



PLIENINIO STIEBO SU KOMBINUOTOSIOMIS ATOTAMPOMIS TECHNINIS EKONOMINIS VEIKSMINGUMAS

Donatas Jatulis, Algirdas Juozapaitis, Zenonas Kamaitis

*Tiltų ir specialiųjų statinių katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva
El. paštas bridge@st.vgtu.lt*

Įteikta 2007-01-15; priimta 2007-06-07

Santrauka. Straipsnyje aptariama nauja plieninio stiebo konstrukcija, kurioje taikomos kombinuotosios atotampos. Analizuojamas šios naujos konstrukcijos techninis ekonominis veiksmingumas pagal medžiagų sąnaudų kriterijų. Pateikiamos analizinės išraiškos racionaliems stiebo kamieno lenkiamiesiems momentams apskaičiuoti ir rekomendacijos atotampų tvirtinimo koordinatėms nustatyti. Atliktu skaitiniu eksperimentu parodyta, kad naujų kombinuotųjų atotampų taikymas leidžia sumažinti bendrąsias stiebo medžiagų (plieno) sąnaudas.

Reikšminiai žodžiai: plieninės stiebo konstrukcijos, kombinuotosios atotampos, racionalūs lenkiamieji momentai, konstrukcinės schemas geometriniai parametrai, techninis ekonominis veiksmingumas.

TECHNICAL AND ECONOMICAL EFFECTIVENESS OF THE COMBINED GUYS MAST

Donatas Jatulis, Algirdas Juozapaitis, Zenonas Kamaitis

*Dept of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania
E-mail: bridge@st.vtu.lt*

Received 17 January 2007; accepted 7 June 2007

Abstract. This article presents the investigation of a new structure of the guyed mast with combined guys. Technical and economical effectiveness based on material saving criteria of this structure is analysed. Formulas and recommendations are given for determining the rational bending moments distribution in the mast and the coordinates of the guy attachment points. Numerical simulation shows that the new guy cable system allows reducing the quantity of materials for steel masts.

Keywords: steel masts, combined guy system, rational bending moments, geometrical parameters of structural system, technical and economical effectiveness.

1. Įvadas

Mobiliojo ryšio paslaugų bei jų tinklų plėtra Lietuvoje turėjo esminę įtaką aukštųjų telekomunikacinių statinių projektavimo, o kartu ir mokslinių tyrimų aktyvumui. Vienos iš veiksmingiausių aukštųjų telekomunikacinių statinių konstrukcijų sistemų yra plieniniai stiebai. Šių iš anksto įtemptų

konstrukcijų sistemų elgsena yra išsamiai išanalizuota daugelyje tyrimų [1–7]. Yra pateikti įvairūs analiziniai bei skaitiniai jų įtempių deformacijų būsenos apskaičiavimo metodai [3–5]. Dalis šių darbų skirta dinaminiam skaičiavimams [6, 7].

Didėjant plieninių stiebų gamybos ir statybos apimtims,

pastebimos jų konstrukcinių sprendinių išplėtimo tendencijos. Neabejotinai aktualus tampa tokių konstrukcijų sistemų techninis ekonominis veiksmingumas. Pažymėtina, kad konstrukcinių sprendimų tobulinimas yra daugeliu atvejų nukreiptas į stiebo kamieno elementų schemas ir jų skerspjūvių parinkimą [8]. Yra taip pat žinomi originalūs stiebo konstrukcijų naujų formų siūlymai, iš kurių išskirtume paspyrines (šprengelines) bei plokščiųjų bokštinių stiebų sistemas [9, 10]. Būtina konstatuoti, kad stiebo atotampų, kaip vienu iš pagrindinių konstrukcinių elementų, veikiančių kamieno elementų įtempių deformacijų būseną, forma daugelyje žinomų sprendimų yra praktiškai nepakitusi [4].

Iš anksto įtemptų konstrukcijų veiksmingumui didelę įtaką turi jų geometrinių ir fizinių parametru parinkimas [2, 9]. Pagrindiniais stiebų geometriniais parametrais laikomi jų atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatės, o fiziniai – pradiniai atotampų įtempiai. Tinkamas minėtų parametru reikšmių parinkimas leidžia gauti racionalų lenkiamųjų momentų pasiskirstymą kamiene, kuris lemia artimą optimaliam pagal masės kriterijų projektinį sprendimą [4].

Projektuojant racionalias konstrukcijas svarbus yra ir masės koncentravimo principas [8]. Jo realizavimas leidžia ne tik sumažinti bendrąją konstrukcijos masę, bet ir jos gamybos bei montavimo sąnaudas.

Šio straipsnio autoriai pasiūlė naują stiebo konstrukcinį sprendinį, kai vietoje įprastinių atotampų naudojamos kombinuotosios atotamos [11, 12]. Pagrindiniu šio sprendimo privalumu laikytume galimybę dvigubai padidinti atotampų tvirtinimo prie kamieno jungčių (mazgų) skaičių, išlaikant praktiškai tą patį inkarinių jungčių, kartu ir pamatų skaičių. Tokia konstrukcinė sistema gali būti rekomenduota plačiai taikyti be jokių papildomų technologinių sunkumų. Tačiau kiekvieno naujo konstrukcinio sprendimo taikymo tikslingumas turėtų būti pagrįstas technine ekonomine analize.

Šiame straipsnyje analizuojama naujos stiebo konstrukcinės sistemos, sudarytos iš kombinuotųjų atotampų, techninis ekonominis veiksmingumas pagal medžiagų sąnaudų kriterijų. Pasitelkiant skaitinį eksperimentą, buvo sugretintos įprasto bei naujojo stiebo konstrukcijos, esant racionaliems pagrindiniams jų parametrams. Straipsnyje pateikiamos analizinės išraiškos racionaliems momentams kamiene apskaičiuoti bei atotampų tvirtinimo koordinatėms nustatyti. Sugretinti skaitinio ir analizinio skaičiavimo rezultatai, pateiktas įprasto ir su kombinuotomis atotampomis stiebo skaičiavimo pavyzdys.

2. Racionalūs stiebo komponuojamieji parametrai

Pagrindiniais stiebų komponuojamaisiais parametrais laikomi lenkiamieji momentai kamiene ir atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatės. Minėti parametrai yra tarpusavyje priklausomi. Netinkamai, t. y. neracionaliai parinkus atotampų tvirtinimo prie kamieno vietas, negalima pasiekti racionalaus momentų pasiskirstymo. O nuo minėtų parametru reikšmių racionalaus parinkimo priklauso visos konstrukcijų sistemos masė.

Nagrinėjami įprastos ir kombinuotųjų atotampų stiebai. Naujos kombinuotosios atotamos konstrukcijos ypatumas tas, kad pagrindinė atotampa 1 ties kamienu yra suskaidoma į atšakas 2 (1 pav., dešinioji pusė). Todėl nedaug išaugus bendrajam atotampų ilgiui bei masei, labai (praktiškai dvigubai) padidėja jungčių prie kamieno skaičius. Dėl to sumažėja kamieno tarpmazgių ilgiai (1 pav.).

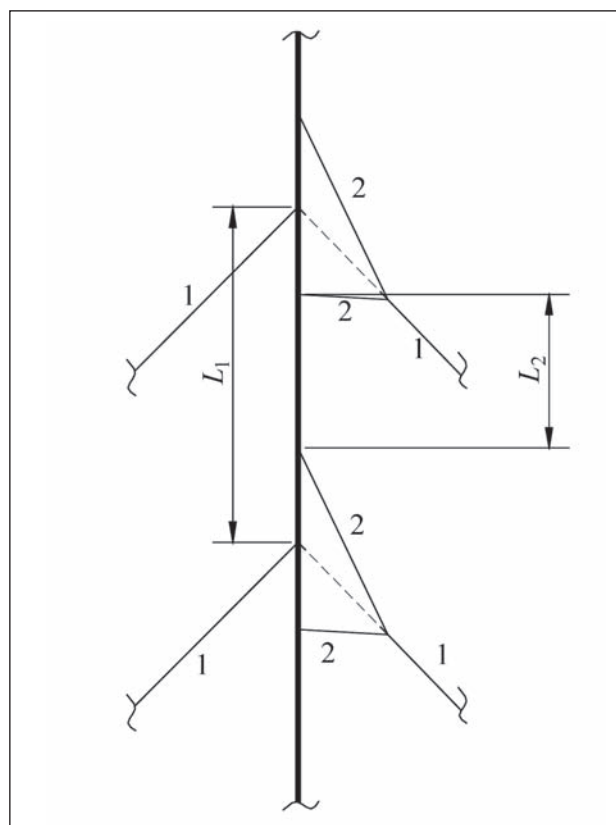
Stiebo kamienas modeliuojamas lenkiamuoju gniuždomuoju strypu, o atotamos bei jų atšakos – lanksčiu kabamuoju iš anksto įtemptuoju lynu. Pagrindinės atotamos 1 kampas su kamienu gali kisti nuo 30 iki 60 laipsnių. Stiebai yra veikiami savojo svorio ir vėjo apkrovų. Pagrindiniais tyrimo objekto parametrais laikomi lenkiamasis momentas kamiene ir atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatės.

2.1. Racionalūs stiebo kamieno momentai

Stiebo kamieno, esant nekintamam jo lenkiamajam standumui ($EJ = \text{const}$), racionaliama momentų pasiskirstymo diagrama laikysime tokia, kurioje neigiamosios ir teigiamosios momentų ekstremumų reikšmės yra lygios (2 pav.).

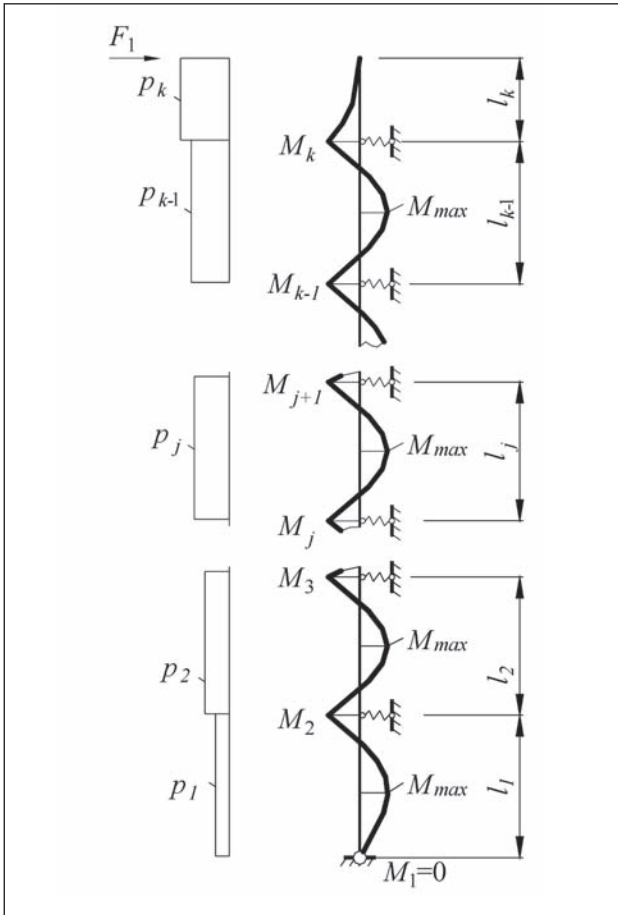
Skaičiuojant stiebus rekomenduojama [4] kiekviename kamieno tarpsnyje (tarpmazgyje) pridėti tolygiai išskirstytą ekvivalentinę apkrovą (3 pav.).

Nagrinėsime atskirus stiebo kamieno tarpmazgius, ašinės jėgos poveikio nevertinsime. Bendruoju atveju tolygiai



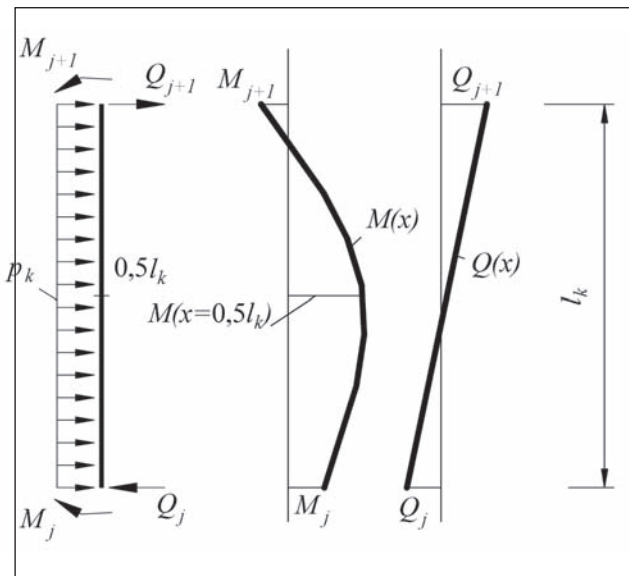
1 pav. Kombinuotų atotampų schema: 1 – pagrindinė (kamiene) atotampa; 2 – atotamos atšaka

Fig 1. Scheme of combined guys system: 1 – principal guy; 2 – branching guy



2 pav. Stiebo kamieno lenkimo momentų diagrama

Fig 2. Bending moment diagram of the mast



3 pav. Lenkiamasis elementas, apkrautas tolygiai išskirstyta apkrova

Fig 3. Bending element under the uniformly distributed load

išskirstyta apkrova p_k veikiamo kamieno elemento lenkiamųjų momentų kitimą per jo ilgį galime nusakyti (1), o skersinių jėgų – (2) lygtimi [13] (3 pav.):

$$M(x) = \left(1 - \frac{3x}{l_k} + \frac{2x^2}{l_k^2}\right) M_j - \left(\frac{x}{l_k} - \frac{2x^2}{l_k^2}\right) M_{j+1} + \left(\frac{4x}{l_k} - \frac{4x^2}{l_k^2}\right) M(x=0,5l_k); \quad (1)$$

$$Q(x) = \left(-\frac{3}{l_k} + 4\frac{x}{l_k^2}\right) M_j - \left(\frac{1}{l_k} - 4\frac{x}{l_k^2}\right) M_{j+1} + \left(\frac{4}{l_k} - \frac{8x}{l_k^2}\right) M(x=0,5l_k); \quad (2)$$

čia M_j – momentas nagrinėjamo strypo pradžioje; M_{j+1} – momentas nagrinėjamo strypo gale; $M(x=0,5l_k)$ – momentas nagrinėjamo strypo viduryje (3 pav.).

Lenkimo momentas pjūvyje $x = 0,5l_k$ yra lygus:

$$M(x=0,5l_k) = \frac{p_k l_k^2}{8} + \frac{M_j + M_{j+1}}{2}. \quad (3)$$

Panaudoję žinomą diferencinę priklausomybę $Q(x) = dM/dx$, galime iš (1) lygties arba tiesiogiai iš (2) lygties nustatyti lenkiamojo momento ekstremumo vietą. Prilyginę (2) lygtį nuliui ir pasitelkę (3) išraišką, gauname maksimalaus momento ordinatę x :

$$x = \frac{1}{2}l_1 + \frac{M_2}{p_1 l_1}, \quad (4)$$

čia: l_1 – pirmo tarpmazgio ilgis; M_2 – momento reikšmė antrojoje atramoje; p_1 – tolygiai išskirstytos apkrovos reikšmė pirmame tarpmazgyje (4 pav.).

Sprendžiamas uždavinys, kuriuo siekiama sulygtinti momentų reikšmes gretimuose tarpmazgiuose (4 pav.).

Nagrinėjamam pirmajam tarpmazgiui galima, įstačius (4) išraišką į (1) ir užrašius momentų lygybės sąlygą $|M_{\max}| = |M_2|$, gauti formulę racionaliai momento reikšmei apskaičiuoti:

$$M_{\max} = \left(\frac{3}{2} - \sqrt{2}\right) p_1 l_1^2 \approx 0,0858 p_1 l_1^2. \quad (5)$$

Pažymėtina, kad (5) formulė yra identiška išraiškai, gautai [14] darbe.

Racionalaus momento reikšmė antrajame tarpmazgyje bus lygi (4 pav.):

$$M_{\max} = \frac{p_2 l_2^2}{16} = 0,0625 p_2 l_2^2, \quad (6)$$

čia: M_{\max} – maksimali momento reikšmė tarpmazgyje;

l_2 – antro tarpmazgio ilgis, p_2 – tolygiai išskirstytos apkrovos reikšmė antrame tarpmazgyje (4 pav.).

Momentas gembinėje dalyje ties atrama nustatomas iš žinomos išraiškos (5 pav.):

$$M_k = \frac{p_k l_k^2}{2} + F_1 l_k, \quad (7)$$

čia: M_k – momento reikšmė gembinėje dalyje; p_k – tolygiai išskirstytos apkrovos reikšmė gembėje; l_k – gembės ilgis; F_1 – sutelktosios jėgos gembės gale reikšmė (5 pav.).

2.2. Racionalios atotampų tvirtinimo koordinatės

Sprendžiant racionalaus įrašų (momentų) reguliavimo stiebo kamiene uždavinį, neabejotinai svarbu parinkti tinkamus, t. y. racionalius, kamienu, tarpmazgio ilgius.

Tuo tikslu užrašius momentų lygybes pirmajame (5) ir antrajame (6) tarpmazgiuose sąlyga, gaunama išraiška, nusakanti racionalų gretimų tarpinių ilgių santykį:

$$l_1 \approx 0,853 l_2 \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}. \quad (8)$$

Analogiškai nustatomas vidurinių tarpmazgių ilgių santykis, užtikrinantis racionalų momentų juose pasiskirstymą:

$$l_i = l_{i+1} \sqrt{\frac{p_{i+1}}{p_i}}. \quad (9)$$

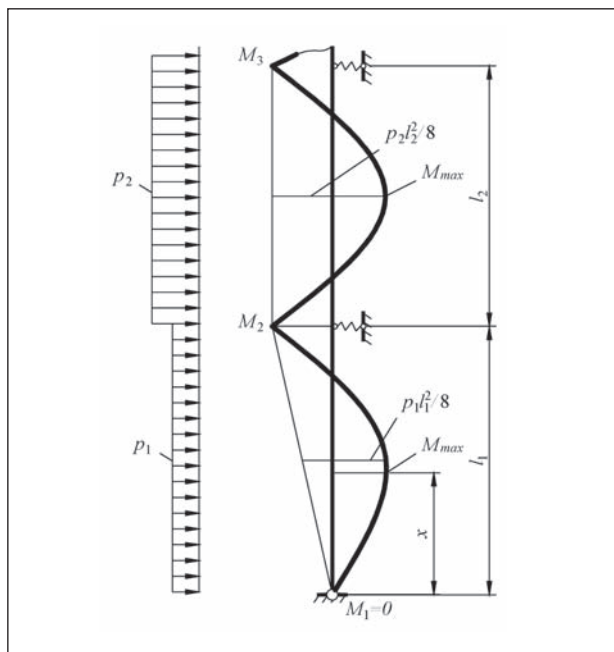
Gembinėje dalyje, kurioje kartu su tolygiai išskirstyta apkrova p_k veikia ir sutelktoji jėga F_1 , yra svarbu nustatyti tokį jos ilgį, kuris užtikrintų momentų lygybę su apatiniu tarpmazgiu. Iš (6) ir (7) išraiškų lygybės gauname racionalų gembės ilgį (4 pav.):

$$l_k = \frac{\sqrt{16F_1^2 + 2p_k p_{k-1} l_{k-1}^2}}{4p_k} - \frac{F_1}{p_k}. \quad (10)$$

Jei stiebo kamienu gembinėje dalyje neveiktų sutelktoji jėga, tai išraiška (10) įgautų tokį pavidalą:

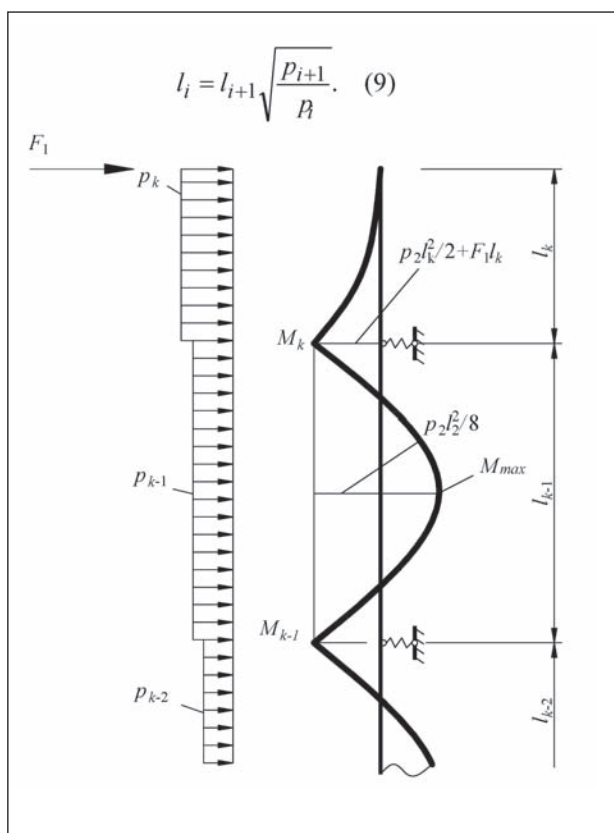
$$l_k = \frac{l_{k-1} \sqrt{2p_k p_{k-1}}}{4p_k}. \quad (11)$$

Siekiant nustatyti naujų kombinuotųjų atotampų taikymo stiebuose veiksmingumą buvo atliktas įprasto stiebo ir stiebo su kombinuotomis atotampomis sugretinimas pagal medžiagų sąnaudas. Nagrinėjamų stiebų kamienu plane kas 90° įtvirtinti keturiomis atotampomis, išdėstytomis dviejuose lygiuose (6 pav., a, b). Stiebų aukščiai parinkti artimi vyraujantiems telekomunikacinių statinių aukščiams ir sudaro 60 metrų. Stiebai buvo veikiami nuolatinės ir laikinosios apkrovų. Vėjo apkrovos slėgis į kamienu ašį paprastumo dėlei buvo priimtas vienodas per visą jo ilgį ir lygus $p = 0,4$ kN/m. Stiebo kamienu elementų skerspjūviai pradiniu



4 pav. Momentų diagramos sulyginimas 1-ajame ir 2-ajame stiebo kamienu tarpiniuose

Fig 4. Bending moment equalisation in the 1st and 2nd spans of the mast



5 pav. Momentų diagramos racionalus pasiskirstymas viršutiniuose stiebo kamienu tarpiniuose

Fig 5. Rational distribution of bending moments in upper spans of the mast

etapu buvo paimti vienodi. Skaičiavimai buvo atlikti programiniu paketu „Robot Millennium“ [15]. Ašinių jėgų įtaka lenkiamiesiems momentams nebuvo vertinama.

3. Skaitinis eksperimentas

Įprasto ir naujojo stiebo konstrukcijos buvo gretinamos esant racionaliems jų pagrindiniams parametrams, tai yra buvo nustatytos racionalios jų atotampų tvirtinimo koordinatės bei gautos racionalios kamieno lenkiamųjų momentų reikšmės. Tuo tikslu buvo pasitelktos analizinės išraiškos (1)–(10).

Kamieno lenkiamųjų momentų diagramos buvo reguliuojamos laipsninio priartėjimo būdu, papildomai parenkant atitinkamą atotampų skerspjūvio plotą bei keičiant jų pradinio išankstinio įtempio reikšmes. Kartu buvo apriboti kamieno viršaus horizontalieji poslinkiai, kurie sudarė apie 1/100 stiebo aukščio.

Gautosios racionalios kamieno lenkiamųjų momentų diagramos pateiktos 6 pav., c. Iš pateiktų grafikų akivaizdžiai matyti, kad racionaliūs momentai stiebe su kombinuotomis atotampomis yra absoliutiniu didumu apie 3,7 karto mažesni už įprasto stiebo racionaliūs momentus. 1 lentelėje pateikti kai kurie abiejų nagrinėjamų stiebų skaičiavimo rezultatai: lenkiamųjų momentų reikšmės, kamieno viršaus poslinkiai, atotampų įtempiai. Derėtų pažymėti, kad pirmojo lygio atotampose didesnius įtempius igauna įprastinė atotampa, o antrojo lygio – kombinuotoji. Tačiau šių įtempių skirtumai neviršija atitinkamai 20 % ir 9 %.

Siekiant nustatyti naujojo pasiūlyto konstrukcinio sprendimo veiksmingumą, buvo atliktas abiejų stiebų projektavimas, tai aptartos pradinės sąlygos. Gauti stiebo elementų skerspjūvių parinkimo rezultatai pateikti 2 lentelėje. Projektavimo duomenys parodo, kad naujojo stiebo kamienui sunaudojama apie 1,5 karto mažiau plieno. O bendroji stiebo su kombinuotosiomis atotampomis masė sudaro tik apie 70 % įprasto stiebo bendrosios masės.

4. Išvados ir rekomendacijos

Panaudojus stiebuose naujas kombinuotąsias atotampas, galima apie 1,5 karto sumažinti jo kamieno masę. Naujos kombinuotosios atotampos nesukelia jokių papildomų projektavimo, įrašų reguliavimo problemų ir nesukuria gamybos bei montavimo technologinių sunkumų. Tokias kombinuotųjų atotampų konstrukcines sistemas rekomenduotina taikyti ne tik naujai projektuojamuose, bet ir rekonst-

1 lentelė. Įprastinio ir stiebo su kombinuotosiomis atotampomis skaičiavimo rezultatai

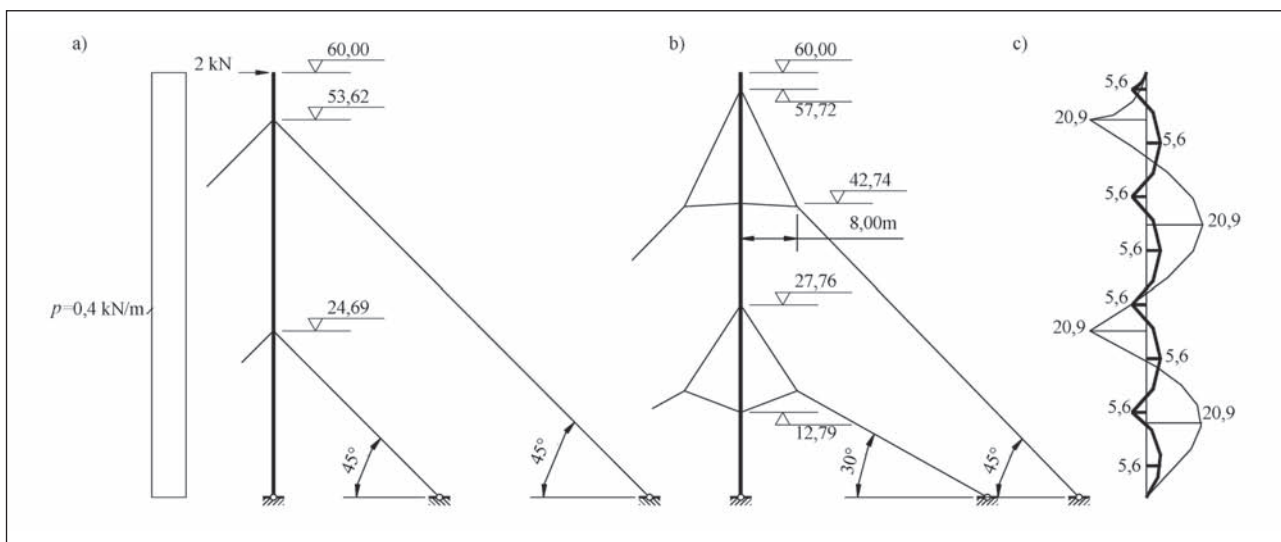
Table 1. Results of numerical experiment of typical and of new type guyed masts

Nagrinėti dydžiai	Įprastinis stiebas	Stiebas su kombinuotosiomis atotampomis
Maksimalus lenkiamasis momentas, kNm	20,9	5,6
Maksimalus horizontalusis poslinkis, cm	65	65
1-jo lygio atotampas įtempis po apkrovimo, MPa	403,3	336,5
2-jo lygio atotampas įtempis po apkrovimo, MPa	385,6	418,9

2 lentelė. Įprastinio ir stiebo su kombinuotosiomis atotampomis medžiagų sąnaudos

Table 2. Material consumption of typical and of new type guyed masts

Masė	Įprastinis stiebas	Stiebas su kombinuotosiomis atotampomis
Kamieno masė, kg	4 112	2 797
Atotampų masė, kg	145	185
Bendra masė, kg	4 257	2 982
Santykinė masė, %	100	70



6 pav. Įprastinio ir stiebo su kombinuotosiomis atotampomis momentų diagramos

Fig 6. Bending moment diagrams of typical and of new type guyed masts

ruojamuose stiebuose.

Straipsnyje pateiktos analizinės išraiškos racionaliems lenkiamiesiems momentams stiebo kamiene apskaičiuoti ir racionalioms atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatėms nustatyti. Šiose išraiškose yra atsižvelgiama į kintamas vėjo apkrovas tarpmazgiuose bei į sutelktosios jėgos poveikį. Gautus sprendinius galima pritaikyti ir kitoms iš anksto įtemptoms konstrukcijoms.

Literatūra

1. ABDULRAZZAG, JASIM N.; CHASEB, GALEB A. Optimum design of square free-standing communication towers. *Journal of Constructional Research*, 2002, Vol 58, p. 413–425.
2. GANTES, C.; KHOURY, R.; CONNOR, J. J. and POUANGARE, C. Modeling, loading, and preliminary design consideration for tall guyed towers. *Computers and Structures*, 1993, Vol 49, No 5, p. 797–805.
3. MELBOURNE, W. H. Predicting the cross-wind response of masts and structural members. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, Vol 69–71, p. 91–103.
4. SOKOLOV, A. G. *Support systems of communication structures* (Опоры линий передач). Moscow: Gosstroizdat, 1961. 453 p. (in Russian).
5. WAHBA, Y.; MADUGULA, M.; MONFORTON, G. Evaluations of non-linear analysis of guyed antenna towers. *Computers and Structures*, 1998, Vol 68, p. 207–212.
6. PEIL, U.; NÖLLE, H.; WANG, Z. H. Dynamic behaviour of guys under turbulent wind load. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, Vol 65, p. 43–54.
7. Yan-Li, H.; Nonlinear discrete analysis method for random vibration of guyed masts under wind load. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, Vol 91, p. 513–525.
8. MELNIKOV, N. *Antenna structures* (Антенные сооружения). Moscow: Znanie, 1969. 48 p. (in Russian).
9. VOEVODIN, A. *Pre-stressed structures* (Предварительно напряженные системы элементов конструкций). Moscow: Stroizdat, 1989. 304 p. (in Russian).
10. VOJEVODIN, A. *Kick-stand radio-masts* (Шпренгельные радиомачты). Moscow: Radio i sviaz, 1981. 176 p. (in Russian).
11. KAMAITIS, Z.; JUOZAPAITIS, A.; JATULIS, D. Masts with combined guys and analysis of their behavior. In *Proceedings of 8th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Vilnius, 2004. CD.
12. KAMAITIS, Z.; JUOZAPAITIS, A.; JATULIS, D. New type of communication guyed masts and analysis of its behaviour. In *Proceedings of IABSE symposium “Metropolitan Habitats and Infrastructure”*. Shanghai, 2004. CD.
13. KALANTA, S. Calculus of elastic pint-jointed and framed plane structures by the finite element technique. In *Transactions in Lithuanian Mechanics* (Литовский механический сборник), Vilnius, 1984, Vol 26, p. 78–94 (in Russian).
14. JUOZAPAITIS, A. Kombinuotųjų stogo konstrukcijų lenkiamoji strypo racionalus projektavimas. *Statyba (Civil Engineering)*, 1996, Nr. 4(8), p. 21–25.
15. *Robot Millennium v 16.5*. Users manual. 2003.

Donatas JATULIS. PhD student at the Dept of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Lithuania. MSc (2002) of the Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: development of guyed-mast structures, non-linear analysis of the cables, guyed masts.

Algirdas JUOZAPAITIS. Assoc Prof 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 the structures, geometrical non-linear analysis of structures.

Zenonas KAMAITIS. Dr Habil, Prof Emeritus at the Dept of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Lithuania. Member of IABSE since 1999. Author and co-author of more than 150 publications, including 6 books. Research interests: concrete structures and bridges, materials, durability, monitoring, and refurbishment.