

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA SŁUPÓW LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH NA BAZIE MODELU KRATOWNICY PRZESTRZENNEJ

JÓZEF PELC

*Katedra Mechaniki i PKM, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
e-mail: jozef.pelc@uwm.edu.pl*

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób analizy wytrzymałościowej słupów kratownicowych linii elektroenergetycznych jako kratownic przestrzennych. Zaproponowano sposób automatycznego eliminowania kinematycznej zmienności ustrojów wynikającej z występowania w układzie tzw. węzłów płaskich. Polega on na blokowaniu możliwych przesunięć węzłów płaskich, przy czym informacja o konieczności blokowania konkretnego przesunięcia pozyskiwana jest z analizy macierzy sztywności układu. Dzięki zastosowaniu MES z wykorzystaniem 3-wymiarowych elementów prętowych możliwe jest szybkie przeprowadzanie analiz wytrzymałościowych słupów. Przedstawiono krótką charakterystykę programu autorskiego, stosowanego do identyfikacji prętów niespełniających warunków nośności, oraz weryfikację proponowanego podejścia.

1. WSTĘP

Obliczenia wytrzymałościowe kratownicowych słupów linii elektroenergetycznych są przeprowadzane w przypadku:

- opracowywania nowych projektów słupów,
- nakładania dodatkowych obciążeń (kable światłowodowych, anten telefonii komórkowej),
- oceny stanu eksploatowanych konstrukcji i prognozowania czasu bezpiecznej pracy,
- analizy przyczyn poważnych awarii.

Do niedawna obliczenia wytrzymałościowe słupów linii elektroenergetycznych przeprowadzane były metodami uproszczonymi, tj. analizowano płaskie kratownice odpowiadające poszczególnym ścianom słupa. Taki sposób analizy był dopuszczony przez odpowiedni zapis dotyczący modeli obliczeniowych słupów, zawarty w obowiązujących ostatnio normach [1].

W czasach poprzedzających erę komputerów wartości sił w prętach kratownic na ogół wyznaczano metodami graficznymi. Obecnie stosowane są do tego celu programy komputerowe bazujące głównie na metodzie elementów skończonych [3]. W ostatnim czasie opublikowano dużą liczbę prac dotyczących wielu ważnych aspektów analizy kratownicowych konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznych, takich jak: analiza nieliniowa [4], przewidywanie obciążenia niszczącego konstrukcję [5], analiza dynamiczna [6]. Należy jednak odróżnić prace badawcze od ścisłych wymagań sformułowanych

w obowiązujących w danym kraju przepisach normowych. Te pierwsze pozwalają lepiej zrozumieć pracę konstrukcji i dokładniej ocenić zapas bezpieczeństwa oraz udoskonalać odpowiednie normy, zaś obowiązujące wymagania normowe muszą być bezwzględnie spełnione zarówno w odniesieniu do konstrukcji aktualnie projektowanych, jak i istniejących, ale dociążanych lub modyfikowanych. Podstawowe zadanie projektowe dotyczące realnych konstrukcji polega przede wszystkim na sprawnym wyznaczeniu sił w prętach kratownicy pod wpływem prognozowanych obciążeń.

Rozkładanie kratownicy przestrzennej na płaskie podzespoły jest nie tylko zadaniem żmudnym, ale może stanowić źródło błędów związanych zarówno ze stosowanymi w tej technice uproszczeniami, jak i zbieraniem obciążeń działających na płaskie kratownice. Kratownicowe słupy linii elektroenergetycznych w istocie są kratownicami przestrzennymi i naturalną konsekwencją tego faktu powinno być obliczanie ich jako układów 3-wymiarowych. Chociaż kratownica stanowi jeden z najprostszych pod względem obliczeniowym ustrój konstrukcyjny, analiza wytrzymałościowa słupa, jako kratownicy przestrzennej, metodą elementów skończonych (MES) napotyka na poważne trudności związane z kinematyczną zmiennością ustroju wynikającą z występowania tzw. węzłów płaskich. W różny sposób próbowano radzić sobie z tymi trudnościami, np. stosując elementy belkowe do analizy kratownicowych układów przestrzennych lub wprowadzając wewnętrzne elementy fikcyjne o mniejszej sztywności wzdłużnej niż pręty kratownicy [7]. Dobór sztywności takich prętów nie jest zadaniem łatwym i może prowadzić do błędów. Ponadto wprowadzanie takich prętów do modelu obliczeniowego jest działaniem czasochłonnym i żmudnym. Podobna sytuacja występuje w analizie kratownic za pomocą elementów belkowych. Wymagana jest wtedy redukcja sztywności na zginanie elementów belkowych, której wielkość jest trudna do określenia. Zbyt mała redukcja zamienia ustrój kratownicowy w sztywniejszy układ ramowy i wartości sił normalnych mogą mieć inne wartości niż w kratownicy. Z kolei zbyt duża redukcja może prowadzić do błędów numerycznych wynikających ze słabego uwarunkowania macierzy sztywności układu. Użycie elementów belkowych wymaga dodatkowego nakładu pracy związanego z koniecznością podawania dla każdego elementu dodatkowego punktu określającego usytuowanie głównych centralnych osi bezwładności przekroju poprzecznego belki w przestrzeni.

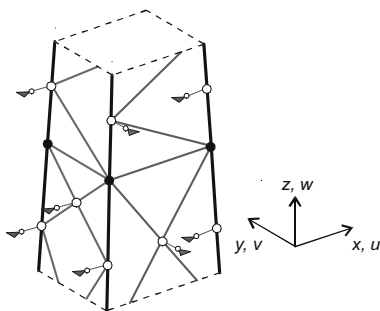
W pracy przedstawiono efektywny sposób przezwyciężenia trudności obliczeniowych kratownic przestrzennych. Polega on na automatycznym blokowaniu dodatkowych stopni swobody układu, związanych z węzłami płaskimi, za pomocą dodatkowych fikcyjnych elementów kratownicowych, których sztywność nie ma wpływu na wyniki, gdyż spełniają one w układzie rolę prętów zerowych. Sposób ten wykorzystuje dostęp do macierzy sztywności układu i dobrze nadaje się do implementacji do własnego programu zorientowanego na analizę słupów linii elektroenergetycznych, a także wież telefonii komórkowej.

2. AUTOMATYCZNE ELIMINOWANIE KINEMATYCZNEJ ZMIENNOŚCI KRATOWNICOWEGO MODELU SŁUPA

Klasyczne zadanie wyznaczenia sił w prętach słupa sprowadza się do przyjęcia modelu obliczeniowego konstrukcji jako kratownicy, zebrania obciążeń, przyłożenia ich w węzłach i tak zwanego rozwiązania kratownicy.

Na rys. 1 przedstawiono fragment modelu kratownicowego słupa ze skratowaniami dwóch stykających się ścian. Węzły oznaczone zaczerzniętymi kółkami, zwane węzłami przestrzennymi, charakteryzują się tym, iż przemieszczenie takiego węzła w dowolnym

kierunku wymaga wydłużenia/skrócenia pręta dochodzącego do tego węzła. Pozostałe węzły oznaczone kółkami (węzły płaskie) mają ograniczony ruch w płaszczyźnie jednej ściany, ale w kierunku prostopadłym do tej ściany mają swobodę przesuwu. Pojawienie się w ustroju kratownicowym węzłów płaskich skutkuje jego kinematyczną zmiennością.



Rys.1. Węzły płaskie i sposób blokowania ich ruchliwości

Kratownica nie może być w prosty sposób obliczona za pomocą MES z wykorzystaniem elementów kratownicowych, tj. 2-węzłowych elementów prętowych o sześciu stopniach swobody. W celu przezwyciężenia trudności obliczeniowych można nałożyć dodatkowe więzy na stopnie swobody węzłów płaskich. Można na przykład narzucić warunek, żeby węzły płaskie doznawały przemieszczeń zapewniających ich pozostawanie w płaszczyznach ścian, w których leżą pręty dochodzące do tych węzłów. Komercyjne programy MES umożliwiają definiowanie tego typu więzów, jednak ręczne wyszukiwanie węzłów płaskich i definiowanie dla każdego z nich dodatkowych więzów może być zadaniem bardzo pracochłonnym, dlatego zaproponowano sposób automatycznego blokowania przemieszczeń węzłów płaskich, polegający na dołączaniu do węzła kratownicowych prętów fikcyjnych eliminujących ich niepożądaną ruchliwość (rys. 1). Każdy taki pręt odbiera węzłowi jeden stopień swobody. Należy jednak znaleźć sposób identyfikacji stopni swobody wymagających blokowania. Można wszak zauważyć, że w kratownicy z płaskimi węzłami, rozważanej w globalnym układzie współrzędnych x, y, z , na głównej przekątnej macierzy sztywności układu, w miejscach odpowiadających stopniom swobody związanym z możliwymi przesuwaniami tych węzłów, występują wyrazy o małych wartościach – wyraźnie odbiegających od pozostałych. Z węzłami płaskimi, położonymi w niezbędnych członach słupa (kolumna), związane są nawet zerowe wartości tych wyrazów. W celu ustalenia warunku blokowania nadliczbowych stopni swobody układu należy ustalić wartość tzw. progu blokowania. Wartość tę można określić dość precyzyjnie na podstawie analizy wartości wyrazów głównej przekątnej macierzy sztywności konkretnego układu z niezablokowanymi węzłami płaskimi.

3. PROGRAM AUTORSKI DO ANALIZY WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ SŁUPÓW

Przedstawiony sposób postępowania z węzłami płaskimi może być wykorzystany pod warunkiem dostępu do macierzy sztywności analizowanego układu. Niektóre programy MES nie dają takiej możliwości lub dostęp do tablic jest ograniczony, choćby koniecznością rozpoznania kodu programu. W programie autorskim ukierunkowanym na efektywną analizę wytrzymałościową kratownicowych słupów linii elektroenergetycznych zastosowano przedstawiony sposób automatycznego usuwania z układu jego kinematycznej zmienności. Program został opracowany ze względu na konieczność sprawnej analizy dużej liczby słupów

kratownicowych. Obliczenia były wymagane głównie ze względu na dodatkowe dociążanie istniejących konstrukcji kablami linii światłowodowych oraz w prognozowaniu czasu bezpiecznej pracy słupów istniejących linii.

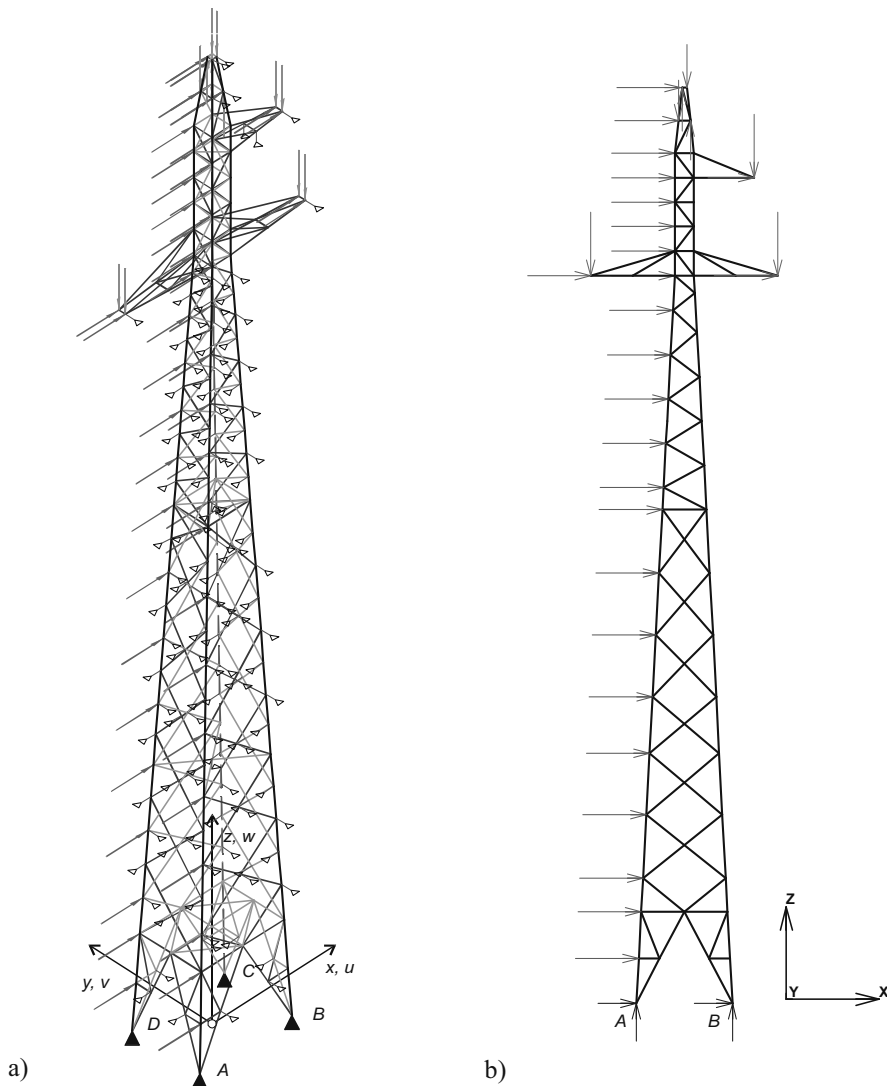
Analiza wytrzymałościowa słupa przebiega w dwóch etapach. W pierwszym – po zbudowaniu macierzy sztywności układu i zastosowaniu warunków brzegowych związanych z mocowaniem słupa do podłoża, odpowiednia procedura programu komputerowego analizuje wyrazy głównej przekątnej tej macierzy i w przypadku, gdy wyraz ma wartość mniejszą od ustalonego progu blokowania, dany stopień swobody jest blokowany. Polega to na wygenerowaniu dodatkowego, bezmasowego pręta kratowniczowego i ustawieniu go prostopadle do odpowiedniej ściany słupa. Jeden jego koniec jest usytuowany w blokowanym węźle, a drugi jest podpierany przegubowo nieprzesuwnie. Po automatycznym dodaniu wszystkich niezbędnych fikcyjnych prętów następuje drugi etap analizy, tj. automatyczne generowanie nowej siatki elementów skończonych oraz tworzenie i rozwiązywanie układu równań MES. Program autorski wyposażony jest w procedurę analizującą wartości sił w prętach fikcyjnych i w razie zablokowania niewłaściwego stopnia swobody użytkownik jest informowany o takim zdarzeniu. Z praktyki wynika, że tylko w nielicznych przypadkach niezbędne były drobne modyfikacje (dodanie/usunięcie) prętów fikcyjnych w modelu słupa.

Rolę preprocesora i postprocesora w analizie słupa spełnia program typu CAD (w tym przypadku IntelliCAD) wyposażony w zestaw funkcji napisanych w języku AutoLISP. Po zakończeniu budowy modelu słupa zapisywana jest jego baza danych w formacie DXF, którą następnie odczytuje i przetwarza zewnętrzny program (generator danych) w celu zapisania tekstowego pliku danych, odpowiedniego dla programu autorskiego. Program ten jest programem bazującym na MES, wykorzystującym 3-wymiarowe elementy typu kratownicowego (ściskanie lub rozciąganie), jednakże zaimplementowano w nim przedstawiony sposób blokowania węzłów płaskich i analizę warunków nośności wg obowiązujących przepisów normowych. Program oblicza współczynniki bezpieczeństwa wszystkich prętów (wartości ilorazu nośności pręta i siły obliczeniowej występującej w pręcie w danym wariantcie obciążenia). Liczba ta określa stopień spełnienia normowego warunku nośności pręta. Wartość mniejsza od jedności oznacza, że pręt nie spełnia warunku i np. powinien być wzmocniony. Po obliczeniach program generuje rysunki wszystkich ścian słupa oraz poprzeczników i prętów wewnętrznych, na których pręty niebezpieczne są oznaczane odpowiednim kolorem. Rysunki te umożliwiają szybką lokalizację prętów niebezpiecznych w analizowanej konstrukcji.

4. WERYFIKACJA PRZEDSTAWIONEGO SPOSOBU ANALIZY SŁUPÓW

Przedstawiony sposób postępowania z węzłami płaskimi zweryfikowano, porównując wyniki otrzymane zaproponowanym sposobem z wynikami analizy słupa uzyskanymi za pomocą modelu płaskiego kratownicy. Model przestrzenny analizowano za pomocą programu autorskiego, zaś model płaski z wykorzystaniem komercyjnego programu MSC.Marc Mentat.

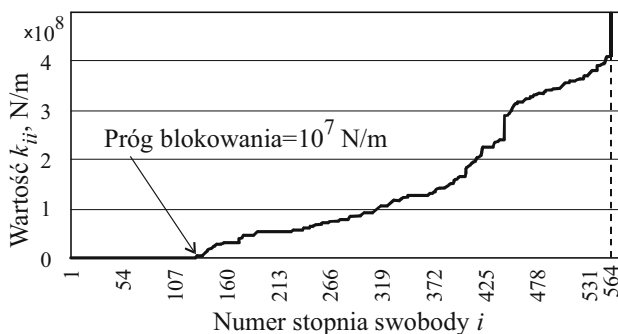
Do analizy porównawczej wybrano rzeczywisty słup przelotowy serii Sc185 typu P+6 o wysokości 28.94 m obciążony parciem wiatru w kierunku prostopadłym do linii (kierunek osi x na rys. 2). Model płaski stanowiła ściana AB słupa, z usuniętymi węzłami płaskimi, zrzutowana na płaszczyznę pionową.



Rys.2. Modele obliczeniowe słupa: a) przestrzenny z zablokowanymi stopniami swobody węzłów płaskich, b) płaski

W celu określenia wartości progu blokowania płaskich węzłów konstrukcji, rozważanej w globalnym układzie współrzędnych (x,y,z) , analizowane są wartości wyrazów k_{ii} głównej przekątnej macierzy sztywności układu. Po uszeregowaniu tych wyrazów rosnąco można przedstawić wykres ich zmienności (rys. 3). Widać, że niektóre wyrazy mają małe wartości (początkowa część wykresu) i odpowiadają one niepożądanym stopniom swobody węzłów płaskich. W rozważanym przypadku wartość progu blokowania wyniosła 10^7 N/m i na jej podstawie program generował pręty fikcyjne, które umożliwiają blokowanie nadliczbowych stopni swobody kratownicy. Ze względu na niewielką zbieżność trzonu słupa (1:19 w płaszczyźnie xz i 1:29 w płaszczyźnie yz) pręty te są obracane o niewielkie kąty względem osi x lub y , aby zachować prostopadłość do odpowiedniej płaszczyzny skratowania ściany

słupa. Zbieżność trzonu słupa jest rozumiana jako wartość tangensa kąta nachylenia ściany słupa do płaszczyzny pionowej. W rozważanym przypadku program wygenerował 130 prętów fikcyjnych: 62 o kierunku zbliżonym do osi x i 64 – do osi y oraz 4 w kierunku osi z .



Rys.3. Wykres wartości wyrazów przekątnej macierzy sztywności modelu MES analizowanego słupa z węzłami płaskimi

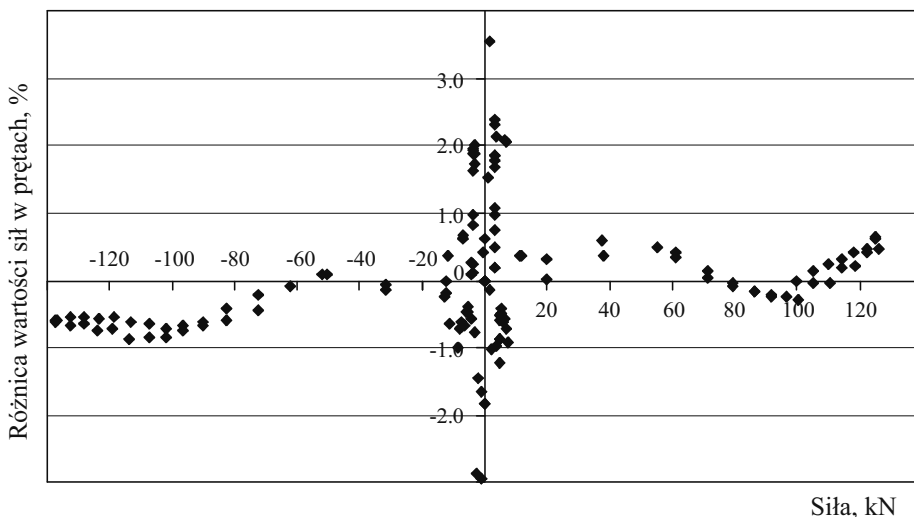
W modelu przestrzennym słupa obciążenia zewnętrzne są przykładane do węzłów w kierunkach nieodpowiadających zablokowanym stopniom swobody węzłów płaskich. Jednak w wyniku działania ciężaru własnego konstrukcji, do wszystkich węzłów modelu, również do węzłów płaskich, przyłożone są siły pionowe. Ponieważ pręty fikcyjne nie są usytuowane poziomo, to powstają w nich niewielkie siły związane z ciężarem własnym konstrukcji. Maksymalne wartości składowych reakcji w podporach prętów fikcyjnych (0.018, 0.017, 0.075 kN) podzielone przez minimalne wartości reakcji w zamocowaniu słupa do podłoża (9.79, 4.53, 130.8 kN) odpowiednio wynoszą: $R_{fx}/R_{x\min}=0.18\%$, $R_{fy}/R_{y\min}=0.38\%$ i $R_{fz}/R_{z\min}=0.06\%$. Można by rozważyć możliwość przesuwania sił ciężkości z węzłów płaskich do sąsiednich węzłów „zwykłych”, jednak ze względu na znikome wartości sił w prętach fikcyjnych spowodowane działaniem sił ciężkości, to działanie nie jest konieczne. Bardzo małe wartości reakcji podpór prętów fikcyjnych świadczą również o zablokowaniu właściwych, tj. nadliczbowych, stopni swobody układu.

W tabeli 1 podano parametry modeli słupa oraz otrzymane ekstremalne wartości przemieszczenia punktu szczytowego i sił w prętach. Obraz deformacji słupa z dołączonymi do niego prętami fikcyjnymi w ogólności nie jest realny, jednak wartość przemieszczenia punktu szczytowego jest prawie taka sama, jak w przypadku modelu płaskiego.

Tabela 1. Zestawienie różnic w analizowanych modelach słupów

		Model słupa		Różnica (%)
		płaski	przestrzenny	
Liczba elementów		119	561	
Liczba węzłów		61	317	
Liczba dodatkowo zablokowanych stopni swobody	u	-	62	
	v	-	64	
	w	-	4	
Przemieszczenie punktu szczytowego (cm)	u	37.3	37.4	-0.27
Siła max (kN)	rozciąganie	126.76	126.17	0.47
Siła min (kN)	ściskanie	-136.59	-137.45	-0.63

Wartości ekstremalnych sił normalnych wyznaczone za pomocą obu modeli są bardzo zbliżone do siebie. Na rys. 4 przedstawiono procentowe różnice wartości sił w prętach rozważanego słupa odniesione do wartości z modelu przestrzennego. Różnice te są nieznaczne w prętach istotnie obciążonych. Większe różnice występują w prętach słabo obciążonych, w szczególności w prętach zerowych. Należy jednak podkreślić, że w modelu płaskim konstrukcji rozkład sił osiowych jest nieco inny niż w modelu przestrzennym, ze względu na zaniedbanie pochylenia ściany słupa. Stwierdzono, że punkty najbardziej odległe od osi poziomej wykresu (rys. 4) dotyczą prętów o wspólnych węzłach z prętami wewnętrznymi słupa, których nie uwzględnia model płaski. Dobra zbieżność wartości sił w prętach przenoszących znaczne siły, a więc decydujących o nośności całej konstrukcji, potwierdza skuteczność przedstawionego sposobu analizy słupów kratownicowych



Rys.4. Różnice wartości sił w prętach słupa uzyskanych za pomocą modelu płaskiego i przestrzennego

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ze względu na występowanie węzłów płaskich w kratownicowych słupach linii elektroenergetycznych ich numeryczna analiza wytrzymałościowa jako ustrojów 3-wymiarowych wymaga specjalnego podejścia. Zaproponowany sposób automatycznego usuwania kinematycznej zmienności modelu MES z elementami prętowymi (rozciąganie/ściskanie) okazał się skuteczny. Wyniki przeprowadzonej weryfikacji potwierdzają możliwość stosowania proponowanego sposobu blokowania węzłów płaskich w typowych słupach linii elektroenergetycznych. Przygotowanie kratownicowego modelu obliczeniowego słupa wymaga mniej czasu i jest mniej żmudne niż np. definiowanie dodatkowych więzów narzucanych na wybrane stopnie swobody węzłów płaskich. Otrzymywane kratownicowe modele MES słupów mają mniejsze rozmiary niż modele wykorzystujące elementy belkowe, które mają przynajmniej dwukrotnie większą liczbę stopni swobody. Ponadto każdy element belkowy wymaga podania współrzędnych dodatkowego węzła (punktu) określającego położenie osi obojętnej przekroju poprzecznego belki w przestrzeni oraz występują problemy z określeniem stopnia redukcji sztywności giętej

prętów. Modele złożone z elementów kratownicowych pozwalają skrócić czas pracy potrzebny na ich przygotowanie i mogą być szybciej analizowane.

LITERATURA

1. PN-96/B-03205. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Stalowe konstrukcje wsporcze. Obliczenia statyczne i projektowanie.
2. Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S.: Stalowe konstrukcje specjalne. Warszawa: Arkady, 1995.
3. Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Warszawa: Ofic. Wyd. Pol. Warsz., 2005.
4. Albermani F.G.A., Kitipornchai S.: Numerical simulation of structural behaviour of transmission towers. "Thin-Walled Structures" 2003, 41, p. 167–177.
5. Kempner Jr. L., Do T.T., Mueller III W.: Lattice transmission tower analysis moves beyond the simple truss model. "Electric Light & Power" 2002, 80, 12, 2002, p22, 2p.
6. Gani F., Légeron F.: Dynamic response of transmission lines guyed towers under wind loading. "Can. J. Civ. Eng." 2010, 37, p.450-464.
7. Da Silva J.G.S., Vellasco P.C.G.D.S., De Andrade S.A.L., De Oliveira M.I.R.: Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers. "Journal of Constructional Steel Research" 2005, 61, p. 1108–1134.

TRANSMISSION TOWERS STRUCTURAL ANALYSIS BY THE USE OF THE SPATIAL TRUSS MODEL

Summary. A strategy for the structural analysis of lattice transmission towers treated as 3-dimensional trusses is presented. A way of automatic suppression of mechanism effects resulting from the occurrence of out-of-plane nodes is proposed. It consists in blocking the possible displacements of the out-of-plane nodes, with information about the need to block a particular displacement being obtained from the analysis of the system stiffness matrix. By applying FEM with the use of 3-dimensional rod elements one can quickly perform structural analyses of transmission towers. A brief description of the author's computer program used to identify the bars, which not fulfill the load capacity criterion is given. Verification of the proposed approach is presented.