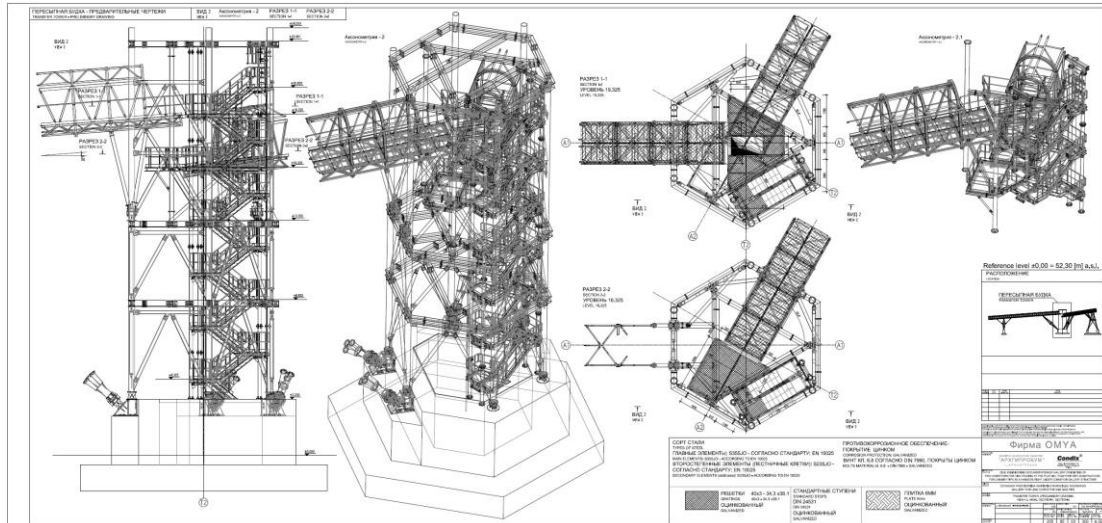
3. OGÓLNA KONCEPCJA UKŁADU KONSTRUKCYJNEGO

Pomysł rozwiązania głównych elementów konstrukcyjnych jak już wspomniano we wstępie, zaczerpnięto z obserwacji natury, która tworzy poziom złożoności konstrukcji w funkcji jej późniejszej pracy czy eksploatacji. W związku z tym, statyczne obiekty naturalne, takie jak np. skały, posiadają sztywne struktury konstrukcyjne w postaci siatek krystalicznych z materiałem mało urozmaiconym pod względem właściwości. Istoty żywe podlegające różnym obciążeniom, w różnych warunkach - charakteryzują się wielką złożonością, co można zauważyć chociażby w ich układzie przenoszącym obciążenia takim jak szkielet. Mając to na uwadze, elementy sztywne jak kości szkieletowe wspomagane są przez: ścięgna - elementy wiotkie o dużej wytrzymałości na rozciąganie, liczne przeguby i wolne przestrzenie. Wszystko to w znacznym stopniu ogranicza koncentrację naprężeń i pozwala na łatwe dopasowanie geometryczne.

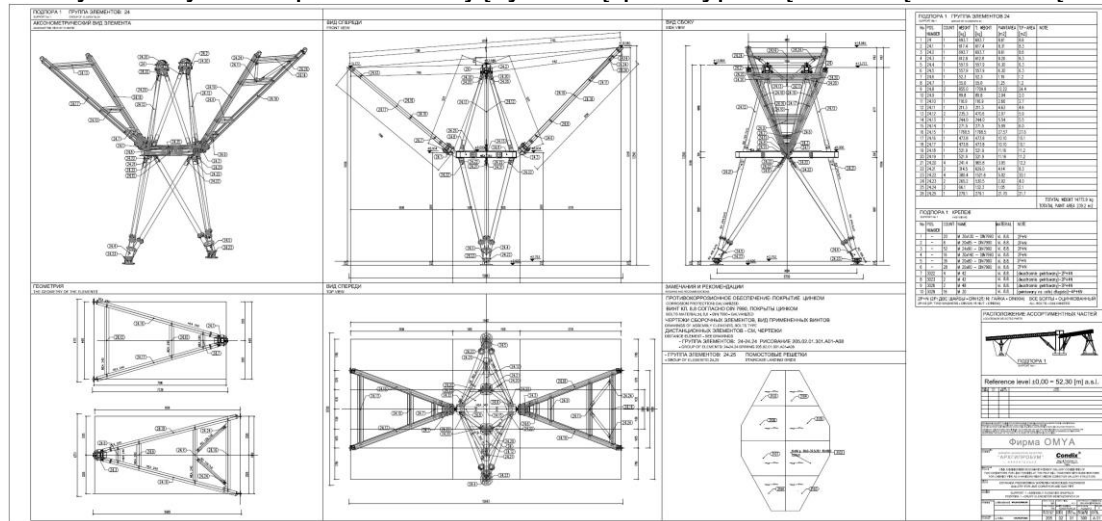
Konstrukcje wsporcze pod urządzenia technologiczne z racji szeregu zmian występujących na wielu etapach: projektowania, montażu i w czasie eksploatacji, powinny charakteryzować się podobnymi dużymi zdolnościami dostosowawczymi. Rozwiązania takie, w swej zasadniczej części mogą rzutować na wykonalność projektu w założonych ramach czasowo-finansowych.



Rys. 1. Rysunek przedstawiający ogólną koncepcję konstrukcji wsporczej



Rys. 2. Rysunek przedstawiający wieżę przesyłową z klatką schodową

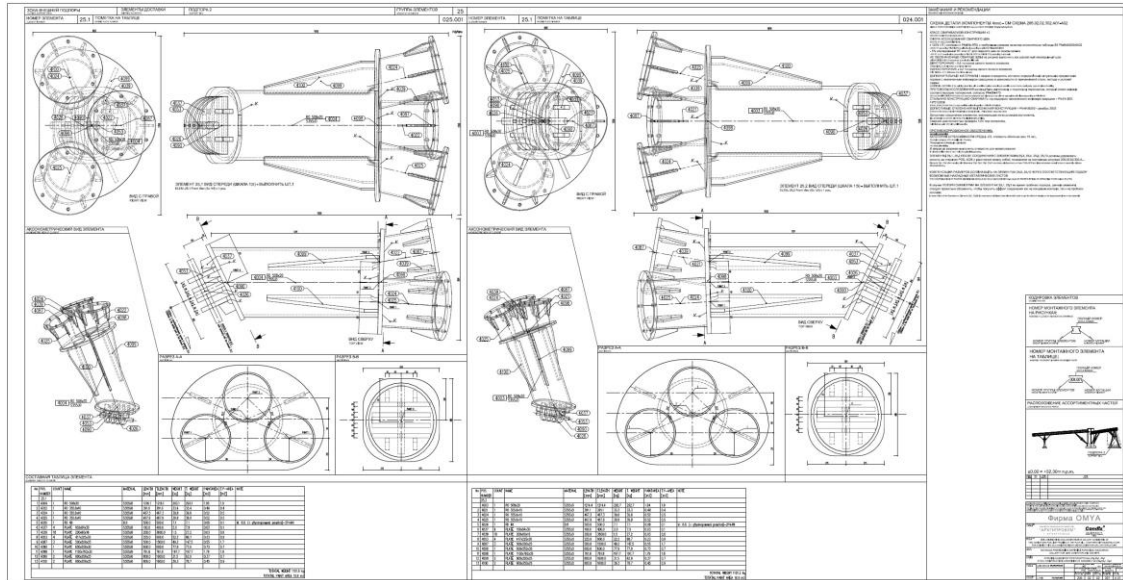


Rys. 3. Rysunek montażowy strukturalno-homoidalnej podpory wahaczowej

4. NUMERYCZNY MODEL OBLICZENIOWY

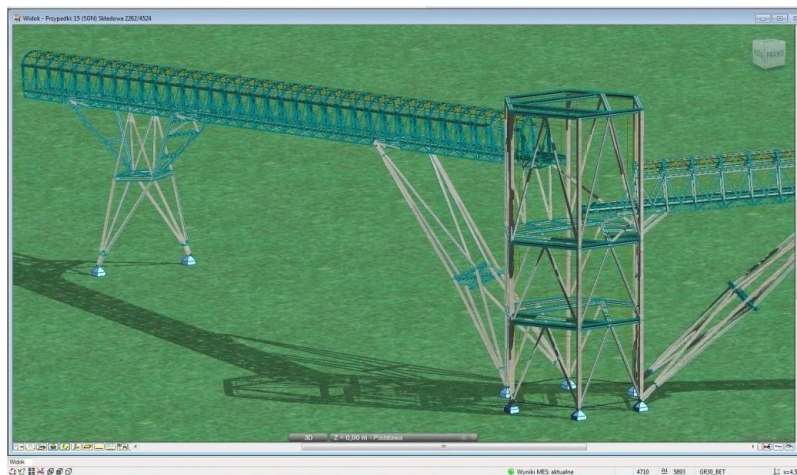
Przestrzenny obliczeniowy model numeryczny stworzono z dużą dbałością o odwzorowanie jego głównych elementów jak między innymi węzły. Zostały one najpierw rozwiązane konstrukcyjnie w modelu warsztatowym - patrz rys. 4. Dopiero na tej podstawie powstał obliczeniowy obraz węzła w całości konstrukcji - z jego wewnętrznymi mimośrodkami i resztą geometrii - rys. 5,6,7. Taka kolejność projektowania pozwala uniknąć szeregu zmian modelu numerycznego na skutek niemożności wymodelowania węzła w projekcie warsztatowym.

W tym miejscu należy przedstawić powszechną prawdę, że element konstrukcyjny pracuje tak - jak się go zaprojektuje i wykona, a nie jak przyjmie w obliczeniach. Chodzi przede wszystkim o proporcje i sztywności węzłów.

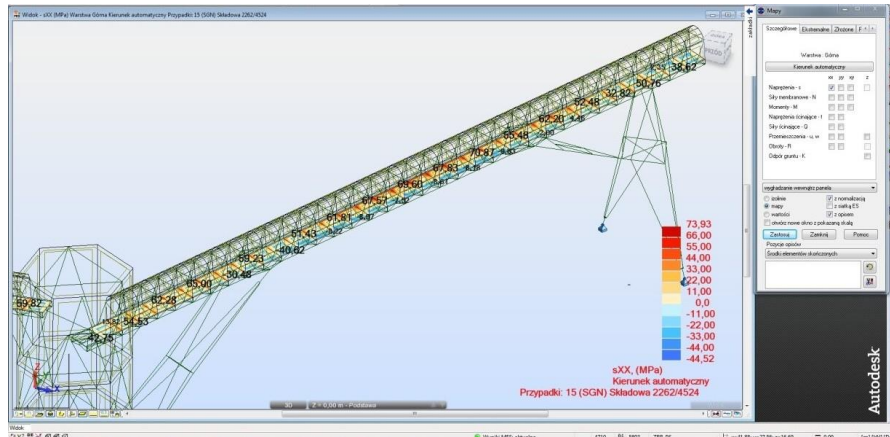


Rys. 4. Rysunek warsztatowy jednego z węzłów podpory zastrzałowej

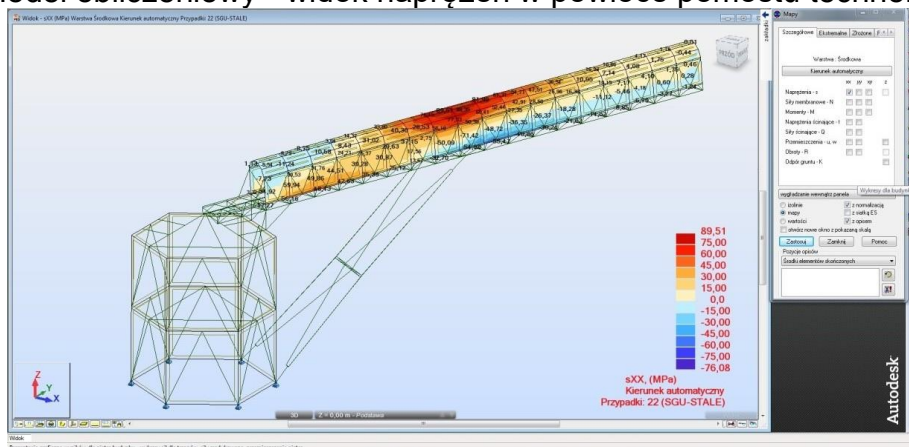
Z racji dużej liczby kombinacji obciążeń i złożoności modelu starano się uniknąć rozwiązania problemu statycznego w analizie nieliniowej, stąd układ obliczeniowy ograniczono do elementów powłokowo prętowych. Pozwoliło to, prowadzić obliczenia w analizie liniowej i superponować skutki obciążeń - co skraca proces obliczeniowy i zmniejsza objętość pliku wynikowego. Dodatkowo ze względu na dość złożony wieloetapowy montaż, konieczne było stworzenie dodatkowych schematów montażowych uwzględniających różne fazy montażowe, z dobraniem indywidualnych trawers i zawiesi włącznie, co znacznie rozszerzyło zakres obliczeń. Dlatego model obliczeniowy musiał być przede wszystkim efektywny, pozwalający na szybkie wielokrotne obliczenia z szeregiem zmian w układach: statycznym i geometrycznym. Umożliwiając korzystanie z niego na montażu wykorzystując typowy sprzęt obliczeniowy z odpowiednim oprogramowaniem - patrz rys. 5,6,7.



Rys. 5. Wizualizacja obliczeniowego modelu numerycznego



Rys. 6. Model obliczeniowy - widok naprężeń w powłoce pomostu technologicznego



Rys. 7. Model obliczeniowy - widok naprężeń w powłokach obudowy w jednym ze schematów montażowych

Dodatkową trudność stanowiło sprawdzenie wytrzymałości i kąta pochylenia konstrukcji w fazie podnoszenia z uwagi na pracę urządzeń dźwigowych na granicy swoich parametrów znamionowych, oraz występujące w miejscu montażu ograniczenia lokalizacyjne - patrz rys 8 do 11, 17 do 22



Rys. 8. Czynności przygotowawcze przy podnoszeniu pierwszego segmentu mostu - podnoszony ciężar to ok. 56 ton



Rys. 9. Jak wyżej - widoczne łańcuchy odciągowe z możliwością regulacji kąta pochylenia podpory ukośnej



Rys. 10. Demontaż trawers przy pierwszym segmencie - widoczna realizacja schematu montażowego pokazanego na rys. 7



Rys. 11. Podnoszenie pierwszego segmentu drugiej linii - widoczny kontrolowany przechył wstępny

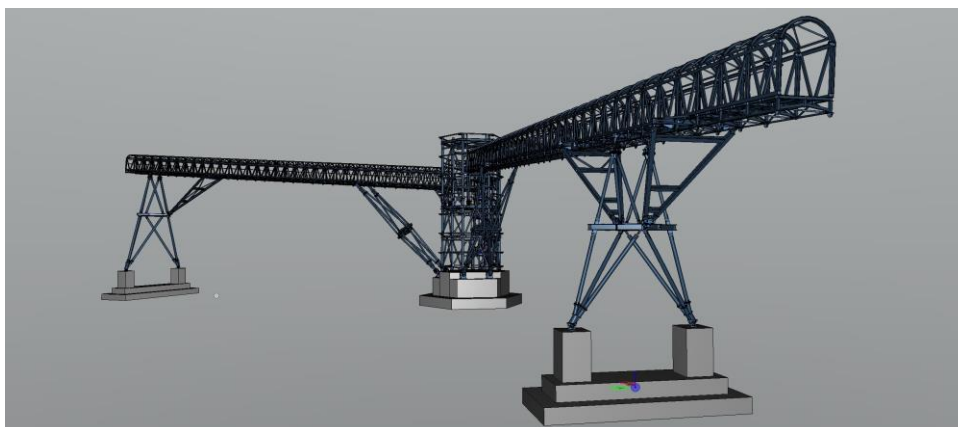
Całość obliczeń statycznych i dynamicznych - w zakresie określenia podstawowych postaci drgań własnych, została przeprowadzona w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012.

5. NUMERYCZNY MODEL WARSZTATOWY BIM

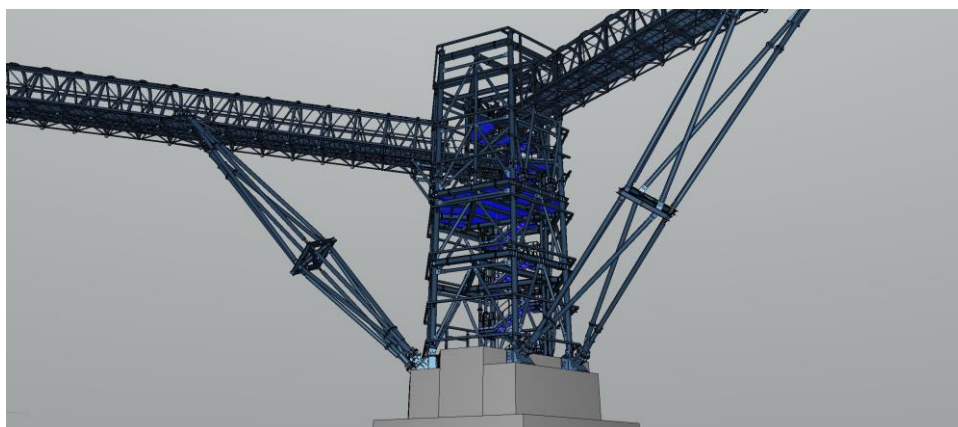
Duża liczba kryteriów optymalizacyjnych takich jak: odległość od miejsca wytworzenia do miejsca montażu, konieczność przejścia przez odprawę celną, sposób zabezpieczenia konstrukcji, wieloetapowy montaż, brak dostępności specjalistycznego sprzętu pomocniczego, wymusiły niestandardowe rozwiązania konstrukcyjne. Ich cechą wspólną było przeniesienia środka ciężkości trudności wykonania zadania na wykwalifikowane wytwórnie, co skutkowało maksymalną prefabrykacją części wysyłkowych. Wiele elementów musiało zostać sprawdzonych w numerycznym modelu warsztatowym pod kątem np. ich obrotu w zakresie nierzadko ponad 90 stopni - względem innych części, co w konstrukcjach budowlanych nie jest powszechną praktyką. Rozwiązania węzłów musiały umożliwić bezpieczną i prostą regulację geometrii z zastosowaniem siłowników hydraulicznych śrub i blach dystansowych.

Podczas scalania podnoszone elementy z racji specyfiki montażu zmieniły położenie środka ciężkości, co skutkowało pojawieniem się zmiennego przechyłu na wielkogabarytowych segmentach montażowych - patrz rys. 11. Główny sprzęt montażowy jakim był dźwig 450 ton,

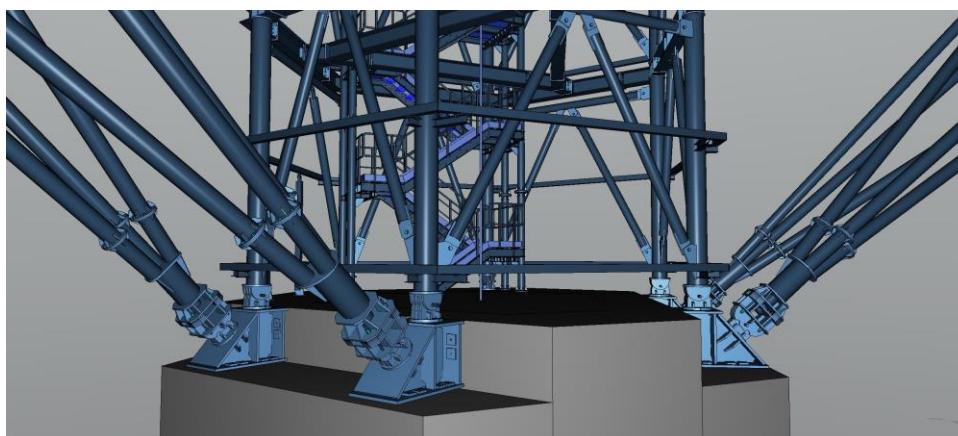
operował na granicy swoich parametrów. Precyzyjne wyznaczenie środka ciężkości w funkcji umiejscowienia trawers i zawiesi miało zasadnicze znaczenie dla określenia projektowego przechyłu elementu. Te parametry były niezbędne do przyjęcia bezpiecznych parametrów montażu. Model warsztatowy, rysunki warsztatowe i montażowe, określenie środków ciężkości dla złożonych elementów montażowych zostało wykonane z wykorzystaniem programu ProStructures V8i SELECTseries 4 for AutoCAD 2012.



Rys. 12. Wizualizacja modelu BIM - widok ogólny na galerię



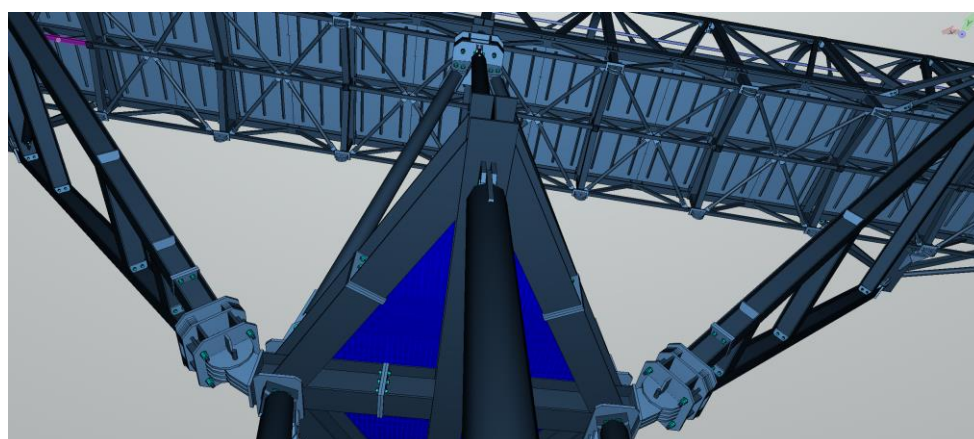
Rys. 13. Wizualizacja modelu BIM - wieża strefa przypodporowa



Rys. 14. Jak wyżej - widok węzłów z możliwością regulacji hydraulicznej



Rys. 15. Wizualizacja modelu BIM - widok strefy przypodporowej podpory wahaczowej



Rys.16. Jak wyżej - zbliżenie węzłów z możliwością regulacji hydraulicznej

7. ZDOLNOŚCI ADAPTACYJNE KONSTRUKCJI STRUKTURALNYCH O KSZTAŁCIE HOMOIDALNYM W ŚWIETLE PRZEDSTAWIONYCH ZAŁOŻEŃ

Na etapie projektowym układ konstrukcyjny ulegał szeregu zmianom. Przedstawiona konstrukcja szczególnie w zakresie homoidalnych podpór wahaczowych, dawała się łatwo adoptować do różnych kryteriów: rozstawu podpór, rozpiętości i wysokości. Obliczeniowo była praktycznie niewrażliwa na pojawiające się zmiany geometryczne i powiązane z nimi korekty układów obciążeń zewnętrznych i powstających do nich sił wewnętrznych. Niewielka liczba prętów, sprowadzała szybko wymieniony układ sił do fundamentów i dawała się w łatwy sposób modyfikować nie zmieniając przy tym zasadniczej części geometrii.

Mała liczba części składowych blisko dwudziestometrowych podpór była ogromną zaletą na etapie wstępnego montażu scalającego, w trudnych warunkach klimatycznych, przy relatywnie niedużych placach montażowych, które stanowiły jednocześnie zaplecze składowo-magazynowe i celne.

Struktury przestrzenne pozwalają projektować elementy o dużej sztywności, ze stosunkowo prostymi węzłami przegubowymi. Geometria homoidalna umożliwia natomiast, przyjęc w sposób intuicyjny właściwe proporcje całej konstrukcji, jak i poszczególnych jej elementów. Ma to kluczowe znaczenie na etapie budowy złożonego modelu obliczeniowego, gdzie przyjęcie wstępnej macierzy sztywności ma szczególne znaczenie w optymalizacji całego schematu statycznego [7,8].

6. REALIZACJA

Montaż konstrukcji przypadł na trudne warunki zimowe. Temperatura podczas montażu niejednokrotnie spadała do -27 stopni Celsjusza. Ten parametr poza bardzo trudnymi warunkami pracy ludzi i sprzętu, nie stanowił problemu - gdyż założona różnica temperatur w projekcie wynosiła $DT= 60$ stopni. Konstrukcja poza kilkoma miejscami kompensacji wymiarowej: na styku dwóch materiałów o różnych tolerancjach wykonania jakim są stal i żelbet - została zaprojektowana i wykonana jako skręcana.

Napotkane na miejscu warunki spowodowały wykorzystanie wszystkich założonych możliwości dostosowawczych w zakresie prowadzenia montażu: przegubów, luzów, miejsc kompensacji, regulacji hydraulicznej. Obliczeniowy i warsztatowy model numeryczny był niezastąpiony w fazie montażowej. Używany był między innymi do określenia: tymczasowych środków ciężkości, szybkiego sprawdzenia ciężaru segmentów montażowych, obliczenia sztywności tymczasowych schematów montażowych, oceny efektywności zastosowanego sprzętu montażowego. Żaden z głównych zaprojektowanych styków śrubowych nie został rozwiercony, czy w jakikolwiek inny sposób zmieniony - co było ogromnie ważne ze względu na panujące warunki. Stosunkowo niewielka liczba elementów montażowych, jak na tego typu konstrukcję powodowała między innymi, łatwiejsze odszukanie elementów pod zwałami zalegającego śniegu.

Rozdzielenie montażu na dwa etapy: mały i duży - pozwoliło racjonalniej dysponować sprzętem montażowym. W małym montażu, używano głównie lekkiego sprzętu lokalnego. W dużym, który obejmował łącznie piętnaście dni roboczych - zastosowano założony, główny sprzęt montażowy: dźwig 450 ton i 100 ton, który sprowadzono na ten okres z Moskwy. Powyższy podział umożliwił także, prowadzenie części prac - w tym montażu obudowy i technologii na ziemi, co w innym przypadku skutkowałoby montażem na wysokości - zwiększając znacznie czas i koszty całości inwestycji.



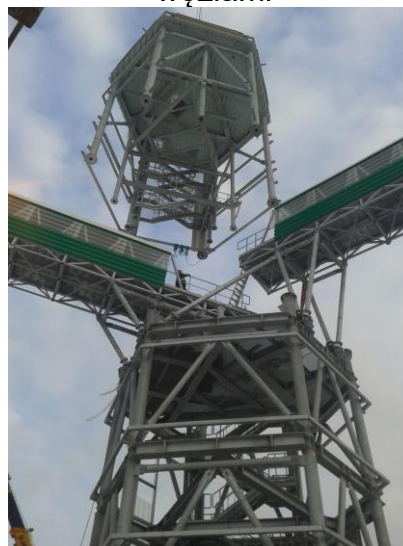
Rys.17. Homoidalna podpora wahaczowa
- widok z przodu



Rys.18. Homoidalna podpora wahaczowa
z widocznymi regulowanymi hydraulicznie
węzłami



Rys.19. Etap scalania dwóch segmentów
wież



Rys.20. Jak obok - widoczne
zmontowane wcześniej elementy klatki
schodowej i pomostów technologicznych



Rys. 21. Widok zmontowanej konstrukcji
wsporczej



Rys. 22. Widok konstrukcji wsporczej z
częściowo zamontowanym oświetleniem

7. UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że konstrukcje przemysłowe nie muszą być kształtowane wyłącznie uwzględniając wymogi technologiczne, mogą być również formowane z uwzględnieniem walorów estetycznych. Kształty zaczerpnięte z natury dają się jak widać znakomicie adoptować i w prosty sposób nadawać właściwe proporcje konstrukcją budowlanym - skracając jednocześnie czas: projektowania, obliczeń, jak i montażu. Zastosowanie metod numeryczny na różnych etapach procesu budowlanego pozwala lepiej gospodarować dostępnymi środkami, optymalizując projektowanie, proces wytwarzania oraz montażu.

LITERATURA

- [1] Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S.: *Stalowe konstrukcje specjalne*, Arkady, Warszawa 1995
- [2] Bródka J., Garncarek R., Miłaczewski K.: *Blachy fałdowe w budownictwie stalowym*, Arkady, Warszawa 1999.
- [3] Bródka J., Broniewicz M.: *Konstrukcje stalowe z rur*, Arkady, Warszawa 2001.
- [4] Ferenc K., Ferenc J.: *Konstrukcje spawane. Projektowanie połączeń*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [5] Łubiński M., Filipowicz A., Żółtowski W.: *Konstrukcje metalowe cz. I*, Arkady, Warszawa 2000, 2003, 2005
- [6] Łubiński M., Żółtowski W.: *Konstrukcje metalowe cz. II*, Arkady, Warszawa 2004.
- [7] Rębielak J., Mikołajewski J.: *Analiza statyczna modułowo sprężonego wspornika strukturalnego*, XV Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Wojskowa Akademia Techniczna, Jurata, 09-13 maja 2011, s. 279-288.
- [8] Rębielak J., Mikołajewski J.: *Wzmocnienie konstrukcji stalowej hali poprzez ukierunkowane sprężenie dachu*, XVI Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Wojskowa Akademia Techniczna, Jurata, 14-18 maja 2012, s. 507-516.