

WPLYW TOLERANCJI WYMIAROWYCH ELEMENTÓW NA CECHY GEOMETRYCZNE PRZESTRZENNYCH STRUKTUR PRĘTOWYCH

JACEK BOGUSZ (LUBLIN)

Praca stanowi próbę zastosowania współczesnych metod matematyki i mechaniki ośrodków siatkowych do opisu własności geometrycznych i mechanicznych (statycznych) przestrzennych konstrukcji prętowych z uwzględnieniem lokalnych tolerancji wymiarowych pojedynczych elementów konstrukcji. W pracy określono związek lokalnych tolerancji charakterystycznych wymiarów elementów z globalnymi parametrami geometrycznymi układu. W opisie wyróżniono pewne etapy charakterystyczne dla montażu tego rodzaju konstrukcji. Przedstawiona metoda pozwala na pełne opisanie dowolnej konfiguracji przestrzennej struktury prętowej w procesie montażu i użytkowania oraz analizę pola naprężeń i przemieszczeń jako funkcji lokalnych tolerancji wymiarowych elementów. Opracowany algorytm może służyć jako generator parametrów geometrycznych danej klasy struktur prętowych w istniejących, komputerowych programach analizy statycznej konstrukcji. Dla ilustracji otrzymane zależności zastosowano do analizy przykładu wybranej struktury przestrzennej.

1. WSTĘP

Jak wiadomo, w wyniku określonego procesu wytwarzania pojedynczych elementów konstrukcyjnych ich rzeczywiste wymiary odbiegają od wymiarów projektowanych. Mieszczą się one w pewnym zakresie, który zależy od przyjętych odpowiednich tolerancji wymiarowych. W przypadkach, kiedy w całej konstrukcji występuje odpowiednio duża liczba elementów, np. w przestrzennych konstrukcjach prętowych tzw. strukturach siatkowych, rzeczywisty kształt konstrukcji może ulegać zmianie, a przy założeniu zbyt dużych tolerancji lokalnych wymiarów elementów może nawet znacznie odbiegać od kształtu projektowanego.

ALABRUDZIŃSKI [10] przedstawił równania i związki umożliwiające ocenę zmian wielkości geometrycznych konstrukcji siatkowych w odniesieniu do ich wielkości nominalnych. Jak wykazali FRĄCKIEWICZ i LEWIŃSKI [1] oraz ROSEN i SCHMIT [2], nawet małe zmiany kształtu konstrukcji siatkowych mogą prowadzić do geometrycznie zmiennych kształtów oraz zmiany przewidywanych przez projektanta pól naprężeń i przemieszczeń konstrukcji. Niewielkie zmiany kształtu konstrukcji mogą mieć zatem wpływ na jej

bezpieczeństwo. Dla specjalnych przestrzennych struktur prętowych, np. konstrukcji anten satelitów telekomunikacyjnych [3], dokładność kształtu jest jedną z zasadniczych cech użytkowych układu i precyzyjne odtworzenie zaprojektowanego kształtu może być zadaniem najważniejszym. Znalezienie związków pomiędzy tolerancjami lokalnymi a globalnymi zmianami kształtów konstrukcji jest więc niezwykle ważne i pozwala odpowiedzieć na dwa zasadnicze z punktu widzenia praktyki pytania: 1. Z jaką dokładnością muszą być wykonane elementy, aby spełnić wymagania projektowe kształtu konstrukcji? 2. Jakich zmian kształtu konstrukcji można spodziewać się przy danych, wynikających z przyjętego procesu technologicznego, tolerancjach wymiarowych elementów?

W niniejszej pracy zajęto się budową modelu matematycznego oraz sposobu analizy wspomnianych wpływów lokalnych tolerancji wymiarowych na własności geometryczne i statyczne wybranej klasy przestrzennych struktur siatkowych. Rozważania poniższe obejmują główne tezy pracy [7] autora.

2. MODEL OBLICZENIOWY I CECHY GEOMETRYCZNE STRUKTURY PRĘTOWEJ

Rozpatrzmy pewną klasę przestrzennych struktur prętowych o budowie regularnej w sensie powielania pewnej podstawowej formy przestrzennej w całej strukturze. Założymy, że podstawową formą przestrzenną wyróżnioną w poniższych rozważaniach jest element czworościenny, którego krawędzie i wierzchołki pokrywają się odpowiednio z osiami geometrycznymi prętów oraz z węzłami struktury. Założymy ponadto, że węzły struktury są idealnymi przegubami kulistymi i należą do dwóch niepokrywających się powierzchni. Pręty struktury są więc łącznikami charakterystycznymi dla modelu kratowego i należą do trzech warstw: górnej, dolnej i środkowej. Warstwy te utworzone są z prętów łączących tylko węzły leżące na wspomnianych już powierzchniach oraz węzły jednej i drugiej powierzchni.

Postawione zadanie budowy modelu matematycznego oraz sposobu analizy wpływu lokalnych tolerancji wymiarowych elementów na własności tak zdefiniowanej struktury wymaga, zdaniem autora, zastosowania teorii, która pozwalałaby na bezpośrednie wprowadzenie zmian metryki do opisu układu. Wymaganiom tym odpowiada przedstawiona w pracy [4] teoria ośrodków siatkowych.

Zdefiniowany powyżej przestrzenny układ prętowy może być traktowany jako ośrodek siatkowy o określonej budowie. Stosując aparat mechaniki ośrodków siatkowych, zbiór węzłów układu może być sparametryzowany zgodnie z metodą zaproponowaną w pracy [6] po adaptacjach związanych z wyróżnieniem jednoparametrowych podzbiorów struktury omówionych w pracy [5].

Położenie punktów zbioru w trójwymiarowej przestrzeni Euklidesa wyznaczają odpowiednie wektory \mathbf{r} i $\bar{\mathbf{r}}$ wyprowadzone z ustalonego punktu odniesienia 0, który jest początkiem globalnego układu współrzędnych kartezjańskich.

Położenie węzłów sąsiednich zbioru określają wektory \mathbf{e}_a i $\bar{\mathbf{e}}_a$ lokalnej bazy podstawowej, które zdefiniowane są w następujący sposób:

$$(2.1) \quad \begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= \delta \mathbf{r}, & \mathbf{e}_2 &= \bar{\mathbf{r}} - \mathbf{r}, & \delta \mathbf{r} &= \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A, \\ \bar{\mathbf{e}}_1 &= \delta \bar{\mathbf{r}}, & \bar{\mathbf{e}}_2 &= -\mathbf{e}_2, & \delta \bar{\mathbf{r}} &= \mathbf{r}_D - \mathbf{r}_C. \end{aligned}$$

Jednostkowe wektory normalne do płaszczyzn wyznaczonych przez powyższe wektory można wyrazić wzorami

$$(2.2) \quad \mathbf{e}_3 = \frac{\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2}{|\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2|}, \quad \bar{\mathbf{e}}_3 = \frac{\bar{\mathbf{e}}_1 \times \bar{\mathbf{e}}_2}{|\bar{\mathbf{e}}_1 \times \bar{\mathbf{e}}_2|}.$$

Iloczyny skalarne wektorów bazy podstawowej wyznaczają składowe obiektu podstawowego g_{ab} , który określa metrykę, to znaczy długości łączników pomiędzy sąsiednimi punktami zbioru. Długości łączników o odpowiednich kierunkach wyrazić więc można przez składowe obiektu podstawowego

$$(2.3) \quad \begin{aligned} l_1 &= \sqrt{g_{11}} \Delta \xi^1, & l_2 &= \sqrt{g_{22}}, \\ l_{12} &= \sqrt{g_{11} \Delta \xi^1 \Delta \xi^1 - 2g_{12} \Delta \xi^1 + g_{22}}, & \Delta \xi^1 &= 1. \end{aligned}$$

Odpowiednie przyrosty wektorów bazy podstawowej \mathbf{e}_a oraz podobnie dla bazy podstawowej $\bar{\mathbf{e}}_a$ (zamieniając odpowiednio składowe g_{ab} na \bar{g}_{ab}) określają współczynniki koneksji i składowe obiektu najeżenia zbioru. W przedstawionej metodzie ważną rolę spełniają związki pomiędzy współczynnikami koneksji a składowymi obiektów metryki i długościami dodatkowych łączników. Dla rozważanej struktury mają one postać następującego układu równań:

$$(2.4) \quad \begin{aligned} \frac{\delta_1 g_{11}}{\Delta \xi^1} &= 2\Gamma_{11}^t g_{11} + \Gamma_{11}^t \Gamma_{11}^a g_{1a} \Delta \xi^1 + b_{11} b_{11} \Delta \xi^1, \\ \bar{g}_{11} - g_{11} &= 2\Gamma_{21}^t g_{11} + \Gamma_{21}^t \Gamma_{21}^a g_{1a} + b_{21} b_{21}, \\ \frac{\delta_1 g_{11}}{\Delta \xi^1} - \bar{g}_{11} + g_{11} &= 2\Gamma_{11}^a g_{a2} + (2\Gamma_{11}^t \Gamma_{21}^a \Delta \xi^1 - \Gamma_{21}^t \Gamma_{21}^a) g_{1a} + \\ &+ 2b_{11} b_{21} \Delta \xi^1 - b_{21} b_{21}, \end{aligned}$$

$$(2.4) \quad \frac{\delta_1 g_{22}}{\Delta \xi^1} = 2\Gamma_{21}^t \bar{g}_{t2} + \Gamma_{21}^t \Gamma_{21}^a g_{ta} \Delta \xi^1 + b_{21} b_{21} \Delta \xi^1,$$

$$2(\bar{g}_{12} - g_{12}) - \frac{\delta_1 g_{22}}{\Delta \xi^1} = (2\Gamma_{22}^t \Gamma_{21}^a - \Gamma_{21}^t \Gamma_{21}^a \Delta \xi^1) g_{ta} +$$

$$+ 2\Gamma_{22}^t g_{t1} - b_{21} b_{21} \Delta \xi^1,$$

$$2\Gamma_{22}^t g_{t2} + \Gamma_{22}^a \Gamma_{22}^a g_{ta} = 0.$$

Po analizie powyższych równań, którą przeprowadzono i omówiono w pracach [5, 6 i 7], można wyznaczyć odpowiednie wzory dla współczynników koneksji i składowych obiektu najeżenia zbioru. Mają one następującą postać:

$$(2.5) \quad \Gamma_{21}^1 = [Dg_{22} - (g_{12} \Delta \xi^1 - g_{22}) F] [-g \Delta \xi^1]^{-1},$$

$$\Gamma_{21}^2 = [Dg_{12} - (g_{11} \Delta \xi^1 - g_{12}) F] [g \Delta \xi^1]^{-1},$$

$$b_{21} = \pm \sqrt{\bar{g}_{11} - g_{11} - 2\Gamma_{21}^t g_{t1} - \Gamma_{21}^t \Gamma_{21}^a g_{ta}},$$

gdzie $g = \det g_{ab}$, $F = \bar{g}_{12} + g_{12}$,

$$2D = \frac{\delta_1 g_{22}}{\Delta \xi^1} - (\bar{g}_{11} - g_{11}) \Delta \xi^1$$

oraz

$$(2.6) \quad \Gamma_{11}^1 = ZA_{21} - Bg_{21},$$

$$\Gamma_{11}^2 = Bg_{11} - ZA_{11},$$

gdzie

$$B = \frac{C_2}{g(1 + \Gamma_{21}^2 \Delta \xi^1)}, \quad Z = \frac{C_1}{g(1 + \Gamma_{21}^1 \Delta \xi^1)},$$

$$A_{11} = \Gamma_{21}^a g_{a1} \Delta \xi^1 + g_{12},$$

$$A_{21} = \Gamma_{21}^a g_{a2} \Delta \xi^1 + g_{22},$$

$$C_1 = \frac{1}{2\Delta \xi^1} \left[\left(\frac{L}{\Delta \xi^1} \right)^2 - 4g_{11} - \delta_1 g_{11} \right],$$

$$C_2 = \frac{\delta_1 g_{21}}{\Delta \xi^1} - \Gamma_{21}^t g_{t1} - b_{11} b_{21} \Delta \xi^1.$$

Potrzebne do dalszych rozważań składowe obiektu najeżenia określone są następującymi wzorami:

$$(2.7) \quad b_1 = \frac{\sqrt{g[(1 + \Gamma_{11}^1 \Delta \xi^1)(1 + \Gamma_{21}^2 \Delta \xi^1) - \Gamma_{11}^2 \Gamma_{21}^1 \Delta \xi^1 \Delta \xi^1]}}{\sqrt{(1 + \delta_1)g}} - 1,$$

$$(2.7) \quad [c.d.] \quad b_1^1 = \frac{R^a g_{a2}}{g}, \quad b_1^2 = -\frac{R^a g_{a1}}{g},$$

gdzie

$$R^1 = \frac{\sqrt{g} [(1 + \Gamma_{11}^1) b_{21} - b_{11} \Gamma_{21}^1]}{\sqrt{(1 + \delta_1) g}},$$

$$R^2 = \frac{\sqrt{g} [\Gamma_{11}^2 b_{21} - (1 + \Gamma_{21}^2) b_{11}]}{\sqrt{(1 + \delta_1) g}}.$$

Znając parametry metryczne oraz składowe wektorów e_1, e_2 bazy podstawowej dla $\xi^1 = \xi_0^1$ można teraz określić położenie punktów zbioru w przestrzeni E_3 z dokładnością do translacji zbioru jak ciała sztywnego. Odpowiednie wzory rekurencyjne dla promieni wektorów w bazie podstawowej wynikające z zależności pomiędzy wektorami bazy zbioru pasmowego można przedstawić w następującej postaci:

$$(2.8) \quad \begin{aligned} e_1 &= e_1 + \Gamma_{21}^1 e_t + b_{21} e_3, \\ (1 + \delta_1) e_a &= e_a + \Gamma_{a1}^1 e_t + b_{a1} e_3, \\ (1 + \delta_1) e_3 &= e_3 + b'_1 e_t + b_1 e_3. \end{aligned}$$

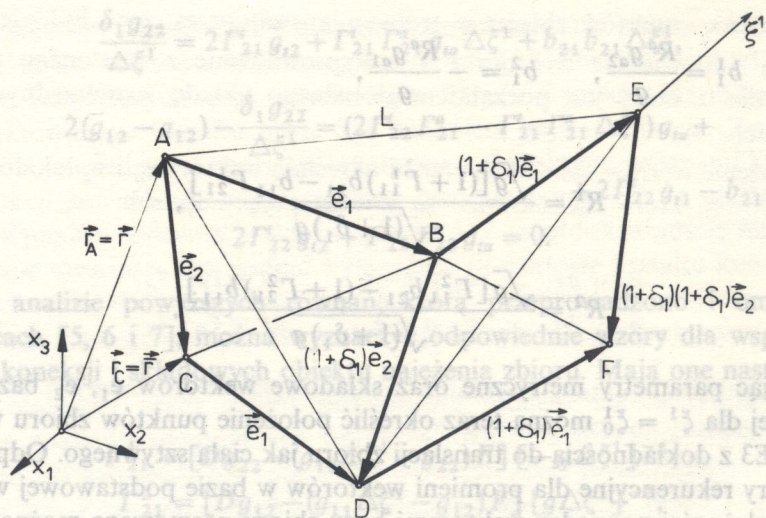
Mając dane globalne, promienie wektory r, \bar{r} punktów A, B, C zbioru (rys. 1) i położenie punktów D, E i F , możemy określić następujące wektory promienie:

$$(2.9) \quad \begin{aligned} r_D &= r_C + \bar{e}_1, \\ r_E &= r_B + (1 + \delta_1) e_1, \\ r_F &= r_D + (1 + \delta_1) \bar{e}_1. \end{aligned}$$

Powyższe wzory mają również charakter rekurencyjny i pozwalają określić położenie dowolnego punktu wyróżnionego pasma struktury w przestrzeni E_3 . Stosując powyższą procedurę do pozostałych pasm, można określić położenie dowolnego punktu struktury, jako funkcję niezależnych parametrów metrycznych układu, którymi są długości odpowiednich łączników struktury.

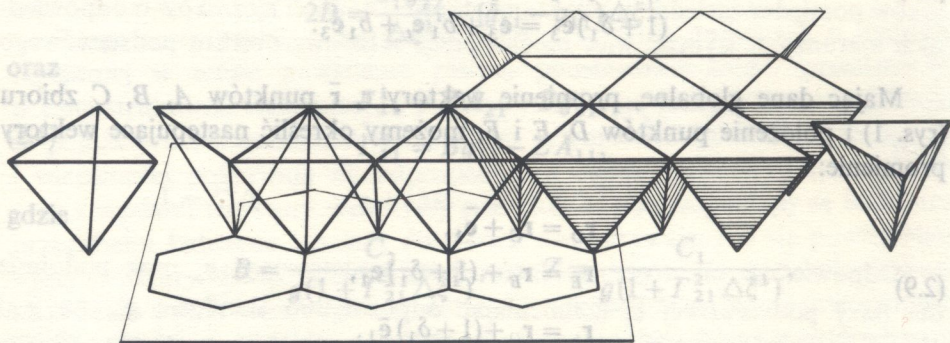
Uzależnienie części parametrów metrycznych struktury występuje w układach statycznie niewyznaczalnych oraz w układach z przestrzennymi elementami sztywnymi. Przedstawiony sposób postępowania pozwala więc na określenie kształtu konstrukcji, która ma być zbudowana z elementów o danych wymiarach i montowanych w założonej kolejności.

Przyjęta podstawowa, czworościenna forma przestrzenna umożliwia budowę modeli geometrycznych szeregu stosowanych w praktyce struktur prętowych.



Rys. 1. Elementarny zbiór punktów

Przedmiotem dalszej analizy jest dość często stosowana struktura o budowie przedstawionej schematycznie na rys. 2.

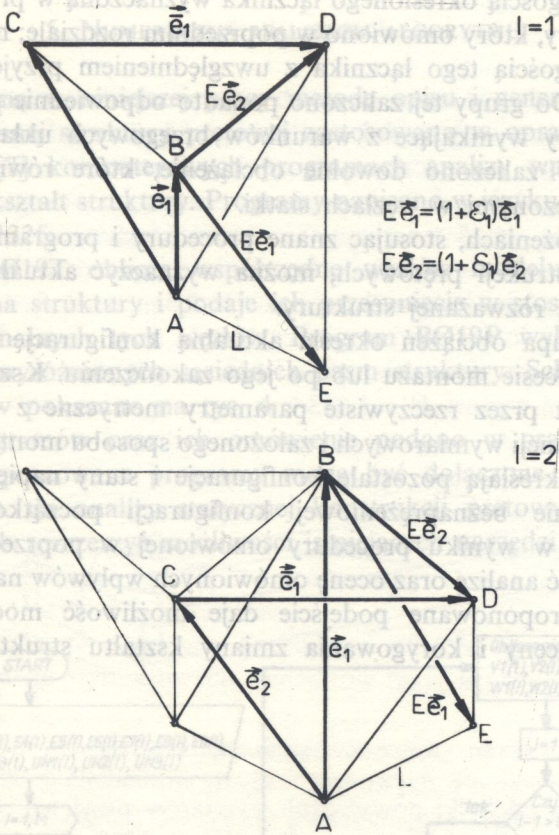


Rys. 2. Schemat przekrycia strukturalnego przykładu

W tym przypadku generacja kształtu struktury prowadzona jest zgodnie z omówioną procedurą po przyjęciu pokazanych na rys. 3 lokalnych baz podstawowych w wyróżnionych pasmach układu.

Po odpowiednim zestawieniu tych pasm zgodnie z przyjętym sposobem montażu można określić kształt całej struktury.

W pracy [7] przedstawiono, opracowane przez autora zgodnie z omówioną procedurą, programy komputerowe wyznaczające kształt analizowanej struktury, jako funkcji określonych parametrów metrycznych. Pewne parametry metryczne na danym wstępnym etapie analizy ze względu na statyczną niewyznaczalność układu zostały przyjęte jako zmienne zależne. Omówienie ich roli przedstawiono w dalszej części rozważań.



Rys. 3. Generacja siatki analizowanej struktury

3. ANALIZA PRZEMIESZCZEŃ I SIŁ WEWNĘTRZNYCH W STRUKTURZE

Wyznaczona w wyniku powyższych rozważań forma przestrzenna traktowana jest jako początkowa konfiguracja beznaprężeniowa analizowanej struktury. Może być ona poddana działaniu wpływów, które dla naszych celów podzielono na dwie grupy. Do pierwszej grupy wpływów zaliczono siły ciężkości, które zastąpiono siłami skupionymi, rozmieszczonymi w węzłach siatki oraz wstępne odkształcenia niektórych łączników struktury, traktowanych w poprzednich rozważaniach jako zależne parametry metryczne. Odkształcenia te określone są m.in. przez przyjęte tolerancje wymiarowe i dla danego łącznika mogą być wyrażone w następującej postaci:

$$(3.1) \quad \varepsilon_0^e = \frac{l_0^e - l_r^e}{l_0^e}$$

gdzie l_0 jest długością określonego łącznika wyznaczoną w procesie generacji kształtu struktury, który omówiono w poprzednim rozdziale; natomiast l_r jest rzeczywistą długością tego łącznika z uwzględnieniem przyjętych tolerancji wymiarowych. Do grupy tej zaliczono ponadto odpowiednie przemieszczenia podpór struktury wynikające z warunków brzegowych układu. Do drugiej grupy wpływów zaliczono dowolne obciążenie, które również zastąpiono siłami rozmieszczonymi w węzłach siatki.

Po tych założeniach, stosując znane procedury i programy analizy przestrzennych konstrukcji prętowych, można wyznaczyć aktualne konfiguracje i stany napięcia rozważanej struktury.

Pierwsza grupa obciążeń określa aktualną konfigurację i stan napięcia struktury w procesie montażu lub po jego zakończeniu. Kształt konstrukcji wyznaczony jest przez rzeczywiste parametry metryczne z uwzględnieniem przyjętych tolerancji wymiarowych i założonego sposobu montażu. Obciążenia drugiej grupy określają pozostałe konfiguracje i stany napięcia układu.

Wykorzystanie beznaprężeniowej konfiguracji początkowej struktury, wygenerowanej w wyniku procedury omówionej w poprzednim rozdziale, pozwala uprościć analizę oraz ocenę omówionych wpływów na stan konstrukcji. Ponadto proponowane podejście daje możliwość modelowania oraz bezpośredniej oceny i korygowania zmiany kształtu struktury w procesie montażu.

4. TOLERANCJE WYMIAROWE ELEMENTÓW STRUKTURY

Zdefiniowane i omówione w poprzednich rozdziałach pracy parametry metryczne struktury zastępują pewien złożony układ rzeczywistych elementarnych części konstrukcji, które łączone są w określonym porządku w procesie montażu. Wyróżnić w nich można np. dwie elementarne części w postaci prostych odcinków prętów i przestrzennych elementów łączących pręty w jedną strukturę, które nazywane są często rzeczywistymi węzłami struktury. W rzeczywistości spotykamy się więc z trzema polami tolerancji. Dwa pola tolerancji odnoszą się do wymiarów każdej z wyżej wymienionych elementarnych części układu, natomiast trzecie pole tolerancji odnosi się do procesu montażu konstrukcji.

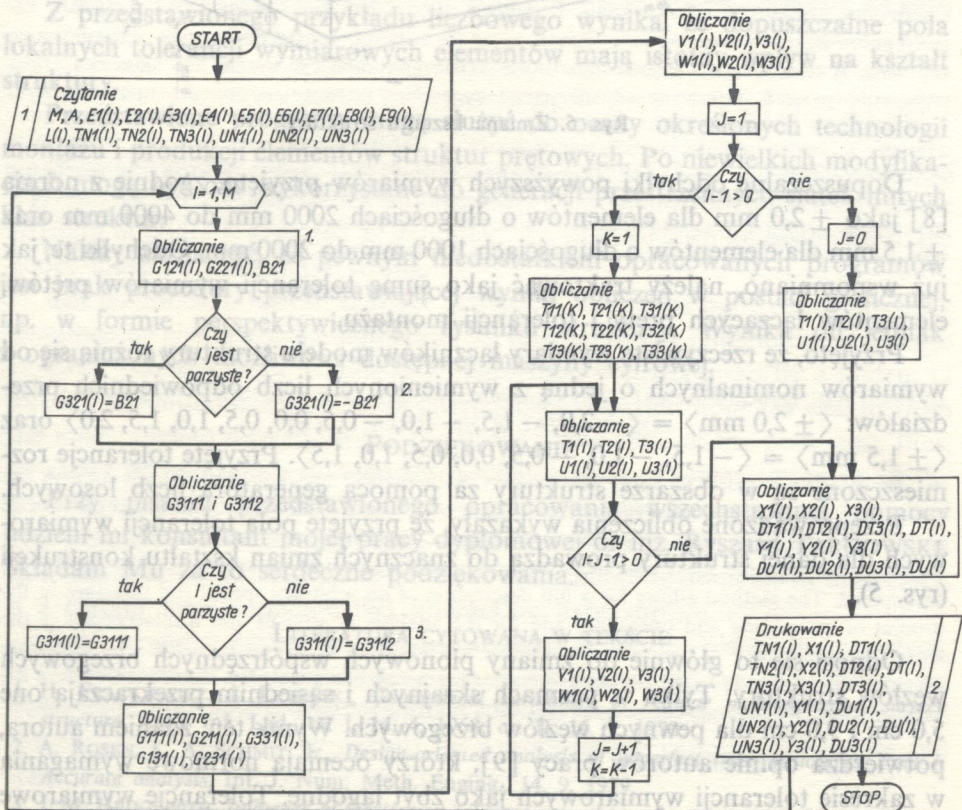
W celu uproszczenia rozważań przyjęto jedno zastępcze pole tolerancji, to jest pole tolerancji odległości pomiędzy sąsiednimi węzłami teoretycznego modelu struktury. Dopuszczalne odchyłki wymiarów elementarnych łączników modelu przyjęto zgodnie z normą [8]. Rozkład lokalnych imperfekcji wymiarowych w obszarze struktury określano przy użyciu generatora liczb losowych.

5. NUMERYCZNA REALIZACJA ALGORYTMU

Przedstawioną w niniejszej pracy metodę opisu i generowania kształtu siatki przestrzennej struktury prętowej zastosowano w opracowanych przez autora pracy [7] komputerowych programach analizy wpływu lokalnych imperfekcji na kształt struktury. Programy napisano w języku FORTRAN dla EMC ODRA 1325.

Program B019T oblicza współrzędne węzłów modelu wyróżnionego, skrajnego pasma struktury i podaje ich przesunięcie w stosunku do współrzędnych nominalnych tych węzłów. Program B019P wykonuje podobne obliczenia dla wyróżnionych sąsiednich pasm struktury. Schematy blokowe obu programów pokazano na rys. 4.

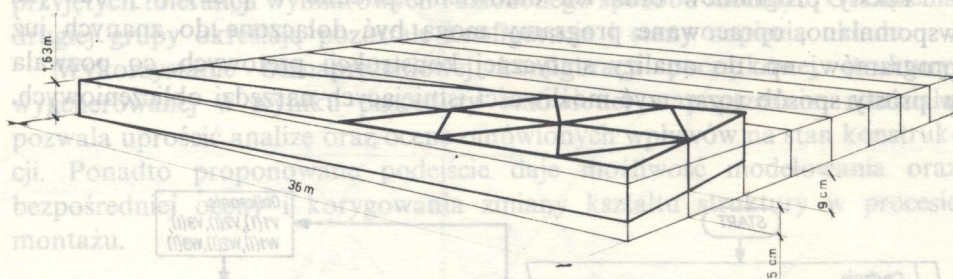
Teksty programów oraz ich omówienie podano w pracy [7]. Jak już wspomniano, opracowane programy mogą być dołączone do znanych już programów, np. do analizy statycznej konstrukcji prętowych, co pozwala w prosty sposób rozszerzyć możliwości istniejących narzędzi obliczeniowych.



Rys. 4. Schemat blokowy programu B019T

6. PRZYKŁAD LICZBOWY

W celu sprawdzenia opracowanych algorytmów i wskazania możliwości bezpośredniej oceny wpływu lokalnych imperfekcji wymiarowych na kształt wybranej struktury, wyznaczono rzeczywisty kształt przestrzennej struktury prętowej, która spełnia założenia omówione w punkcie drugim pracy. Struktura pokazana na rys. 5 ma rozpiętość 36 m. Modularne odległości między teoretycznymi węzłami regularnych, elementarnych form przestrzennych (krawędzie czworościanów) przyjęto jako $A = 2,0$ m, natomiast odcinki łączące teoretyczne węzły dolnej powierzchni czyli boki sześciokątów dolnej warstwy prętów struktury przyjęto jako $L = 1,1545$ m. Wysokość geometrycznego modelu struktury wynosi $H = 1,633$ m.



Rys. 5. Zmiana kształtu struktury

Dopuszczalne odchyłki powyższych wymiarów przyjęto, zgodnie z normą [8] jako $\pm 2,0$ mm dla elementów o długościach 2000 mm do 4000 mm oraz $\pm 1,5$ mm dla elementów o długościach 1000 mm do 2000 mm. Odchyłki te, jak już wspomniano, należy traktować jako sumę tolerancji wymiarów prętów, elementów łączących pręty i tolerancji montażu.

Przyjęto, że rzeczywiste wymiary łączników modelu struktury różnią się od wymiarów nominalnych o jedną z wymienionych liczb odpowiednich przedziałów: $\langle \pm 2,0 \text{ mm} \rangle = \langle -2,0, -1,5, -1,0, -0,5, 0,0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 \rangle$ oraz $\langle \pm 1,5 \text{ mm} \rangle = \langle -1,5, -1,0, -0,5, 0,0, 0,5, 1,0, 1,5 \rangle$. Przyjęte tolerancje rozmieszczone są w obszarze struktury za pomocą generatora liczb losowych. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że przyjęte pola tolerancji wymiarowych dla danej struktury prowadzą do znacznych zmian kształtu konstrukcji (rys. 5).

Odnosi się to głównie do zmiany pionowych współrzędnych brzegowych węzłów struktury. Tylko w pasmach skrajnych i sąsiednim przekraczają one 5,0 cm i 9,0 cm dla pewnych węzłów brzegowych. Wynik ten, zdaniem autora, potwierdza opinie autorów pracy [9], którzy oceniają normowe wymagania w zakresie tolerancji wymiarowych jako zbyt łagodne. Tolerancje wymiarowe narzucane przez projektantów są ostrzejsze i raczej zbliżone do tolerancji wymaganych dla mechanizmów.

7. WNIOSKI

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że zastosowanie metod mechaniki ośrodków siatkowych do opisu i analizy zjawisk geometryczno-statycznych w przestrzennych strukturach prętowych prowadzi do praktycznie użytecznych, łatwych do zaprogramowania algorytmów, które mogą znaleźć zastosowanie w praktyce projektowej. Dają one możliwość bezpośredniego uwzględnienia złożonych pól lokalnych tolerancji wymiarowych elementów w analizie konstrukcji przy niewielkich modyfikacjach istniejących programów komputerowych.

Opracowane algorytmy generacji siatki przestrzennej wybranej klasy struktur prętowych służą jako generatory beznaprężeniowej konfiguracji początkowej struktury przy danych parametrach metrycznych układu.

Pomysł wprowadzenia beznaprężeniowej konfiguracji początkowej struktury pozwolił właśnie na uproszczenie analizy i wykorzystanie istniejących programów komputerowych oraz dał możliwość wstępnej oceny wpływu lokalnych imperfekcji na ogólny kształt struktury. Dzięki temu analiza może być prowadzona szybko i oszczędnie.

Z przedstawionego przykładu liczbowego wynika, że dopuszczalne pola lokalnych tolerancji wymiarowych elementów mają istotny wpływ na kształt struktury.

Przedstawione programy mogą służyć do oceny określonych technologii montażu i produkcji elementów struktur prętowych. Po niewielkich modyfikacjach mogą być one wykorzystane do generacji przestrzennych siatek innych klas struktur.

Należy zaznaczyć, że pewnym niedostatkim opracowanych programów jest brak procedury przedstawiającej wyniki obliczeń w postaci graficznej, np. w formie perspektywicznego rysunku struktury. Wynika on jednak z ograniczonych możliwości dostępnej maszyny cyfrowej.

PODZIĘKOWANIE

Przy pisaniu przedstawionego opracowania wszechstronnej pomocy udzielił mi konsultant mojej pracy dyplomowej dr inż. Ryszard TARGOWSKI. Składam Mu za to serdeczne podziękowania.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. H. FRĄCKIEWICZ, J. LEWIŃSKI, *Geometrical variability of regular multisegmental surface structure*, Arch. Inż. Łąd., cz. I, 14, 4, 1968; cz. II, 16, 1, 1970.
2. A. ROSEN, L. A. SCHMIT, Jr., *Design-oriented analysis of imperfect truss structures, Part I. Accurate analysis*, Int. J. Num. Meth. Enging., 14, 9, 1979.
3. J. M. HEDGEPEETH, *Influence of fabrication tolerances on the surface accuracy of large antenna structures*, AIAA J., 20, 5, 680-686, 1982.

4. H. FRĄCKIEWICZ, *Mechanika ośrodków siatkowych*, PWN, Warszawa 1970.
5. R. TARGOWSKI, *Geometria dyskretnego modelu obliczeniowego struktur przestrzennych*, V Konferencja Metody Komputerowe w Mechanice Konstrukcji, Wrocław 1981.
6. R. TARGOWSKI, *A generalized automatic mesh generation with triangular and tetrahedron elements*, Int. Conf. on Accuracy Estimates and Adaptive Refinements in Finite Element Computations ARFEC, Lisbon 1984.
7. J. BOGUSZ, *Wpływ tolerancji wymiarowych elementów na geometrię struktury przestrzennej* [praca dyplomowa], Politech. Lubelska, Wydz. Inżyn. Budowlanej i Sanitarnej, 1985.
8. PN-77/B-06200, *Konstrukcje stalowe budowlane, Wymagania i badania*.
9. J. BRÓDKA, *Przekrycia strukturalne*, Arkady, Warszawa 1985.
10. Z. ALABRUDZIŃSKI, *Teoria tolerancji płaskich przegubowych konstrukcji siatkowych* [praca doktorska], Politech. Warszawska, Wydz. Mechaniczny, 1977.

Резюме

ВЛИЯНИЕ ДОПУСКА РАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГЕОМЕТРИЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СТРУКТУР

Работа составляет попытку применения современных методов математики и механики сеточных сред для описания геометрических и механических (статических) свойств пространственных стержневых конструкций с учетом локальных размерных допусков единичных элементов конструкции. В работе определена связь локальных допусков характеристических размеров элементов с глобальными геометрическими параметрами системы. В описании выделены некоторые характеристические этапы для монтажа этого рода конструкций. Представленный метод позволяет полностью описать произвольную конфигурацию пространственной стержневой структуры в процессе монтажа и эксплуатации, а также анализ полей напряжений и перемещений как функции локальных размерных допусков элементов. Разработанный алгоритм может служить как генератор геометрических параметров данного класса стержневых структур в существующих компьютерных программах статического анализа конструкции. Для иллюстрации полученные зависимости применены к анализу примера избранной пространственной структуры.

SUMMARY

EFFECT OF DIMENSIONAL TOLERANCES UPON THE GEOMETRIC PROPERTIES OF SPATIAL ROD STRUCTURES

An attempt is made to apply the modern mathematical and mechanical tools used in the analysis of lattice-type media to describe the geometric and mechanical (statical) properties of spatial rod structures, local dimensional tolerances of individual rods being taken into account. Relations between the local tolerances and the global geometric parameters of the system are determined. The method allows for a full description of an arbitrary spatial rod structure in the process of assembling and operation, and for the analysis of stresses and displacements of the structure as functions of the local dimensional tolerances of structural elements. The algorithm prepared may be used to generate the geometric parameters of a given class of rod structures in the existing computer programs used in the structural analysis. The results are illustrated by an example.

POLITECHNIKA LUBELSKA, LUBLIN

Praca została złożona w Redakcji dnia 4 marca 1986 r.,
nowa wersja dnia 29 maja 1987 r.