



## PLIENINIŲ STIEBŲ ĮRĄŽŲ REGULIAVIMAS

Donatas Jatulis<sup>1</sup>, Algirdas Juozapaitis<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva

El. paštas:<sup>1</sup>donatas.jatulis@st.vgtu.lt; <sup>2</sup>alg@st.vgtu.lt

Įteikta 2009 05 04; priimta 2009 06 01

**Santrauka.** Straipsnyje aptariama plieninių stiebų projektavimo metodika, paremta įrąžų reguliavimu. Pateikiamos analitinės išraiškos racionaliems lenkiamiesiems momentams bet kuriame kamieno tarpsnyje nustatyti. Šiose netiesinėse išraiškose vertinama ašinės jėgos, veikiančios kamiene, įtaka racionalių lenkiamųjų momentų reikšmėms. Straipsnyje aptariamas ir atotampų tvirtinimo prie kamieno racionalių koordinacių (alitudžių) apskaičiavimas, taip pat ir pačių atotampų išankstinio įtempimo bei jų skerspjūvio ploto nustatymas. Atliktas skaitinis tipinio tribriaunio spragotinio plieninio stiebo eksperimentas parodė, kad siūloma įrąžų reguliavimo metodika leido ne tik sumažinti atotampų skerspjūvio plotą, bet ir bendrąsias sąnaudas.

**Reikšminiai žodžiai:** plieninis stiebas, racionalūs lenkiamieji momentai, įrąžų reguliavimas, geometriniai ir fizikiniai parametrai, elgsenos modeliavimas.

### 1. Įvadas

Pastarąjį dešimtmetį Lietuvoje padidėjo aukštųjų statinių projektavimo ir statybos apimtis. Pagrindinę įtaką tam turėjo gerokai išaugusi telekomunikacinių paslaugų paklausa ir tokių tinklų plėtra. Kilusios aukštųjų telekomunikacinių statinių projektavimo problemos inicijavo tokių konstrukcijų, kaip plieniniai stiebai, mokslinius tyrimus ir inovacijas. Pažymėtina, kad šios iš anksto įtemptos netiesinės elgsenos sistemos išsamiai aptartos daugelyje darbų (Gantes *et al.* 1993; Smith 2007; Halasz, Petersen 1970; Мельников 1969; Соколов 1961; Juozaitis, Šapalas 1998). Yra žinomi įvairūs analiziniai ir skaitiniai stiebų įtempimų deformacijų būsenos tyrimo metodai (Giofrè *et al.* 2004; Yan-Li 2003; Wahba *et al.* 1998; Воеводин 1989; Juozapaitis *et al.* 2008). Dalis darbų skirta stiebų dinaminės elgsenos analizei (Melbourne 1997; Giofrè *et al.* 2004; Peil *et al.* 1996). Yra žinomi tyrimai, skirti ir plieniniams stiebams tobulinti bei jų techniniam ekonominiam efektyvumui didinti (Abdulrazzag, Galeb 2002; Gantes *et al.* 1993; Мельников 1969). Būtina pažymėti, kad konstrukcijų tobulinimas daugeliu atvejų suprantamas tik kaip stiebo kamieno sudaromųjų elementų (juostų ir tinklelio) schemas parinkimas ir skerspjūvių

projektavimas. Didžiausią efektą galima pasiekti tobulinant konstrukcijų formą. Yra žinomi naujos sandaros stiebo konstrukcijų tyrimai (Воеводин 1981, 1989; Jatulis *et al.* 2007). Būtina pabrėžti, kad iš anksto įtemptų konstrukcijų sistemų techninį ekonominį efektyvumą nusako jų geometriniai bei fizikiniai parametrai (Abdulrazzag, Chaseb 2002; Воеводин 1989). Yra žinoma, kad racionalių pagal masės kriterijų projektinių sprendimą lemia stiebo kamieno lenkiamųjų momentų pasiskirstymas (Трофимович, Пермяков 1981). Racionalių momentų pasiskirstymą galima pasiekti tik tinkamai parinkus minėtus geometrinius ir fizinius parametrus.

Yra žinomi darbai, kuriuose racionalūs lenkiamieji momentai apskaičiuojami neatsižvelgiant į ašinės jėgos poveikį (Трофимович, Пермяков 1981). Toks tiesinis skaičiavimas esant tam tikram stiebo liaunumui gali duoti nemenkų paklaidų.

Straipsnyje pateikiamos analitinės išraiškos racionaliems lenkiamiesiems momentams bet kuriame kamieno tarpsnyje nustatyti. Šiose netiesinėse išraiškose įvertinama ašinės jėgos, veikiančios kamiene, įtaka lenkiamųjų momentų reikšmėms. Sprendžiant racionalių lenkiamųjų momentų reguliavimo stiebo kamiene

uždavinį, aptariamas ir atotampų tvirtinimo prie kamieno racionalių koordinatčių skaičiavimas. Siekiant nustatyti aptarto įrąžų reguliavimo techninį ekonominį efektyvumą darbe pateiktas skaitinis eksperimentas, rodantis siūlomos stiebo projektavimo metodikos efektyvumą.

**2. Stiebo komponuojamieji parametrai**

Iš anksto įtemptų sistemų efektyvumui didelę įtaką turi jų geometrinių ir fizinių parametrų parinkimas (Gantes *et al.* 1993; Воеводин 1989). Pagrindiniais geometriniais stiebų, kaip iš anksto įtemptų konstrukcijų, parametrais laikomi jų atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatės, o fizikiniais – pradiniai atotampų įtempiai bei jų ašinis standis. Tinkamas minėtų parametrų reikšmių parinkimas leidžia gauti racionalų lenkiamųjų momentų pasiskirstymą kamiene, kuris lemia artimą optimaliam pagal masės kriterijų projekcinį sprendimą (Соколов 1961).

Minėtieji parametrai yra susieti tarpusavyje. Todėl neracionaliai parinkus atotampų tvirtinimo prie kamieno vietas, neįmanoma pasiekti racionalaus lenkiamųjų momentų kamiene pasiskirstymo.

Pabrėžtina ir tai, kad įrąžų reguliavimas leidžia tiesiogiai, palyginti su variantiniu projektavimu, artėti prie racionalaus sprendinio. Todėl taikant įrąžų reguliavimą stiebo komponavimo laiko sąnaudos tik sumažinamos, o galutinis projektinis sprendinys visada artimas optimaliam.

**3. Racionalūs stiebo kamieno lenkiamieji momentai**

Stiebo kamieno masę lemia veikiantys didžiausieji lenkiamieji momentai. Juos sukelia tolygiai paskirstyta apkrova  $p_i$  ir sutelktine jėga  $F_1$ . Stiebų skaičiavimams atlikti rekomenduojama (Соколов 1961) kiekviename kamieno tarpsnyje (tarpmazgyje) pridėti tolygiai išskirstytą ekvivalentinę apkrovą (1 pav.).

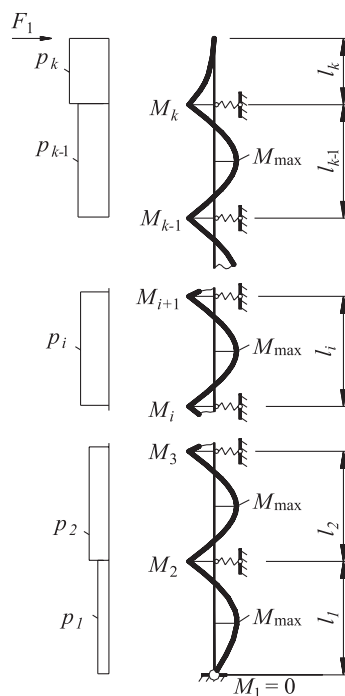
Stiebo kamieno racionalia momentų pasiskirstymo diagrama laikysime tokią, kurioje veikiant minėtoms apkrovoms neigiamosios ir teigiamosios momentų ekstremumų reikšmės yra absoliutiniu didumu tarpusavyje lygios (1 pav.).

Maksimaliam lenkiamajam momentui kamieno tarpsnyje (2 pav.) nustatyti pasinaudosime (Тимошенко 1955) pateiktomis lenkiamo strypo ašies išlinkio lygtimis, veikiant tolygiai paskirstytai apkrovai (1) ir strypo galuose pridėtiems lenkiamiesiems momentams (2):

$$y = \frac{P}{Nk^2} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kl}{2} - kx\right)}{\cos\frac{kl}{2}} - 1 \right] - \frac{P}{2N} x(l-x), \tag{1}$$

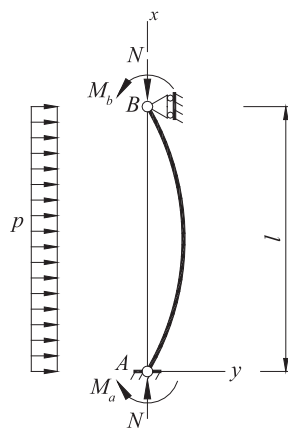
$$y = \frac{M_b}{N} \left( \frac{\sin kx}{\sin kl} - \frac{x}{l} \right) + \frac{M_a}{N} \left[ \frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} - \frac{l-x}{l} \right], \tag{2}$$

čia  $k = \sqrt{\frac{N}{EI}}$  – kamieno liaunumo parametras.



1 pav. Stiebo kamieno racionalių lenkimo momentų diagrama

Fig. 1. Rational bending moment diagram of the mast



2 pav. Kamieno tarpsnio, veikiamo tolygiai išskirstytos apkrovos ir gniuždymo jėgos, skaičiuojamoji schema

Fig. 2. Model of shaft span under uniform distributed and axial load

Pasitelkus (1) ir (2) lygtis, iš žinomos diferenciacinės priklausomybės  $EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M(x)$  gaunama lenkiamąjo momento kamieno tarpsnyje išraiška:

$$M(x) = M_a \frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} + M_b \frac{\sin kx}{\sin kl} + \frac{p}{k^2} \left[ \frac{\cos k \left( x - \frac{l}{2} \right)}{\cos \frac{kl}{2}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Tarpsnio viduryje  $x = \frac{l}{2}$  lenkiamasis momentas bus lygus:

$$M \left( x = \frac{l}{2} \right) = p \frac{1 - \cos \frac{kl}{2}}{k^2 \cos \frac{kl}{2}} + \frac{M_a + M_b}{2} \frac{1}{\cos \frac{kl}{2}}. \quad (4)$$

Kai kamieno lenkiamųjų momentų ties gretimomis atramomis reikšmės nėra vienodos, tada maksimalus kamieno tarpsnio lenkiamasis momentas nebus jo viduryje. Tokiu atveju, žinant, kad maksimalaus lenkiamąjo momento ordinatėje skersinė jėga lygi nuliui ( $V(x) = dM / dx = 0$ ), galima pertvarkius (3) lygtį gauti išraišką maksimalaus lenkimo momentui apskaičiuoti:

$$x(M_{\max}) = \frac{1}{2}l + \frac{1}{k} \arctan \left[ \cot \left( \frac{1}{2}kl \right) \frac{M_b - M_a}{M_b + M_a + \frac{2p}{k^2}} \right]. \quad (5)$$

Įrašius (5) išraišką į (3) lygtį ir remiantis momentų lygybės sąlyga  $M_{\max} = -M_2 = M_{rac}$ , kai  $M_A = 0$ , gaunama formulė pirmojo tarpmazgio racionalaus lenkiamąjo momento reikšmei apskaičiuoti:

$$M_{rac} = \frac{p}{k^2} \left[ \frac{\cos \left( \arctan \left[ \cot \left( \frac{1}{2}k_1l_1 \right) \frac{-M_{rac}}{2p_1 - M_{rac}} \right] \right)}{\cos \frac{k_1l_1}{2}} - 1 \right] - \frac{\sin \left( \frac{1}{2}k_1l_1 + \arctan \left[ \cot \left( \frac{1}{2}k_1l_1 \right) \frac{-M_{rac}}{2p_1 - M_{rac}} \right] \right)}{\sin k_1l_1}. \quad (6)$$

Tiesiogiai iš (6) formulės gauti racionalaus momento reikšmę yra keblu, todėl ši lygtis sprendžiama

laipsniško priartėjimo būdu. Pirmajam priartėjimui galima pasitelkti (7) išraišką, kurioje nevertinama ašinės jėgos įtaka (Jatulis *et al.* 2007):

$$M_{rac} = \left( \frac{3}{2} - \sqrt{2} \right) p_1 l_1^2 \approx 0,085 \ 8 p_1 l_1^2. \quad (7)$$

Tarus, kad antrojo ir kitų kamieno tarpsnių maksimalus lenkiamasis momentas yra tarpatričio viduryje, ir pasitelkus momentų lygybės sąlygą  $M_{\max} = -M_2 = M_{rac}$ , iš (4) formulės galima gauti išraišką vidurinių tarpsnių racionalaus lenkiamąjo momento reikšmei apskaičiuoti:

$$M_{rac} = \frac{p_i l_i^2}{16} \frac{4 \tan^2 \frac{u_i}{2}}{u_i^2}, \quad (8)$$

čia  $u$  – kamieno liaunumo koeficientas:

$$u = \frac{l}{2}k = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{N}{EI}}. \quad (9)$$

Nesunku įsitikinti, kad tuo atveju, kai ašinės jėgos reikšmė artima nuliui, lenkiamųjų momentų reikšmės pagal (8) išraišką praktiškai sutampa su tiesinio skaičiavimo pagal žinomą formulę (Jatulis *et al.* 2007) reikšmėmis:

$$M_{rac} = \frac{p_i l_i^2}{16} = 0,062 \ 5 p_i l_i^2. \quad (10)$$

Gembinėje kamieno dalyje paprastai ašinės jėgos įtaka yra nedidelė, todėl lenkiamąjo momento reikšmę gana tiksliai nustatyti galima pasitelkus (11) išraišką.

$$M_k = \frac{p_k l_k^2}{2} + F_1 l_k, \quad (11)$$

čia:  $M_k$  – momentas gembinėje dalyje;  $p_k$  – tolygiai paskirstyta gembėje apkrova;  $l_k$  – gembės ilgis;  $F_1$  – sutelktoji jėga gembės gale (1 pav.).

#### 4. Racionalios atotampų tvirtinimo koordinatės

Sprendžiant racionalaus lenkiamųjų momentų reguliavimo stiebo kamieno uždavinį, pirmiausia reikia parinkti tinkamus, t. y. racionalius kamieno tarpmazgio ilgius. Išspręsti šį uždavinį galima tokia seka:

1. Kiekvienam tarpsniui užrašoma racionalaus lenkiamąjo momento lygtis, bendras šių lygčių skaičius lygus padalinto kamieno tarpsnių skaičiui.
2. Pasitelkiama stiebo kamieno aukščio kaip visų kamieno tarpsnių sumos apskaičiavimo sąlyga:

$$H_k = l_1 + l_2 + l_i + l_{i+1} \dots l_{k-1} + l_k. \quad (12)$$

Turint stiebo kamieno aukštį  $H_k$  ir pasitelkus kamieno tarpsnių skaičių, gaunamas pakankamas lygčių

skaičius optimaliems kamieno tarpams apskaičiuoti.

3. Imama racionalaus lenkiamojo momento reikšmė.
4. Naudojant (6) ir (8) išraiškas apskaičiuojamos pirmo ir vidurinių tarpų reikšmės. Pabrėžtina, kad iš šių formulių sunku tiesiogiai nustatyti tarpų ilgius, todėl jie irgi apskaičiuojami laipsniško priartėjimo būdu.
5. Naudojant (11) išraišką, apskaičiuojamas kamieno gembės ilgis.
6. Tikrinama (12) sąlyga. Jeigu gauta tarpų suma yra didesnė už kamieno aukštį, koreguojama (mažinama) racionalaus momento reikšmė ir grįžtama į 4 žingsnį. Jeigu gauta tarpų suma yra mažesnė už kamieno aukštį, tada reikėtų atitinkamai didinti racionalaus momento reikšmę.

Skaičiavimų seka nutraukiama, kai gautų tarpų sumos ir kamieno aukščio skirtumas atitinka pasirinktą tikslumą.

### 5. Racionalūs tampriųjų atramų poslinkiai

Racionalių tampriųjų atramų poslinkiams nustatyti pasitelksime (Тимошенко 1955) posūkių atraminuose mazguose darnos lygtis (3 pav.):

$$\begin{aligned} M_{i-1} \frac{l_i}{6EI_i} \Phi(u_i) + M_i \frac{1}{3E} \left[ \frac{l_i}{I_i} \Psi(u_i) + \frac{l_{i+1}}{I_{i+1}} \Psi(u_{i+1}) \right] + \\ M_{i+1} \frac{l_{i+1}}{6EI_{i+1}} \Phi(u_{i+1}) + U_{xi-1} \frac{1}{l_i} - U_{xi} \left( \frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i+1}} \right) + \\ U_{xi+1} \frac{1}{l_{i+1}} + \frac{pl_i^3}{24EI_1} \chi(u_i) + \frac{pl_{i+1}^3}{24EI_{i+1}} \chi(u_{i+1}) = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

čia funkcijos  $\Phi(u)$ ,  $\Psi(u)$ ,  $\chi(u)$  įvertina ašinės jėgos įtaką nagrinėjamos atramos posūkio kampui.

Šių funkcijų išraiškos:

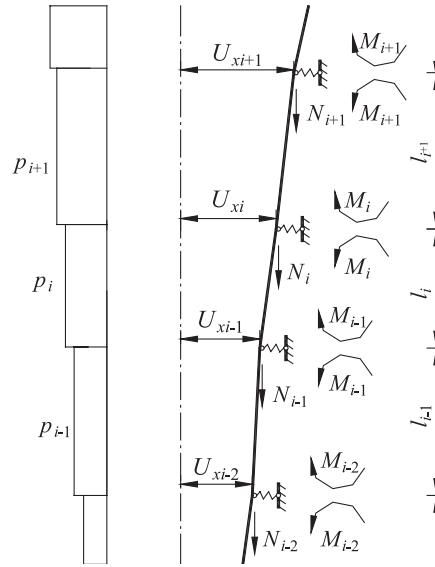
$$\Phi(u) = \frac{3}{u} \left( \frac{1}{\sin 2u} - \frac{1}{2u} \right), \quad (14)$$

$$\Psi(u) = \frac{3}{2u} \left( \frac{1}{2u} - \frac{1}{\tan 2u} \right), \quad (15)$$

$$\chi(u) = \frac{3(\tan u - u)}{u^3}. \quad (16)$$

Sprendžiant (13) lygčių sistemą, atraminių momentų reikšmės imamos vienodos, t. y. lygios racionaliam momentui, o imamas tik viršutinio mazgo poslinkis  $U_{lim}$ . Taip gaunamas pakankamas lygčių skaičius nežinomiems kitiems, racionaliams atramų poslinkiams

apskaičiuoti. Jeigu skaičiuojama pagal geometriškai tiesinę formuluotę (13) lygtyje trigonometrinių funkcijų  $\Phi(u)$ ,  $\Psi(u)$ ,  $\chi(u)$  reikšmės lygios vienetui.



3 pav. Stiebo kamieno skaičiuojamoji schema

Fig. 3. Model of the mast shaft

### 6. Racionalūs atotampų komponuojamieji fizikiniai parametrai

Atotampų komponuojamieji parametrai yra atotampų išankstinis įtempimas  $\sigma_{0i}$ , skerspjūvio plotas  $A_i$ . Kai yra žinomi racionalūs poslinkiai, nesunku apskaičiuoti atraminių mazgų reakcijas, o tai savo ruožtu leidžia nustatyti apkrovų atstojamąją reakciją  $Q$ , atitinkančią kiekvieną atotampų lygį.

Nagrinėjant atotampų lygius atskirai (4 pav.), ėmus priešvėjinių atotampų įtempį veikiant apkrovai  $\sigma_{2,3}$ , pradinis atotampų įtempimas  $\sigma_{0i}$  bei skerspjūvio plotas  $A_i$  gaunami išsprendus tokią lygčių sistemą:

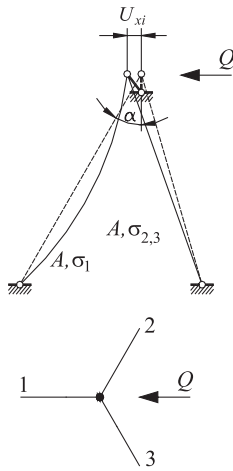
$$Q + A(-\sigma_{2,3} + \sigma_1) \sin \alpha = 0, \quad (17)$$

$$-U_x \sin \alpha = -\frac{s^3}{24A^2} \left( \frac{q_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{q_0^2}{\sigma_0^2} \right) + \frac{s}{E} (\sigma_1 - \sigma_0), \quad (18)$$

$$-0,5U_x \sin \alpha = -\frac{s^3}{24A} \left( \frac{q_1^2}{\sigma_{2,3}^2} - \frac{q_0^2}{\sigma_0^2} \right) + \frac{s}{E} (\sigma_{2,3} - \sigma_0), \quad (19)$$

čia:  $Q$  – atotampų mazgo horizontalių apkrovų atstojamoji reakcija;  $\alpha$  – atotampo kampas su vertikale;  $\sigma_1$  –

įtempis pavėjinėje atotampoje;  $\sigma_{2,3}$  – įtempis priešvėjinėje atotampoje;  $E$  – atotampos tamprumo modulis;  $A$  – atotampos skerspjūvio plotas;  $s$  – atotampos tarptraimis;  $q$  – atotampos tolygiai paskirstytos apkrovos statmenoji komponentė. Formulės (17)–(19) indeksas 0 reiškia atotampų būseną montavimo etapais. Lygtyse (19)–(25) nežinomieji yra atotampų skerspjūvio plotas  $A_i$ , atotampų pradinis įtempimas  $\sigma_{2,3}$ , įtempis pavėjinėje atotampoje  $\sigma_1$ .



4 pav. Atotampų lygio skaičiuojamoji schema

Fig. 4. Model of the guy level

Taip komponuojant atotampas galima suvienodinti atotampų įtempius kiekviename lygyje ir sumažinti atotampų plieno sąnaudas.

### 7. Stiebo komponavimo seka

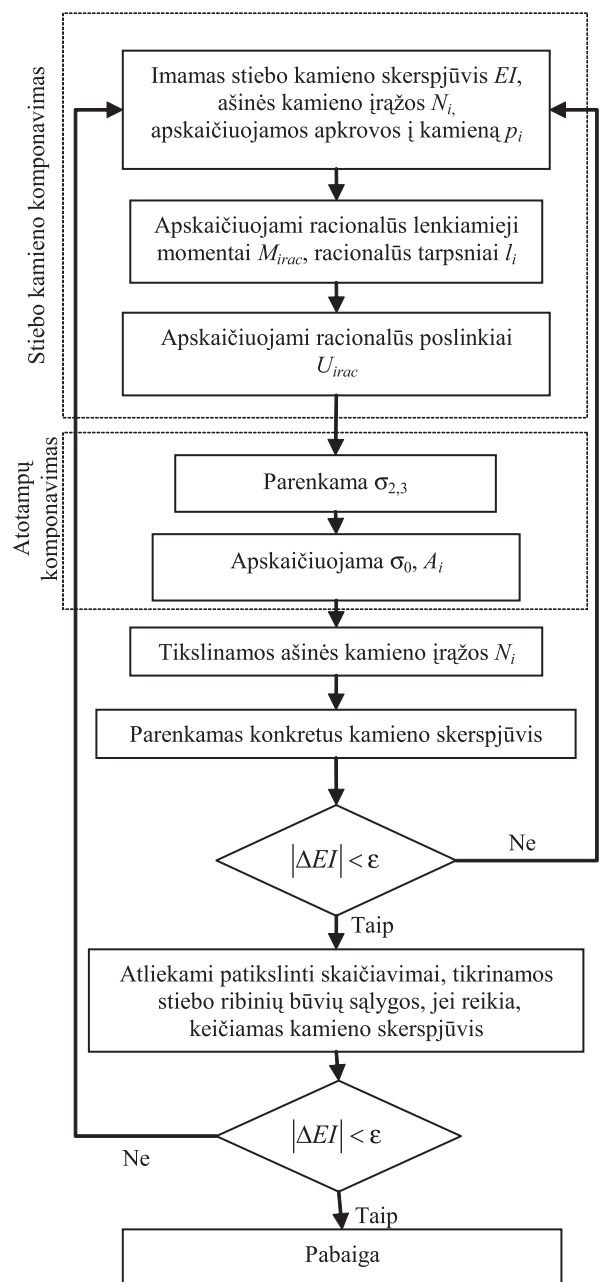
Apibendrinus stiebo kamieno ir atotampų įrašų reguliavimo metodiką, galima pateikti tokią stiebo komponavimo seką:

1. Pagal žinomus analogus imamas kamieno tarpinių lenkiamasis standis  $E$ , išorinės apkrovos.
2. Apskaičiuojami kamieno racionalūs lenkiamieji momentai, atotampų tvirtinimo kamiene koordinatės.
3. Priėmus ribinį viršutinio atotampos tvirtinimo taško poslinkį, apskaičiuojami racionalūs kamieno mazgų poslinkiai.
4. Imamas priešvėjinių atotampų įtempis po apkrovimo.
5. Apskaičiuojamas atotampų skerspjūvio plotas ir išankstinis atotampų įtempimas.
6. Apskaičiuojamos kamieno tarpinių ašinės jėgos.
7. Parenkami konkretūs kamieno tarpinių skerspjūviai.

8. Kartojami 2–6 punktų veiksmai, kol pasiekiamas reikiamas tikslumas.
9. Perskaičiuojama stiebo įrašos schema pagrindiniam ir kitiems apkrovos deriniams.
10. Tikrinamos ribinių būvių sąlygos, jeigu reikia, keičiamas skerspjūvis, perskaičiuojamos apkrovos ir kartojami 2–9 punktų veiksmai.

Stiebo komponavimo algoritmas pateiktas 5 pav.

Pateiktos stiebo komponavimo metodikos ypatumas tas, kad optimalus lenkiamųjų momentų pasiskirstymas kamiene gali būti pasiektas tik konkrečiam apkrovimo variantui. Esant kitam apkrovimo varian-



5 pav. Stiebo komponavimo algoritmas

Fig. 5. Algorithm of composing of guyed mast

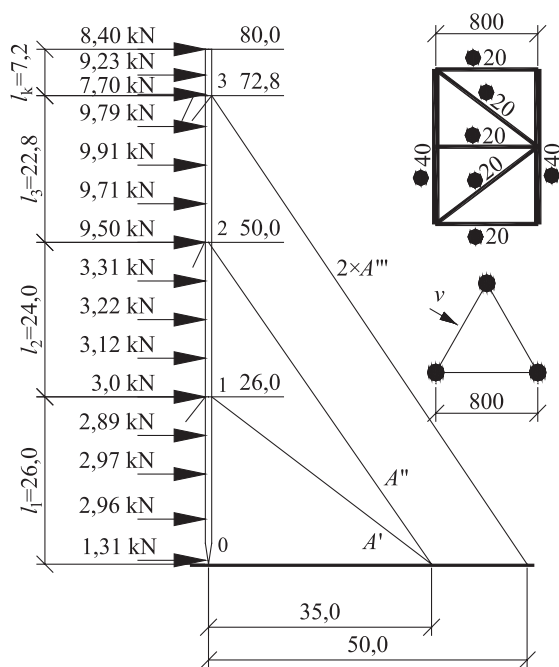


tui gali būti, kad kažkuriame stiebo kamieno tarpsnyje atsiras didesnės reikšmės lenkiamasis momentas. Dėl šios priežasties tikslingiausia komponuoti stiebą maksimaliam suminiam apkrovimui, o parinktą kamieno skerspjūvį tikrinti kitų apkrovimo variantų atvejams.

**8. Skaitinis eksperimentas**

Siekiant nustatyti pateiktos stiebo įrašų reguliavimo metodikos techninį ekonominį veiksmingumą buvo atliktas skaitinis eksperimentas. Analizei buvo pasirinktas tipinis tribriaunis spraginis stiebas (6 pav.).

Stiebo kamieno ir atotampų duomenys pateikti 1 lentelėje.



6 pav. Tipinio stiebo schema

Fig. 6. Standard guyed mast

1 lentelė. Tipinio stiebo duomenys

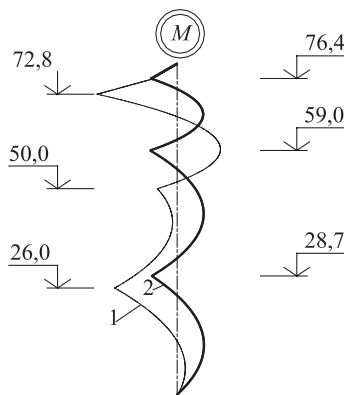
Table 1. Standard guyed mast data

Kamieno duomenys		Atotampų duomenys			
Sekcijos elementas	Skerspjūvis (plieno markė)	Lygis	Skerspjūvio plotas, mm <sup>2</sup>	Išankstinis įtempimas, MPa	Tamprumo modulis, GPa
Juosta	•40 (S355)	1	68	100	185
Statramstis	•20 (S355)	2	68	100	185
Spyris	•20 (S355)	3	2×68	100	185

Buvo pasirinktas apkrovos derinys, kai vėjo statinė apkrova veikia vieną kamieno plokštumą (6 pav.). Su- telktosios apkrovos į kamieną pakeistos ekvivalentinėmis tolygiai paskirstytomis apkrovomis. Kamieno er- dvinis modelis buvo pakeistas į vienašį ir priimta, kad atotampas su kamieniu jungiasi kamieno svorio centro ašyje.

Pritaikius pirmiau išdėstytą stiebo komponavimo metodiką buvo parengtas stiebo projektas. Gauti re- zultatai buvo sugretinti su tipinio stiebo duomenimis. Stiebo elementų įrašoms nustatyti buvo pasitelktas *Robot Millennium* programinis paketas, kurio atotampų analizės patikimumą parodė ankstesnis tyrimas (Ju- zapaitis et al. 2008). Analizei supaprastinti ašinės jėgos įtaka lenkiamiesiems momentams nebuvo vertinama. Naujai komponuojant stiebą buvo priimtas viršutinio atotampas mazgo poslinkis  $U_{x3} = 69$  cm, priešvėjinių atotampų įtempis po apkrovimo  $\sigma_{2,3} = 680$  MPa.

Gautosios lenkiamųjų momentų diagramos su- gretintos 7 pav., o skaičių rezultatai sugretinti 2 lentelėje.



7 pav. Tipinio (1) ir naujai sukomponuoto (2) stiebo lenkiamųjų momentų diagramos

Fig. 7. Bending moment diagrams of standard (1) and new composed (2) guyed mast

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naujai sukom- ponuoto stiebo maksimalus momentas daugiau kaip 3 kartus mažesnis už tipinio stiebo maksimalų lenkia- mąjį momentą. Toks rezultatas pasiektas parenkant racionalias atotampų tvirtinimo koordinates. Labiau- siai tarpmazgių ilgis koreguotas viršutinio tarpmazgio (-31,3 %) ir gembės (-96,5 %), t. y. buvo sumažinti la- biausiai apkrauti kamieno ruožai. Pabrėžtina, kad įrašų reguliavimas leido vienodai išnaudoti ir gerokai suma- žinti (-131,4 %) atotampų skerspjūvio plotą.

Stiebų projektavimo rezultatai parodė, kad reguliuojant įrašas kamieno plieno sąnaudas pavyko sumažinti daugiau kaip 30 %.

Pabrėžtina, kad įrašų reguliavimas yra gana paprastas būdas priartinti projekcinį rezultatą prie optimalaus bei lengvai pritaikomas variantiniam projektavimui.

**2 lentelė.** Tipinio ir naujai sukomponuoto stiebo gretinamosios analizės rezultatai

**Table 2.** Comparison analysis results of standard and new composed guyed mast

	Tipinis stiebas (1)	Naujai sukomponuotas stiebas (2)	$\frac{(2)-(1)}{(2)} \cdot 100\%$
Kamieno geometriniai komponuojamieji parametrai			
$l_1$ , m	26	28,7	9,3
$l_2$ , m	24	30,3	20,8
$l_3$ , m	22,8	17,4	-31,3
$l_k$ , m	7,2	3,7	-96,5
Atotampų fizikiniai komponuojamieji parametrai			
$A'$ , mm <sup>2</sup>	68	29,4	-131,4
$A''$ , mm <sup>2</sup>	68	63,8	-6,6
$A'''$ , mm <sup>2</sup>	2×68	2×31,8	-113,6
$\sigma'_0$ , MPa	100	123,3	18,9
$\sigma''_0$ , MPa	100	242,8	58,8
$\sigma'''_0$ , MPa	100	282,5	64,6
Statinių skaičiavimų rezultatai BEM ( <i>Robot Millennium</i> )			
$U_{x3}$ , cm	73	69	-5,8
$M_{0-1}$ , kNm	-9,5	-31,3	69,6
$M_1$ , kNm	73,1	29,7	-146,1
$M_{1-2}$ , kNm	5,4	-31,0	117,4
$M_2$ , kNm	23,1	31,6	26,9
$M_{2-3}$ , kNm	-50,6	-30,4	-66,4
$M_3$ , kNm	93,6	30,8	-203,9
$\sigma'_{2,3}$ , MPa	319	665	52,0
$\sigma''_{2,3}$ , MPa	497	663	25,0
$\sigma'''_{2,3}$ , MPa	523	663	21,1
Projektavimo rezultatai			
Juosta (S355)	•36	•30	
Statramstis (S355)	•22	•20	
Spyris (S355)	•18	•16	
Kamieno masė, t	3,7	2,8	-32,1

## 9. Išvados

1. Pateiktos išraiškos stiebo kamieno racionaliems lenkiamiesiems momentams, atsižvelgiant į kamieno ašinės jėgos įtaką, apskaičiuoti bei

racionalioms atotampų tvirtinimo koordinatėms nustatyti.

2. Aptartas racionalių stiebo atotampų komponuojamųjų fizikinių parametrų nustatymas.
3. Atliktas stiebo skaitinis eksperimentas ir gretinamoji gautų rezultatų analizė parodė, kad įrašas reguliuojant galima labai sumažinti stiebo lenkiamuosius momentus bei jo plieno sąnaudas.

## Literatūra

- Abdulrazzag, J. N.; Chaseb, G. A. 2002. Optimum design of square free-standing communication towers, *Journal of Constructional Research* 58: 413–425. doi:10.1016/S0143-974X(01)00055-4
- Gantes, C.; Khoury, R.; Connor, J. J.; Pouangare, C. 1993. Modeling, loading, and preliminary design consideration for tall guyed towers, *Computers and Structures* 49(5): 797–805. doi:10.1016/0045-7949(93)90027-B
- Giofrè, M.; Gusella, V.; Materazzi, A.; Venanzi, I. 2004. Removable guyed mast for mobile phone networks: wind load modeling and structural response, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92(6): 463–475. doi:10.1016/j.jweia.2004.01.006
- Halasz, R.; Petersen, C. 1970. *Abgespannte Maste und Schornsteine. Statik und Dynamik*. Berlin: Ernstu Sohn. 111 p.
- Yan-Li, H. 2003. Nonlinear discrete analysis method for random vibration of guyed masts under wind load, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91: 513–525. doi:10.1016/S0167-6105(02)00451-8
- Jatulis, D.; Juozapaitis, A.; Kamaitis, Z. 2007. Technical and economical effectiveness of guyed mast with combined guys, *Technological and Economic Development of Economy* 13(2): 120–125.
- Juozaitis, J.; Šapalas, A. 1998. Behaviour of Masts Subjected to Action of wind Load, *Journal of Constructional Steel Research* 46(1): 467–467. doi:10.1016/S0143-974X(98)80090-4
- Juozapaitis, A.; Kutas, R.; Jatulis, D. 2008. Mast behaviour analysis and peculiarities of numerical modelling, *Journal of Civil Engineering and Management* 14(1): 61–66. doi:10.3846/1392-3730.2008.14.61-66
- Melbourne, W. H. 1997. Predicting the cross-wind response of masts and structural members, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69–71: 91–103. doi:10.1016/S0167-6105(97)00163-3
- Peil, U.; Nölle, H.; Wang, Z. H. 1996. Dynamic behaviour of guys under turbulent wind load, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 65: 43–54. doi:10.1016/S0167-6105(97)00021-4
- Smith, B. W. 2007. *Communication Structures*. London, Thomas Telford. 338 p.
- Wahba, Y.; Madugula, M.; Monforton, G. 1998. Evaluations of non-linear analysis of guyed antenna towers, *Computers and Structures* 68(1): 207–212. doi:10.1016/S0045-7949(98)00025-X
- Воеводин, А. А. 1989. *Предварительно напряженные системы элементов конструкций* [Vojevodin, A. A. Pre-stressed structures]. Москва: Стройиздат. 304 с.

- Воеводин, А. А. 1981. *Шпренгельные радиомачты* [Vojevodin, A. A. Kick-stand radio-masts]. Москва: Радио и связь. 176 с.
- Мельников, Н. 1969. *Антенные сооружения* [Melnikov, N. Antenna structures]. Москва: Знание. 48 с.
- Соколов, А. Г. 1961. *Опоры линий передач* [Sokolov, A. G. Support systems of communication structures]. Москва. 453 с.
- Тимошенко, С. П. 1955. *Устойчивость упругих систем* [Timoshenko S. P. Stability of elastic structures]. Москва: Гостеориздат. 542 с.
- Трофимович, В. В.; Пермяков, В. А. 1981. *Оптимальное проектирование металлических конструкций* [Trofimovic, V. V.; Permiakov, V. A. Optimum Design of Steel Structures]. Киев: Будівельник. 136 с.

## REGULATION OF GUYED MAST STRESSES

### D. Jatulis, A. Juozapaitis

**Abstract.** Development of mobile communications and their networks in Lithuania produced an essential influence on high telecommunications structures design activities. In its turn it has stimulates their research and innovations of such structural systems. One of the most efficient systems of telecommunication structures is guyed mast. It should be indicated that the behaviour of prestressed structures systems has been thoroughly examined in many investigations. But recently the increase of economical efficiency of guyed masts becomes undoubtedly actual. The development of such structures in many cases is directed to the selection in the mast elements scheme and their cross-sections. It should be underlined that geometric and physical parameters have a decisive moment on prestressed structures. An exact parameters choice allows to obtain in the mast rational distribution of bending moments, predetermining a project solution closely connected with the mass criteria. The diagram of bending moment's distribution in guyed mast is considered rational when negative and positive moment values are absolutely equal. In the present research, analytical expressions for rational bending moments determining are presented. Above mentioned non-linear expressions estimate an influence of axial force for the bending moments. When solving the task of rational bending moments in a guyed mast, it is necessary to select suitable (i.e. rational) guyed mast bending spans. In the article is described the calculations of the guys fastening altitudes when guy level number is known. It should be noted that it is necessary to use the way of gradual approximation. The sequence of calculations is interrupted, when the sum of guyed mast spans corresponds to the exactness selected. The decisive part in mast behaviour is played by guys. The main parameters of them are pretension and cross-section area. In the article the equations are presented for determining the above-mentioned parameters. It should be stressed that after making uniform stresses of the guys on the different level of each of them it is possible to minimise some steel quantities. In the article a numerical experiment is presented for determining the technical-economical effectiveness of stress regulation. For the analysis, a standard three edged lattice guyed mast with cross-section parameters was selected in a usual way. By the suggested beam composition methods the design of the shaft was performed, and the results obtained were compared to a standard guyed mast shaft. For determining the stresses of beam elements *Robot Millennium* software was used; its reliability was demonstrated by earlier investigations. The results of numerical experiment that the maximal bending moment of composed guyed mast is three times less than that of a standard maximal one. An applied regulation of stresses has allowed to lessen much of the cross-section of guy rope. By applying the suggested methods it was possible to diminish the steel expenditure of shaft by more than 30%.

**Keywords:** guyed mast, rational bending moments, stress regulation, geometric and physical parameters, behaviour modelling.

**Donatas JATULIS.** Asistent at the Dept of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Lithuania. PhD at VGTU. Research interests: development of guyed-mast structures, non-linear analysis of the cables and guyed masts, optimal structural design.

**Algirdas JUOZAPAITIS.** Associate Professor at the Dept of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Lithuania. PhD at VGTU. Research interests: steel bridges and special steel structures, optimal shape determining of structures, geometrical non-linear analysis of structures.