



Donatas JATULIS

**MASTS WITH COMBINED GUYS:
ANALYSIS AND CONTROL OF STRESS AND
DEFORMATION**

**Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)**

1485-M

Vilnius  **2008**

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Donatas JATULIS

**MASTS WITH COMBINED GUYS:
ANALYSIS AND CONTROL OF STRESS AND
DEFORMATION**

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

Vilnius  2008

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2002–2008.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Ipolitas Zenonas KAMAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Institute of Mathematics and Informatics, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Assoc Prof Dr Valerijus KERAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Audronis Kazimieras KVEDARAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

Prof Dr Habil Jonas BAREIŠIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Assoc Prof Dr Antanas ŠAPALAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 9 a. m. on 20 June 2008.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956, fax +370 5 270 0112,

e-mail doktor@adm.vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 20 May 2008.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, Vilnius, Lithuania).

© Donatas Jatulis, 2008

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Donatas JATULIS

**STIEBAI SU KOMBINUOTOMIS
ATOTAMPOMIS, JŲ ĮTEMPIŲ IR
DEFORMACIJŲ ANALIZĖ BEI REGULIAVIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

Vilnius  2008

Disertacija rengta 2002–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Ipolitas Zenonas KAMAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Matematikos ir informatikos institutas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

doc. dr. Valerijus KERAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Audronis Kazimieras KVEDARAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

Oponentai:

prof. habil. dr. Jonas BAREIŠIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

doc. dr. Antanas ŠAPALAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2008 m. birželio 20 d. 9 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956, faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@adm.vtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2008 m. gegužės 20 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, Vilnius, Lietuva).

VGTM leidyklos „Technika“ 1485–M mokslo literatūros knyga.

© Donatas Jatulis, 2008

General characteristic of the dissertation

Topicality of the problem. Guyed masts are special structures widely used for wireless broadcasting and communications industries. The need for taller and more reliable antenna supporting structures is increasing. There are many different setups and configurations of guyed masts designated for particular applications. Usually, a guyed mast consists of a vertical tall mast shaft laterally supported at several levels along its height by sets of inclined pre-tensioned guys spaced at equal angles around the mast and attached to discrete foundations.

The structural analysis of a guyed mast is complex, because of non-linear behaviour of structural system and the random nature of the loads. The choice of initial tension and the non-linear behaviour of the guys can have a very great effect on the displacements and behaviour of a whole structure. The main disadvantage of guyed masts can be considered their increased deformability under the action of wind and ice loads as well as temperature changes. Some guyed masts have suffered in the past from structural failure.

An easiest way to reduce displacements and weight of guyed mast is to increase a number of elastic supports for the mast shaft. However, a large number of usual guys increases mast erection costs. With the aim to increase the effectiveness of guyed system the author proposes for the first time to use guyed mast structure with combined guyes. To verify this new structural system theoretical and experimental studies of its behaviour must to be undertaken.

Subject of research. The main subject of this work is the steel guyed masts with combined guyes under static loading.

Methodology of research. This thesis deals with experimental, analytical and numerical research methods.

Main objective. The main objective of this work was to create a new type of guyed mast with combined guys and to analyse its behaviour under static loading.

Main tasks

1. To analyse structural systems, behaviour features and design methods of communication structures.
2. To propose a method for the analysing and determining the internal forces in guys and shaft of guyed masts with combined guys under a static loading.
3. To execute the numerical simulation of the behaviour of the guyed masts with combined guyes.
4. To compare the results that are obtained by the numerical simulation by finite element method with the results of guyed mast model testing.
5. To execute the numerical simulation of layout parameters of guyed mast with combined guys and their influence on shaft deformability.

6. To prepare the technique of composition of optimal layout parameters of guyed mast with combined guys.
7. To evaluate the technical and economical effectiveness of proposed type of guyed masts and the rational fields of their application.

Scientific novelty

1. A new type of suspension system with main and secondary guys to increase a number of elastic supports for the mast shaft is proposed.
2. The numerical method for modelling guys is proposed.
3. The analytical method for the analysing and determining the internal forces in guys and mast under static loading is proposed.
4. An analysis of layout parameters of guyed masts with combined guys and their influence on structural system deformability is performed.
5. The experimental study of guyed mast model with combined guys is performed.
6. The technique of composition of optimal layout parameters of guyed mast with combined guys is proposed.
7. The technical and economical effectiveness of guyed masts with combined guys is evaluated.

Practical value

The created new guyed mast with additional guys influences an effect of saving material by 2,3 times. It can be expected more than 2 times of decreasing of the guyed mast fabrication cost. The technique of composition of optimal layout parameters of guyed mast with combined guys is useful in design of new and customary guyed masts.

Approbation and publication. The main results of this work were submitted in 4 scientific technical conferences. Nine papers were published on the topic of the dissertation and 3 of them in the journals from of list approved by the Department of Science and Higher Education (see 15–16 p.).

The scope of the scientific work. The thesis consists of general characteristics, a list of notations, 76 pictures, 15 tables, 5 main chapters, results and conclusions, list of references. The total scope of the dissertation is 146 pages.

Defended propositions

1. The new type of suspension system with main and secondary guys for the mast shaft influences an effect of saving material.
2. Combined guys don't cause problems for design, fabrication and erecting of guyed masts.
3. An initial equilibrium of guy cables is the most important factor for shaft displacements and bending moments.

THE CONTENT OF THE DISSERTATION

1. Object and goal of research

In this chapter review of guyed masts, their structural systems and behaviour analysis methods were briefly outlined.

Intensive theoretical and experimental research is carried out in the field of analysis and design of modern tall guyed masts. Fundamental works can be mentioned with data for design, analysis and construction of guyed mast with many references on this subject. Many dynamic models have been proposed in the literature. Although any of the well-known theories are complex. Several simpler methods based on approximations are proposed. In design practice the dynamic response is sometimes neglected. The static wind load, for example, is multiplied by a gust and amplification factors resulting in a higher equivalent static load. As can be seen, design of these structures is not simply. On the other hand, the capabilities of suspension systems have not yet been sufficiently investigated and exploited and there are vast possibilities for innovative solutions. To reduce a weight of mast structures special measures are sometimes taken. Among them, a mast shaft of prestressed truss system or guy systems consisting of series of guys with horizontal elements can be mentioned. Most of those solutions decrease the weight of the shaft, but complicate construction and increase the total cost of the whole structure.

2. New structural solution of guyed masts. Analytical method for analysis of guyed masts with combined guys

The proposed guyed mast structure consists of vertical mast-column, main and secondary guys (Fig 1). The central mast can be constructed using solid, circular or open steel lattice of typically square or triangular cross-section; however, the first two types need more complicated connection details. The mast is normally guyed in three or four directions, e. g., at 120° or 90° angles in the plan. The main guys are propped by two additional secondary guys each with a half of the cross-sectional area to increase number of intermediate elastic supports and to reduce the bending lengths of the mast shaft. The standard cables are used for main and secondary guys.

The number of secondary guys depends on cross-section shape of the mast-column. It is intended to use for each main guy two secondary guy cables situated in vertical plane (e. g., in case of a solid mast) and two or four secondary guys, if a mast is latticed (Fig 1, c).

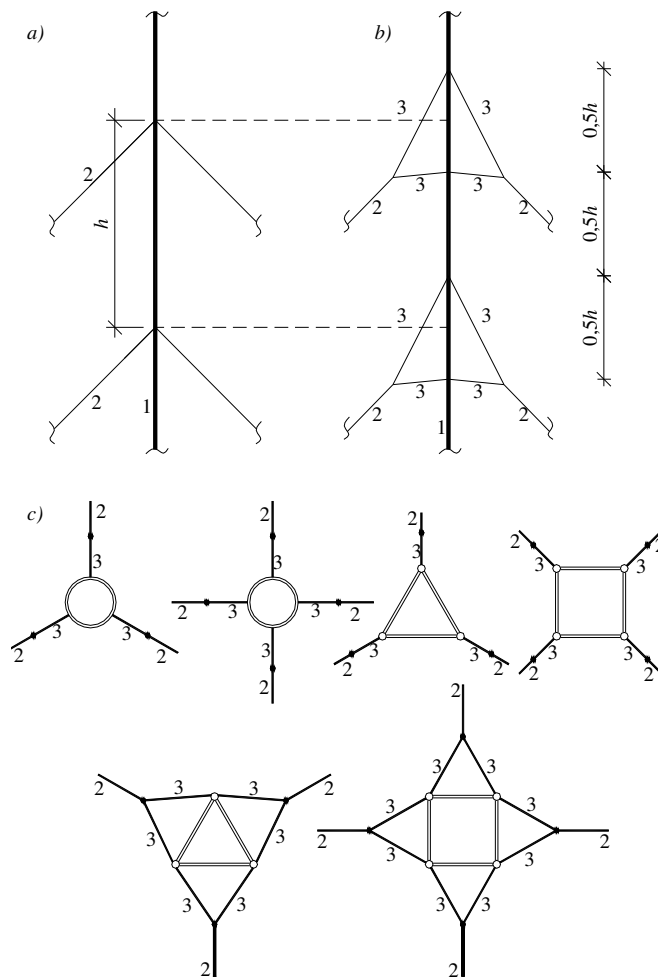


Fig 1. Guyed mast: a – typical system; b – system with combined guys; c – cross-sections: 1 – central mast; 2 – main guy; 3 – additional secondary guy

The secondary guys are attached to the main guy by a special connectors assuring invariable length of the secondary guys. The latter are attached to the vertical mast by the same connectors as in the case of standard guyed masts.

A method for static analysis of guyed towers is extended and applied to problems in two dimensions. The mast and guy cables may be loaded by arbitrary distributed forces. The effect of axial forces in the mast are taken into account. Highly accurate non-linear equation analysis algorithm is handled by the Secant method.

3. Analysis of layout parameters of guyed masts with combined guys and their influence on structural system deformability

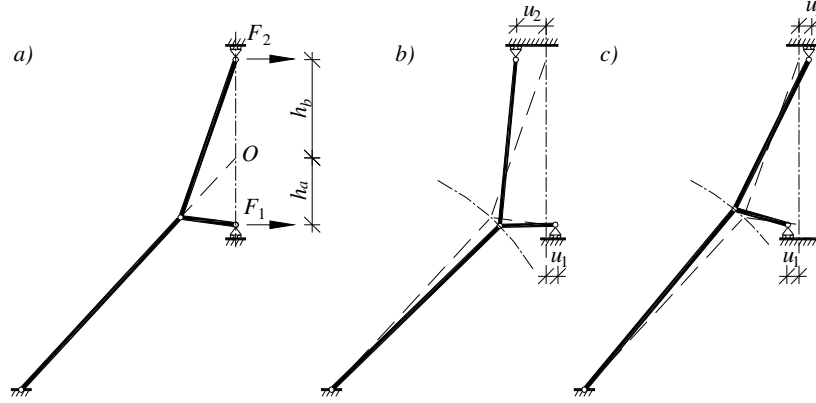


Fig 2. Possible kinematical displacements of combined guys

Let us consider a system of rigid bars loaded by two forces F_1 and F_2 (Fig 2, a). When no motion of the system is allowed, the condition of equilibrium for the bars requires

$$\frac{h_a}{h_b} = \frac{F_2}{F_1}. \quad (1)$$

If this condition of equilibrium is not satisfied, the kinematical displacements will occur (Figs 2, b and c). Note that displacements u_1 and u_2 of nodes are in opposite directions. If we now replace rigid bars by flexible cables, the additional displacements will occur due to elastic elongation and kinematical displacements of the cables. Hence, for behaviour analysis of a

guyed mast with combined guys the factor of initial equilibrium of guy cables is introduced:

$$K_{eq} = \frac{F_1 h_a}{F_2 h_b} . \quad (2)$$

In order to determine the influence of parameter K_{ef} on the behaviour of a guyed mast, the numerical analysis using by the commercial program *Robot Millennium* was performed. The mast shaft was modelled as beam-column element and guys are modelled as two-node cable elements. The geometric non-linear static analyses have been performed using Newton-Raphson iterative technique.

Let's consider the vertical segment of the guyed mast between two consecutive groups of cables supported laterally by a single guy and loaded with two concentrated forces F_1 and F_2 at the anchoring nodes of each secondary guy (Fig 3, b). The mast segment is assumed hinged at two edges at the level of guy supports.

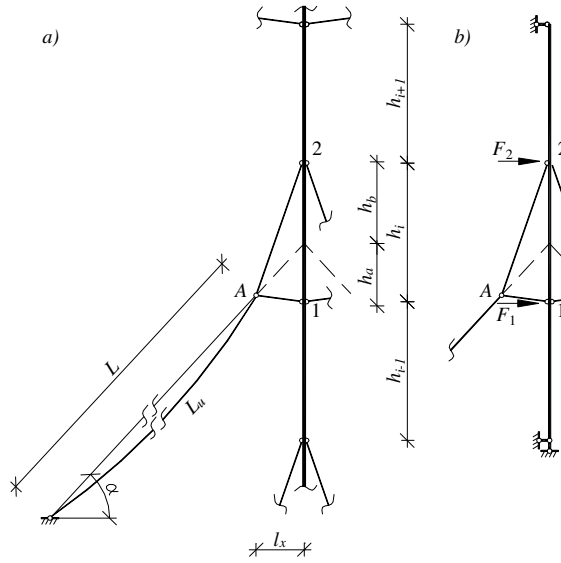


Fig 3. Intermediate segment of the guyed mast, including the combined guy:
a – geometrical parameters; b – scheme of loading

The cross-sections of main and secondary cables are identical with $EA_{cab}=12$ MN. Bending stiffness of the mast $EI_m = 73,4$ MNm². It is also assumed that $h_{i-1} = h_i = h_{i+1} = 30$ m. The sum of two concentrated forces $F_1 + F_2 = 24$ kN. Horizontal projection of secondary guys $l_x = 7,5$ m.

Three scenarios were analysed:

1. $F_1 = F_2 = 12$ kN ; $\frac{h_a}{h_b} = 0,1 \div 2$; $h_i = 30$ m ;
2. $\frac{F_1}{F_2} = 0,1 \div 2$; $\frac{h_a}{h_b} = 1$; $h_i = 30$ m ;
3. $F_1 = F_2 = 12$ kN ; $\frac{h_a}{h_b} = 0,1 \div 2$; $h_i = 18 \div 46$ m .

The non-dimensional lateral displacements u_i/h_i were defined at each point where the secondary guys are connected to the mast shaft. Displacements are summarized in Fig 4. It can be observed that an increase in the parameter K_{eq} leads to a slight increase in displacements of anchoring node 1 and to a decrease in displacements of node 2. This increase in displacements is relatively more important for node 2 than that for node 1. For values $K_{eq}=1$, the displacements of nodes are approximately equal to each other.

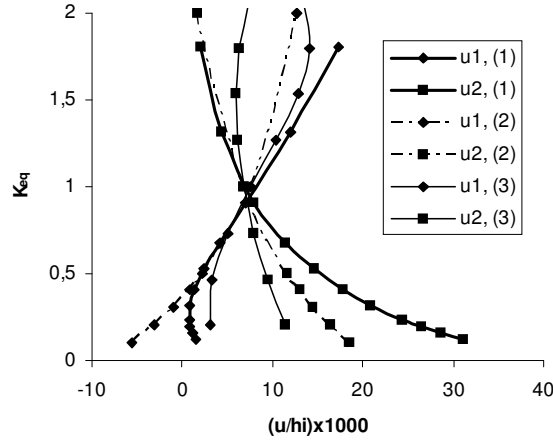


Fig 4. Relative displacements of nodes 1 and 2 versus parameter K_{eq}

4. Experimental study of guyed masts with combined guys

To testify the numerical analysis presented above, a physical steel scale-model of 3 m high is fabricated and tested in the Structural Laboratory of the University (Fig 5).

The scale model is two-level guyed mast. The mast shaft is a steel box of profile $\square 25 \times 1,5$ mm with a constant bending stiffness $EI_m = 2500 \text{ Nm}^2$. The cables are made of brass wires with a diameter of 2 mm and $EA_{cab} = 193 \text{ kN}$. The equivalent Young's module is 135 GPa. One main cable end via two secondary guys is attached to the mast shaft, and the second one to an anchored mechanism, allowing a control of tension in the cable. Two positions of secondary lower guy cable are considered (3.1 and 3.1', see Fig 5).

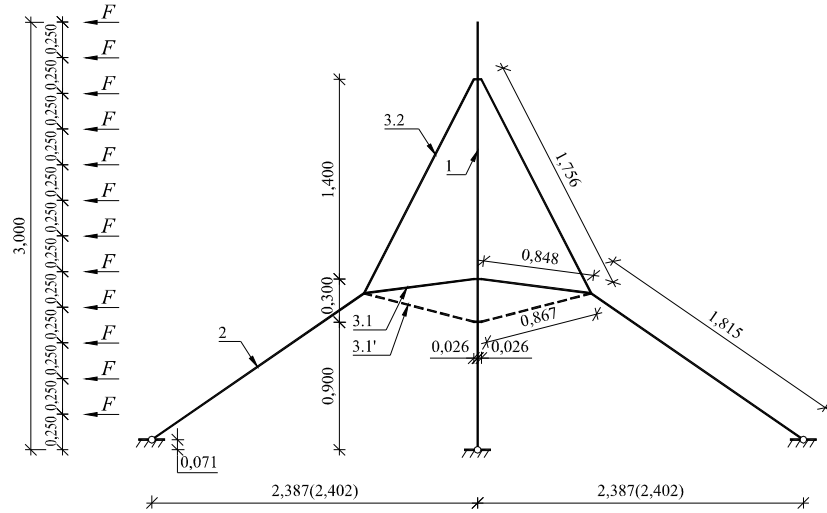


Fig 5. Structural model of guyed mast: 1 – central mast; 2 – main guy; 3.1 – secondary lower guy at $K_{eq} = 0,46$; 3.1' – secondary bottom guy at $K_{eq} = 0,90$; 3.2 – secondary upper guy.

The mast model was tested in bending with a special by designed device. The model with a pinned foot was placed centrally and loaded laterally. Loading was produced by weights. To simulate the uniformly distributed wind pressure, the concentrated horizontal forces spaced at short intervals of 25 cm are applied. Each model test underwent 3 cycles of loading and unloading. A

total of 24 strain gauges were used to measure strains on the surface of the mast shaft at selected positions. Deflections were measured at 6 points of the mast shaft, and the tensions in the guys determined by suitable dynamometers. The test data are summarized in Fig 6.

The bending moments induced in the mast shaft are distributed as shown in Fig 6, b. This indicates that the mast with $K_{eq}=0,46$ is subjected to positive moments along a large length of the mast. The redistribution of moments similar to that in continuous beam is observed in the mast with $K_{eq}=0,90$.

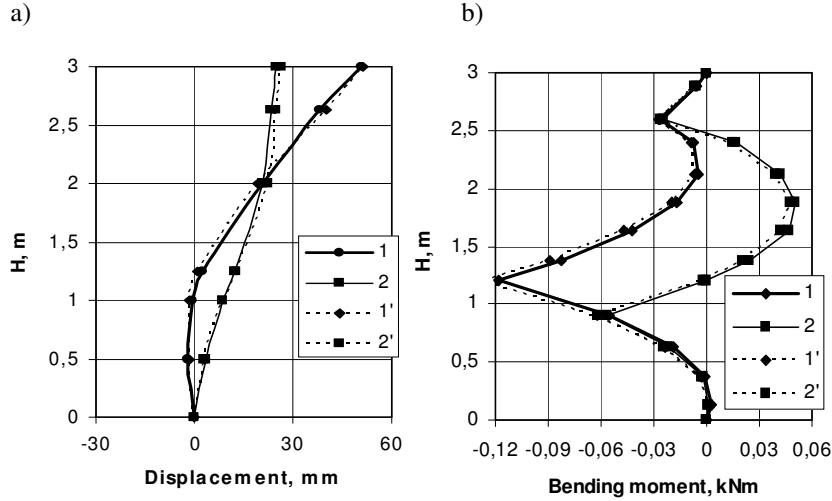


Fig 6. Comparison of experimental and predicted (a) deflections and (b) bending moments of the mast shaft: 1 – $K_{eq}=0,46$; 2 – $K_{eq}=0,90$; ——— experimental; --- FE modelling (pretension stresses in cables $\sigma_0=38,5$ MPa)

The general redistribution trend is to shift from positive moment region to the negative one. The magnitude of positive bending moment decreased while magnitude of bending moment increased, leading to their approximately equal values. Experimental results indicate an average of 2 times decrease in maximum moment at the attachment point of the bottom cable.

As can be seen from this analysis, designs of guyed mast must take into consideration the configuration of combined guys, i. e. take into account the factor K_{eq} .

Fig 6 shows that the experimental results were in good agreement with the results from the FE analysis. The finite element model can predict the

displacements of the guyed mast to an acceptable range of 7,2 % to –8,8 %, and that of bending moments of 12 % to –9,8 %. So the results of FE simulation match well the experimental data.

5. Technical and economical effectiveness of guyed masts with combined guys

Technical and economical effectiveness based on material saving criteria of the masts with combined guys is analysed in this chapter. Formulas and recommendations are given for determining the rational bending moments distribution in the mast shaft and the suitable coordinates of the guy's attachment to the mast shaft points.

The technique of composition of optimal layout parameters of guyed mast with combined guys is proposed.

For the comparative material intake studies, two similar guyed masts are considered (Fig 7). Both masts have identical geometry cross width and material properties with the exception that proposed mast has additional guy cables. The lattice steel masts have a triangular cross-section. The main guys are located at 3 levels and arranged at 120° in plan. All the main guy cables form the same angle with horizontal plane of 45° . Four heights of guyed masts, i. e. 30, 60, 120 and 180 meters, are considered. Loading included self weight of the mast and static component of the wind load. The dynamic effects of the wind were neglected. Details of guyed masts are in Table 1.

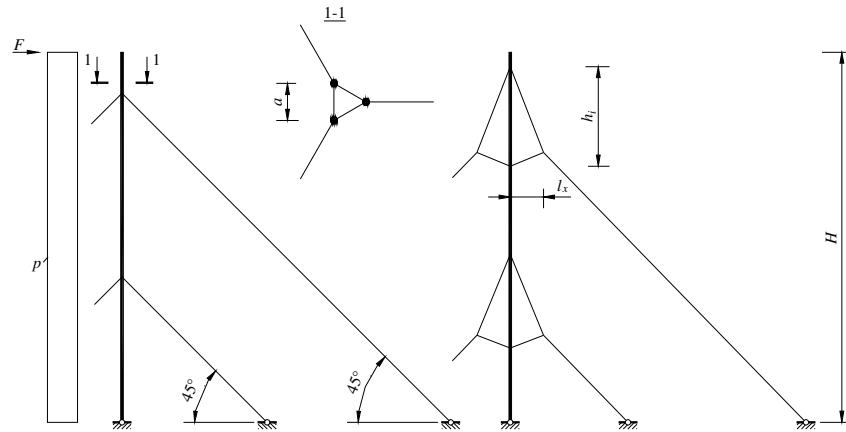


Fig 7. Typical guyed mast (a), guyed mast with combined guys (b).

Table 1. Details of guyed masts used in the analysis

H , m	a , m	p , kN/m	F , kN
30	0,3	0,11	6,4
60	0,6	0,27	7,9
120	1,2	0,79	10,7
180	1,8	1,40	13,5

In Table 2 a comparison is made between material quantities for a typical and new guyed mast. The combined guys have significant influence on the bending moments of the mast shaft. The additional guys enable to increase the number of intermediate elastic supports for the mast shaft and influence the effect of material savings up to 2,3 times.

Table 2. Material quantities of typical guyed masts and guyed masts with combined guys

H , m	Shaft weight				Guys weight				Total			
	Typical guyed mast		Guyed mast with combined guys		Typical guyed mast		Guyed mast with combined guys		Typical guyed mast		Guyed mast with combined guys	
	t	%	t	%	t	%	t	%	t	%	t	%
30	0,08	100	0,04	54,0	0,001	100	0,002	118,5	0,1	100	0,06	63,5
60	0,7	100	0,3	46,0	0,06	100	0,07	116,7	0,7	100	0,4	51,3
120	7,7	100	3,4	43,4	0,4	100	0,46	114,5	8,1	100	3,8	46,9
180	31,3	100	13,4	42,7	1,5	100	1,65	113,3	32,8	100	15,0	45,9

Results and Conclusions

1. A new type of guyed mast system with combined guy cables composed of main and secondary guys to increase a number of elastic supports for the mast shaft has been proposed. Such a solution does not take any difficulty in design, manufacturing and erecting process of proposed guyed masts.
2. A simplified analytic expression is proposed to analyse a cable behaviour under a uniform distributed slanting load in the longitudinal axis. Two-node catenary cable element, derived using a simplified analytical expression for elastic catenary, is proposed for modelling the cables. The cable element tangent stiffness matrix is evaluated.
3. The analytical method for analysing and determining the internal effects in guys and mast under static loading is proposed. The geometrical non-linearity

of both guy-cable and mast shaft is taken into account. In order to check the proposed analytical method and to determine, lateral displacements and internal forces in the guyed mast under the distributed static loading, the FEM was performed. A good agreement is obtained between computed results by proposed method and predicted responses by FE simulation. The analytical method of behaviour analysis to be adequate for a design of guyed masts with combined guys.

4. An analysis of layout parameters of guyed masts with combined guys and their influence on structural system's deformability is performed. To verify the validity of combined guys, the comparison is made with an existing solution for a typical guyed mast. The comparison showed that the combined guys result in smaller bending moments and horizontal displacements in the mast shaft with identical axial forces in the shaft and in the guy-cables.
5. The testing of steel scale model along with the FE analysis was carried out to determine the influence of geometrical and physical parameters of combined guyed cables on the displacements and bending moments in the mast shaft. The results from both methods match well. It was shown that FE analysis can be used for an improved assessment of mast behaviour with combined guys.
6. Analytical expressions are presented to determine the rational bending moments in the mast shaft and the coordinates of the secondary guy attachment points to the mast shaft. The ranging technique of optimal layout parameters of guyed masts with combined guys is proposed.
7. Technical and economical effectiveness based on material saving criteria of masts with combined guys is analysed. The analysis showed that additional guys enable to increase number of intermediate elastic supports for the mast shaft and influence an effect of saving material by 2,3 times. It can be expected more than 2 times of decreasing of the guyed mast fabrication cost.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation In the reviewed scientific periodical publications

1. Jatulis, D.; Juozapaitis, A.; Kamaitis, Z. 2007. Technical and economical effectiveness of guyed mast with combined guys. *Technological and economic development of economy*, Vilnius, 13(2): 120–125. ISSN 1392-8619 (EBSCO, ICONDA, CSA, SCOPUS).
2. Jatulis, D.; Kamaitis, Z.; Juozapaitis, A. 2007. Static behavior analysis of masts with combined guys. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vilnius, 14(3): 177–182. ISSN 1392-3730 (EBSCO, ICONDA, Compendex, VINITI).

3. Juozapaitis, A.; Kutas, R.; Jatulis, D. 2008. Mast behaviour analysis and peculiarities of numerical modelling. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vilnius, 14(1): 61–66. ISSN 1392-3730 (EBSCO, ICONDA, Compendex, VINITI).

In other editions

4. Kamaitis, Z.; Juozapaitis, A.; Jatulis, D. 2004. Masts with combined guys and analysis of their behavior. In *Selected papers of 8th International conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*. Vilnius: Technika. 502–507. ISBN 9986-05-757-4 (Thomson ISI proceedings).
5. Jatulis, D.; Kamaitis, Z.; Juozapaitis, A. 2007. Static analysis and testing of guyed mast. In *Selected papers of the 9th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius. 610–614. ISBN 978-9955-28-201-3 (Thomson ISI proceeding).
6. Jatulis, D. 2003. Analysis of combined-guy influence to mast behaviour. In *Proceedings of the VI Conference of Lithuanian Young Scientist "Lithuania without science – Lithuania without future"*, held in Vilnius on 27–28 March, 2003. Civil Engineering (6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2003 m. kovo 27–28 d. medžiaga. Statyba). Vilnius: Technika, 307–312. ISBN 9986-05-617 -7.
7. Jatulis, D. Peculiarities of modeling of guy-cables. 2004. In *Proceedings of the VII Conference of Lithuanian Young Scientist "Lithuania without science – Lithuania without future"*, held in Vilnius on 25–26 March, 2004. Civil Engineering (7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25–26 d. medžiaga. Statyba). Vilnius: Technika, 112–117. ISBN 9986-05-775-7.
8. Kamaitis, Z.; Juozapaitis, A.; Jatulis, D. 2004. New Type of Communication Guyed Masts and Analysis of Its Behavior. In *Report of IABSE Symposium "Metropolitan Habitats and Infrastructure"*. Shanghai. 360-361. ISBN 3-85748-110-2 (IABSE Reports).
9. Jatulis, D. A method of modeling of a guy-cable. 2005. In *Proceedings of the VIII Conference of Lithuanian Young Scientist "Lithuania without science – Lithuania without future"*, held in Vilnius on 24–25 March, 2005. Civil Engineering (8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 24–25 d. medžiaga. Statyba). Vilnius: Technika. 205–212. ISBN 9986-05-893-7.

STIEBAI SU KOMBINUOTOMIS ATOTAMPOMIS, JŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ BEI REGULIAVIMAS

Tiriamoji problema. Mobiliojo ryšio paslaugų bei jų tinklų plėtra Lietuvoje turėjo esminę įtaką aukštųjų telekomunikacinių statinių projektavimo, o tuo pačiu ir mokslinių tyrimų aktyvumui. Didžiąją jų dalį sudaro įvairaus aukščio bei konstrukcijų stiebai. Šie statiniai yra vienos iš efektyviausių aukštųjų telekomunikacinių statinių sistemų.

Vis aktualesnis tampa minėtų konstrukcijų techninio ekonominio efektyvumo didinimas. Ekonomiškumo problema tampa ypač svarbi didėjant stiebų ir bokštų gamybos bei statybos apimčiai. Didžiausias techninis ekonominis efektyvumas yra pasiekiamas tobulinant konstrukcinę formą. Jau yra atlikta darbų, kuriuose pateikti nauji stiebų sprendimai. Nuo XX a. vidurio yra naudojamos paspyrinės, kombinuotos su rėjomis, hibridinės stiebų-bokštų konstrukcinės formos. Šių sistemų sprendiniuose dėmesys sutelktas į stiebo kamieno masės mažinimą. Žinant, kad didžiąją apkrovos dalį stiebams sudaro vėjo apkrova, kamieno masės mažinimas yra logiška tobulinimo kryptis. Tačiau konstrukcinės formos tobulinimas tik masės požiūriu dažnai turi neigiamos įtakos ne mažiau svarbiems ekonominiams veiksniams – padidėja gamybos, montavimo ir eksploatavimo išlaidos.

Darbo aktualumas. Telekomunikaciniai statiniai statomi kiek daugiau kaip vieną šimtmetį, todėl, palyginti su tokiais statiniais kaip tiltai, galima teigti, kad stiebai yra sąlygiškai naujos konstrukcijos, kurių konstrukcinės formos yra neišnaudotos.

Tik išsamus naujos konstrukcijos, veikiamos statine apkrova, elgsenos tyrimas gali būti tvirtas pagrindas tolimesnei stiebo pastovumo ir dinaminei analizei. Todėl, analizuojant naujo tipo stiebo elgseną, pirmiausia svarbu nustatyti įtempimų ir deformacijų priklausomybę nuo statinės apkrovos.

Statinės ir dinaminės analizės požiūriu stiebai yra sudėtingos sistemos, kurių įtempimų ir deformacijų būvis priklauso nuo stiebo atotampų ir kamieno geometriškai netiesinės elgsenos. Dėl šių priežasčių stiebai yra jautrūs konstrukcijos poslinkiams, gamybos ir montavimo metu atsiradusiems projektiniams nuokrypiams. Todėl prielaidos, supaprastinančios konstrukcijos elgsenos reiškinius, ne visada yra priimtinos. Stiebams analizuoti šiuo metu naudojami skaitinės analizės programiniai paketai ne visada užtikrina norimą skaičiavimo tikslumą, o dėl sudėtingos stiebo elgsenos projektavimas dažnai būna ilgas ir sudėtingas. Stiebų skaičiavimo analizinių metodų svarba šiuo metu išlieka didelė, nes jie leidžia geriau suprasti konstrukcijos elgseną, o projektuojant šiais metodais galima tiesiogiai išspręsti ir projektavimo uždavinį. Tai ypač aktualu išankstiniam ir variantiniam projektavimui.

Šiuolaikiniais modeliavimo būdais analizuojant netgi labai sudėtingas konstrukcijas, paprastai galima įvertinti didžiąją veiksnių, lemiančių konstrukcijų elgseną. To dažnai pakanka nagrinėjant gerai žinomas konstrukcijas, tačiau naujo tipo stiebams būtina atlikti eksperimentinius tyrimus, leidžiančius sugretinti teorinius rezultatus su tikra stiebo elgsena.

Dėl minėtųjų priežasčių yra aktualūs teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, leidžiantys sukurti naujos konstrukcinės formos stiebus, efektyvius masės, gamybos, montavimo bei eksploatavimo požiūriu. Aktualu sukurti priimtino tikslumo stiebų inžinerinę skaičiavimo ir komponuojamųjų parametru nustatymo metodiką, nustatyti šių stiebų elgsenos ypatumus bei ekonominę efektyvumą.

Tyrimų objektas. Pagrindinis šio darbo objektas – statiskai apkrauti plieniniai stiebai su kombinuotomis atotampomis.

Pagrindinis darbo tikslas. Stiebo naujos efektyvios konstrukcinės formos su kombinuotomis atotampomis sukūrimas ir jos elgsenos analizė, veikiant statinėms apkrovoms.

Darbo uždaviniai

1. Išanalizuoti šiuolaikinių plieninių stiebų konstrukcines formas ir skaičiavimo metodus.

2. Sukurti stiebo su kombinuotomis atotampomis konstrukciją.

3. Parengti inžinerinę skaičiavimo metodiką stiebams su kombinuotomis atotampomis skaičiuoti.

4. Nustatyti kombinuotų atotampų įtaką stiebo įtempių ir deformacijų būviui.

5. Atlikti stiebo su kombinuotomis atotampomis modelio elgsenos, veikiant statinėms apkrovoms, eksperimentinius laboratorinius tyrimus.

6. Nustatyti stiebo su kombinuotomis atotampomis racionalius komponuojamuosius parametrus ir parengti stiebo ir jo elementų komponavimo metodiką.

7. Įvertinti naujos konstrukcijos stiebo techninį ir ekonominį efektyvumą.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta nauja stiebo su kombinuotomis atotampomis konstrukcinė forma.

2. Pasiūlyta atotampų skaitinio modeliavimo metodika.

3. Parengta naujos konstrukcinės formos stiebo inžinerinė skaičiavimo metodika konstrukcijos elementų poslinkiams ir įrąžoms nustatyti.

4. Atlikta naujo stiebo elgsenos analizė.

5. Atlikti naujo stiebo modelio eksperimentiniai įtempių ir deformacijų tyrimai, rezultatų analizė.

6. Sukurta stiebo su kombinuotomis atotampomis komponavimo metodika racionaliems komponuojamiesiems stiebo parametrams parinkti.

7. Atlikta naujo stiebo ekonominio efektyvumo analizė.

Tyrimų metodika. Darbe taikomi analiziniai metodai, įvertinantys geometrinį netiesiškumą, taip pat eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimų metodai.

Praktinė vertė. Sukurtos stiebo konstrukcijos panaudojimas leistų sumažinti stiebų gamybos kaštus. Parengta metodika racionaliems komponuojamiesiems stiebo parametrams parinkti turi praktinę vertę naujų ir įprastų stiebų projektavime.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurta nauja stiebo su kombinuotomis atotampomis konstrukcinė forma sumažina stiebo gamybos sąnaudas.
2. Naujų kombinuotųjų atotampų taikymas nesukelia jokių papildomų projektavimo, įrąžų reguliavimo problemų ir nesukuria gamybos bei montavimo technologinių sunkumų.
3. Stiebo kamieno poslinkiams ir lenkiamųjų momentų reikšmėms didžiausią įtaką turi pradinės atotampų pusiausvyros koeficiento reikšmė.

Darbo aprobacija ir publikacijos. Disertacijos tema publikuoti devyni mokslo darbai, trys iš jų – recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, trys – tarptautinių ir trys – kitų konferencijų leidiniuose (žr. 15–16 p.).

Disertacijos apimtis. Disertacija sudaro: bendrąją darbo charakteristiką, žymėjimų sąrašą, 76 paveikslai, 15 lentelių, penki skyriai, pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, 116 pavadinimų literatūros sąrašas. Viso 146 puslapiai.

Disertacijos struktūra

Pirmajame skyriuje atlikta telekomunikacinių statinių konstrukcinių ir elgsenos ypatumų apžvalga. Išanalizuoti stiebų skaičiavimo metodai ir jų ypatybės, suformuluotas darbo tikslas ir uždaviniai.

Antrajame skyriuje sukurta nauja stiebo konstrukcinė forma. Išvesta atotampų baigtinio elemento tangentinė standumo matrica, įvertinanti atotampų tolygiai išskirstytos apkrovos gulsčiosios dedamosios įtaką. Suformuotas skaitinis atotampų sistemų skaičiavimo algoritmas. Parengta inžinerinė stiebo su kombinuotomis atotampomis skaičiavimo metodika, įvertinanti statinių apkrovų poveikius. Atlikta inžinerinės metodikos skaitinė patikra gretinant su BE metodu.

Trečiajame skyriuje atliktas skaitinis eksperimentas skirtas stiebų su kombinuotomis atotampomis komponuojamųjų parametrų įtakai stiebo elgsenai nustatyti. Atliktas naujo ir įprasto stiebo elgsenos palyginimas. Nustatyti stiebo komponuojamieji parametrai ir jų rekomenduojamos reikšmės.

Ketvirtajame skyriuje tikroji naujos stiebo konstrukcijos elgsena buvo patikrinta išbandžius plokštuminį 3 m aukščio stiebo modelį statine

horizontalia apkrova. Eksperimentinių tyrimų rezultatai sugretinti su skaitinio modeliavimo, pasitelkiant BE metodą, rezultatais.

Penktajame skyriuje išvestos analizinės išraiškos racionaliems lenkiamiesiems momentams stiebo kamiene apskaičiuoti ir racionalioms kombinuotų atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatėms nustatyti pagal tiek geometriškai tiesinę, tiek pagal geometriškai netiesinę skaičiavimo formuluotę. Parengta stiebo optimalaus komponavimo metodika, leidžianti parinkti stiebo kamieno ir kombinuotų atotampų geometrinius ir fizikinius parametrus, užtikrinančius racionalų lenkiamųjų momentų kamiene pasiskirstymą. Atlikta naujos konstrukcijos stiebo ekonominio efektyvumo analizė.

Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados

1. Sukurtas naujo konstrukcinio tipo stiebas, kurio naujumas grindžiamas kombinuotųjų atotampų vietoj įprastų naudojimu. Pagrindinių atotampų atšakos ties stiebo kamienu, išlaikant tą patį įtempimų atotampų skaičių, didina stiebo tamprų atramų skaičių ir sumažina stiebo lenkiamų ruožų ilgį. Palyginti su įprastais stiebais, kombinuotosios atotampos nesukelia jokių papildomų projektavimo, įrąžų reguliavimo problemų, gamybos ir montavimo sunkumų.
2. Pasiūlyta supaprastinta atotampų pusiausvyros analizinė išraiška, rodanti atotampų tolygiai išskirstytos apkrovos gulsčiosios komponentės įtaką. Remiantis pasiūlyta išraiška gauta atotampų baigtinio elemento tangentinė standumo matrica, sudarytas skaitinis atotampų sistemų skaičiavimo algoritmas.
3. Remiantis sudarytomis kombinuotų atotampų ir stiebo kamieno pusiausvyros lygtimis pasiūlyta stiebų skaičiavimo metodika, įvertinanti tiek atotampų, tiek stiebo kamieno geometriškai netiesinę elgseną. Inžinerinės metodikos skaitinė patikra gretinant su BE metodu parodė kokybišką sutapimą.
4. Atlikta stiebo, veikiamo statinėmis apkrovomis, skaitinė elgsenos analizė parodė tik šiam konstrukciniam stiebo tipui būdingus elgsenos ypatumus, nustatant stiebo komponuojamuosius parametrus ir jų rekomenduojamas reikšmes. Atliktas sugretinimas su įprastu stiebu parodė, kad naujo tipo atotampų panaudojimas leidžia esmingai sumažinti kamieno lenkiamuosius momentus bei suvienodinti kamieno poslinkius. Atotampų skėtimo jėgos, kamieno gniuždymo įrąža pamate lieka beveik nepakitusi.
5. Tikroji naujos stiebo konstrukcijos elgsena buvo patikrinta išbandžius plokštuminį 3 m aukščio stiebo modelį statine horizontalia apkrova. Eksperimentinių tyrimų rezultatai – atotampų skėtimo jėgos, kamieno

lenkiamieji momentai ir horizontalūs poslinkiai – kokybiškai ir kiekybiškai sutapo su skaitinio modeliavimo, pasitelkiant BE metodą, rezultatais.

6. Pateiktos analizinės išraiškos racionaliems lenkiamiesiems momentams stiebo kamienne apskaičiuoti ir racionalioms kombinuotųjų atotampų tvirtinimo prie kamieno koordinatėms nustatyti pagal tiek geometriškai tiesinę, tiek pagal geometriškai netiesinę skaičiavimo formuluotę. Remiantis šiomis išraiškėmis pasiūlyta stiebo optimalaus komponavimo metodika, leidžianti parinkti stiebo kamieno ir kombinuotųjų atotampų geometrinius ir fizikinius parametrus, užtikrinančius racionalų lenkiamųjų momentų diagramos pasiskirstymą kamienne.
7. Atlikta naujos konstrukcijos stiebo ekonominio efektyvumo analizė parodė, kad stiebuose panaudojus kombinuotąsias atotampas galima iki 2,3 karto sumažinti jo kamieno masę. Tokias kombinuotųjų atotampų konstrukcines sistemas rekomenduotina taikyti ne tik naujai projektuojamuose, bet ir rekonstruojamuose telekomunikacinės paskirties stiebuose. Atsižvelgiant į Lietuvos metalo konstrukcijų gamintojų praktiką, galima prognozuoti, kad kombinuotųjų atotampų naudojimas leis sumažinti stiebo kamieno gamybos kainą daugiau nei du kartus.

About the author

Donatas Jatulis was born in Vilnius, on 26 of June 1978.

First degree in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2000. Master of Science in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2002. In 2002–2007 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. At present – assistant in Department of Bridges and Special Structures of Vilnius Gediminas Technical University.

Trumpos žinios apie autorių

Donatas Jatulis gimė 1978 m. birželio 26 d. Vilniuje.

1996 m. įgijo statybos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universitete, Statybos fakultete. 2002 m. įgijo statybos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universitete, Statybos fakultete. 2002–2007 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Šiuo metu dirba asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje.

Donatas Jatulis

**MASTS WITH COMBINED GUYS:
ANALYSIS AND CONTROL OF STRESS AND DEFORMATION**

**Summary of doctoral dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)**

Donatas Jatulis

**STIEBAI SU KOMBINUOTOMIS ATOTAMPOMIS, JŲ ĮTEMPIŲ IR
DEFORMACIJŲ ANALIZĖ BEI REGULIAVIMAS**

**Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)**

2008 05 14. 1,5 sp. l. Tiražas 100 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius