Na prawach rekopisu

INSTYTUT BUDOWNICTWA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport serii PRE 80/87

STATECZNOŚĆ DŹWIGARÓW ZAWIESZONYCH NA LINACH PODCZAS MONTAŻU

Andrzej CZEMPLIK

Praca doktorska

Promotor: doc. dr inż. Kazimierz CZAPLIŃSKI

Słowa kluczowe: stateczność konstrukcji, montaż, badania modelowe, Metoda Elementów Skończonych Mgr inż. Andrzej Czemplik

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 50-377 Wrocław, Pl. Grunwaldzki 11

Raport opracowano w ramach problemu badawczego nr O2002, . pod kierunkiem doc. dra inż. Kazimierza Czaplińskiego

Symbol pracy: S

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej w dniu 1987.06

SPIS TRESCI

1.	WPROWADZENIE	5
2.	PRZEDMIOT i CEL PRACY	9
3.	WYKAZ OZNACZEN	12
4.	PRZEGLĄD ZNANYCH ROZWIĄZAN NA TEMAT BADANEGO ZAGADNIENIA	15
5.	CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW BRZEGOWYCH ELEMEN- TÓW ZAWIESZONYCH NA LINACH	25
6.	SPOSÓB ANALIZY ZAGADNIENIA ZA POMOCA, METODY	32
6.1.	Ogólna charakterystyka metody	32
6.2.	Algorytm obliczeń	37
6.3.	Schemat blokowy obliczeń numerycznych	45
6.4.	Program dla maszyny cyfrowej	45
6.5.	Dokładność obliczeń	45
7.	NUMERYCZNA ANALIZA BADANEGO PROBLEMU	49
7.1.	Wysokość obejm montażowych	49
7.2.	Lokalizacja miejsc zawieszenia	55
7.3.	Kąt rozstawu lin zawiesia montażowego	59
7.4.	Utrata stateczności dźwigarów o dużej sztyw-	
	ności skrętnej	60
7.5.	Podsumowanie analizy numerycznej	62

t

---3---

strona

65 65
65
68
69
69
74
88
92
94

-4-

1. WPROWADZENIE

Z analizy katastrof, których przyczyną była utrata stateczności konstrukcji podczas montażu wynika, że często były one spowodowane błędami tegoż procesu [83]. W pracy zajęto się szczególnym przypadkiem utraty stateczności, a mianowicie utratą płaskiej postaci zginania smukłych dźwigarów pełnościennych w trakcie ich podnoszenia. Ten etap montażu zasługuje na szczególną uwagę z tego względu, że dźwigary zawieszone na linach znajdują się w specyficznych warunkach brzegowych. Przeoczenie specyfiki tego sposobu podparcia było wielokrotnie przyczyną awarii lub katastrof konstrukcji podczas montażu [2, 19, 26, 32, 36, 74].

-5-

Warunki brzegowe dźwigarów zawieszonych wyróżniają się przede wszystkim możliwością obrotu przekrojów podporowych wokół osi podłużnej. Obrotowi temu towarzyszy powstanie momentu skręcającego, przyłożonego w miejscach podwieszenia. Wartość tego momentu zależy od ciężaru dźwigara oraz od miejsca i sposobu zawieszenia dźwigara. Działa on w kierunku przywracającym belce położenie początkowe. Jest to więc swoiste podparcie sprężyste, z uwagi na obrót przekrojów podwieszonych wokół osi podłużnej, przy czym stała sprężynowania zależy od sposobu podparcia oraz od obciążenia (tj. od ciężaru własnego dźwigara). Przypadek taki, w którym występuje zależność stałej sprężynowania podpór od ciężaru konstrukcji należy w teorii konstrukcji do rzadkości. Ze wspomnianej specyfiki warunków brzegowych wynika konieczność odmiennego teoretycznego opisu zwichrzenia dźwigarów zawieszonych w stosunku do dźwigarów

opartych na podporach stałych. W przekrojach podporowych dźwigarów zawieszonych występuje o jeden stopień swobody wiecej niż w analogicznych przekrojach opartych na podporach stałych. Konsekwencją tej różnicy warunków brzegowych jest niższa wartość obciążenia krytycznego powodującego zwichrzenie dźwigarów podwieszonych w porównaniu do dźwigarów opartych na podporach. Istotę tego zagadnienia omówiono w dalszych rozdziałach pracy, tu jednak warto zaznaczyć, że wspomniane obniżenie obciążenia krytycznego, w niektórych przypadkach dochodzi do 60 %. Dlatego też dźwigary unoszone w fazie montażu są bardziej narażone na możliwość utraty płaskiej postaci zginania niż elementy już zmontowane. Możliwy jest ponadto przypadek, w którym belka zawieszona może utracić płaską postać zginania nawet wówczas gdy cechuje się znaczną sztywnością skrętną, wobec czego nie ulega skręceniu na swojej długości. Możliwy jest bowiem jej obrót (jako ciała sztywnego) wokół prostej przechodzącej przez punkty podwieszenia, jeśli różnica sztywności gietnych w obu prostopadłych kierunkach jest znaczna. Element - obrócony we wspomniany sposób - zginany będzie w płaszczyźnie mniejszej sztywności giętnej; może wieć doznać odkształceń trwałych. dyskwalifikujących go do dalszego montażu.

Etap montażu trwa niezwykle krótko w stosunku do okresu użytkowania konstrukcji. Nie dziwi więc fakt, że większość metod projektowania uwzględnia warunki charakterystyczne dla konstrukcji wybudowanej tj. w stanie użytkowania. Trzeba zaznaczyć, że w czasie montażu zachodzi, istotna dla bezpieczeństwa konstrukcji, zmienność schematów statycznych. Bywa też tak, że element zaprojektowany na rozciąganie jest podczas montażu ściskany.

-6-

Zupełnie inne od użytkowych, niekiedy zaskakująco niebezpieczne są obciążenia konstrukcji w tym etapie. Czesto też za pomocą klasycznych metod analizy konstrukcji, nie można zbadać konstrukcji, która charakteryzują stany typowe dla poszczególnych faz montażu. Wydaje się jednak, że nie jest konieczne powiększanie liczby inżynierskich metod analitycznych. Wystarczy istniejące metody uzupełnić o elementy, które pozwola uwzglednić warunki pracy konstrukcji charakterystyczne dla montażu. Z tego względu w niniejszej pracy wzięto pod uwage dużą popularność Metody Elementów Skończonych (MES) w zastosowaniu do analizy konstrukcji budowlanych. Zarówno w placówkach naukowobadawczych jak i w wielu biurach projektowych użytkowane są różne systemy komputerowego wspomagania analizy konstrukcji oraz jej projektowania za pomocą MES. Uzupełnienie tej metody odpowiednimi procedurami pozwoliko przeprowadzić analize numeryczną problemu stanowiącego przedmiot pracy. Dodatkowy materiał poznawczy uzyskano z badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelach z blach aluminiowych.

Mechanika konstrukcji w fazie montażu zawiera nadal wiele zagadnień oczekujących na właściwe, inżynierskie rozwiązanie. Często bowiem, oprócz wspomnianych awarii w czasie montażu, zdarza się, że elementy montażowe lub zmontowana część konstrukcji doznają nadmiernych, nie przewidzianych obliczeniowo odkształceń. Niekiedy wystarcza w takich wypadkach doraźne zastosowanie tymczasowych wzmocnień ale czasami trzeba dokonać zmian w projekcie technicznym. Rozwiązanie problemów nośności konstrukcji w czasie montażu ma, jak się wydaje, duże znaczenie dla zwiększenia racjonalności i bezpieczeństwa

----7---

tego procesu. Umożliwi ponadto lepsze uwzględnienie warunków montażu w projekcie konstrukcji co wielokrotnie jest postulowane w pracach z zakresu teorii montażu, np. [12, 20, 21].

Tematyka niniejszej pracy była we fragmentach przedstawiona zarówno w gronie teoretyków stateczności konstrukcji [17] jak i technologów montażu [18]. Prezentowane zagadnienia spotkały się z dużym zainteresowaniem, dyskusja zaś wskazała na potrzebę dalszych badań z omawianego zakresu, np. na temat dynamiki czy też wpływu wiatru na konstrukcję w poszczególnych fazach jej montażu. Są to jednak zagadnienia tak obszerne, że wymagają odrębnych opracowań, dla których niniejsza praca jest jedynie początkiem.

-8-

2. PRZEDMIOT i CEL PRACY

Przedmiotem pracy są badania stateczności cienkościennych dźwigarów o przekroju otwartym zawieszonych na linach żurawia (podczas montażu). Zarówno analizę numeryczną jak i badania modelowe ograniczono do dźwigarów metalowych aczkolwiek zaproponowana metoda analizy i program numeryczny opracowany na jej podstawie, mogą być w pewnym stopniu odpowiednie także dla konstrukcji betonowych. Badane zagadnienia dotyczą bowiem przede wszystkim konstrukcji metalowych, stanowią jednak znaczący w praktyce problem w odniesieniu do strunobetonowych elementów montażowych o dużych smukłościach [13].

Współcześnie stosuje się metody montażu charakteryzujące się dużym stopniem scalenia montowanych elementów, co pozwala znacznie obniżyć pracochłonność montażu wielu rodzajów konstrukcji [65, 69]. W zależności od rodzaju konstrukcji i metody montażu, elementy scalone mogą mieć charakter sztywnych elementów przestrzennych lub też elementów długich i stosunkowo smukłych. W tym drugim wypadku, przedstawiona w niniejszej pracy analiza pozwoli dość dokładnie określić maksymalne długości smukłych dźwigarów cienkościennych, które mogą być bezpiecznie unoszone przez środki transportu pionowego.

Ponadto, dzięki zastosowanej Metodzie Elementów Skończonych, zaproponowany sposób analizy elementów prostoliniowych będzie mógł być wykorzystany do przeprowadzenia obliczeń wytrzymałościowych dla mało wyniosłych łuków w trakcie ich montażu. Pewnym ułatwieniem jest tu fakt istnienia gotowych algo-

-9-

rytmów transformacji zastosowań elementów prostych do łuków [5].

Trzecim zastosowaniem wyników przedstawionej analizy jest jej wykorzystanie do badania stateczności wiązarów kratowych podczas ich podnoszenia. Jest to również bardzo ważny problem występujący podczas montażu [41, 47, 50, 52, 84]. Jedną z metod analizy tego zagadnienia przedstawił Henryk Ostapiuk [59]. W metodzie tej modelem obliczeniowym wiązara kratowego jest belka pełnościenna. Uściślone zatem w niniejszej pracy metody obliczania dźwigarów pełnościennych, mogą stanowić również punkt odniesienia do bardziej dokładnego wyznaczania krytycznej wartości obciążenia kratownic podczas montażu. Przeprowadzenie tej analizy jest (dzięki zastosowanej metodzie) możliwe przy dowolnej zmienności przekroju poprzecznego badanych dźwigarów.

Sformułowano następujące tezy pracy:

1. Obciążenie krytyczne z uwagi na zwichrzenie cienkościennych dźwigarów o dużych smukłościach jest w przypadku zawieszenia dźwigarów na linach żurawia montażowego istotnie mniejsze niż w przypadku oparcia na podporach stałych. Z tego względu przeprowadzenie bezpiecznego transportu pionowego takich elementów podczas montażu wymaga sprawdzenia ich stateczności z uwzględnieniem warunków brzegowych odpowiednich dla zawieszenia.

2. Zależność stałej sprężynowania (z uwagi na obrót względem osi podłużnej) podpór – jakimi są obejmy czy zaczepy montażowe – od obciążenia dźwigara powoduje, iż poszukiwaniu obciążenia krytycznego powinna towarzyszyć jednoczesna aktualizacja wartości stałej sprężynowania. Metoda oparta na koncepcji elementów skrańczonych i wykorzystująca iteracyjną procedurę aktualizacji wartości stałej sprężynowania podpór jest odpowiednim narzędziem obliczeniowym dla analizy badanego problemu.

3. WYKAZ OZNACZEŃ

- az odległość punktu przyłożenia obciążenia od środka ścinania przekroju poprzecznego
- A pole powierzchni przekroju poprzecznego dźwigara
 cienkościennego
- ^{'b}1, ^b2 szerokości: górnej oraz dolnej półki przekroju dwuteowego

bz – wysokość środnika przekroju dwuteowego

[C] - macierz warunków brzegowych

d – rozstaw obejm podporowych

odległość punktu zamocowania liny od środka cięż kości przekroju podporowego

e_y, e_z - współrzędne punktu zamocowania liny do obejmy montażowej, w lokalnym układzie współrzędnych (por. rys. 6.1)

E - moduł sztywności wzdłużnej (m. Young'a)

F - siła ściskająca występująca w belce zawieszonej
 na linach

g_{kr} - krytyczna ze względu na zwichrzenie wartość cięża ru własnego dźwigara zawieszonego na linach

g^{xx} - krytyczna ze względu na zwichrzenie wartość ciężaru własnego dźwigara podpartego w sposób "widełkowy"

E1,52,83 - grubość półki górnej, dolnej oraz środnika belki dwuteowej

G - moduł sztywności poprzecznej (m.Kirchhoffa)

- h odległość pomiędzy środkami półek przekroju dwuteowego
- Iz, Iy momenty bezwładności przekroju poprzecznego względem osi z oraz y
- I moment bezwładności przekroju poprzecznego przy skręcaniu
- I_ω wycinkowy moment bezwładności przekroju poprzecznego dźwigaru cienkościennego
- I polarny moment bezwładności przekroju poprzecznego
- [k_s]- lokalna macierz sztywności sprężystej elementu skończonego
- [k_G] lokalna macierz sztywności geometrycznej elementu skończonego

[K_S], [K_G] - globalne macierze sztywności sprężystej i geometrycznej dźwigara

- 1 długość dźwigara
- M moment skręcający przyłożony w przekrojach zamocowania lin
- M moment skręcający przyłożony w węźle elementu skończonego
- My, Mz momenty zginające przyłożone w węźle elementu skończonego
- q_z obciążenie pionowe równomiernie rozłożone na długości elementu skończonego
- Q całkowity ciężar dźwigara

,	
[r] -	macierz przyporządkowania elementu skończonego
S -	stała sprężynowania (z uwagi na obrót)
U -	energia odkształcenia układu konstrukcyjnego
u, v, w	– przemieszczenia przekroju dźwigara wzdłuż osi
	x, y, z, odpowiednio
v –	praca sił zewnętrznych
W	całkowita energia potencjalna układu konstrukcyjnego
y _o , z _o	- współrzędne środka ścinania w lokalnym układzie
	współrzędnych przekroju poprzecznego
<u>~</u>	kąt rozwarcia lin zawiesia (por. rys. 5.2.a)
{△} -	wektor węzłowych deformacji
v» -	kąt obrotu przekroju poprzecznego dźwigara względem 👘
	osi podłużnej, przechodzącej przez punkty zamocowa-
	nia lin zawiesia montażowego
ϑ ₁ , ϑ _p	- kąt obrotu przekroju poprzecznego dźwigara
, 1	względem osi podłużnej, mierzony po lewej i pra-
	wej stronie obejmy montażówej

Ð kąt bocznego wygięcia przekroju poprzecznego

λ parametr obciążenia krytycznego

Φ kąt spaczenia przekroju poprzecznego dźwigara cienkościennego

ψ kąt pionowego ugięcia dźwigara

Za pomocą jednego lub kilku znaków 🥤 (prim) oznaczono w pracy pierwszą i wyższe pochodne określone w odniesieniu do długości dźwigara (<u>d</u>x).

4. PRZEGLĄD ZNANYCH ROZWIĄZAŃ NA TEMAT BADANEGO ZAGADNIENIA

Pierwsze prace z omawianego zakresu opublikował <u>Csonka</u> w roku 1954 [14, 15]. Stosując nieskończone szeregi, uzyskał on przybliżone rozwiązanie równań różniczkowych (drugiego stopnia) zagadnienia zwichrzenia prostokątnych belek o stałym przekroju poprzecznym, zawieszonych w obydwu końcach na pionowych linach. Wykorzystując dwa pierwsze wyrazy szeregu uzyskał wzory na krytyczny ciężar własny belki (rys. 4.1):



Rys. 4.1. Schematy belek rozważanych w pracach Csonki [14, 15]. Następnie, stosując te same metody, wspomniany autor przedstawił w pracy [16] przybliżoną analizę wpływu zastrzałów przylegających prostopadle do wcześniej rozważanych belek.

W tym samym czasie, <u>Bölcskei</u> przeprowadził w elementarny sposób analizę stateczności belki(o przekroju prostokątnym), zawieszonej na pionowych linach w dwóch miejscach jednakowo odległych od jej końców [8]. Założył on jednak nieznaczną / odległość punktów zawieszenia od środka ciężkości przekroju i w konsekwencji pominął wpływ skręcania belki przyjmując, iż

-15-

belka o ciężarze krytycznym przechyli się jak ciało sztywne i dozna wygięcia bocznego. Autor ten zaproponował dla obliczania ciężaru krytycznego następujący wzór (rys.4.2):



W roku 1955 <u>Lovass - Nagy</u> opublikował matematyczną analizę stateczności belek o przekrojach bisymetrycznych zawieszonych za obydwa końce na piopowych linach [46]. Poszukiwał on krytycznej wartości odległości miejsc podwieszenia od środka ciężkości przekroju dla belki o ustalonej długości i obciążeniu. Posługując się metodą Rayleigh'a - Ritz'a i stosując zapis macierzowy, autor uzyskał przybliżone rozwiązanie problemu.

<u>Yegian</u> w swej dysertacji z roku 1956 dokonał analizy stalowych dźwigarów dwuteowych o stałym przekroju poprzecznym, zawieszonych w dwóch miejscach na pionowych linach [81]. Autor posługiwał się całkowaniem numerycznym i metodą różnic skończonych. Wyniki przedstawił tabelarycznie oraz na wykresach.

Labelle w roku 1959 uogólnił prace Csonki i Bölcskei w ten sposób, że uwzględnił przypadek lin nachylonych pod kątem

--- 16---

ostrym względem osi belki. Stosując podobne metody obliczeniowe przedstawił rozwiązanie dla belek z betonu sprężonego [45]. Dyskusję stosowalności tych rozwiązań podjął <u>Muller</u> [53].

Zastosowanie szeregów nieskończonych i metody energetycznej do analizy stateczności podnoszonych belek z betonu sprężonego było w roku 1960 przedmiotem pracy <u>Pettersson'a</u> [60]. Stwierdził on, że skręcanie analizowanych belek jest małe, a wpływ ograniczenia swobody deplanacji przekrojów podwieszonych na wartość obciążenia krytycznego jest znikomy.

Kolejną dysertację poświęconą rozważanej analizie stateczności napisał w roku 1963 <u>Swann</u> [71]. W pracy tej, dokonano modyfikacji iteracyjnej metody Newmark'a czyniąc ją odpowiednią do analizy tego problemu. Zastosowanie tej metody przedstawiono na kilku przykładach. W proponowanej metodzie pominięto wpływ niektórych odkształceń charakterystycznych dla elementów cienkościennych. Autor jako pierwszy wykonał serię badań doświadczalnych dla belek zawieszonych. Badaniom poddano osiem dwuteowych i teowych belek strunobetonowych i pięć belek wykonanych ze stopów aluminium. Modele aluminiowe miały jednakowe wymiary geometryczne były one natomiast w różny sposób zawieszone podczas badań (rys.4.3). Analiza wyników tych badań jest kontynuowana w pracy [70]. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły, dla przyjętych założeń, dobrą zgodność z zaproponowanym analitycznym sposobem obliczeń.

Uproszczoną analizę zwichrzenia cienkościennych dźwigarów zawieszonych na pionowych linach w dwóch końcach podali w roku 1967 <u>Kollar</u> i <u>Gárdonyi</u> w pracy [42]. Posługując się kla-

-17-



Rys. 4.3. Schemat badań modelowych wykonanych przez Swann'a [71]; a) charakterystyka geometryczna modeli aluminiowych, b) sposób obciążenia zawieszonego modelu.

syczną metodą energetyczną badali oni możliwość antysymetrycznej formy zwichrzenia oraz wpływ usztywnienia przekrojów podwieszonych. Autorzy skupili uwagę na pięciu rodzajach kształtu przekroju poprzecznego belek cienkościennych i dwóch sposobach zawieszania przedstawionych na rys.4.4. Podano przybliżone wzory na obliczanie momentu krytycznego, ze względu na zwichrzenie, belek zawieszonych na końcach. W pracy zamieszczono wartości współczynników niezbędnych dla korzystania z zaproponowanych wzorów.

Pracą o dużym znaczeniu praktycznym jest raport Królewskiej Politechniki w Sztokholmie opracowany w roku 1970 przez Johansson'a [39]. Zawiera on analizę stateczności stosowanych w Szwecji cienkościennych dźwigarów stalowych o przekroju bisymetrycznym (typu HSI). Podwieszenie tych belek podczas montażu badano dla wybranych trzech schematów (rys.4.5). Wynikiem analizy przeprowadzonej przy użyciu metody energetycznej są



Rys. 4.4. Belki cienkościenne analizowane przez Kollar'a i Gordonyi [42] ; a) przekroje poprzeczne belek, b) rozważane sposoby zawieszania belek

wytyczne do prowądzenia robót montażowych w wypadku stosowania belek rozważanego typu. Zalecany tam np. wybór lokalizacji miejsc podwieszenia przedstawiają poniższe zależności:

jeżeli $(\frac{1}{b_1})^3 \cdot \frac{Q}{E \cdot g_1 \cdot h} < 3$ to belka może być zawieszona za końce,

jeżeli $3 \leq \left(\frac{1}{b_1}\right)^3 \cdot \frac{Q}{E \cdot g_1 \cdot h} < 190$ to belka powinna być zawieszona w odległości $\frac{1}{4}$ od końców.





Podobne dźwigary były w roku 1973 przedmiotem rotważań <u>Ostapiuka</u> [59]. Określił on za pomocą metody energetycznej, sposobem Ritz'a, krytyczną wartość obciążenia dźwigarów zawieszonych w dwóch punktach. Dla przypadku pionowych lin podał optymalną lokalizację miejsc podwieszenia wg zależności a = 0,22·1 (rys.4.5).

Pewnych uogólnień pracy Johanssona dokonali w roku 1977 <u>Fukumoto</u> i <u>Yamasaki</u> [27]. Analizowali oni również bisymetryczne dźwigary dwuteowe. Dodatkowo rozważyli oni jednak kilka innych miejsc podwieszenia lin, a dla dwóch wybranych sposobów zawieszenia zaproponowali współczynniki uwzględniające wpływ ugięć w płaszcz, źnie pionowej na wartość obciążenia krytycznego.

W roku 1977 w Paryżu ukazała się <u>praca zbiorowa</u> poświęcona konstrukcjom z betonu sprężonego [13]. Zamieszczono w niej również zalecenia z zakresu analizy stateczności stosunkowo wiotkich belek strunobetonowych podnoszonych w czasie montażu. Podano następujący wzór przybliżony na określanie obciążenia krytycznego podnoszonych belek o przekroju cienkościennym:

-20-

$$g_{kr} = \frac{16 \cdot \sqrt{\gamma \cdot E \cdot I_z \cdot G \cdot I_s}}{1^3} \dots (4.4)$$

gdzie wartości współczynnika y należy przyjmować wg rys.4.6c.



Rys. 4.6. Dane pomocnicze do posługiwania się wzorem (4.4) [13];

a) lokalizacja miejsc zawieszenia, b) sposób podwieszenia, c) nomogram do wyznaczania wartości / .

Autorem najnowszych prac z rozważanego zakresu jest <u>Tarnai</u>. Przedstawił on w roku 1978, w ogólnym zapisie, zależności według teorii Dunkerley'a dla zawieszonych za końce dźwigarów cienkościennych [73]. Zaproponował również oryginalną postać funkcji własnych zagadnienia zwichrzenia unoszonych dźwigarów cienkościennych o dowolnym przekroju poprzecznym i pokazał ogólny algorytm rozwiązania problemu przy zastosowaniu metody Ritz'a oraz metody Galerkina [74]. Problemem stateczności dźwigarów unoszonych zajmowali się także inni autorzy, jak np.: <u>Meissner</u> [51], <u>Rafla</u> [64] i <u>Kolesničenko</u> [41]. Jednakże poruszane przez nich zagadnienia analizowane były w szerszym zakresie w pracach omówionych

Autorzy przedstawionych wyżej prac wykorzystywali bieżące osiągnięcia z zakresu ogólnej teorii zwichrzenia elementów zginanych. Rys historyczny rozwoju teorii zwichrzenia przedstawiony jest np. w pracach [6, 11, 25]. Problemy utraty płaskiej postaci zginania elementów konstrukcyjnych są jednak nadal dziedziną rozwijaną przez wielu badaczy.Spośród krajowych publikacji z tego zakresu wymienić można np. prace [22, 30, 43, 48, 49, 55, 61, 79]. Obszerną bibliografię publikacji zagranicznych na temat zwichrzenia można znaleźć w monografii [1], zaś spośród opracowań zagranicznych wymienić należy, z uwagi na duże rozpowszechnienie w kraju i obszerność treści, prace [9, 66, 76]. Zagadnienia stateczności konstrukcji podczas montażu, z uwagi na podobny charakter niektórych zjawisk, zbliżone są do problemu stateczności elementów podpartych sprężyście. Problem ten został badany m.in. w pracach [3, 22, 57, 66]. Podobnym do rozważanego zagadnieniem jest też analiza dźwigarów, które jako zawieszone na stałe pracują w konstrukcji w stanie użytkowym. Przykładem mogą służyć podwieszone belki podsuwnicowe w dużych hangarach lotniczych, których analize przedstawiono w pracy [77]. Innym zbliżonym zagadnieniem jest analiza podnoszenia płyt, którą przedstawiono np. w pracy [54].

-22-

wcześniej.

Na zakończenie przeprowadzonej prezentacji dotychczasowych badań na rozważany temat należy stwierdzić, iż charakteryzuje je stosunkowo duża rozmaitość postulowanych sposobów analizy. głównie w zależności od sposobów podwieszwnia konstrukcji. Brak jest prac umożliwiających, za pomocą jednej uniwersalnej metody, analizę zagadnienia w przypadku zarówno dźwigarów o dowolnym i zmniejszającym się na długości kształcie przekroju poprzecznego jak i dowolnego sposobu zawieszenia konstrukcji. Część przedstawionych prac ma, z uwagi na małą dokładność proponowanych wzorów, niewielkie zastosowanie w praktyce. Wiekszość rozwiązań nadaje się jedynie do analizy belek o przekrojach bisymetrycznych. Te zaś, które umożliwiają analizę belek o przekrojach monosymetrycznych nakładają istotne ograniczenia na sposób podwieszenia elementu. Natomiast metoda zaproponowana w pracy [74], uwzględnia jedynie pionowe liny zawiesi montażowych i wymaga każdorazowo rozwiązania wielu bardzo rozbudowanych całek oraz innych uciążliwych rachunków, które można by zunifikować jedynie dla zadań o podobnych warunkach geometrycznych. Szczególnie skąpy jest natomiast materiał doświadczalny dotyczący omawianego tu tematu. Badania modelowe opisane w pracach [70, 71] uwzgledniały jedynie obciążenie siłą skupioną przyłożoną w środku rozpiętości belki zawieszonej. Jak wiadomo, moment krytyczny wywołany siłą skupioną tak przyłożoną jest zawsze wiekszy od momentu krytycznego wywołanego obciążeniem równomiernie rozłożonym. Ponadto obciążenie skupione modeluje właściwie prace trawersu montażowego, zaś dla modelowania ciężaru własnego belki transportowanej pionowo przez żuraw odpowied-

-23-

nie byłoby obciążenie rozłożone na długości modelu.

Rozmaitość sposobów montażu współczesnych konstrukcji, w szczególności konstrukcji metalowych, wymaga uzupełnienia dotychczas przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz opracowanych metod analizy smukłych dźwigarów w fazie podnoszenia tak, by za pomocą jednej metody możliwa była analiza wszystkich występujących w praktyce budowlanej przypadków.

5. CHARAKTERYSTYKA WARUNKOW BRZEGOWYCH ELEMENTÓW ZAWIESZONYCH NA LINACH

Zawieszenie elementu montażowego do haka maszyny montażowej, którą najczęściej jest żuraw budowlany lub wciągarka realizowane jest za pośrednictwem zawiesi. Wybór konstrukcji zawiesi powinien uwzględniać przyjęty sposób montażu, cieżar elementu montażowego i lokalizację miejsc podwieszenia. Oprócz zawiesi wytwarzanych jako typowe produkuje się także zawiesia specjalnie zaprojektowane dla konkretnego procesu montażu. Konstrukcja zawiesia ma bowiem duże znaczenie dla bezpieczeństwa transportu pionowego [44, 72]. Obszerny przegląd konstrukcji zawiesi zawierają katalogi ich producentów (np. MOSTOSTAL), a przykładowe rozwiązania przedstawiają np. prace [10, 38, 67]. Często jednak dla zawieszenia elementu montażowego stosuje się oprócz zawiesi także obejmy, zaczepy czy dodatkowe pęta. Jedynie bowiem w elementach żelbetowych można bez trudności zabetonować uchwyty montażowe odpowiednie dla bezpośredniego mocowania zawiesi. W przypadku dźwigarów metalowych bardzo często należy stosować wspomniany osprzet dodatkowy. Na rys. 5.1 pokazano najczęściej stosowane sposoby mocowania smukłych dźwigarów do haka zawiesia montażowego.

Dźwigary o dużych smukłościach montowane są najczęściej za pomocą zawiesi pokazanych schematycznie na rys.5.2. W przypadku montażu elementów o szczególnie dużych długościach stosuje się także dwa odpowiednio rozstawione żurawie.

Ogólną postać układu równań różniczkowych zagadnienia zwichrzenia elementów cienkościennych podał Własow w pracy [78].



Rys. 5.1. Szkic wybranych sposobów mocowania dźwigarów do zawiesia.





Rys. 5.2. Schemat konstrukcji zawiesi stosowanych w montażu dźwigarów; a) z. dwucięgnowe, b) z. z trawersem, c) z. z układem samorównoważącym.

Uproszczone postacie tych równań podano też w pracach [7, 31, 68]. Analiza badanego problemu wykorzystująca rozwiązywanie tych równań równowagi jest możliwa jedynie dla prostych przypadków, w których dźwigar ma stały na długości przekrój poprzeczny zaś liny, na których jest on zawieszony są pionowe. Z uwagi na dwie teoretycznie możliwe formy utraty płaskiej postaci zginania (symetryczną i antysymetryczną), poniżej zestawiono warunki brzegowe odpowiednie dla trzech różnych lokalizacji punktów zawieszenia, pokazanych na rys.5.3.

> 1° d = 1 (rys.5.3a) postać symetryczna: $\vartheta''=0$, $\vartheta'=0$, postać antysymetryczna: $\vartheta''=0$, $\vartheta'=0$,

> 2° 0 < d < 1 (rys.5.3b) postać symetryczna: $\vartheta'' = 0$, $\vartheta' = 0$, postać antysymetryczna: $\vartheta'' = 0$, $\vartheta = 0$, dodatkowo w obydwu wypadkach:

$$\vartheta_{1} = \vartheta_{p}, \quad \vartheta_{1}' = \vartheta_{p}', \quad \vartheta_{1}'' = \vartheta_{p}''$$

 3° d = 0 (rys.5.3c) postać symetryczna: $\sqrt[n]{} = 0$, postać antysymetryczna: $\sqrt[n]{} = 0$, $\sqrt[n]{} = 0$.



Rys.5.3. Stosowane lokalizacje punktów zawieszenia belek

W niniejszej pracy postuluje się jednak bardziej uniwersalną metodę analizy, opartą na koncepcji elementów skończonych [29, 82]. W metodzie, którą opisano w rozdz.6 możliwe jest zwolnienie, skrępowanie lub sprężyste utwierdzenie każdego spośród siedmiu zestawionych poniżej stopni swobody przekrojów zawieszonych

...(5.1)

W proponowanym rozwiązaniu przyjęto we wszystkich przekrojach zawieszonych całkowite skrępowanie przesuwu w kieruny, zaś w jednym przekroju - także skrepowanie kach \mathbf{Z} i przesuwu w kierunku x. W przekrojach zawieszonych przyjęto ponadto sprężyste zamocowanie z uwagi na obrót elementu wokół osi przechodzącej przez punkty zaczepienia haka liny zawiesia. Przyjęto swobodę skręcania przekrojów podporowych wokół oraz y. W przypadku stosowania obejm pokazanych na osi \mathbf{Z} rys.5.1 d.e przyjęto całkowite skrepowanie deplanacji przekrojów zawieszonych. Szkic przyjętych warunków brzegowych w przypadku swobodnej deplanacji pokazano na rys.5.4.

W celu wyznaczenia stałych sprężynowania s (rys.5.4) rozważmy położenie przekroju poprzecznego dźwigara w miejscu jego zawieszenia do liny zakładając nieznaczny obrót przekroju o mały kąt \Im (rys.5.5). Układ utworzony przez dźwigar, osprzęt mocujący i zawiesie można traktować jako zespół dwóch ośrodków. Jeden z nich jest całkowicie wiotki, a drugi



Rys.5.4. Schemat przyjętych warunków brzegowych



Rys.5.5. Schemat nieznacznie obróconego przekroju podporowego

ma określoną sztywność. Ośrodki te łączą się za pośrednictwem haka zawiesia montażowego. W praktyce obejmy i zaczepy do montażu dźwigarów cechuje stosunkowo duża sztywność zarówno giętna jak i skrętna. Rozpatrując zatem przekrój podporowy dźwigara zawieszonego można przyjąć, że ta część obejmy bądź zaczepu, która wystaje ponad górną powierzchnię dźwigara (na rys.5.5 zakreskowany pas) nie doznaje żadnych ugięć. W przekroju podporowym liny w pewnym sensie przeciwdziałają

-29-

obrotowi tego przekroju wokół osi podłużnej.

W przypadku zawieszenia dźwigara w dwóch punktach, w każdej z lin, do których jest on zaczepiony powstaje pionowa składowa reakcji na ciężar dźwigara równa $\frac{1}{2}$ ·gl. W obróconym o mały kąt ϑ położeniu przekroju podwieszonego siła ta działając na ramieniu δ wywołuje moment skręcający M, o wartości:

$$M_{s} = \frac{g \cdot 1}{2} \cdot \delta = \frac{g \cdot 1}{2} \cdot e \cdot \sin \vartheta,$$
ale $\vartheta \rightarrow 0$, $\sin \vartheta \approx \vartheta$
stad
$$M_{s} = \frac{g \cdot 1}{2} \cdot e \cdot \vartheta.$$
...(5.1)

Moment ten przeciwdziała obrotowi przekroju zawieszonemu proporcjonalnie do kąta skręcenia. Sposób podparcia jakim jest zawieszenie na linach można więc traktować jak sprężyste podparcie z uwagi na obrót wokół osi przechodzącej przez punkty zaczepienia haka lin zawiesia. Stałą sprężynowania takiego podparcia określa wzór:

$$s = \frac{M_s}{\sqrt[n]{rad}} = \frac{g \cdot 1}{2} \cdot e \left[\frac{Nm}{rad}\right] \qquad \dots (5.2)$$

Środek ciężkości przekroju zawieszonego doznaje wskutek nieznacznego obrotu przemieszczenia pionowego φ , którego wartość wyznaczyć można z zależności:

$$e - \varphi = e \cdot \cos \vartheta$$

$$\varphi = e (1 - \cos \vartheta) = 2 \cdot e \cdot (\sin \frac{1}{2}\vartheta)^{2} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot e \cdot (\sin \vartheta)^{2}$$

stąd

$$\varphi \approx \frac{1}{2} e \cdot \vartheta^{2} \qquad \dots (5.3)$$

Rozpatrywany kąt ϑ ma bardzo małą wartość, zatem czynnik ϑ^2

6. SPOSÓB ANALIZY ZAGADNIENIA ZA POMOCA METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

6.1. Ogólna charakterystyka metody

W celu analizy cienkościennych dźwigarów zawieszonych podczas montażu dokonano niezbędnych uzupełnień w Metodzie Elementów Skończonych, czyniąc je przydatną do badania problemu. Klasyczna obecnie koncepcja elementów skończonych [82] była przez wielu badaczy modyfikowana na potrzeby różnych badań z zakresu stateczności konstrukcji. W wielu wypadkach próby te przyniosły bardzo dobre efekty, o czym mogą świadczyć m.in. prace [4, 33, 34, 35, 40, 63, 75].

W niniejszej pracy proponuje się analizę stateczności traktowaną jako problem wartości własnych, która pozwala na ścisłe określenie wartości krytycznych parametru obciążenia. Nie pozwala natomiast dokładnie określić pokrytycznego zachowania się dźwigara. Przemieszczenia w stanie krytycznym określane są z dokładnością do stałej. W wielu pracach, np. [6, 23, 80], pokazano, że tak prowadzoną analizę stateczności cechuje duża dokładność w odniesieniu do belek i słupów o stosunkowo dużych smukłościach, a więc i dźwigarów rozważanych w niniejszej pracy. Analizę ograniczono do sprężystego obszaru zachowania materiału, zważywszy po pierwsze na to, iż jedynie dźwigary krępe, o małych smukłościach tracą stateczność w zakresie sprężysto-plastycznym lub plastycznym, a po drugio, zwichrzenie w zakresie pozasprężystym zostało wykluczone w pracy [81] jako wynik przeprowadzonych tam analiz elementów podnoszonych w czasie montażu.

W modelu matematycznym problemu zwichrzenia dźwigarów zawieszonych na linach przyjęto następujące założenia:

- analizę przeprowadzono przyjmując, iż dźwigary mają dowolny kształt przekroju poprzecznego lecz spełniają założenia teorii prętów cienkościennych o przekrojach otwartych Własowa [78].
- uwzględniono obciążenie jednoparametryczne, czyli narastające proporcjonalnie do jednego parametru λ .
- przyjęto dowolną lokalizację miejsc zawieszenia dźwigara oraz dowolny kąt nachylenia lin zawiesia montażowego.
- założono, iż dźwigar jest w taki sposób zawieszony na linach, że jedynym jego odkształceniem w stanie początkowym jest ugięcie pionowe.

Jak wiadomo [37, 62, 82], Metoda Elementów Skończonych jest metodą energetyczną, w której wykorzystuje się prawo mówiące, iż w stanie krytycznym zmiana całkowitej energii potecjalnej przy przemieszczaniu przygotowanym układu jest równa zeru, z czego wynika równość

$$\delta^2 W = 0$$
 ... (6.1)

Całkowita energia potacjalna jest równa energii odkształcenia pomniejszonej o pracę sił zewnętrznych.

$$W = U - V \qquad \dots (6.2)$$

Energię odkształcenia cienkościennych dźwigarów metalowych określa wzór [7]:

W prezentowanej analizie wykorzystano element skończony opisany w pracy [4] oraz częściowo w pracy [28]. Element ten przedstawiono na rys.6.1. Przyjęto także, za autorami koncepcji tego elementu, wartość potecjału obciążenia zewnętrzenego, macierzy sztywności oraz funkcji kształtu. Wartość pracy sił zewnętrznych dla tak przyjętego elementu skończonego oblicza się wg poniższych wzorów [4]:

$$V = \sum_{i=1}^{8} V_{(i)} \dots (6.4)$$

przy czym:

$$V_{(1)} = F_x (u_1 - u_2) + Q_{y1} \cdot v_1 + Q_{y2} \cdot v_2 + Q_{z1}w_1 + Q_{z2}w_2 + M_{y1} \cdot \Psi_1 + M_{y2} \cdot \Psi_2 + M_{z1}Q_1 + M_{z2} \cdot Q_2 + M_{z1}Q_1 + M_{z2} \cdot Q_2 + Q_{z1}w_1 + Q_{z2}w_2 + Q_{z1}w_1 + Q_{z1}w_2 + Q_{z1}w_1 + Q_{z1}w_1 + Q_{z1}w_2 + Q_{z1}w_1 + Q_{z1}w_2 + Q_{z1}$$

$$\int q_{z} w \, dx + M_{x} \cdot (\mathcal{N}_{1} - \mathcal{N}_{2}), \qquad \dots (6.5)$$

$$V_{(2)} = \frac{1}{2} \cdot \int_{1}^{1} F_{x} \left[(v'^{2} + w'^{2}) + S_{0} \cdot v^{2} \right] dx, \quad \dots (6.6)$$

gdzie:

$$S_{0} = \frac{I_{0}}{A} + e_{y} \cdot \beta_{1} + e_{z} \cdot \beta_{2}$$

$$\beta_{1} = \frac{1}{I_{y}} \left(\int z^{3} dA + \int y^{2} z dA \right) - 2z_{0}$$

$$A \qquad A$$

$$\nabla_{(3)} = -\frac{1}{2} Q_{y1} \int w'' \vartheta x dx - \frac{1}{2} Q_{y2} \cdot \int w'' \cdot \vartheta \cdot (1 - x) dx \dots (6,7)$$

$$\nabla_{(4)} = -\frac{1}{2} Q_{z1} \int_{1} v'' \sqrt[3]{2} \cdot x dx - \frac{1}{2} Q_{z2} \int_{1} v'' \sqrt[3]{(1-x)} dx \dots (6.8)$$

$$V_{(5)} = -\frac{1}{2} M_{y1} \int v'' \sqrt{3} dx + \frac{1}{2} M_{y2} \int v'' \sqrt{3} dx \qquad \dots (6.9)$$

$$V_{(6)} = -\frac{1}{2} M_{z1} \int w'' \vartheta \, dx + \frac{1}{2} M_{z2} \cdot \int w'' \vartheta \, dx \qquad \dots (6.10)$$

$$V(7) = -\frac{1}{2} q_{z} \left[\int_{1} v'' \sqrt[3]{x^{2} + (1 - x)^{2}} dx \right] - \frac{1}{2} q_{z} a_{z} \int_{1} \sqrt[3]{2} dx \qquad \dots (6.11)$$

$$V_{(8)} = -\frac{1}{2} M_{x} \int_{1}^{1} (v' w'' - w' v'') dx \qquad \dots (6.12)$$

Wartość $V_{(1)}$ przedstawia pracę obciążeń zewnętrznych na odpowiadających im przemieszczeniach zaś wartości $V_{(2)}, \ldots V_{(8)}$ zmiany energii potecjonalnej zginania i skręcania wywołane uogólnionymi siłami węzłowymi (tj. przyłożonymi w węzłach elementu skończonego). Tak przyjęty model obliczeniowy dźwigara pozwala uwzględnić znacznie bardziej złożony stan obciążenia konstrukcji niż ten jaki występuje w czasie montażu. Zgodnie z określonymi wcześniej założeniami w analizie zjawiska przyjmuje się, że:





Rys. 6.1. Schemat wykorzystanego w analizie elementu skończonego.

W przyjętym elemencie skończonym uwzględniane są następujące uogólnione przemieszczenia węzłowe:

$$\left[\begin{array}{c} u \\ v \\ \end{array} \right] - skrócenie dźwigara, \\ v \\ - przemieszczenie boczne, \\ \Theta \\ - kąt bocznego wygięcia, \\ w \\ - przemieszczenie pionowe, \\ \Psi \\ - kąt pionowego ugięcia, \\ \vartheta \\ - kąt skręcenia przekroju, \\ \Phi \\ - kąt spaczenia, \\ \end{array} \right]$$

gdzie:

$$\varphi = -\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}, \quad \Psi = -\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}x}, \quad \Phi = -\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}.$$

-36-
W MES wykorzystuje się fakt, iż pierwsza wariacja całkowitej energii SW = 0, z czego dalej wyprowadza się dla stanu krytycznego równanie:

$$[K_{\rm s}]\{\Delta\} + \lambda [K_{\rm g}]\{\Delta\} = 0, \qquad \dots (6.14)$$

które prowadzi do warunku:

$$[K_{s}] + \lambda [K_{G}] = 0,$$
 ...(6.15)

co można przekształcić do postaci:

$$\frac{1}{\lambda} \left\{ \Delta \right\} = - \left[K_{\rm g} \right] \cdot \left[K_{\rm g} \right] \left\{ \Delta \right\} \qquad \dots \qquad (6.16)$$

Iteracyjna metoda obliczeń zastosowana w pracy wykorzystuje dla wyznaczania wartości parametru obciążenia λ , równanie (6.16).

6.2.Algorytm obliczeń

W prezentowanej analizie wykonuje się obliczenia, których celem jest wyznaczenie krytycznej wartości ciężaru własnego unoszonego dźwigara. Wyznaczona wartość pozwoli na przeprowadzenie sprawdzenia bezpieczeństwa zaprojektowanego sposobu podwieszenia i procesu transportu pionowego. Tok obliczeń przedstawiono dzieląc go na trzy etapy:

Etap I. Obliczenia danych początkowych

Przed przystąpieniem do analizy stateczności należy wyznaczyć charakterystyki geometryczne przekroju dźwigara i podzielić go myślowo na n elementów skończonych tak, by w miejscach zawieszenia wypadły węzły podziału. Następnie należy dokonać identyfikacji zastosowanych zawiesi w sposób opisany w rozdziale 5. Ponadto w (n + 1) węzłach powstałych w wyniku podziału dźwigara, należy wyznaczyć momenty zginające, siły tnące i siły osiowe. Dla każdego elementu należy określić ciężar jednostki długości danego elementu.

Wymienione wyżej "przygotowanie danych" można łatwo zaprogramować np. w MES ale można również wykorzystać do tego celu użytkowane w biurach projektowych programy obliczeniowe dla komputerów, służące analizie konstrukcji cienkościennych. Programy takie z reguły wyznaczają zarówno charakterystyki geometryczne jak i siły zewnętrzne w zadanych przekrojach. <u>Etap II.</u> Wyznaczenie macierzy sztywności sprężystej [K_g] i macierzy sztywności geometrycznej [K_g]

Jak wiadomo [37], macierz $[K_s]$ wyraża energię odkształcenia konstrukcji odpowiednio do przyjętego wektora parametrów węzłowych, zaś macierz $[K_G]$ wyraża pracę sił węzłowych na uogólnionych przemieszczeniach, którymi są w proponowanej wersji MES parametry węzłowe (5.1).

Wykorzystany (w prezentowanym sposobie obliczeń) element skończony wymaga użycia opracowanych przez jego autorów [4] następujących postaci lokalnych macierzy [k_s] i [k_G] :



-38-

w której:

$$a = \frac{A \cdot E}{I}, \quad b = \frac{12 \ E \ I_{z}}{I^{2}}, \quad c = -\frac{G \ E \ I_{z}}{I^{2}}, \quad d = \frac{4 \ E \ I_{z}}{I},$$

$$e = \frac{2 \ E \ I_{z}}{I}, \quad f = \frac{12 \ E \ I_{y}}{I^{2}}, \quad g = -\frac{6 \ E \ I_{y}}{I^{2}}, \quad h = \frac{4 \ E \ I_{y}}{I},$$

$$i = \frac{2 \ E \ I_{y}}{I}, \quad j = \frac{12 \ G \ I_{s}}{10 \cdot 1} + \frac{12 \ E \ I_{\omega}}{I^{2}}, \quad k = \frac{-G \ I_{s}}{10} - \frac{6 \ E \ I_{\omega}}{I^{2}},$$

$$k = \frac{4 \ G \ I_{s}}{I} + \frac{4 \ E \ I_{\omega}}{I}, \quad m = -\frac{G \ I_{s}}{30} + \frac{2 \ E \ I_{\omega}}{I}$$

oraz



w której:

$$a = \frac{12 F_x}{10 1}, b = -\frac{F_x}{10}, c = \frac{4 F_x 1}{30}, d = -\frac{F_x 1}{30},$$

$$e = \frac{12 F_x S_0}{10 1} - \frac{13 q_z a_z 1}{35}, f = -\frac{F_x S_0}{10} + \frac{11 q_z a_z 1^2}{210},$$

$$g = \frac{4 F_x S_0 1}{30} - \frac{q_z a_z 1^3}{105}, h = \frac{12 F_x S_0}{10 1} - \frac{9 q_z a_z 1}{70},$$

-- 39--

$$\begin{split} \mathbf{i} &= -\frac{\mathbf{F}_{\mathbf{x}} \, \mathbf{S}_{\mathbf{0}}}{\mathbf{10}} - \frac{\mathbf{13} \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{a}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2}{420} , \quad \mathbf{j} &= -\frac{\mathbf{F}_{\mathbf{x}} \, \mathbf{S}_{\mathbf{0}} \, \mathbf{1}}{\mathbf{50}} + \frac{\mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{a}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^3}{\mathbf{140}} , \\ \mathbf{A} &= 0,6 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}})/1 + 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} + 0,55 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} + 33 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}/140 , \\ \mathbf{B} &= -0,55 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{z}}) - 0,01 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1} - 0,45 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} - \mathbf{169} \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/840 , \\ \mathbf{C} &= -0,05 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{z}}) - 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} - 5 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/280 , \\ \mathbf{D} &= (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) \, \mathbf{1}/15 + \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1}^2/60 + 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1}^2 + 9 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^3/420 , \\ \mathbf{E} &= -0.6 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}})/1 - 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} - 0,15 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} - 29 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/840 , \\ \mathbf{F} &= 0,05 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) + 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1} - 0,1 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} - 29 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/840 , \\ \mathbf{H} &= - \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) \, \mathbf{1}/60 - \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1}^2/60 - 3 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^3/440 , \\ \mathbf{I} &= - 0,6 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) \, \mathbf{1}/60 - \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1}^2/60 - 3 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^3/840 , \\ \mathbf{I} &= - 0,6 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}})/1 - 0,55 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} - 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} + 29 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/840 , \\ \mathbf{K} &= 0,6 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1}} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}})/1 + 0,55 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1} - 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1} + 29 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/840 , \\ \mathbf{K} &= 0,5 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) - 0,45 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1} + 0,\mathbf{1}\mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/840 , \\ \mathbf{M} &= - 0,55 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) - 0,05 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}\mathbf{1}} \, \mathbf{1} - 5 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^2/280 , \\ \mathbf{N} &= - (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) \, \mathbf{1}/60 - \mathbf{Q}_{\mathbf{z}\mathbf{2}} \, \mathbf{1}^2/60 - 3 \, \mathbf{q}_{\mathbf{z}} \, \mathbf{1}^3/640 , \\ \mathbf{0} &= 0,05 \, (\mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{1} - \mathbf{M}_{\mathbf{y}\mathbf{2}}) \, \mathbf{1$$

z oraz z na y w wyrażeniach na A, B, ..., P.

Aby skonstruować globalne macierze $[K_s]$ i $[K_G]$ buduje się macierze przyporządkowania $[r]_i$ dla każdego i-tego (i = 1,...n) elementu podziału dźwigara:



w których k = 7 (i - 1) + 1.

Zbudować należy ponadto macierz warunków brzegowych [C]. Jest to odpowiednio przekształcona macierz jednostkowa, której stopień jest równy sumarycznej liczbie stopni swobody wszystkich węzłów podziału, tj. (n + 1) 7. W macierzy tej, dla uzyskania macierzy [C], usuwa się te wiersze, które odpowiadają całkowicie odebranym podporowym stopniom swobody. Globalne macierze [K_s] i [K_G] buduje się zgodnie z następującymi równaniami:

$$[K_{g}] = [C]^{T} \left(\sum_{i=1}^{n} [r]_{i}^{T} [k_{g}]_{i} [r]_{i}\right) [C], \dots (6.17)$$
$$[K_{g}] = [C]^{T} \left(\sum_{i=1}^{n} [r]_{i}^{T} [k_{g}]_{i} [r]_{i}\right) [C], \dots (6.18)$$

Etap III. Iteracyjna procedura wyznaczania krytycznej wartości parametru obciążenia

mill . From

Zagadnienie wyszukiwania najmniejszej, tj. krytycznej wartości parametru obciążenia można sprowadzić do rozwiązania równania na wartości własne:

$$[K_{g}] \{\Delta\} + \lambda [K_{G}] \{\Delta\} = 0, \qquad \dots (6.19)$$

które po przekształceniu ma postać równania (6.16).

Spośród wielu metod wyznaczania wartości i wektorów własnych, proponuje się wykorzystać metodę zwaną w algebrze algorytmem QR. Wcześniej jednak należy zgodnie z równaniem (6.16) wyznaczyć macierz $[A] = -[K_s]^{-1} [K_G]$ i przekształcić ją do postaci tzw. górnej macierzy Hessenberga. Przekształcenie to, w stpsunkowo prosty sposób, można wykonać za pomocą metody Houscholdera. Metoda QR pozwala wyznaczyć całe widmo wartości własnych, z którego wybiera się najmniejszą wartość parametrų λ , a następnie wybiera się odpowiadający jej wektor własny. Wektor ten przedstawia wartości globalnego wektora parametrów węzłowych, a więc uogólnione przemieszczenia wszystkich węzłów podziału dźwigara, obliczone z dokładnością do stałej. Jednak takie jednokrotne wyznaczenie najmniejszej wartości λ i interpretacja jej jako wartości krytycznej jest, jak wykazały przeprowadzone obliczenia, obarczone dość dużym błędem. Zauważyć należy bowiem, że w stanie krytycznym, tj. gdy $\lambda = \lambda_{kr}$, krytyczna wartość ciężaru dźwigara wyraża się zależnością $q_{kr} = \lambda_{kr} \cdot g_0$, gdzie g_0 jest początkową wartość obciążenia, przyjętą do analizy. Zaleca się, jako go przyjmować rzeczywisty ciężar własny jednostki długości

odpowiada-

wywołane ciężarem o wartości go a nie gkr. Biorąc więc pod uwagę specyficzną zależność stałych sprężynowania podpór od cieżaru opisaną równaniem (5.2) opracowano procedure iteracyjna przedstawioną schematycznie na rys.6.2.

W wyniku pierwszego rozwiązania równania (6.19) otrzymuje się $g_1^{kr} = \lambda_1^{kr} \cdot g_0 \cdot Wartość g_1^{kr} odpowiada obrotowej po$ datności podparcia charakteryzowanej przez stałą sprężynowas zależną od wartości g, czyli s = $s(g_0)$. Dla ponia nownego wyznaczenia rozwiązania równania (6.19) rozpoczyna sję drugi krok procedury (i = 2) i przyjmuje się g_1^{kr} jako początkową wartość obciążenia. W ten sposób uzyskuje się wartość krytyczną $g_2^{kr} = \lambda_2^{kr} \cdot g_1^{kr}$, która odpowiada stałej sprężynowania $s_1 = s(g_1^{kr})$. Postępowanie kontynuuje się w podobny sposób aż do takiego (i + 1)-go kroku, w którym spełniona jest nierówność:

$$\frac{g_{i}^{kr} - g_{i-1}^{kr}}{kr} \leqslant \varepsilon$$

gdzie E jest ustaloną dokładnością obliczeń. Przedstawiona procedura wykorzystując liniowo sformułowany problem wartości własnych, w stosunkowo szybki (dla maszyny cyfrowej) sposób pozwala wyznaczyć poszukiwaną wartość krytyczna.



Rys. 6.2. Schemat procedury iteracyjnej z ilustracją zbieżności na wykresie.

milli

6.3. Schemat blokowy obliczeń numerycznych

Schemat blokowy obliczeń numerycznych odpowiadający opisanemu algorytmowi przedstawiono na rys.6'.3. Schemat ten odpowiada opracowanemu programowi (w języku FORTRAN), którego tekst przedstawiono w Załączniku.

6.4. Program dla maszyny cyfrowej

Przedstawiony algorytm obliczeń wymaga wykonania wielu obliczeń, dla wykonania których konieczne jest zastosowanie komputera. Odpowiednio do przedstawionego algorytmu obliczeń opracowano program #LIFT dla maszyny cyfrowej ODRA 1305. Językiem programu jest Fortran 1900 [58]. Pełny tekst programu oraz przykład redakcji wyników zamieszczono w Załączniku do niniejszej pracy. Poniżej, na rys.6.3, przedstawiono schemat blokowy tego programu.

6.5. Dokładność obliczeń

Przedstawiony sposób obliczeń oparty jest na MES, która jako metoda energetyczna ma charakter przybliżony. W celu kompleksowej oceny dokładności postulowanej analizy przeprowadzono badania eksperymentalne opisane w rozdziale 8 niniejszej pracy. W pewnym zaś stopniu rozważania analityczne pozwalają również wnioskować o dużej dokładności opisanych obliczeń. Jak już bowiem wspomniano, w pracy wykorzystuje się model elementu skończonego opracowany przez Baursoum'a i Gallagher'a. Autorzy ci, przedstawili w pracy [4]analizę dokładności obliczeń prowadzonych za pomocą MES z wykorzysta-

-45-





Rys. 6.3 Schemat blokowy programu #LIFT.

niem do belek swobodnie podpartych bądź całkowicie utwierdzonych, których przekrój poprzeczny jest stały na długości, przy podziale modelu obliczeniowego zaledwie na 3 elementy skończone uzyskuje się błąd obliczeń mniejszy niż 1 %.

Opisana w pracy metoda może być, po przeprowadzeniu niezbędnych, stosunkowo prostych modyfikacji wykorzystania także do prostych zadań, np. do analizy stateczności belek opartych na podporach stałych (swobodnie podpartych, całkowicie utwierdzonych itd/). Do oszacowania poprawności algorytmu przeprowadzono więc również szereg obliczeń kilkunastu tak właśnie podpartych belek. Te same belki poddano nastepnie analizie za pomoca metody przeznaczonej dla takich belek, proponowane przez Nethercot'a i Rockey'a w pracy [56]. Autorzy ci szacuja, iż błąd ich metody nie przekracza 5 %. W celu obliczeń porównawczych napisano program dla minikomputera IMP-85, oparty na wspomnianej metodzie. Wyniki obliczeń wykonanych za pomoca tego programu oraz za pomocą sposobu przedstawionego w niniejszej pracy różniły się średnio o około 4 %. Dodać jednak należy, że metoda Nethercot'a i Rockey'a przeznaczona jest dla prostych belek jednoprzesłowych i ma charakter szacunkowy.

7. NUMERYCZNA ANALIZA BADANEGO PROBLEMU

W celu możliwie pełnej identyfikacji natury rozważanego zjawiska przeprowadzono, za pomocą programu #LIFT, wiele serii obliczeń dźwigarów zawieszonych w różny sposób. Należy zaznaczyć, że nie powiodły się próby przeprowadzenia analizy numerycznej wykorzystującej parametryzację charakterystyk geometrycznych rozważanych dźwigarów. Nie udało się bowiem ustalić takich bezwymiarowych parametrów charakteryzujących po pierwsze - cechy geometrii dźwigara i po drugie sposób zawieszenia, by modelowane były wszystkie czynniki istotnie wpływające na badaną wartość krytyczną. Do analizy przyjęto zatem dwa stalowe dźwigary (I i II) o przekrojach poprzecznych pokazanych na rys.7.1. Na ich przykładzie w dalszej części rozdziału pokazano wpływ najważniejszych parametrów procesu podnoszenia na wartość krytyczną gkr. Obliczenia wykonano stosując myślowy podział każdego dźwigara na 4 elementy skończone oraz przyjmując dokładność ε równa około 0.02.

7.1. Wysokość obejm montażowych

Odległość punktu zaczepienia haka liny zawiesia montażowego od środka ciężkości przekroju podp**or**owego ma tak duży wpływ na wartość g_{kr}, że w kilku pracach z podobnego zakresu np.[8,15](por.rozdział 4) przyjmowano nawet liniową zależność g_{kr} od e. Przeprowadzone obecnie, za pomocą programu #LIFT, obliczenia kilkudziesięciu różnych dźwiga-

-49-



Rys. 7.1. Przekroje poprzeczne dźwigarów przyjętych do analizy numerycznej.

rów cienkościennych wskazują na nieliniowy charakter wspomnianej zależności. Z drugiej zaś strony, ustalenie matematycznej zależności zachodzącej pomiędzy g_{kr} oraz e wymagałaby podziału rozważanych dźwigarów na bardzo dużą liczbę klas dźwigarów o zbliżonych niektórych cechach geometrycznych. Taki sposób postępowania prowadziłby do budowy wielu nomogramów i byłby przydatny do katalogowego sposobu projektowania procesu montażu.

W niniejszej pracy, co już było podkreślone, postuluje się dokładniejszy, numeryczny sposób wyznaczania wartości krytycznej g_{kr}, pozwalający na całkowitą dowolność geometrii dźwigaru. Dla orientacji zaś na temat wpływu, jaki

-50-

wartość e wywiera na wartość krytyczną g_{kr} , przeprowadzono obliczenia dla dźwigarów I i II. Wyznaczano mianowicie ich ciężar krytyczny g_{kr} w zależności od zmieniającej się wartości e. Obliczenia wykonano dla czterech różnych lokalizacji przekrojów podporowych (c=0; 2,4; 4,8; 6 m, gdzie c oznacza odległość przekroju podporowego od końca dźwigara). Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 7.2 i 7.3. Wskazują one na to, że wartości krytyczne ciężaru dźwigarów zawieszonych poprzez coraz to wyższe obejmy zbliżają się asymptotycznie do wartości g_{kr}^{∞} , która odpowiada widełkowemu [43] podparciu dźwigara w miejscach obejm. Zważywszy zaś na postać wzoru (5.2) można teoretycznie przyjąć, że przypadek nieskończenie dużej wartości e jest równoważny oparciu na podporze stałej, gdzie skrępowany jest obrót wokół osi podłużnej.

Przeprowadzone obliczenia pokazują, że w przypadku zawieszenia dźwigara na końcach (tj. gdy c = 0) wartość krytyczna nie różni się bardziej niż o 10 % od wartości krytyczgkr nej dźwigara gdy jest on oparty w sposób widełkowy dla e > 6 · i, gdzie i, jest promieniem bezwładności względem osi y. Wraz ze wzrostem ilorazu $\frac{c}{1}$ tj. w miarę jak przekroje podporowe zbliżają się do środka dźwigara, wspomniana zbież $g_{kr} \longrightarrow g_{kr}^{\infty}$ występuje dla coraz mniejszych wartości θ. ność Z praktycznego punktu widzenia są one prawie zawsze jednak zbyt duże. W praktyce bowiem wysokość obejm montażowych czyli jest znacznie mniejsza od 6 · iy · Bezpietakże wartość e czeństwo operacji transportu pionowego rozważanych elementów wymaga zatem uwzględnienia wpływu wartości e , charakteryzującej sprężysty sposób oddziaływania lin zawiesia, na



na wartość krytyczną g_{kr} na przykładzie dźwigara I.



wartość krytyczną g_{kr} . Z rys.7.2 i 7.3 łatwo odczytać jak duży błąd jest popełniany gdy belkę zawieszoną traktuje się w obliczeniach podobnie jak opartą na podporach stałych (tj. bez możliwości obrotu wokół osi podłużnej). Dla najczęściej spotykanych w praktyce lokalizacji przekrojów podporowych, tj. gdy $c = (0 \div 0,2) \cdot 1$, na podstawie przeprowadzonej analizy oraz prezentowanych przykładowych wyników można sformułować następującą zależność:

$$g_{krr} = (0,60 \div 0,95) \cdot g_{krr}^{\infty} \dots (7.1)$$

Dolna granica opisanego zakresu dotyczy przypadków zawieszenia na końcach (c = 0) oraz zaczepienia lin np. za górną półką dźwigara. Górna granica jest odpowiednia dla przypadków względnie dużych wartości e bądź $\frac{c}{l}$. Zależność (7.1) świadczy o tym, że pominięcie wpływu specyficznych warunków brzegowych dźwigara zawieszonego na linach może być przyczyną utraty stateczności i w konsekwencji zniszczenia elementu podczas montażu.

W uzasadnionych wypadkach, stosując wysokie obejmy można znacznie podwyższyć poziom naprężeń krytycznych podnoszonego dźwigara. Wymaga to jednak stosowania żurawia o zwiększonej wysokości podnoszenia. Przeprowadzone obliczenia pokazały, co widać także na rys.7.2 i rys.7.3, że krzywe wyznaczane przez wyniki obliczeń $/g_{kr} = f$ (e)/ zbliżone są swym kształtem do hiperboli. Mają one zawsze jedną asymptotę, którą jest prosta o równaniu $g_{kr} = g_{kr}^{\infty}$, zaś druga ich gałąź bierze początek w początku układu współrzędnych. Oznacza to, że dźwigar zawieszony - w idealnych warunkach - za środek ciężkości przekroju podporowego znajduje się w stanie równowagi chwiejnej i wystarczy nieskończenie małe skręcenie by uległ on zwichrzeniu. Warto też zauważyć, że kształt wspomnianych krzywych charakteryzuje się wyraźnie zaznaczonymi "ramionami", w wypadku gdy c $\geq 0,2$ ·l. Ramiona te tworzą w przybliżeniu kąt nieznacznie rozwarty, co oznacza, że w takich wypadkach wraz ze wzrostem e następuje szybka zbieżność $g_{kr} \rightarrow g_{kr}^{\infty}$. Spostrzeżenia te oparto nie tylko na analizie dźwigarów I i II ale na opliczeniach innych 57 przykładowych dźwigarów.

7.2. Lokalizacja miejsc zawieszenia

Przy wyborze właściwego miejsca zaczepienia lin zawiesia montażowego na długości dźwigara dąży się przede wszystkim do osiągniecia możliwie najmniejszych odkształceń podnoszonego elementu. W pracy [12] proponuje się takie podwieszanie dźwigarów, by jednakowe były wartości bezwględne momentu dodatniego (w przekroju środkowym) i ujemnego (w przekrojach podporowych). Przy tym założeniu wyprowadza się zależność c = 0.207 · 1 . która opisuje sposób rozmieszczenia przekrojów podporowych dźwigara zawieszonego na linach pionowych. Lokalizacje przekrojów podporowych cienkościennej belki stalowej zawieszonej na linach pionowych badano także w pracy [59] · Przyjmując jako kryterium maksymalną wartość ba-Ekr danej belki, wyprowadzono tam następujący wzór na optymalną lokalizację miejsc zawieszenia: $c = 0,22 \cdot 1$.

W praktyce jednak nie zawsze można element zawiesić w miejscach najbardziej właściwych z wytrzymałościowego punktu

-55-

widzenia. W przekrojach podporowych winny być zastosowane żebra usztywniające, rozstaw tych przekrojów bywa niekiedy ograniczony długością trawersu, a zdarza się i tak, że ograniczenia technologiczne wyznaczają odległą od optymalnej lokalizację miejsc podwieszenia. W takich wypadkach oprócz oczywistego sprawdzenia warunków wytrzymałości naloży określić wartość g_{kr} . Proponowana w niniejszej pracy metoda obliczeń pozwala to zrobić stosunkowo szybko dla dowolnego kąta rozwarcia lin zawiesia. Przeprowadzone obliczenia dla róźnych miejsc zawieszenia wskazują, że największe (mające znaczenie praktyczne) wartości g_{kr} osiągane są w zależności od kształtu przekroju poprzecznego i kąta nachylenia lin , oraz od wartości e , gdy c = (0,19 ÷ 0,23)·l.

Na rys.7.4 i rys.7.5 przedstawiono wyniki obliczeń g_{kr} wykonanych dla dźwigarów I i II, przy zmiennej lokalizacji przekrojów podporowych. Na pierwszym z tych rysunków pokazano wyniki dla przypadków gdy e = 0.5 m i e = 0.9 m. Kształt krzywych, jakie wyznaczają wyniki przy różnych wartościach e jest podobny, jedynie przesunięty ku górze o wartość wynikającą z rozważań przeprowadzonych w p.7.1. Górną granicę tego przesunięcia wyznaczają wartości g_{kr}^{∞} , które dla poszczególnych wartości c oznaczono na obydwu rysunkach.

Na prezentowanych rysunkach widać występujące także w wielu innych analizowanych przykładach, wyraźnie zaznaczające się nagłe przegięcie krzywej ku górze. Występuje ono dla $c = (0,19 \div 0,21) \cdot 1$. Jest to przedział, w którym następuje jakościowa zmiana formy zwichrzenia. Kiedy bowiem dźwigar jest zawieszony tak, iż miejsca zawieszenia są znacznie oddalone

C		0	1,2	2,4	3,4	4,8	5,2	6]
9.	e=0,5	1,051	1,677	3,046	5,676	2.034	37,08	63,71	x x
	e=0,9	1,283	2,040	3,559	6,398	21,19	38,98	77,55	••





-57-



Rys. 7.5. Wyniki obliczeń pokazujących na przykładzie dźwigaru II zależność $q_{kr} = f$ (c).

od końców, tj. c > $(0,19 \div 0,21) \cdot 1$, wówczas największy wpływ na zwichrzenie mają ujemne momenty zginające w przekrojach podporowych i utrata płaskiej postaci zginania występuje w obszarze wsporników powstałych w wyniku rozważanego sposobu zawieszenia. Wartości krytyczne dla takiego "wspornikowego" zwichrzenia są jak widać z prezentowanych rysunków znacznie większe niż w przypadku gdy c < $(0,19 \div 0,21) \cdot 1$ tj. gdy o zwichrzeniu decydują momenty zginające występujące w przęśle pomiędzy punktami zawieszenia. Jednak w większości wypadków mających znaczenie praktyczne zawieszanie dźwigarów w dużej odległości od końców jest niemożliwe z uwagi na przekroczenie warunków wytrzymałości w przekrojach podporowych.

Proponowana w niniejszej pracy metoda obliczeń pozwala przeprowadzić w bardzo krótkim czasie wariantową analizę stateczności dźwigara zawieszonego w dwóch lub więcej dowolnie wybranych przekrojach. Uzyskany w wyniku obliczeń wektor własny zagadnienia stateczności (por. Załącznik), który zawiera unormowane do jedności przemieszczenia krytyczne wyznaczone z dokładnością do stałej pozwala identyfikować postać zwichrzenia odpowiadającą przyjętej lokalizacji miejsc zamocowania lin.

7.3. Kąt rozstawu lin zawiesia montażowego

Kąt∝ (rys.5.2), jaki zawarty jest pomiędzy liniami zawiesi dwucięgnowych ma podobny wpływ na stateczność dźwigara zawieszonego jak odpowiednio nachylone do poziomu podpory stałe na stateczność belki na nich opartej. Łatwa do wyznaczenia w elementarny sposób siła ściskająca, której wartość

-59-

rośnie wraz ze wzrostem kąta ∞ , powoduje zmniejszenie wartości krytycznej g_{kr}. Dodatkowym czynnikiem zmniejszającym wartości g_{kr} są momenty zginające przyłożone w przekrojach podporowych równe iloczynowi poziomej składowej naciągu lin i wartości e . Zmienność funkcji g_{kr} = f (∞) jest dla belek zawieszonych podobna jak w przypadku ich oparcia na odpowiednio ukośnych podporach stałych, jedynie zmiena wartości e powoduje szybsze zmniejszanie wartości g_{kr} w istotny sposób jednak zależne od lokalizacji podpór tj. od wartości $\frac{c}{L}$. Wraz ze wzrostem ilorazu $\frac{c}{L}$ tempo wzrostu g_{kr} przy rosnących kątach ∞ jest coraz wolniejsze wskutek tego, iż coraz krótszy odcinek dźwigara objęty jest działaniem składowej ściskającej.

Opisany wcześniej algorytm obliczeń zakłada możliwość analizy w przypadku dowolnego kąta « . Z uwagi na duże podobieństwo wpływu nachylenia lin do pochylenia podpór stałych nie przeprowadzono obliczeń przykładowych.

7.4. Utrata stateczności dźwigarów o dużej sztywności skrętnej

Przeprowadzona analiza numeryczna pokazała, że zawieszone na linach dźwigary, które charakteryzują się dużą sztywnością skrętną mogą utracić płaską postać zginania poprzez specyficzny dla tego sposobu podparcia obrót całego dźwigara tak jak ciała sztywnego wokół prostej wyznaczonej przez punkty zaczepienia lin do dźwigara. Obrócony w ten sposób dźwigar jest zginany w płaszczyźnie swej mniejszej sztywności giętnej co może spowodować jego zniszczenie. Dla ilustracji tego zjawiska przeprowadzono za pomocą programu # LIFT sześć serii obliczeń. W pierwszej z nich wyznaczono krytyczne obroty węzłów modelu obliczeniowego dźwigara II, obliczone z dokładnością do stałej. W obliczeniach przyjęto c = 0 oraz e = 1,68 m. W następnych seriach obliczano podobne wielkości dla powiększanych w poszczególnych seriach wartości I_s analizowanego dźwicora. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 7.1 zaś na rys.7.6 pokazano lokalizację węzłów podziału modelu obliczeniowego badanego dźwigara na elementy skończone.



TABELA 7.1.

Nr serii obli- czeń	I _s [m ⁴]	Kąt skrę przeczne [⁰] – z	g _{kr}				
		węzeł 1	węzeł 2	węz Jł 3	węzeł 4	węzeł 5	L J
1	0,00001	0,3110	0,7958	1,000	0,7958	0,3110	4,901
2	0,0001	0,4576	0,8366	1,000	0,8366	0,4576	7,880
3	0,0003	0,4623	0,6714	0,7635	0,6714	0,4623	10,78
4	0,001	0,4651	0,5479	0,5848	0,5479	0,4651	13,68
5	0,01	0,4521	0,4623	0,4668	0,4623	0,4521	16,69
6	1	0,4532	0,4532	0,4532	0,4532	0,4532	17,12

Przedstawione wyniki pokazują jak wraz ze wzrostem I_s maleje różnica pomiędzy kątami skręcenia poszczególnych przekrojów. Przypadek badany w serii nr 6, tj. dla I_s = 1 ma charakter jedynie teoretyczny ale pozwala wyznaczyć graniczny kąt skręcenia, jednakowy dla całego elementu. Pozostałe serie obliczeń mają sens praktyczny i świadczą o tym, że duża wartość I_s nie wyklucza niebezpieczeństwa utraty płaskiej postaci zginania dźwigara zawieszonego na linach.

Przedstawiony w niniejszej pracy sposób obliczeń pozwala dokładnie identyfikować względne skręcenie poszczególnych przekrojów poprzecznych dźwigara a zatem i formę utraty stateczności, gdyż informacje te zawiera wyznaczony wektor własny zagadnienia stateczności.

7.5. Podsumowanie analizy numerycznej

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły scharakteryzować wpływ najważniejszych czynników na badaną wartość krytyczną g_{kr} . Prezentowane wynik' świadczą o tym, że wartość g_{kr} jest funkcją nie tylko geometrii dźwigara ale również lokalizacji miejsc zawieszenia, wysokość obejm montażowych i kąta nachylenia lin. W pracy, dla większej jasności, pokazano wpływ pojedynczo wydzielonych, określonych czynników z ustalonymi wartościami pozostałych, na wartość g_{kr} . Wyniki obliczeń, które w rozdziale tym zamieszczono oraz te, których tutaj nie przedstawiono, a które prowadzone były jako testy budowanego programu świadczą, iż wpływ wspomnianych czynników ma duże znaczenie praktyczne. Różnice pomiędzy war-

-62-

tościami g_{kr} i g_{kr}^{∞} są tak duże (por. wzór 7.1), iż pominięcie specyfiki zachowania dźwigara zawieszonego jest niedopuszczalne z punktu widzenia bezpieczeństwa montażu. Należy ponadto zauważyć, że często docelowe oparcie montowanych dźwigarów charakteryzuje się mniejszą liczbą stopni swobody niż podparcie widełkowe. Często bowiem konstrukcja obejm montażowych jest taka, że przekroje podporowe nie mają możliwości deplanacji. Wartość krytyczna z uwagi na zwichrzenie w takich wypadkach jest jeszcze większa niż w przypadku oparcia widełkowego a mimo to z powodu braku dokładniejszych metod przyjmówano ją dotychczas jako miarodajną, także dla tych przejściowych etapów montażu, w których dźwigar jest zawieszony na linach.

W projektowaniu technologii montażu, dla racjonalnego

--63--

określenia tymczasowych usztywnień podnoszonego dźwigara bardzo pomocna jest znajomość możliwej postaci zwichrzenia. W opracowanym programie obliczeń informacje te zawiera wektor własny, którego elementami są uogólnione, krytyczne przemieszczenia węzłowe. Zaprojektowany na jego podstawie np. system tymczasowych ściągów sprężających albo dodatkowych żeber usztywniających może pozwolić na bezpieczne podnoszenie elementu montażowego charakteryzującego się stosunkowo dużą smukłością.

8. EKSPERYMENTALNE BADANIA STATECZNOŚCI DŹWIGARÓW ZAWIESZONYCH

Jak wynika z lektury literatury technicznej na omawiany temat, badania laboratoryjne opisane w pracach [70, 71] były jedynymi badaniami, jakie przeprowadzono w przeszłości dla analizy poruszanego zagadnienia. W badaniach tych rozważano jednak głównie modele dźwigarów wykonane z betonu sprężonego, które obciążano siłą skupioną w środku ich rozpiętości co w znikomym stopniu odpowiadało zachowaniu dźwigara w czasie transportu pionowego, kiedy to jego obciążeniem jest ciężar własny czyli obciążenie rozłożone na długości.

W celu eksperymentalnej weryfikacji metody analitycznej proponowanej w rozdz. 6 przeprowadzono badania doświadczalne, w których podparcie i obciążenia symulowane były odpowiednio do warunków panujących podczas transportu pionowego,

8.1. Opis stanowiska do badań mudelowych

Dla realizacji eksperymentów zaprojektowano i wykonano stanowisko do badań modeli dźwigarów metalowych w warunkach odpowiadających zawieszeniu na linach zawiesia montażowego (rys.8.1). Stanowisko wykonane zostało z walcowanych kształtników stalowych. Oprócz spoin ma też ono połączenia na śruby, by możliwa była zmiana geometrii stanowiska.

Zawieszenie modeli na cienkich (p = 1, 2 mm) linkach stalowych realizowane było poprzez obejmy wykonane z kształtowników aluminiowych (rys.8.2a). Do obejm tych zamocowano



Rys. 8.1. Schemat stanowiska do badań doświadczalnych "skrzydełka" ze sklejki drewnianej, przewidując potrzebę tłumienia niepożądanych drgań, które mogłyby wystąpić w momentach powiększania obciążenia (dosypywanie śrutu ołowianego). Do tłumienia tych drgań przewidzian, naczynia z wodą umieszczane pod obejnami (rys.8.2b).

Dla realizacji obciążenia modelu w sposób symulujący wzrastający ciężar własny, w środowiskach modeli, w linii środków ciężkości nawiercono co kilka cm otwory o średnicy $\emptyset = 1,2$ mm. Przez otwory te przewieszono krótkie, wygięte pręciki stalowe $(\emptyset \ 1)$, do których za pośrednictwem mocnej dratwy szewskiej zawieszone były woreczki z tkaniny, w które wsypano śrut ołowiany (rys.8.3). Na rys.8.4 przedstawiono widok modelu zawieszonego, który jest wyposażony w komplet woreczków obciążających.





Rys.8.2. Konstrukcje obejm wykorzystanych w bedaniach, a) widok ogólny, b) sposób tłumienia drgań modelu.





Rys. 8.3. Schemat i widok sposobu obciążenia modeli.



Rys.8.4. Widok modelu wyposażonego w zestaw woreczków obciążających.

8.2. Badania materiałowe

Modele dźwigarów zostały wykonane z blach ze stopu aluminium PA2. Wartości stałych materiałowych określono na podstawie statycznej próby rozciągania próbek wyciętych z arkuszy blach, z których następnie wykonywano modele. Próby rozciągania przeprowadzono zgodnie z normą PN-80/H-04310. Pomiary odkształceń podłużnych i poprzecznych wykonano za pomocą tensometrów elektronowych o bazie pomiarowej równej 10^{-2} m i współczynniku czułości K = 2,15.

W tabeli 8.1. zestawiono wartości średnie i odchylenia standardowe wymiarów przekroju poprzecznego próbek (a_o - grubość, b_o - szerokość próbki) oraz stałych E i ŷ.

TABELA 8.1.

Lp.	E (a ₀)	S (a _o)	E (b ₀)	S (b ₀)	E (E)	S (E)	$E(\mathbf{a})$	s(v)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	mag.	4776
1.	0,470	0,012	19,65	0,25	76 920	851	0,306	0,009
2.	0,995	0,019	19,90	0,20	77 052	908	0,308	0,011

8.3. Charakterystyka modeli

Przeprowadzono eksperymenty na pięciu modelach wykonanych z blach ze stopu aluminium. Modele miały zarówno stały jak i zmienny na długości przekrój poprzeczny o kształcie dwuteowym (bi- oraz monosymetryczny). Zmiany przekroju poprzecznego osiągane były poprzez zmienny przekrój pasów, środnik bowiem w całości wykonywany był z jednego pasma blachy. W celu wykonania beleczek paski blach klejono za pomocą kleju z żywicy epoksydowej. W środnikach belek, na linii środków ciężkości nawiercono otwory Ø 1,2 dla przewieszenia układu obciążającego. Wymiary poszczególnych belek badanych doświadczalnie przedstawiono na rys.8.5.

8.4. Przebieg eksperymentu

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych przeprowadzono badanie pomocnicze, którego celem było określenie odkształceń blachy środnika w okolicy nawierconego otworu, wywołane obciążeniem przekazywanym na środnik przez wieszak układu obciążającego (rys.8.3.). Badanie wykonano na specjalnie przygotowanych kawałkach blach. Stwierdzono, iż przy obciążeniu



Rys. 8.5. Charakterystyka geometryczna belek aluminiowych badanych doświadczalnie.

nawet dwukrotnie większym od maksymalnego jakie stosowano w badaniach zasadniczych, nawiercony otwór (Ø 1,2 mm) "wydłużył" się o około 0,08 mm, co jest odkształceniem dla badanego zjawiska pomijalnie małym. Wspomniane otwory nawiercane były w odstępach 2 - 3 cm. W przypadku zmiany przekroju poprzecznego zmieniał się także odstęp pomiędzy otworami tak by symulowanie zmiany ciężaru własnego możliwe było przy jednakowym wypełnieniu wszystkich woreczków ze śrutem ołowianym.

Każdy z pięciu przeprowadzonych eksperymentów polegał na określeniu krytycznego z uwagi na zwichrzenie ciężaru własnego belki o ustalonym kształcie i określonym sposobie zawieszenia. Obciążenie belek zwiększano poprzez powiększenie masy ołowiu w poszczególnych woreczkach. Ołów dosypywano porcjami po kilkadziesiąt dekagramów, w sposób zapewniający symetryczny wzrost obciążenia belki. Jedynie podczas dosypywania śrutu w trakcie badań belki nr 1 konieczne było użycie naczyń z wodą do stabilizacji występujących wówczas drgań (rys.8.2b).

W trakcie badań prowadzono stały pomiar ugięć modelu w sąsiedztwie obydwu obejm podporowych oraz w przekroju środkowym. Pomiar ugięć dokonywany był za pomocą czujników zegarowych o zakresie 20 mm i czułości 0,01 mm. Pomiar ten pozwolił na kontrolę równomiernego zwiększania obciążenia a ponadto wskazania czujników służyły do bieżącej kontroli oczekiwanej linii ugięcia belki. W tych samych miejscach przeprowadzono pomiar kąta obrotu modelu wokół osi podłużnej, wykorzystując do tego celu sześć przetworników przemieszczeń liniowych typu PDM (dwa dla pomiaru w jednym przekroju), które pracowały w

11-

układzie transformatora różnicowego. Przetworniki były podłączone do wzmacniacza typu CF500 (prod. Inst. Lotnictwa w Warszawie), który był następnie połączony z woltomierzem cyfrowym typu V540 (6 cyfr). Stopień wzmocnienia sygnałów wejściowych oraz skala woltomierza były tak ustawione by wskazanie woltomierza cyfrowego było wartością pomierzonych przemieszczeń, wyrażoną w mm. Układ ten charakteryzował sie czułością 0,001 mm i dokładmością 0,5 % wartości wskazywanej. Dwa przetworniki, za pomocą których mierzony był kat obrotu środkowego przekroju belki były dodatkowo połączone z dwupisakowym rejestrem graficznym typu TZ4200 (prod. Tesla). Wskazania każdego z tych przetworników wykreślone były na papierze innym kolorem w znacznie zwiekszonej skali, dzieki czemu możliwa była bieżąca kontrola obrotu przekroju środkowego. Możliwość ta pozwoliła nieco wcześniej przewidzieć moment zwichrzenia - widoczne bowiem były wyraźne drgania pisaków. Kąty obrotu trzech wymienionych przekrojów belki wyznaczone były na podstawie pomiaru bocznych przemieszczeń pasów górnego i dolnego. Schemat tego pomiaru przedstawiono na rys.8.6. Na górnej powierzchni pasa górnego oraz na dolnej powierzchni pasa dolnego, w środkowym przekroju badanych belek przyklejone były po trzy tensometry elektrooporowe (rys.8.7). Zastosowano tensometry papierowe typu 10/120 o stałej równej 2,15, które podłączone były do mostka tensometrycznego typu T2 (prod. Polit. Warszawska). Celem pomiaru odkształceń a zatem i określenia naprężeń była przede wszystkim kontrola połączenia pasów ze środnikiem (klejone żywicą epoks.) w trakcie naprężeń panujących w badanych belkach, które zgod-

-72-


Rys. 8.6. Czujniki pomiarowe oraz przemieszczeń bocznych, a)schemat, b)widok.



Rys. 8.7. Rozmieszczenie tensometrów elektronowych na powierzchni półki w środkowym przekroju

Rys. 8.8. Stanowisko badawcze wraz z aparaturą pomiarową



nie z założeniem programu badań winny się mieścić w zakresie sprężystym. Odczyty wszystkich pomiarów dokonywane były każdorazowo po zwiększeniu obciążenia. Moment zwichrzenia belek następował zawsze podczas dosypywania ołowiu. Należy dodać, że zwiększenie obciążenia do poziomu bliskiego teoretycznej wartości krytycznej, realizowano mniejszymi porcjami ołowiu, by jak najdokładniej wyznaczyć eksperymentalną wartość krytyczną. Ogólny widok stanowiska badawczego wraz z aparaturą pomiarową przedstawiono na rys.8.8.

8.5. Wyniki badań

W trakcie badań obciążano belki aż do momentu ich zwichrzenia (rys.8.9), który zawsze występował w zakresie sprężystym. Następnie, na podstawie znajomości masy śrutu zużytej do obciążenia określano krytyczny ciężar własny badanego modelu.



Rys. 8.9. Belka nr 1 po utracie płaskiej postaci zginania.

W przeprowadzonym eksperymencie tensometryczne pomiary odkształceń oraz pomiary ugięć miały charakter pomocniczy. Pomiar odkształceń i wyznaczone z nich naprężenia świadczą o bardzo dobrej pracy klejonego połączenia pasów ze środnikiem podczas eksperymentu. Wyniki pomiarów ugięć w procesie zwiększenia obciążeń były do momentu bliskiego zwichrzeniu zgodne z wartościami teoretycznymi z dokładnością równą średnio około 8 %.

Zasadniczenie znaczenie dla wyznaczenia stanu krytycznego mają wyniki pomiaru kątów obrotu. W każdym z pięciu eksperymentów stwierdzono nagły wzrost kąta obrotu podczas - przewidywanych jako ostatnie i dlatego dokonywanych zmniejszonymi porcjami - etapów zwiększania obciążenia. Następowała wówczas gwałtowna utrata płaskiej postaci zginania belki i jej zniszczenie. Na rysunkach 8.9 ÷ 8.13 przedstawiono w graficznej formie wyniki badań. Każdy z tych pięciu rysunków składa się z dwóch części: "a" i "b".

W części "a", na trzech wykresach przedstawiono wyniki pomiarów kątów obrotu modelu wokół osi podłużnej w zależności od obciążenia, przy którym te kąty pomierzono. Pierwszy wykres dotyczy obrotów stwierdzonych w przekroju środkowym zaś dwa pozostałe – w przekrojach tuż za obejmami podporowymi. Za pomocą metody najmniejszych odchyleń kwadratowych wyznaczono zależności funkcyjne, aproksymujące dyskretne wyniki pomiarów. Najlepsze wyniki uzyskiwano stosując aproksymację zależnością hiperboliczną. Obok wykresów podano postać analityczną hiperboli aproksymującej oraz współczynnik korelacji r charakteryzujący odpowiedniość aproksymacji.

-75-

Rysunki "b" ilustrują wyniki obliczeń wykonanych za pomocą opisanego wcześniej programu #LIFT, w których wyznaczano teoretyczną wartość obciążenia krytycznego g^{teor} danego modelu. Pokazano na nich obliczeniowy schemat podziału modelu na elementy skończone. Dla każdego węzła podano też wektor parametrów węzłowych czyli uogólnione przemieszczenia krytyczne obliczone z dokładnością do stałej. Obok teoretycznej wartości obciążenia krytycznego przedstawiono wykres kolejnych kroków iteracji przeprowadzonej zgodnie z procedurą (rys.6.2) zastosowaną w programie obliczeń.

Pomimo dużej staranności wykonania badanych belek cienkościennych, nie udało się uniknąć nieznacznych niedokładności. Świadczą o nich obroty modeli wokół osi podłużnej, wzrastające wraz ze wzrostem obciążenia. Jednak również w praktyce budowlanej niedokładności wykonania konstrukcji są nieuniknione i dlatego współczesne metody analizy stateczności konstrukcji traktują wyidealizowany przypadek bifurkacji jako graniczną formę utraty stateczności [80].

Prezentując wyniki badań należy przypomnieć, że doświadczenie służyło do weryfikacji proponowanej metody analitycznej a nie do sprawdzenia poprawności obliczeń konkretnego obiektu rzeczywistego. Z tego względu wyniki badań nie są odnoszone ao obiektów o dużych wymiarach. Konstrukcja i geometria badanych belek spełniają założenia postulowanej metody analitycznej a więc również założenia teorii prętów cienkościennych Własowa. Oznacza to, że wyniki badań mogą służyć do sformułowania wniosków na temat weryfikowanej metody bez ich przemnażania przez skale podobieństwa modelowego. Z drugiej strony

-76-

zaś, uwzględniając podobne wartości współczynnika Poissona stali i stopu aluminium oraz ich podobne, w sensie podobieństwa modelowego, zachowanie w zakresie sprężystym, nie ma przeszkód dla określenia kryteriów ścisłego podobieństwa modelowego dla każdej badanej belki [24]. Oznacza to więc, że każdą z tych belek można także uważać za model fizyczny w zmniejszonej skali, a wyniki ich badań możnaby odnieść (po wyznaczeniu wszystkich stałych podobieństwa modelowego) do konstrukcji o rozmiarach stosowanych w praktyce. Jednak dla sprawdzenia poprawności metody nie jest konieczna znajomość stałych takiego podobieństwa gdyż sam fakt istnienia ścisłego podobieństwa znacznie rozszerza obszar weryfikacji.



Rys. 8.9a. Wyniki pomiaru kątów obrotu belki nr 1 wokół osi podłużnej w zależności od obciążenia (komentarz w p.8.5).



tarz w p.8.5).



Rys. 8.10a. Wyniki pomiaru kątów obrotu belki nr 2 wokół osi podłużnej w zależności od obciążenia (komentarz w p.8.5).



mentarz \mathbb{N} p.8.5)



Rys. 8.11a. Wyniki pomiaru kątów obrotu belki nr 3 wokół osi podłużnej w zależności od obciążenia (komentarz w p.8.5).



-83-

mentarz V

p.8.5).





montarz \leq

p.8.5).



w p.8.5).



p.8.5).

\$

-87-

Wartości krytyczne (doświadczalne i obliczeniowe) ciężaru własnego belek nr 3 i nr 4 odnoszą się do ich części skrajnych. Belki te (rys.8.5) mają zmienny przekrój poprzeczny. Odpowiednie wartości dla części środkowych są większe proporcjonalnie do wzrostu powierzchni przekroju poprzecznego części środkowych.

8.6. Podsumowanie badań doświadczalnych

Wyniki pomiaru kątów obrotu 🔊 przekrojów przypodporowych przy wzrastającym obciążeniu g wyznaczają hiperbolę o równaniu

$$N = c_1 + \frac{c_2}{g} (8.1)$$

Wartość c₁ (rzędna asymptoty) można uważać za doświadczalnie wyznaczony kąt obrotu 🕅 podpór (por. rys.5.5) w stanie krytycznym.

Podobnie kąty obrotu 🕉 przekroju środkowego pomierzone przy wzrastającym obciążeniu g wyznaczają hiperbolę o równaniu

$$g = c_3 + \frac{c_4}{v}, \quad ...(8.2)$$

w którym wartość c₃ jest równą bądź bardzo bliska wartości krytycznej g_{kr}, wyznaczonej na podstawie ważenia obciążenia, przy którym nastąpiło zwichrzenie.

W przeprowadzonych badaniach, w żadnym przypadku nie powstała antysymetryczna postać zwichrzenia, co dodatkowo potwierdza tezę sformułowaną w pracy [81] mówiącą, iż postać taka jest możliwa jedynie wtedy gdy punkty zawieszenia są nieznacznie od siebie oddalone. Przypadek taki w praktyce montażu konstrukcji nie ma zastosowania.

Porównując wyniki eksperymentu z rezultatami obliczeń numerycznych należy przede wszystkim zestawić obliczeniowe i doświadczalne wartości krytyczne ciężaru własnego badanych belek zawieszonych. Ze względów poznawczych przeprowadzono także obliczenia badanych modeli przy założeniu skrępowanego obrotu podpór czyli w przypadku oparcia na podporach stałych oraz obliczenia przy założeniu skrępowanej deplanacji w przekrojach opartych na podporach stałych. Wyniki eksperymentu i wspomnianych obliczeń zestawiono w tabeli 8.2. Porównanie wartości zawartych w wierszach 1 i 3 tej tabeli oraz dla modelu nr 2 w wierszach 2 i 4 świadczy o dobrej zgodności teorii z weryfikującym eksperymentem.

Różnice pomiędzy wartościami wyznaczonymi doświadczalnie i obliczonymi numerycznie zawierają się w zakresie 8 ÷ 17 % wartości obliczeniowych.

Trudności związane z utrzymaniem całkowitej symetrii i równomierności wzrostu obciążenia spowodowały, iż doświadczalnie wyznaczone kąty obrotu przekrojów zawieszonych (podporowych) nie są dokładnie równe. Oznacza to, że eksperymentalną postać zwichrzenia charakteryzują odchyłki od kształtu idealnie symetrycznego. Na powstanie różnic pomiędzy wynikami doświadczeń i obliczeń miały również wpływ trudne do uniknięcia nieznaczne niedokładności wykonania modeli oraz występujące zawsze w takich badaniach błędy przypadkowe będące wynikiem działania wielu dorbnych i zmiennych czynników o charakterze losowym.

39-

TABELA 8.2.				Ciężar krytyczny $\left[rac{kN}{m} ight]$				
			model nr 1	model nr 2	model nr 3	model - nr 4	model nr 5	
EKSPERYMENT	 belka zawieszona możliwy obrót przekrojów podporowych wokół osi 	- możliwa deplanacja przekorjów podporo- wych	1	0,96	-	0,79	0,94	0,71
	podłużnej	- skrępowana deplanacja przekrojów podporowych	2	5 55 .	1,00		8 .1	
OBLICZENIA NUMERYCZNE	— belka zawieszona	- możliwa deplanacja przekrojów podporowych	3	0,865	_	0,849	1,10	0,823
	 możliwy obrót przekrojów podporowych wokół osi podłużnej 	 skrępowana deplanacja przekrojów podporowych 	4		0,856	-	_	_
	- belka oparta na podporach stałych	 możliwa deplanacja przekrojów podporowych 	5	1,15		0,939	1,35	0,901
	 skrępowany obrót prze- krojów podporowych wo- kół osi podłużnej 	- skrępowana deplanacja przekrojów podporowych	6	2,45	1,49	2,51	2,82	2,40

Zważywszy jednak na dobrą zgodność najważniejszych wyników badań jakimi są wartości $g_{kr}^{dośw}$ z wartościami g_{kr}^{oblicz} można uznać, że zaproponowana metoda iteracyjna jest odpowiednią dla badania stateczności dźwigarów pełnościennych zawieszonych na linach.

9. WNIOSKI KONCOWE

Przeprowadzone badania analityczne oraz testy eksperymentalne pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Cienkościenne dźwigary metalowe o dużych smukłościach podnoszone na linach w czasie montażu wymagają wcześniej – szych obliczeń sprawdzających możliwość ich zwichrzenia. Obliczenia te winny uwzględniać specyficzne warunki brzegowe zawieszenia. Wartość krytyczna dźwigara zawieszonego w dwóch punktach może być mniejsza o kilkadziesiąt procent od wartości krytycznej tego dźwigara w przypadku jego oparcia na podporach stałych.

2. Zawieszenie dźwigara na linach stwarza możliwość utraty płaskiej postaci zginania również dźwigarów o dużej sztywności skrętnej. Mogą one bowiem doznać obrotu wokół prostej wyznaczonej przez punkty zaczepienia lin (podobnie jak ciało sztywne) i wskutek zginania w płastczyźnie mniejszej sztywności giętnej mogą ulec zniszczeniu.

3. Zastosowanie racjonalnej konstrukcji obejm montażowych, właściwej lokalizacji przekrojów podporowych i optymalnego kąta nachylenia lin zawiesia pozwala istotnie zmniejszyć niebezpieczeństwo utraty stateczności dźwigara zawieszonego na linach.

4. Proponowany w niniejszej pracy numeryczny sposób analizy badanego zagadnienia, oparty na opracowanej procedurze

-92-

iteracyjnej oraz wykorzystujący Metodę Elementów Skończonych pozwala w krótkim czasie (za pomocą m.c.) przeprowadzić obliczenia dla całkowicie dowolnie sformułowanego zadania w rozważanym obszarze.

5. Eksperymentalna weryfikacja obliczeń numerycznych pozwala uznać opracowany sposób obliczeń za odpowiedni do badania przedmiotowego zagadnienia. 10. WYKAZ LITERATURY

- [1] Allen H.G., Bulson P.S., Background to Buckling, McGraw-Hill 1980.
- [2] Augustyn J., Sledziewski E., Awarie konstrukcji stalowych, Arkady, Warszawa 1976.
- [3] Austin W.J., Yegian S., Tung T.P., Lateral Buckling of Elastically End-Restrained Beams, Proceedings of the ASCE, vol. 81, No. 673, 1955, pp. 1-25.
- [4] Barsoum R.S., Gallagher R.H., Finite Element Analysis
 of Torsional and Torsional-Flexural Stability Problems,
 Int. J. for Num. Meth in Eng., vol. 2, 1970, pp. 335-352.
- [5] Bažant Z.P., Nimeri M.E., Large-Deflection Spatial Buckling of Thin-walled Beans and Frames, J. Eng. Mech. Div. ASCE, vol. 99, No. EM9, 1973, pp. 1259-1281.
- [6] Beams and Beam-Columns, Stability and Strength, Ed. by R.Narayanan, Applied Science Publishers, London, NY 1983.
- [7] Bleich F., Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill 1952.
- [8] Bölcskei E., Die Stabilität des an zwei Punkten aufgehängten geraden Balkens, Acta Techn. Hung, t. 8, f. 3-4, 1954, s. 243-256.
- [9] Březina V., Stateczność prętów konstrukcji metalowych, Arkady, Warszawa 1966.

- [10] Buryta J., Cyunel B., Konopka R., Tota R., Wątorski J., Podstawy projektowania technologii i organizacji montażu w budownictwie, Wyd. Polit. Krak., Kraków 1976.
- [11] Chen W.F., Atsuta T., Theory of Beam-Columins, vol. 2, McGraw-Hill 1977.
- [12] Ciołek R., Próba teorii montażu konstrukcji budowlanych, IOMB, Warszawa 1964.
- [13] Composants en beton precontraint par armature adherente (praca zbiorowa), Dunod, Paris 1977.
- [14] Csonka P., Die Stabilität der an ihren Enden aufgehängten prismatischen Stäbe von rechteckigem Querschnitt, Acta Techn. Hung., t. 8, f. 1-2, 1954, s. 79-90.
- [15] Csonka P., Die Stabilität des an einem Punkt aufgehängten geraden Balkens, Acta Techn. Hung., t. 8, f. 3-4, 1954, s. 389-397.
- [16] Csonka P., Die Stabilität des an seinen Enden aufgehängten an siener seitlichen verschiebung gehinderten Balkens, Acta Techn. Hung., t. 10, f. 1-2, 1955, s. 31-42.
- [17] Czapliński K., Czemplik A., Computer aided investigation of the stability of beams lifted by cables during construction, W: II Reg. Colloq. of Stability of Steel Structures, Budapest 25-26. 09. 1986, vol. I/1, pp. 175-181.
- [18] Czapliński K., Czemplik A., Selected Problems of the Strength of Structure During Construction, W: VII Kongess IKIB, Leipzig 25-28. 09. 1984, h. 13, s. 102-107.

- [19] Czapliński K., Czemplik A., Wyniki uściślonej analizy przyczyn katastrofy mostu Poniatowskiego w Warszawie,
 W: II Konf. Nauk. Bezpieczeństwo Konstrukcji Mostowych, Wrocław 9-11. 09. 1982, s. 73-79.
- [20] Czapliński K,, Die Rolle der Festigkeitsberechnungen bei der Montageprojektierung von Baukonstruktionen, TH Leipzig, Wissenschaftliche Zeitschrift, nr 4, 1980, s. 245-248.
- [21] Czapliński K., Mrozowicz J., Realizacja obiektów budowlanych - podstawy teoretyczne, Wyd. PWr, Wrocław 1983.
- [22] Dąbrowski R., Praktycznie ważne przypadki wyboczenia skrętnego prętów cienkościennych, Arch. Inż. Ląd., t. 2, 1956, s. 45-108.
- [23] Developments in Thin-Walled Structures, part 2, Ed. by J. Rhodes and A.C. Walker, Els. Appl. Sci. Publ., London 1984.
- [24] Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń, Pr. zb. pod red. Z. Orłosia, PWN, Warszawa 1977.
- [25] Engineering Structures, Ed. Bulson P.S., Caldwell J.B., Severn R.T., University of Bristol Press 1983.
- [26] Feld J., Construction Failures, John Willey, New York 1968.
- [27] Fukumoto Y., Yamasaki Y., Lateral Instability of Beams During Lifting, Proc. of the JSCE, vol. 3, No. 259, 1977, pp. 1-10.

- [29] Gallagher R.H., McGuire W., Matrix Structural Analysis, John Willey 1979.
- [30] Giżejowski M., Nośność sprężysto-plastycznych belek ciągłych o przekrojach otwartych, PWN, Warszawa-Łódź 1986.
- [31] Gjelsvik A., The Theory of Thin Walled Bars, John Willey 1981.
- [32] Godfrey K.A., ""lucing failures-construction related problems and solutions, Civil Engineering ASCE, May 1984, pp. 59-63.
- [33] Hartz B.J., Matrix formulation of structural stability problems, J. of the Str. Div. ASCE, vol. 91, 1965, pp. 141-157.
- [34] Hicks G.W., Finite element elastic buckling analysis, J. of the Str. Div. ASCE, vol. 93, No. ST6, 1967, pp. 71-86.
- [35] Horak M., A Calculation of the Critical Load of Spatial Buckling of Elastic Thin-Walled Bars by the Method of Finite Elements, Stavebnicky Časopís, vol. 20, No. 8, 1972, pp. 598-619.
- [36] Jaromiak A., Rosset A., Katastrofy i awarie mostów, WKŁ. Warszawa 1986.
- [37] Jaworski A., Metoda elementów skończonych w wytrzymałoś ci konstrukcji, Wyd. PW, Warszawa 1981.

- [38] Jaworski K., Lenkiewicz W., Martinek W., Michnowski Z., Wasilewski Z.J., Technologia robót budowlanych, PWN, Warszawa 1985.
- [39] Johansson B., Lateral Stability of I-Beams during lifting, Bulletin No. 84, The Royal Institute of Technology, Stockholm 1970.
- [40] Johnson C.P., Will K.M., Beam Buckling by Finite Element Procedure, J. of the Str. Div. ASCE, vol. 100, No. ST3, 1974, pp. 669-685.
- [41] Kolesničenko V.G., Rasčet metaličeskich konstrukcij i prisposoblenij pri proizvodstve montažnych rabot, Budivelnik, Kiev 1981.
- [42] Kollar L., Gárdonyi Z., Déversement latéral des poutres a poroi mince suspendues par leurs extrémités, Acta Techn. Hung., t. 57, f. 1-2, 4999, s. 187-210.
- [43] Kozłowski T., Utrata stateczności płaskiej postaci zginania belek i prętów, Inż. i Bud., nr 12, 1963,
 s. 480-488.
- [44] Kurth F., Stahlbau-band 2, Veb Verlag Technik, Berlin 1981.
- [45] Labelle P., Stabilite elastique des poutres on beton precontraint a l'egard du deversement lateral, L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, vol. 12, No. 141, 1959, s. 779-831.
- [46] Lovass-Nagy V., Mathematical investigation of the " stability against lateral buckling of a beam freely

suspendeal at both ends, Acta Techn. Hung., t. 13, f. 3-4, 1955, pp. 281-297.

- [47] Lukianov K.I., Zajdenberg A.I., Silvestrov A.V., Ob ustojčivosti ploskoj formy izgiba stalnych ferm pri podieme, Prom. Stroit., No. 1, 1971, s. 7-9.
- [48] Łubiński M., Giżejowski M., Janik G., Zwichrzenie belek stalowych przy różnych warunkach obciążeń i podparcia, Inż. i Bud., nr 4, 1980, s. 126-131.
- [49] Łubiński M., Giżejowski M., W sprawie określenia wytrzymałości obliczeniowej na zwichrzenie elementów konstrukcji stalowych, Inż. i Bud., nr 1, 1981, s. 24-29.
- [50] Mayzel B., Warunki stateczności wiązarów kratowych przy podnoszeniu dźwigiem na montażu, W: Księga Jubileuszowa prof. W. Wierzbickiego, PWN, Warszawa 1959, s. 97-120.
- [51] Meissner F., Enige Auswertungsergebnisse der Hipptheorie einfach-symmetrischer Balkenträger, Der Stahlbau, vol. 24, h. 5, 1955, s. 111-113.
- [52] Miller I.D., Erection and Stability of a 67.5 m Span Roof - 1982 Commonwealth Games Aquatic Centre, Trans. of The Inst. of Eng. Australia - Civil Eng., vol. CE24, No. 4, 1982, pp. 306-311.
- [53] Muller J., Lateral stability of precast members during handling and placing, J. of the PCI, vol. 7, No. 1, 1962.
- [54] Muthiyalu N., Veszkateswara Rao G., Finite Element Analysis of lifting of an elastic plate from a rigid fundation, Int. J. for Num. Meth. in Eng., vol. 10, No. 5, 1976, pp. 1183-1187.

- [55] Naleszkiewicz J., Zagadnienia stateczności sprężystej,
 PWN, Warszawa 1958.
- [56] Nethercot D.A., Rockey K.C., A unified approach to the elastic lateral buckling of beams, Str. Engineer, vol. 49, No. 7, 1971, pp. 321-330.
- [57] Nethercot D.A., Rockey K.C., Lateral Buckling of Beams with Mixed End Conditions, Str. Engineer, vol. 51, No. 4, 1973, pp. 133-138.
- [58] Orlicz K., Język FORTRAN komputerów Jednolitego Systemu JS(DOS) oraz ODRA 1300, skrypt PWr, Wrocław 1977.
- [59] Ostapiuk H., Przybliżone określanie warunków stateczności smukłych belek stalowych zawieszonych w dwóch punktach, Prace COBPKM "Mostostal", nr 4, 1973, s. 43-51.
 - [60] Pettersson O., Vippningsproblem vid hissing och montering av slanka balkar, Nordisk Betong, N. 3, Stockholm 1960.
 - [61] Piątek M., Zwichrzenie sprężyste belek prostych w przypadku ogólnym, Arch. Mech. Stos., nr 2, 1954, s. 235-260.
 - [62] Pietrzak J., Rakowski G., Wrześniowski K., Macierzowa analiza konstrukcji, PWN, Warszawa-Poznań 1979.
 - [63] Powell G., Klinger R., Elastic Lateral Buckling of Steel Beams, J. of. the Str. Div. ASCE, vol. 96, No. ST9, 1970, pp. 1919-1932.
 - [64] Rafla K., Beitrag zur Frage der Kippstabilität aufgehängter Balken, Dissertation, TU Braunschweig, 1968.

- [65] Robison R., Steel Girder Bridge Sets Record Length, Civil Engineering ASCE, No. 5, 1984, pp. 38-40.
- [66] Roik K., Carl J., Linder J., Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe, Ernst u. Sohn, 1972.
- [67] Rowiński L., Technologia zmechanizowanych robót budowlanych, PWN, Warszawa 1976.
- [68] Rutecki J., Cienkościenne konstrukcje nośne obliczenia wytrzymałościowe, PWN, Warszawa 1966.
- [69] Skarzyński A., Jankowiak P., Pracochłonność montażu
 wybranych lekkich hal stalowych i kierunku jej obniżania, W: III Konf. Nauk. Wydz. Bud. Ląd. Polit. Pozn., t. 1, 1980, s. 177-184.
- [70] Swann R.A., Godden W.G., The lateral buckling of concrete beams lifted by cables, The Structural Engineer, vol. 44, No. 1, 1966, pp. 21-33.
- [71] Swann R.A., The Lateral Buckling of Beams Lifted by Cables, PhD Dissertation, University of Belfast 1963.
- [72] Szvidenko V.M., Montaž stroitelnych konstrukcij, Wyžsza Škola, Charkov 1982.
- [73] Tarnai T., Lateral buckling analysis of end-suspended beams by means of the Dunkerley theorem, Fiatal oktatók és kutalók tudományos fóruma, Budapesti Müszaki Egyetem, 1978, pp. 136-143.
- [74] Tarnai T., Variational methods for analysis of lateral buckling of beams hung at both ends, Int. J. Sci., vol. 21, 1979, pp. 329-337.

- [75] Tebedge N., Tall L., Linear Stability Analysis of Beam-Columns, J. of. the Str. Div. ASCE, vol. 99, No. ST12, 1973, pp. 2439-2457.
- [76] Timoshenko S.P., Gere J.M., Teoria stateczności sprężystej, Arkady, Warszawa 1963.
- [77] Unger B., Ein Beitrag zur Berechnung von aufgehängten Kranbahnträgern nach Theorie II Ordnung, Der Stahlbau, h. 10, 1972, s. 306-311, Forts. h. 12, 1972, s. 378-383.
- [78] Vlasov V.Z., Tonkostennye uprugie steržni, Gosudarstvennoe Izdatelstvo Fiz-Mat. Lit., Moskwa 1959.
- [79] Weiss S., Uwagi w sprawie kryteriów stateczności w przypadku zgięcia pręta cienkościennego, Arch. Inż. Ląd., t. 15, nr 3, 1969, s. 623-640.
- [80] Współczesne metody analizy stateczności konstrukcji, Praca zbiorowa, Ossolineum, Wrocław 1981.
- [81] Yegian S., Lateral buckling of I-beams supported by cables, PhD Dissertation, University of Illinois 1956.
- [82] Zienkiewicz O.C., Metoda Elementów Skończonych, Arkady, Warszawa 1972.
- [83] Ziółko J., Orlik G., Montaż konstrukcji stalowych, Arkady, Warszawa 1980.
- [84] Zykow G.A., O proverke ustojčivosti stalnych ferm pri podieme, Mont. i specj. rab. v stroit., No. 9, 1975, s. 18.

ROZDZIELNIK

1.	Recenzenci pracy	2	egz.
2.	Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej	1	egz.
3.	Biblioteka i OINT Instytutu Budownictwa PWr	1	égz.
4.	Promotor pracy	1	egz.
5.	Autor	2	egz.

Na prawach rękopisu

INSTYTUT BUDOWNICTWA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ Raport serii PRE 50 /87

STATECZNOŚĆ DŹWIGARÓW ZAWIESZONYCH NA LINACH PODCZAS MONTAŻU

Andrzej CZEMPLIK Praca doktorska

ZAZĄCZNIK

Promotor: doc. dr inż. Kazimierz CZAPLINSKI

Słowa kluczowe: stateczność konstrukcji, montaż, badania modelowe, Metoda Elementów Skończonych

Wrocław, czerwiec 1987

Mgr inż. Andrzej Czemplik

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 50-377 Wrocław, Pl. Grunwaldzki 11

Raport opracowano w ramach problemu badawczego nr 02002 pod kierunkiem doc. dra inż. Kazimierza Czaplińskiego

Symbol pracy: S

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej w dniu .1937.06..... WYDRUK PROGRAMU HLIFT DLA MC ODRA 1305 Z/4

```
1157
      LIBRARY(SUBGROUPFSCE)
      PROGRAM(ITET)
      HIXED SEGMENTS
      COMPRESS INTEGER AND LOGICAL
      INPUT J=CPO
      OUTFUT 2=190/160-
      FMD
      MASTER- D-WIGARY ZAULESZONE PODCZAS MONTAZU
C****
            *************
ί
С
      ANTOR PROGRAMM MOR INZ. ANDRZEJ CZEMPLIK
C
C * * *
      ************
      REAL 01(6),02(6),03(6),61(6),62(6),03(6),LJ(6),IZ(6),TS(6),
     *IU(6),IV(6),IO(7),SE1(6),BE2(6),IM,JM,KL,LM,MM,AA(6),
     +KJ (14, 14), KG (40, 49) / IZI, IYI, ISI/IOI, IVI
      1NTEGER PT(14,40),1NT(49),1TS(49),LP(3,8),GP(49),NSTR(3),G(49,49)
      REAL ID.JP.KD.LD.MD.ND.TDP.JDP.KDP.MDP.HJ(14/14).MY1/MY2/MZ1.
     *M72,MX,LOP,46(40,49),FOB(49,14),ROB1(49,14),ROB2(49,14),ROB2(49,14),ROB3(49,49
     +);XRZ(49),YUK(40),00(2401),86(2744),SORFZYNA(3),
     *KGMIN,TMV1(7),TMY2(7),TQ71(7),TQ72(7),A2(7),FMIM(7
     *), PEGEOPTA(2401), PEGNSTR(3)
      REAL FRG(2401), HUFE(43), PHG(2401), WGE(147), WYN(2401)
      EOUIVALENCE (PRO(1),KG(1));(PHG(1);HG(1)),(QUFF(1),NGE(1),ROBT(1)
     *), (KRZ(1), RO61(148)), (YUR(1), ROE1(197))
     *, (ROB(1), ROB3(1), MYH(1))
      COMPON/BUA/EJ,CJ
      COMMON/GLA/AM, EM, CM, DM, EM, FM, GM, HM, IM, JM, AD, BD, CD, ED, FD; GD, HD,
     +ID,JD,VD,MD,PD,OD,PD,OD,RD,ADP,EDP,CDP,DDP,EDP,FDP,GDP,HDP,IDP,
     +JDP, KDP, MDP, NDP, ODP, PDP, DD, LD, LDP
      COMMON/CFO/K4
      COMMON/WYS/F
K1=0 PRZEKROJ ENUTEDWY LUB TEOWY
С
      Κ1=1 ΡRZΕΚROJ CEONY (Ε4=0 ΚΟRΥΥΟ)Κ4=1 ΚΟRΥΥΟ ΟDURCCONE)
С
          PRZEKRUJ NOWOLNY
С
      K1 = 2
      K2=1
           PEZEKRUJ STAEV NA DEUGUSCI
C
           PRZEKRUJ ZMIENNY NA DEUGUSCI
      K7=1
C
           OUCIAZENIE ROWNOMIERNE
C
      K3=9
           OFCIAZENIE NIEROWNOMIERNE
С
      K 3=1
           PFINY HYDWUK; K5=1 WYDRUK SKPOCONY
С
      K5=0
PIT=3.14159
      READ(1,300)LS
      NRGFILEO
     00 28 ISFRIAM1, LS
      KONTEC=0
      WPITE(2,200) ISENIA
      READ (1,301) K1, K2, K3, K5
     READ(1,302)H.EJ.PSS.RO.F.ALFA
      NU=7*(N+1)
     GJmドJ/(どゃ(ヤードSSS))
     WRTTE(2)2013EJ,6J,F88,R0,N,F2ALFA
     RFAN(今,ろひろ)(しょ(T),Im1,目)
     01.1 *: 0
     00 + 1=1,1
     0640013413(1)
     12176(2,202)(1,6J(1),1m1,N)
     WPITE(2220330L)
     GO TU(1/2)K1
```

```
Z/5
```

40 TO(4) K2 [+************** С PRZEKROJ PHUTEOPY LUB TEOWY C******************************** READ(1,304)911,812,813,611,612,613 1F((811.1T.(0.00000001)).OR.(812.LT.(0.00000001)))G0 TU 6 WRITE(2,204) 60 70 27 NPITE(2,205) 6 27 WRITE(2,210)BI1,BI2,BI3,GL1,GI2,GI3 CALL TWUTFOUY(BI1,BI2,BI3,GI1,GI2,GI3,AAI,I7I,IYI,ISI,IUI,I0I, *BETI,REZT,AZI,FRIMI) 00 5 I=1.N AA(I) = AAT 17(1)=171 IY(I)=IYI IS(I)=ISIIW(I)=1VI 10(1)=101 RE1(I)=PE1I HE2(I)=PE2I FMIM(1)=FMIMI A7(T)=AZT · 181(I)=BI1 B2(I)=B12 33(1)=813. 61(1)=611 52(J)=612 5 63(I)=6I3 WPITE(2,208)AAI,TZI,TYI,ISI,IWI,IOI,BE11,BE21,AZI,FMIMI GO TO 13 READ(1,304)(81(1),87(1),83(1),61(1),62(1),63(1),1=1,N) WRJTE(2,206) UPITE(2,207)(1,04(1),02(1),03(1),64(1),62(1),63(1),1=4,0) 10 7 I=1.N 7 CALL UNUTFOUY(84(I),32(I),83(I),G1(I),G2(I),G3(I),AA(I),IZ(I),IY() ナンテナキ(エンテナ国(エンテエウ(エンテョビ)(エンテリビア(エンティイ(エンテド加工物(エン) WPITE(2,209)(I,AA(I),JZ(I),IY(I),JS(I))JO(I),BE1(I),BF2(I), *A乙(丁),FMTM(T),I=1,目) GO TO 13 C*************** C BBSEKHOT CEDMA C+***** READ(1,306)K4 1 1F(K4.E020)URITE(2,211) 1F(K4.E0-1)UNITE(2,212) 1F(K4_E021) GUTO 28 GO. TO(8) K2 READ(1,307) B11, F13, G11, G13 WRITE(2,213)811,813,611,613 CALL CEUNY(BI1,FI3,GT1,GI3,AAI;IZI,IYI,ISI,IWI,IOI,BE1I,BE21, *AZI, FRIMT) 00 9 1=1.M 91(1)#811 おろ(す) ヒおしろ G1(1)=G11 63(1)=613 AA(T)=AAT 17(1)=171 IY(I) = IYIIS(T)=IST.
· . · ·		7.16
		$f(\mathbf{I}) = \mathbf{I} + \mathbf{I}$
	ý.	882(I)=1621 UDITE(7, 208)4AT 171 IVI.ISI.IUI.IOI 8661.8651.A71
		60 TO 13
	, Q	READ(1,307)(P1(1),83(1),61(1),63(1),1=1,N)
		WRITE(2,214)(I,01(I),03(I),01(I),03(I),I=1,N)
		D9 10 I=1,N
	10	_ GALL_CECHY(R1(I),B3(I),G1(I),AA(I),TZ(I),IY(I),IS(I),IW(I),IO(I),
		+ EE1(1), FF2(1), A7(1), FM1M(1)).
		= WR [TR(2), 249) (1, 8A(1), 12(1), 13(1), 15(1), 10(1), 8E(1), 0EE(1), 14(1), 10(1), 8E(1), 0EE(1), 14(1), 10(1
		60×12
	C****	******
	Ç	PRZEKROJ DOMOLNY
	C++**	** ** * * * * * * * * * * * * * * *
	5	60 TO(11)K2
		NRITE(2/21)) READ(4,340)A41,121,1VI,1ST,1WI,101,RE41,RE21,A71
		WEITE(2)208)AAT, IZI, IVI, ISI, IWI, IOI, BE11, BE21, AZI
		00 12 I=1.N
	2	AACTTRAAT
		17(1)=17T
		8E1(1)=8F11
	12	0 E2(I)=0 E2I
		- 50 - ΤΟ - 1.5
	11	*A7(1),EMTH(1),.1=1.H)
		WRITF(27216)
		WRITE(2,209)(1, AA(I), IZ(I), IY(I), IS(I), JW(I), IO(I), FE1(J), BE2(I),
		*AZ(I))
	1.3	READ(1,311)LNP;((LP(K,J),J=1,8),K=1,LMP)
		-ΡΥΤΡΥΤΡΥΥΤΡΥΖΕΜΑΤΕΓΑΖΗΟ - ΤΕΛΙΝΟ Α.Μ. ΣΥΝΤΟΝ ΕΧΝΤΕΝΤΟ ΟΡΟΚΟΕ ΟΒΙΙΛΟΖΑΝΙΑ ΡΕΛΚΟΙΙ ΤΟΙ
		DO 57 TET.N
		READ(1,307)TMY1(1),TMY2(1),TQZ1(1),TQZ2(1)
	57	CONTINUE
		READ(1,304) DUFLADNOSC
		WPITF(2,217)LMP,(LP(I,1),T=1,LMP)
	. بار بار بار بار .	- UNIIF(5)23)00K1404020
	C ****	SERVEUCIA POUPODOWYCH STOPHT SUCHODY GP
	C ** * **	*******
		DO 16 L=1,NV
	16	6P(L)=0
		n na marte de la companya de la
		1F(1,10,1P(F,1))60 TO 10
	18	CONTINUE
		GO TO 17
	19	
		112770-047755775775775775577555 112713-1

	20	GP(J)=LP(K9,11)
	17	CONTINUE '
		NRITE(2,2000)(GP(J),J=1,NN)
	C * * * * *	*************
	С	MACIERZ WARNNKON BRZEGONYCH G
	C+++*	************
		DD 21 K=1,AU
		00 71 J=1.NV
	21	G(K, J) = 0
		DO 25 K=1, WH
	5.5	G(K, K) = 1
		DO 23 J#1,04
		IF(GP(J)_FQ.1)60 TO 23
	24	5 (K,L)#5 (K,J) CONTINE
	\mathbf{O}	
		WPITE(2,2015)16
	2015	FORMAT, 1X, ILICZEA STOPNI SWOBODY LGEI, IZY
		IF(K5, E0, 1) GUT0 63
		WRITE(2,2012)
		DO 2011 K-1.114
	2011	WRITE(2,2001)(G(K,L),L=1,LG)
	63	CONTINUE
	C*****	******
	С	ELEMENTY ZERUNE W MACIERZACH KJ I HJ
	C	ZEFORANIE KG I HG
	C*****	******************
		DO 15 K=1,14
		HJ(K,1)=0
		00 15 L=1.14
	15	KJ(K,L)=0
,		00 31 K=2.8
	-	
	31	$HJ(K+f_{0},\delta) = (j)$
		HJ(4,2),HJ(9,4),HJ(11,2),HJ(11,9),HJ(12,10)=0
	51	
	C .	TAA-O
		00 56 Tent H
	56	$T \Delta A + T A + A A (T) + L (T)$
		JPITE(2,2026)TO
		$DO = 29 = 1 \pm 1 + 1$
	C*****	*********
	С	MACIERZ SZTYWNOSCI ELEMENTU KJ
	C+++++	*********
		CALL FLORAL (LJ (T), AA (I), IZ (I), IY (I), IS (I), IH (I), AP, RM, CM, DM, EM, RM.
	*	• GM, HN, TM, JM, KM, LM, MM)
		К I (1 , 1) » К I (1 , 8) нАМ
		KJ(P,1),KJ(1,8)All
		KJ(7,7),KJ(9,9) #BM
		KJ(9)2)/KJ(2)2)89884 21-22 - オン・ステン・ステン クレーズ コン・ビーズタン ロンーグロ
		あきてアナシナアドラ(アナキリウ)ナドラ(ラナアナナドラク) かしょくえきしい
		ありてんデジナをおくダナクナチドロ大ダナゴロナチドロ大王(ロナジナ戸門に)3 ダイノターネトールコイクロールグラット(1
		大コスペテプノアは大イワノキロノデビス ション・ション ション・ション マンノア・オスト・ビ (イオル・ペンペル)
		トリモニナトリアラモリトリアファクロン ひんしん しょうしょう

```
KJ(6,6),KJ(11,11)=FM
      KU(4.11), KJ(11.4)=-FM
      KJ(4,5),KJ(5,4),KJ(4,12),KJ(12,4)=GM
      RJ(5,11),KJ(11,5),KJ(11,12),KJ(12,11)=-GM
      KI(5,5),KI(12,12)=H41
      KJ(5,12),KJ(12,5)=IM
      KJ(A,F),KJ(13,13)=JM
      KJ(6,13) . KJ(13, 6) =- JA
      KJ(K,7),KJ(K,14),KJ(7,6),KJ(74,6)=KH
      KJ(7,13), FJ(13,7), KJ(14,13), KJ(13,14)=-FM
      KJ(7,7),KJ(14,14)=LH
      と」(14,7)、ド」(ア,1ム)=阿特
      IF(V5.E0:1)G0T0 64
     14RITE(2.2004)I
      DO 2007 K=1,14
 2007 WPITE(2,2010)(KJ(K,L))L=1,14)
   64 CONTINUE
C**************
      MACIFEZ PRZYPORZADKOWANA PI
С
C************************
      DD 14 L=1,14
      00 14 J=1.N!
      DI(1,J)=0
      IF(J.FO.F+7*(J-4))PT(L,J)=1
  14
      CONTINUE
      IF(K5,E0,1)60T0 65
      00,2003 1=1,14 %
 2003 MRITE(S,2005)(PT(L,J),J=1,NW)
   65 CONTINUE
С
      UDGOLNIGNE SILY NA KONCACH ELEMENTU
C
            CECTAZENTE ROWNOMIERNE
     UZ=-RU*AA(1)
      JE(LMP_E0.1)6010 53
      IF (ALFA, FO. 0) GOTO 53
      IF(ALFA, FQ, 180)00 TO 30
      FX=TU+TAN((ALFA+PIT/180))2)
      TF(180-A1FA)54,53,0
      IF(I.LT.IP(1.1) OR I.GE.LP(LMP,1)) FX=0
C
      FUENTUALNE LINY POSREDNIE MUSZA BYC PICNOWE
     6010 55
     FX=_FY
  54
     IF(T.LT.IP(1/15.ORLIPGEILP(LMP,15)FY=0
     GOTO 55
   30. WRITE(2,226)
     60 TO 28
   53 FX=0
      MSPOLCZYNNIK WAGNERA
C
 55
     S0=10(1)/AAC1)+均日1(1)米F酸化的(1)
     WRITE(2,2014) FX, QZ, AZ(I), SO, TMY4(I),
    +T"Y2(1),M71,N22,T021(1),T022(1),0Y1,0Y2,MX
(*************
     HACTERZ, GEO INTRACZNALENEMENTU HJ
0
「ビベルビートトロレベルでしょくかう」ドメリロス、ムアですう」なり、ア村ヤキであう「平村ヤきであう」やえり、村名の、アロスキであり。
    *1922(1);6V1,0V2,NX3
     HI(2,:),HJ(A/A),HJ(0,5),HJ(11,11) #AM
     言さく?,2),月さくちょん),月さくキロ,2),月さくキ2,ん)無氏林
     ショイマックションリー(ちょうションリスタロテイクションティクシャクタ
     41(10,3),H1(12,5)=DM
```

```
HJ (6,6), HJ (13,15) = EM
     HJ (7,6)=FM
     HJ(7,7), HJ(14,14)=GM
     HJ(13,6)=HM
     HJ(14,6)=1阿
     HJ(14,7)=JM
     HJ (9,2) / HJ (1) / 4) =+ A(1)
     HJ (0,3), HJ (11,5), HJ (10,9), HJ (12,11)=-AM
     HJ(14,13)=-FI
     HJ(13,7)=-IM
     HJ(6,2)=AD
     HJ (4,3)=RD
     HJ(7,2)=CD
      HJ(7,3)=DD
     HJ(9,6)=FD
      HJ (9,7)=FD
      HJ(10,6)=60
      H.1 (10,7)=HD
      HJ(13,2)=ID
      HJ(13,3)=JD
      HJ(13,9)=KD
      HJ(13,10)=LD
      H.1 (14,2)=MD
      HJ (14,3)=ND
     HJ(14,9)=00
      4J(14,10)=PD
      HJ(4,3),HJ(0,5),HJ(11,10),HJ(12,2)=0D
      HJ(5,2),HJ(10,4),HJ(11,3),HJ(12,9)=-QD
      HJ(10,5)=PD
      H.1 (12,3) =- RD
      HJ (A, L) = ADP
      HJ (0,5)=ADP
      HJ(7,6)=CDP
      HJ(7,5)=DDP
      HJ(11,6)=F00
      HJ(11,7)=FDP
      HJ (12,6) = ODP
      月1(12,7)=月0日
      41(13,4)=102
      HJ(13,5)=JDP
      HJ(13,11)=KOP
      HJ(13,12)=L0P
      HJ(14,4)=MDP
      HJ (14,5)=NDP
      HJ(14,11)=00F
      HJ (14,12)=PDP
      00 32 K=1,13
      DO 32 L=K+1,14
      HJ(K,L)=HJ(L,K)
  32
      IF(K5,E0:1)90T0-66
      00 2013 K=1.14
      WRITE(2,2010)(HJ(K,L),L=1,14)
2013
   64 CONTINUE
C**************
      GLODALNA MACIERY SZTYHNOSCI KC
10 73 1=1.1.5
      00 33 J=1,14
      $=0
      DO 74 KE1, HIL
      5=5+6(K,1)*21(J,K)
  74
```

£,

33 ROR(L,J)=S 00:35 L=1/LG DO 35 J=1.14. A . S=0 00 36 K=1,14 A=A+ROB(L,K)*FJ(K,J) 36 S=S+R(B(1,K)*HJ(K,J) R091(L,J)=A 35 ROR2(L,J) =S DO 38 L=1.LG 00 38 J=1.NU SFO DO 39 K=1,14 39 S=S+R(B1(L,K)+PT(K,J)38 R083(L,J)=S DO 40 L=1.LG 09 40 J=1.LG S=n DO 41 KE1,NH -5=S+R0R3(L,K)+G(K,J) 41 KG(L, J)=KG(L, J)+S 60 GLOBALNA MACIERZ GEOMETRYCZNA HC С 00 42 L=1, LG 00 42 J=1,NU 4 · S=0 DO 63 K=1,14 43 S = S + ROB2(L, K) + PT(K, J)ROB3(L,J)=S 42 00 24 L=1,L0 00 24 J=1,L0 5=0 00:65 K=1,44 45 S=S+ROB3(L,K)+G(K,J) HG(L,J)=HG(L,J)+S 41 20 CONTINUE ZAMIANA MACIEFZY -KG I HG NA EKWIVALENTNE WEKTORY PKG I PHG С DO 2008 J=1,LG DO 2008 1=1,LG PHG(I+L6+(J-1))=HG(1,J) PKG(1+LG*(J-1))=-KG(I+J) 2003 IPR=0 10R=4 IRR=1 1SR=5 STALA SPREZYNOWANIA PODPOR C 00 74 1=1,3 74 NST!!(1)=0 L . K = () 00 75 1=1,NU JECONCED MEN. TORER+1 オドくじゃくてき ボローどうしゃしゃう 15 'IF(60(1) #4.2)NSTR(L)=1-K 00 84 TE1, LAP PEGHSTP(T)=PEG((HSTP(T)-1)*LG+HSTP(T)) 66 TTPPACJAm1

	LECITEPACJA, EQ. 1)XLAM=1	
	z = z + z + z + z + z + z + z + z + z +	
78	3 DO 76 I=1,LMP	
76	SPREZYNA(I)=TO+PHIM(LP(I,1))*XLAM
	UPITE (D. DZZ) ITEDACIA (SODE	ZVNACI), I-H-IND)
	WALLEN ZT ZSEJATER AUD BIN AF RU	
	DUPXLAM=XLAM	
	00 77 IF1, LAP	
-7 -7	DVO//PCTD/INMANALGAUSTD/IN	- DECHCTOLIN-SUDETVUALI)
	PROCENSIVE IT TT REATONIALLY	J - FROMOTRALI - CFORKTMAKLY
80	IF(K5.F6.1)60T0 67	
	IF(ITERACJA, NEL1)GO TO 79	
	WALLEL CONTRACT	
	NRPEO	
	CALL FRMARIST(LG, LG, IPR, IQ	R, IPR, ISR, PHG(1), RLAB, BUFF(1), NRR)
	IF(NRP.NF.O) WEITE(2,218) NR	R
	IFCMAR ME O)GO TO 28	
14	WRITE(SI)004)	
	NPR=0	
	CALL FPMPPINT(LC,LC,IPR/IQ	R, IRR, ISR, PKG(1), PLAB, BUFF(1), NRR)
	TECHOR NE DIWRITCID 2181NP	p
	1F(FRE.FF.0)00 10 23	
4	7 CONTINUE	
	KGMIN=1.F30	
	DO 47 1=1.16+16.16+1	
	1E/180/15 EO 0300 TO 47	
		and the second state of th
	IF (ABS(PKG(IZ), PT, KGMJN)KG	KINEARS(PKO(1))
47	CONTINUE	
	TEREGNIN HIT TOONSONIN=100	
	UBATE/2 DAONFCHTH	
	WRITE CONTRACTOR	
	DO 43 I=1.LG*LG	
48	} PKGKOPIA(J)=PKG(J)/KGMIN()	
	FGF-1 F-30	
r	the second s	To the star of the star
C***	**********************************	
С	ROZULAZYMANIE ZAGADNIENIA	WEASNEGO
C * * *	************************	****
	NPP=0	
	CALL EDMORTHE LO. FOR. P	KGKODTACAN, NGECAN, DET, IRANK, NPR)
	WPITE(2,235) NPR, DET, LPANK	
	1F(DRF.NF.128)60 TO 20	
	WRITE(2,236)	
	60 TO 38	
1	1 IF(NPR.NF. 0)60 TO 72	
	GO TO 73	
72	NPGFTH=1	
77	NO 40 154 16*16	
11		
4.5	PKGKUPIA(J)#PKGKUPIA(I)/KU	
	IF(KS.EQ21)GUTO 68 COL	
	MRR=0	
	VRITE(2,2013)	
	CALL COMMONTATION LO TOD TO	B TOD TSD BUCKADIA(1) BLAR BURF(1) NREI
	CALL FREERINGLERING LERING	K . L B B / L B K / F K G F G F L A K I / P K G K B F K F K I / P B K F K
	NRITE(2,2014) DET, JRANK	
6	S CONTINUE STATES STATE	
6	URITE(2:2014)DET, JRANK BCONTINUE	
6	URITE(2:2014)PET, JRANK 9 CONTINUE UPD=0 FALL FRANKT(16.16.16.PR6K0	PTA(1), PHC(1), WYN(1), TPK, MRP)
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE UPD=0 CALL FPMUMT(LG, LG, LG, PRGKO	PTA(1), PHC(1), WYN(1), TPK, MRP)
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE UPD=0 UPD=0 UFCUPP.PE.0) WEITE(2,218) NR	PTA(1), PHC(1), WYN(1), TPK, MRM) R
6	JRITE(2,2014)PET,JRANK 18 CONTINUE UPD=0 UPD=0 JECUPP.PE.03MPITE(2,218)NR JECURP.TE.03MPITE(2,218)NR JECURP.TE.03MPITE(2,218)NR	РТА(1), РНС(1), WYN(1), ТРК, МАР) R
6	URITE(2,2014)PET,JRANK 18 CONTINUE UPD=0 CALL FPMUMT(LG,LG,LG,PRGKO IF(UPP.PE.0)WFITE(2,218)NR IF(URF.FF.0)WFITE(2,218)NR IF(FS.E0.1)GUT0 A9	РТА(1), РНС(1), WYN(1), ТРК, МАР) R
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE UPD=0 CALL FPMUMT(LG, LG, LG, PRGKO JECUPP.PE.0) WEITE(2,218) NR JECURP.FE.0) WEITE(2,218) NR JECURP.FE.0) GUTD A9 URITE(2,2020)	РТА(1), РНС(1), WYN(1), ТРК, МАР) R
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE UPD=0 CALL FPMUMT(LG, LG, LG, PRGKO JE(UPP, PE.0) WEITE(2,218) NR JE(UPP, PE.0) WEITE(2,218) NR JE(ES, E0.1) GUTO A9 URITE(7,2020) URD=0	РТА(1), РНС(1), WYN(1), ТРК, МАР) R
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE UPD=0 CALL FPMUMT(LG, LG, LG, PRGKO JECUPP.PE.0) WEITE(2,218) NR JECURP.FE.0) WEITE(2,218) NR JECURP.FE.0 UPF=0 UPF=0	РТА(1), РНС(1), WYN(1), ТРК, МАР) R р. тер тер мумила, ен Ан виссия, ирра
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE 1000±0 CALL FOMUNT(LG, LG, LG, PRGKO IF("PP. PF.0) WFITE(2,218) NR IF("PP. PF.0) WFITE(2,218) NR IF(FS.E0.1) GUTO A9 URITE(7,2020) UPP=0 CALL FOMORIUT(LC, LG, IPR, IO	PTA(1), PHE(1), WYN(1), TPK, MRM) R R, IPR, ISR, WYN(1), PLAU, MMFF(1), WPR)
6	URITE(2,2014) PET, JRANK 9 CONTINUE 1007=0 CALL FPMUMT(LG, LG, LG, PRGKO IF("PP, PF, 0) WFITE(2,218) NR IF("PP, PF, 0) WFITE(2,218) NR IF(FS, E0, 1) GUTO AP URITE(7,2020) URF=0 CALL FPMORINF(LC, LG, IPR, IO IF(FF, LF, 0) FFITE(2,218) NR	PTA(1), PHE(1), WYN(1), TPK, MRM) R R, IPR, ISR, WYN(1), PLAB, MMFF(1), WPR) R

100	> しいNTよびUE
5.1	- PAR
	ΑΤΤΙ ΚΑΖΙΤΟΝΙΟ ΜΟΤΑΤΙΑ. Ο ΑΤΤΙ ΕΝΝΙΤΟΝΙΟ ΚΟΓΙΙΑ. ΤΙΧΕΖΑΝΝ.
	TAB-0
	CALL EDDDHESSEVEC. HVM/MAN ITS/AN YRZ/AN VHD/AN DD/AN IVSN
	CALL EDODVS(16) EVE(4) 200 (1)
	(AII) = PFACK(LG, UVN(1), OR(1), VUR(1), INT(1))
C****	**** SZUKANTE NAJUTEKSZEJ WAPTOSUT WLASNEJ *******
	IF(K5, F0, 1) GOTO 86
	WRITE(2,2021)
86	$X \stackrel{\text{\tiny M}}{\rightarrow} A \stackrel{\text{\tiny M}}{\rightarrow} = 0$
	00 52 1=1,L0
	JF(YRZ(1), LT.XMAX) GO TO 52
	NBX=1
	XMAX=XRZ(J)
52	CONTINUE
	XLAH=1/XMAX
	DU 50 KF1,LG
	JE(K5.EW_1)(V10_50
F (1	MATIFCZIZUZZZE, TRZCEJ, YURCKJI URCKTLGWCNEXHTJJ UCZUN-ODZULALGAZIOV - 455
20	
3	
	$\mathbf{T} \mathbf{F} \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{I} \mathbf{J} \mathbf{F} \mathbf{G} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{G} \mathbf{G} \mathbf{I} \mathbf{T} \mathbf{G} \mathbf{Z} \mathbf{S}$
	IF(KOLTEC.NE.1) CO TO 85
	JF(GP(J) E0.20 GD TO 25
85	UYN(J) = UG(J-J)
	GO TU. 90
25	$(\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{D}) = 0$
0.0	I#I+1`` CONTINIE
7.0	LEARANTEC SO INCOTO 82
	EPSTLONECXLAM/ADDXLAM)-1
	IF(ITEPACJA_E0_1)GOTO 87
	IF(FPSILON, GT. DOKLADNOSC)GOTO 87
8.8	URITE(2,222)
	K = ()
	DO 26 J#1,N+1
	K≓K+1 state stat
	MRITE(2,227)K,I,MYN((1-1)*7+1)
	K=K+1
	URITE(2,228) N, I, WYN((I-1)*7+2)
	「「玉米山」」 「「「玉米」(つつひとど」で、「いいりととて、オン・ブレムト
	$\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}$
	N=K+1 NPITE(2,230)K,T NVN/((1-1)+7+4)
	WRITE(2,231) K, I, WYN((I-1)*7+5)
	K=K_1 (
	WRITE(2,232)K,1,WYN((1-1)*7+6)
	K≖K+1
	VRITE(2,233)K, I, WYN((I→1)*7+7)
23	MRTTF(2)234)
61	ΑΡΥΤΤΕ ΕΖΑΖΟΣΕΡΙΧΑΧΗΛΙΚΑΤΕΡΙΧΑΥΟΗΝΕΡΙΧΑ ΠΡΥΤΓΙΟΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕΙΑΤΕ
C++++	***************************************
č	DBUFORABLE MACIERZY WSZYSTKICH WEETOROW WLASNYCH
C	U PPZYPADYU ZESEDLOUYCH WARTOSET ULASNYCH.
C++++	* * * * * * * * * * * * * * * * * * *
	00 58 1=1.10

30 1-111

Z/13

	LECVIDIANE ONCO TO 50	
6.0	CONTINUE	
34	CONTINUE	
5.0		
23	488 8 0	
		DH ICO ODIAS DIAD DUCCIAS
	LALL FPMPRINICLG, LG, IPR, IGR, I	RR, ISR, GR(1), RLAB, BUFF(1),
	(F(NRR.NF.D)WEITE(2,218)NRR	
6.0	IF(NRF.NF.0)60 TO 28	
0.0	WR1TE(2,225)	
	IF(K3.EQ.1)GUTO 61	
	GRITE(2)/26JW/KRYI	
1.4	GUTU 83	
61	$\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}$	
06	VRITE(2/22)1/02KRYT	
85	LIERACJA=ITEKACJA+1	
	IF(IIFRACJA.CU.2)60 10 78	
	IF CRUNIECIEU, 1360 TU 28	
	WRITE(2)241)CHSTLUM	0 2 0
		0 78
	WHITE(2,240)EPSTLON	
0		**************************************
C	OBLICZENTA ULA NRZYMADKU Z CA	LECHICLE DURANTGZONTA
0	UCROTEM PPZEKRUJUW PODWIESZUN	YCH NURUL USI DZWIGARA
(***)	***************************************	**************
	WEITE(27200)	
	KUNIEU mi	
	$\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}$	2550 20 26
	IFCI EQ NSTRUTTOR I EQ NSTRU	2))60 10 81
	15/1 FO 20070/054/1-0541	1 CO. (NETR/2) . (1-4) +1 C)) CO. TO 82
		. J. EUTINSIE(2) (141) + L0) 300 10 02
	$P \times G \left(X \right) = P \times G \left(J \right)$	
54 3		
97	CONTINUE	
0.1	TEZZKANA ANE CZIGALMONAZIGALMP	ANSTOR PRENIRCIA KG ZIAT
		JJJJJJJJ - REDORGOA KO ZLA
	60 + 0 = 80	
28	CONTINUE	
60	TEANDERTH FOR INCTOD TRIENNE OF	MUDOCENTE DEGI
	STOD IZATRZYMANIE KONCOWE!	
(++++	anner Suinainnii C Konog - C	
C	FORMATY	
C****	****	
200	EORMAT(18.119(1++)/18. (SERIA (BITCZEN NE 1,12)
201	FORMATCIN. HSPOLCZYNNIK SPREZY	STOSCT WZDIUZNEJ FET .F10.4/1X.
<i>e. U T</i>	*INSPOLOZVNNIK SPREZVSTOSCI POL	PRZECZNEJ GEL.E10.4/1X.
	* USPOICZYNNIK POISSONA (PSS=)	F5. 3/1X. IGESTOSC MATERIAL RUM!.
	*E11.4/17. LICZBA ELEMENTOW POL	ZIAFU N# 1, 12/1%, 'ODLEGLOSC OD '
	* GORNIJ DOWTERZCHNI DZWIGARA I	O PUNKTH ZAWINSZENIA FM., F11.41
	*1X, KAT BONTEDZY LINAME ZAWIES	1A ALFAM', F7. 2, 1 STUPN1'/)
267	FORMAT(1y, IDEUGOSC FLEMENTON F	0071AFU: 1/(304, 1L(1,12,1)+1, 11,4
	*5Y, 'L(', 12, ') # ', E11.4, 5X, 'L(',	12, 1) 1, 1#1, F11, 4))
203	FORMAT (1X, CAFKOWITA DEUGOSC I	2VIGANA 1=1,011.4/)
204	FORMAT(1x, PRZERROJ DUUTEOWY (WYMIARACH STAFYCH NA DEUCOSCI")
205	LOUMATINY, IDRZEVROJ TEOMY O WY	HEAPACH STAFYCH NA DEUGOSCEP)

```
FORMAT(1X, PRZEEROJ DWUTEOWY (LUB TEOMY) O MYMIARACH ZMJENNYCH ..
205
    * 'NA DEUGOSCI')
207
     FORMAT(/1X, HVMTARY PRZEKPOJU POSZCZEGOLNYCH ELEMENTOW: //
    *(1X.
    * 'ELENENT'',13,10X,'91#',E10.4,4X,'P2=',E10.4,4X,'B3=',F10.4,
    +4x, 'G1=', F10.4, 4x, 'G2=', E10.4, 4x, 'G3=', F10.4))
    FORMAT(/1x, CHAPAKTERYSTYKI GEOMETRYCZNE PRZEKROJU POPRZECZNEGO: 1
805
    *1X,2HA=,F10_4,2%,3H17=,E10_4,2%,3HIY=,E10_4,2%,3HIS=,E11_4,2%,
    *3HIU±,E11_4,@X%,~HIO±,F11_4,2X,3H81=,E10_3,2X,3H42=,F10_*,2X,3H42=,
    *E11,4,2X,5HEMIN=,E11,24)
    FORMAT(/1X, CHAPAKTERYSTYKI GEOMETRYCZNE POSZCZEGOLNYCH ELEMENTOW
209
    * . 1 : 1 / (1X, 1 ELEMENT 1, 12, 3H
                                   , A = + , E11 24, 2X, 3HIZ=, E11 . 4, 2X, 3HIV=, E1
    *1.4.2Y,3HIS=,E11.4.2X,3HI0=,E11.4.2X,3HE1=,E10.3.2X,3HB2=,E10.3.
     *2X, 34AZE, E11.4, 2X, 546MIM=, E11.4))
210
    - FORMAT(/1Y, WYMTARY PRZEKROJU POPRZECZNEGO11/1X, 3HB1=, E11.4, 2X,
    *3H82=,E11_4,2X,3HB3=,E1124,2X,3H61=,E10_3,2X,3H62=,E10_3,2X,
    +3HG3=, E10.3)
     FORMAT(1x; PRZEEROJ CEOWY ZAWIESZONY W POZYCJI ODWROCONEGO 🗰
211
    * KORYTA!)
     FORMAT(1X, PRZEEROJ CEONY ZAWIESZONY U POZYCJI KORYTA))
212
     FOPMAT(/1X, WYMIARY PRZEKROJU POPRZECZNEGO SA STAFE NA DEUGOSCII,
213
    **D7WIGARA_I_WYNOSZA:*/1X>3HB1=,E11.4.5X,3HB3=,E11.4.5X,*HG1=,
    *E10.3,5X,3HG3=,E10.3)
214
     FORMAT(1x, 'HYMJARY DRZEKROJU POPRZECZNECO SA ZMJENNE NA DEUGOSCJ'
    * DZWIGARA I WYHOSZA: //(1X, 'ELENENT ', 12, 10x, 3H01=, E11, 4, 4X,
    SHR3=_E11_4,4X,3HG1=_E10_3,4X,3HG3=_E10_3))
FORMAT(1X, PRZEEROJ NJETYPONY, STAEY NA DEUGOSCI DZWIGARA!)
FORMAT(1X, PRZEEROJ NIETYPONY, ZMIENNY NA DEUGOSCI DZWIGARA!)
215
216
     FORMAT(/1X,,LIC7BA MIEJSC ZAWIFSZENIA LNP=+,I1,15X,+WEZFY PODPORO
217
    * , + WE: +, 1013)
 218 FORMAT(1x, 'NRR=', 15)
 219 FORMAT(1x, KGMIN=1, 1114)
 227
     FORMAT(1X, NAJWIEKSZA WARTOSC WEASWA X(', 12, ')=', E11,4,10X, '/
       'v(',I2,')=',E11 34,! /!)
     FORMAT(1x, PARAMETR OBCIAZENIA KRYTYCZNEGO LAMBDA=', E11.4)
 221
 222 FORMAT(/12X, PRZEMIESZCZENIA WEZLOWF'./12X
    *, 'Z DUKLADNOSCIA DO STALEJ',/)
    FORMAT(/1X, iKRYTYCZHE OBCIAZENIE ROZLOZONE);
222
    * NA DEUGOSCI RDETA:/)
     FORMAT(20X, 107KFYT=1, E1316)
22%
225
     FORMAT(20X, +QZKQYT(+,11,+)=+,E1316)
 225 FORMAT(1X, IALFA=180 STOPNI !!)
 227 FORMAT(10X, 12,7X, 'U(', 11,')=', E11:4)
 223 FORMAT(107,12,7X, 'V(',11,')=',E11.4)
229 FORMAT(10X,12,4Y, 'TETA(',11,')=',E11.4)
 230 FORMAT(10X, 12,77, 'W(', 11, ')=', E11,4)
 231 FORMAT(10X,12,5%, 'PSI(',11,')=1,E1114)
 232 FORMAT(10X,12,6X, 'FI(',11, ')=', 011.4)
 233 FORMAT(10X,12,5%, CHI(1,11,1)=1,E1124)
 234 FORMAT(8x,29(1H-))
235
     FORMAT(1X,+NRP=+,I3,2X,+DET=+,E11,4,+2X+IRANK=+,I3)
     FORMAT(1X, IGLOBALNA MACIERZ SZTYWNOSCI JEST OSOBLINAI)
236
 232 ΕΟΡΜΑΤζΙΧ,15ΟζΙΗ#)/1Χ,+ΙΤΕΡΛΟΙΑ+,Ι3,20Χ,+9ΤΛΕΕ ΕΡΡΕΖΥΝΟΜΑΝΙΛΙ+.(4
    **E11.4* (X, E11.4)
 238 LORMAN(1x, 150(1H-)/1X, NAPIANT DRZ PPPPZYNOWANIA!)
 239 FORMAT (1x, 12ADAHA DOKLADNOSC ITFRACUL #1, F6, 8)
     FORMATC/19, ITFRACJE ZAKONCZUNU DLA RPSILON# + E11.4)
241
 241 FORMAT (1X) FPSILONA (61124)
     FOPPAT(IA)
2 () ()
301
     FORMAT(410)
     FORMAT (10,5FULA)
502
```

```
Z/15
```

317 FORMAT(SOFO.U) FORMAT (OFO. 0) 306 306 FORMAT(1n) 307 FORMAT(6FO.O) FORMAT(10F0.0) 310 FORMAT(ID/(BID)) 311 FORMAT(1x, ICIAG GPI, 6X, 10(1X, 711)) 2000 2001 FORMAT(5012) 2002 FORMAT(1x, INACIERZE PRZYPORZADKOWANIA!/) 2004 FORMAT(1X, HELENENTI, 13, 3X, HEOKALNE MACIERZE: 1, 2X, *'SZTYVNUSCI, PRZYPORZADKOWANIA I GEOMETRYCZNA') 2005 FORMAT(1x, 50(12)) 2009 FORMAT(/1X, GLOFALNA HACTERZ SZTYMNOSCI ,3X, ****UNAGA! PRZECIWNE ZNAKI****//) 2010 FORMAT(1x,14E10[3) 2012 FORMAT(/1X, MACIERZ WARUNKOW PRZEGONYCH!) 2014 FORMAT(2x, +FX=+, Ef0_3,4x,+0Z=+,E10\3,4X,+AZ=+,E10,3,4X,+S0=+, *E10.5,3X,+NY1=+,E10_3,3X,+MY2=+, E10_3/1X,+MZ1=+,E10_3,3X,+NZ2=+) *E10_3,3X,+Q21=+,E10_3,3X,+Q22=+,F10[3,3X,+QY1=+,F10]3,3X,+QY2=+, *E10.3,3%, MX=1, P10_3) FORMAT(1x, HJYZNACZNIK GLOBALNEJ MACTERZY SZTYMNOSCI DET(KG)=',E10. 2016 *3,3X, !IRANK=!,13) 2017 FORMAT(/1X) GLOPALNA MACIERZ GEOMETRYCZNA!/) FORMAT(/1X, UNWPOCOMA MACIERZ SZTYWHOSCI - GLOBALNA',2X, 2018 ****UVAGAI PRZECIUNE ZNAKI****/) FORMAT(1x, 'ILOCZYN MACIERZY (KG-1)*(HG)') 0505 -FORMAT(16X, WARTOSCI WEASNE', 15X, KOYTYCZNY WEKTOR WEASNY', /3X, 1505 * CZESCI gZECZYWISTE', 5X, 'CZESCI UROJONE', 6X, * 7 DOKLADNOSCIA DO STAEEJ /) 50.55 - FORMAT(1x, I2, 2x, E13.6, 10x, E9.2, 13X, E13.6) 2023 FORMAT(1x, MACIERZ WEKTOROW WLASNYCH) 2024 FORMAT(1x, IREAKCJA PIONOWA TQ=1,E1114) END SUBPOUTINE KLOKAL(LJ, AA, IZ, IY, IS, IW, A, B, C, D, E, F, U, H, I, J, K, L, M) REAL I, J.K.L.M.N.LJ.IY.IZ.IS.IW COMMON/FNA/EJ.GJ NHEI/(LJ+LJ+LJ) A=AA+EJ/IJ 8=17+17+N C==G+IZ+N+LJ D=4+12+E1/LJ E=0/2 F=12+1V+N G=-S*IY*N+LJ H=4+IY+EJ/LJ I=H/2 J=12*GJ*TS/(10*LJ)+12*IU*N K==GJ*IS/10-6*IV*N*LJ L=4*6J*IC*L1/30+4*IV*FJ/LJ M=-GJ*IS*LJ/30+2*IH*EJ/LJ RETHRM END SUBROUTINE DEUTROWY(B1,B2,B3,G1,G2,G3,A,I7,IY,IS,IW,IO,PE1,BE2, + A7, FHIM) REAL IZ, IS, IY, IV, IO COMMON/NYS/F Y0, RE7=0 H=R3+0.5+(61+62) a=41+11+B2+62+83+63 5====1+61+61/2+8×+63+83/2+92+62+(8*+62/2)

```
**(S/A))
      E=S/A+G1/2
     *FMIM=F+61/2+6
      17=61+81++3/12+83+63++3/12+62+82++3/12
      IS=(B1+C1++3+B2+G2++3+B3+G3++3)/3
      B=1/(1+((B1/B2)**3)*G1/G2)
      1 V= 0 + 6 1 + + 3 + 6 1 + H + H / 12
      20=-1+(E*HHE)
      IO=1Y+17+A*(ZO*70+YO*YO)
      C=H-E-G2/2
      D=E=61/c
      G=H-F
      AZ=-Z0
      R1=-((C+(H2**3*C2/12+F2*G2*G*C))-F*(H1**3*G1/12+B1*C1*E*E)+
     *(C*C*C*C*C-D*D*D*D*D)*G3/4)/IY
      851=R1-2*70
      RETURN
      END
      SUBPOUTINE CEOWY(81,83,61,63,A,IZ,IY,IS,IW,IO,BE1,BE2,
     *AZ, FMIM)
C**** Z UUZGEEDNIENIEM MOMENTOW BEZWLADNOSCI WZGLDEM OSI WLASPYCH
      SCIANKI I-POÉEK
      REAL IZ, TY, IS, IN, IO, T1, IS
      COMMON/CEO/K4
     COMMON/VYS/F
      Y0. 0E2=0
      A=2+81+61+83+63
      S=2*(E1+G3)*61*(B1+G3)/2+(B3-2*G1)*63*G3/2
      E=S/A-G3/2
      FMIM=E+63/2+F
      IY=83*63**3/3+2*61*91**3/3-A*((E=63/2)**2)
      11#81*G1**3/12+81*G1*(B3/2*G1/2)**2
      13=03+83++3/12
      17=13+2+11
      18=2*11*61**3+83*83**3
      Z0=F+(B1+C3/2)**2*(33-G1)**2*61/(4*12)
      AZmmZU
      18=61+(E1+63)*****(B3+61)**2/12*((3*(B1+63)*61+2*(P3+61)*63)/(6*
     +(11+63)+61+(83-61)+63))
      10 = 1 + 17 + 0 + (Y0 + Y0 + Z0 + 70)
      R1=(E+(G3+B3+E+F+13)+(2+E+(B1+G3/2))+11+(E++4+ ((E1+G3/2)+E)*+4)
     **G1/2)/Jy
      BE1=R1-2.70
      RETURN
      FND
      SUBROUTINE HLOKAL(L,FX,QZ,AZ,S0,MY1,MY2,MZ1,MZ2,QZ1,
     *022, QY1, QY2, MX)
      REAL L, IM, NY12, NY1, MY2, MZ12, MZ1, MZ2, JM, ID, IDP, JD, JDP, KD, KDP, MD,
     * MDP, LU, LNP, ND, NDP
      COMMON/OLA/AH, EM, CM, DM, EM, FM, GM, HM, TM, JM, AD, BD, CD, ED, FD, GD, HD,
     *ID, JD, KO, ND, ND, ND, ND, ND, ND, ND, ADP, PDP, CDP, PDP, FDP, FDP, FDP, FDP, HDP, JDP,
     *JDP,KDP,MDP,NDP,ODP,PDP,DD,LD,LDP
      AM=12+FX/(10+L)
      3M=-FX/10
      C!= 6+ FX+1/30
      0M=+F×+1/30.
      E門#12*FX*50/(10+L)-73*Q2*A7*L/35
      FM==FX+50/10+11+02+07+L+L/210
      15Mmムメドズナちりメレノ30mのスナムフォレメレメレノ105。
      Htt==12*FX+50/(11+L)=9*02*AZ*L/70
```

С

```
JM=-FX*50*L/30+07*A7*L*L*L/140
MY12=NY1-MY2
1717=N71-M22
AD=0.6***V12/L+0.05*074+0:55*072+33*02*L/140
ADP=0.6+M712/L+0.05+QY1+0:55+QY2+33+Q7+1/140
50=-0.55+NY12-0.1+071+L-0.45+072+L-160+07+L+L/840
80P=-0.55+HT12-0.1+0Y1+L-0.45+0Y2+L-169+0Z+L+L/840
CD=-0.05+MY12-0.05+072+L-5+02+L+L/220
CDP=-0.05+11212-0.05+0Y2+L-5+Q2+L+L/280
DD=!Y12*1/15+021*1*1/60+0.05*022*1*1+9*02*L*L+9*02*L*L*L*L*L/420
DDP=MZ12*L/15+0Y1*L+L/60+0.05+0Y2*L*L+9*QZ*L*L*L/420
ED=-0.6*MY12/L-0.05+071-0.55*022-33+07+1/140
EDP==0: 6+MZ12/L=0.05+0V1-0:55+0V2=3*+0Z+L/140
FD=1.05*MV12+0105*072*L+5*07*L*L/280
FDP=0.05+MZ12+0.05+0Y2+L+5+0Z+L+L/280
GD=-0.05*MY12+0105%021*U-011*022*U-29*Q2*U*1/840
GDP==0.65+NZ12+0.05+0Y1+L=0.1+QY2+L=29+0Z+L+L/840
HD=-HV12*L/60-071*L*L/60-3*02*L*L*L/840
HDP==H712+L/60=0Y1+L+L/60=3+Q7+L+L+L/840
ID=-0.6+MY12/L-0.55+QZ1-0.05*072-33+07*L/140
TDP==0.6+MZ12/L=0.55+0Y1=0.05+0Y2=33+07+L/140
JD=0.05*MV12+0.1*021*L-0.05*022*L+20*02*L*L/840
JPP=0.05+MZ12+0.1+0Y1+L+0.05+0Y2+L+29+07+L+L/340
KD=0.7*NY12/L+0.55*071+0.05*QZ2+33*0Z*L/140
KOP=0.6*M212/L+0.55*QY1+0.05*QY2+33*Q2*L/140
LD=0.55*MV12+0.45*071*L+0.1*422*L+169*42*L*1/840
LDP=0.55+M212+0.45+0Y1+L+0.1+0Y2+L+169+07+L+L/840
MD=-0:05+NY12-0.05+071+L-5+02+L+L/280
MDP==0.(5*MZ12=0.05*0Y1*L=5*Q7*L*L/280
ND=-MY12*L/60+072*L*L/60+3*02*L*L*L/840
UDP==11212+L/60=0Y2+L+L/60=3+Q2+L+L+L/840
OD=-MD
ODP==toP
PD=NY12+1/15+0105+071+L+L+072+L+L/60+9+07+L+L+L/420
PDP=M712+L/15+0.05+0V1+L+L+QY2+L+L/60+9+QZ+L+L+L/420
DD=MX/I
RD="X/2
RETURN
END
FINISH
```

WYDRUK PRZYKŁADOWYCH WYNIKÓW

PROGRAMU #LIFT

```
SERIA UBLICZEN NR 1
WSPOLEZYNNIK SPREZYSTOSCI WZDIUZNEJ E=0,7705E 10
WSPOLEZYNNIK SORF7YSTOSCI POPP7FC7NEJ 6=0.2945E 10
WSPOLLZYNNIK POISSONA PS5=0.308
GESTUSE MATERIAFU ROS 0.2700F 04
LICZBA ELEMENTOW PUDZIALU NE A
ODLEGLUSC OD IGORNEJ PONTERZCHNI DZWTGARA DO PUNKTU ZAWIESZENIA E=
                                                                    0.0340
KAT PUHIEDZY LINAPI ZAWIESIA ALEA= 0.00 STOPNI
DEUGOSC ELEMENTOW PODZIALI:
                                                                     L( 3)= 0.4745E 00
                           1(1) = 0.4745E 00
                                                L(2) = 0.4745 \pm 00
                           1 ( 4) = 0 4745E 00
                                                1 (
CAERONITA DEUGOSC DZWIGARA 1= 0.1898F 01
PRZEKROJ DWUTEDWY U WYMIARACH STAFYCH NA DEUGOSCI
WYNIAEY PR7FKROJU POPR7EC7NFGO.
B1= 0.2000F-01 B2= 0.5000E-01 B3= 0.2000E 00 G1= 0.100E-02 G2= 0.100E-02 G3= 0.100E-02
CHARARTERYSTYKI GEUMETRYCZNE PRZEKROJU POPRZECZNEGO:
A=0.5000E-03 17=0.2085E-07 IV=0.1677E-05 IS= 0.1000E-09 IW= 0.2104E-09 IO= 0.1698E-05 B1= 0.766E-12 B2= 0.000E 00 AZ= 0.9095E-12 FMIM= 0.1350E 00
LICZBA MIFUSC JAWTESJENIA LMP-2
                                           WEZEY PODPORUWE: 1 5
ZADANA DOKLADWOSC ITERACUT = 0.070
            0201010 000000 0000000 000000 0201011
CIAG UP
LICZBA STOPNI SWORODY 16=30
REAKEDA PIONOWA TO= 0.7687E 00
                                                 S0 = 0.566E - 02
FX= V.000F 00
                Q7=-0.810F 00
                                 AZ = 0.909F - 12
                                                                MY1= 0.000E 00
                                                                                 MY2==0.274E 00
                                                                                                 MX = 0.000E 00
                                                QZ2==0.384E 00
MZ1= 4,0008 00
                MZ2= 0.000F 00
                                QZ1 = 0.769 = 00
                                                                                QY2= 0.000E 00
                                                                QY1= 0.000E 00
FX= V.000E 00
                97=-0.8105 00
                                 AZ = 0.909 E - 12
                                                 S0 = 0.566E - 02
                                                                MY1= 0.274F 00
                                                                                 MY2==0.365E 00
                                                                                                 MX = 0.000E 00
MZ1 = V.000F 00
                MZ2= 0.000F 00
                                QZ1 = 0.384E 00
                                                022 = 0.000E 00
                                                                QY1 = 0.000F 00
                                                                                 QY2= 0.000E 00
FX= V.000p 00
                97==0.810F 00
                                 AZ= 0.909F-12
                                                 S0 = 0.566E - 02
                                                                MY1 = 0.365F 00
                                                                                MY2==0.274E 00
                                                                                                 MX= 0.000E 00
                                                QZ2= 0.384E 00
MZ1= V.000F 00
                MZ2= 0.000F 00
                                971 = 0.000 = 00
                                                                QY1= 0.000E 00
                                                                                QY2= 0.000E 00
FX= V.000P 00
                QZ=-0.810F 00
                               AZ= 0.909F-12
                                                 S0 = 0.566E = 02
                                                                MY1 = 0.274 = 00
                                                                                MYZ= 0.000E 00
                                                                                                 MX = 0.000E 00
                                                QZ2= 0.769E 00
MZ1= 4,000F 00
               MZ2 = 0.000 = 00
                               Q71=-0.384F 00
                                                                                QY2= 0.000E 00
                                                                QY1= 0.000F 00
```

Z/19

KRYTYUZNE OBCIAZENIE ROZLOZONE NA DLUGOSCI PRETA

QZKRYT=-0.126741E 02

KRYTYCZNE OBCIAZENIE ROZLOZONE NA DLUGOSCI PRETA

07KRYT=-0.742525E 02 EPSILUN= 0.6032F 00

************************* ITEPACJA 4 0.9513E 01 STALE SPREZYNOWANIA: 0.9513E 01 KGMIN= 0.1000E 03 NRR= 0 DET= 0.1379E 52 IRANK= 30 / IV(1)= 0.0000E 00 / NAJWIENSZA WARTOSC WEASNA X(1)= 0.9628E-02 PARAMETR OBCIAZENIA KRYTYCZNEGO LAMBDA= 0.1039E 03 KRYTYCZNE OBCIAZENIE ROZLOZONE NA DLUGOSCI PRETA Q7KRVT=-0. 841333E 02 EPSILUN= 0 1331F 00 ***** ITEPALJA S STALE SPREZYNOWANIA: 0.1078E 02 0.1078E 02 KGMIN* 0.1000E 03 NRR= 0 DET= 0.1764E 52 IRANK= 30 PRZEMIESZCZENIA WEZIOWE Z DOKLADNOSCIA DO STALEJ U(1) = 0.0000F 001 V(1) = 0.0000 = 002 3 TETA(1) = 0.1324F 00W(1) = 0.0000F 004 5 PSI(1)=-0.1856F-03 FI(1)= 0 3093F 00 6 7 CH1(1)=-0.9821F 00 8 U(2)==0 1699F-21 V(2)=-0.579AF-01 2 TETA(2)= 0.9951 ==01 10 11 4(2)= 0.7294F=04 12 PSI(2)=-0_1116E-03 FI(2)= 0,8215F 00 13 14 CHI(2) == 0, 7074F 00

```
U(3)=-0.1690F=21
        15
        16
                  V(3) = -0.8331 F = 01
               TETA(3)=-0.8032F=12
        17
                  W(3) = 0.1004F=03
         18
         12
                PSI(3) = 0.1308F=14
         20
                FI(3) = 0.1000F 01
                CHI(3) = 0.1965F-10
         21
                      22
                  U(4)=-0 1690F-21
         23
                  V(4)=-0.579AF-01
               TETA(4)=-0.9951F-01
         24
         25
                  W(4)= 0.7294F=04
                PSI(4)= 0,1116F=03
         26
         27
                FI(4)= 0.8215F 00
                CHI(4) = 0.7074F 00
         28
         29
                  U(5)=-0.1690F=21
         30
                  V(5) = 0.0000 \times 00
               TETA(5)==0.1324F 00
         31
                  W(5)= 0.0000F 00
         32
         33
                PSI(5)= 0 1856F=03
                FI(5)= 0 3993F 00
         34
                CHI(5) = 0.9321F 00
         35
NAJUIEKSZA NARTOSC WFASNA X( 1)= 0.9359E=02
                                                       / IY( 1)= 0.0000E 00 /
PARAMETR OBCIATENIA KRYTYCZNEGO LAMBDA= 0.1069E 03
KRYTYUZNE OBCIAZENIE ROZLOZONE NA DLUGOSCI PRETA
                   07KRYT=-0.365502E 02
EPSILUN= 0.2873F-01
ITERACJE ZAKONOTONO DLA EDSTLON= 0.2873E-01
```

2/22

07KRYT=-0.114923F 03

KRYTYUZNE OBCIAZENIE POZLOZONE NA DLUGOSCI PRETA

WARIANT BEZ SPREZYNOWANIA LICZBA STOPNI SWORDDY 16=28 KGMIN* 0.1000E 03 NRR= 0 DFT= 0,1476F 54 IRANK= 28 PRZEMIESZCZENIA WETIOWE Z DOKLADNOSCIA DO STALEJ U(1)= 0.0000F 00 1 V(1)= 0.0000F 00 2 3 TETA(1)=-0.9634F=01 W(1) = 0.0000F 00 4 PSI(1) = 0.1224F=035 FI(1)= 0,0000F 00 6 7 CHI(1) = 0.1000F 01U(2) = 0.8291 = 198 9 V(2)= 0.4337F=01 TETA(2)=-0.7770F-01 10 W(2)=-0:5290F-04 11 PSI(2)= 0.8678F=04 12 FI(2) == 0.430KF 00 13 CHI(2) = 0.7238F 00 14 U(3) = 0.8291F - 1915 V(3)= 0.6365F=01 16 TETA(3)=-0_11375-12 17 18 4(3)=-0.7488F=04 PSI(3)=-0.4441F=15 19 20 FI(3)==0.6134F 00 CHI(3) = Q_3638F=11 21 -22 U(4)= 0.8291F-10 23 V(4)= 0,4337F=01 TETA(4)= 0.7779F=01 24 W(4)==0.5290==04 25 PSI(4)=-0.8678F=04 26 27 FI(4)=-0_4306F 00 CHI(4) =- 0.7238F 00 28 -----U(5) = 0.8291 F = 1929 V(5) = 0.0000F 0030 TETA(5)= 0.9636F=01 31 W(5) = 0.0000F.0032 33 PSI(5)==0.1224F=03 FI(5) = 0.0000F 00 34 CHI(5)=-0,1000F 01 35 NAJULEKSZA WARTOSC WEASNA X(1)= 0.7068E-02 PARAMETR OBCIAJENTA KRYTYCZNEGO LAMBDA # 0.1419E 03

Z/23

ROZDZIĘINIK

1.	Recenzenci p	racy					• •	•	•	•	2	egz.
2.	Biblioteka G	łówna	Polite	chniki	Wrocł	awski	Lej	•	•		1	egz.
3.	Biblioteka i	OINT	Instyt	utu Bu	downic	twa]	?Wr	•	•	•	1	egz.
4.	Promotor pra	су	• • • •		• • •	• •	• •	•	•	•	1	egz.
5.	Autor		• • • •		•••	• •	• •		•	u .\$	1	egz.