



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

№4, ТОМ 15 (2009) 253-259

УДК 621.396

(09)-0201-1

## **ПОРІВНЯННЯ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ СТОВБУРІВ ЩОГЛ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

**В.В. Губанов, І.В. Межинська**

*Кафедра "Металеві конструкції", Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2, 86123, м. Макіївка, Україна.*

*E-mail: mirra@telenet.dn.ua*

*Отримана 19 жовтня 2009; прийнята 26 листопада 2009*

**Анотація.** У статті розглянуті питання стійкості щогл стільникового зв'язку. Виконано аналіз існуючих методів розрахунку щогл на стійкість. Розрахунки стійкості щогл по точному і наближеному методах реалізовані за допомогою ЕОМ. Виконано ряд чисельних експериментів на прикладах трьох щогл стільникового зв'язку: із двома, трьома і чотирма рівнями відтягнень, висотою 18, 28 і 34 м відповідно. Наводяться результати досліджень. Проводиться порівняння результатів точного і наближеного методів розрахунку шляхом зіставлення коефіцієнтів запасу стійкості споруд, визначених за двома методами, для трьох щогл. Виконано розрахунки коефіцієнтів стійкості окремих стрижнів стовбурів для даних щогл за стандартною методикою розрахунку центрально-стиснутих стрижнів, формулами Ейлера і Ясинського. Виконується зіставлення результатів, отриманих по точному і наближеному методах розрахунків між собою і зі стандартною методикою розрахунку центрально-стиснутих стрижнів, формулами Ейлера і Ясинського. У результаті аналізу отриманих даних даються рекомендації до розрахунку щогл мобільного зв'язку на стійкість. Виконується дослідження впливу твердості опор на стійкість щогли за допомогою наближеного методу розрахунку.

**Ключові слова:** щогла стільникового зв'язку, стовбур щогли, стійкість, розрахунок на стійкість, твердість опор.

## **СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ СТВОЛОВ МАЧТ СОТОВОЙ СВЯЗИ**

**В.В. Губанов, И.В. Межинская**

*Кафедра "Металлические конструкции", Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина.*

*E-mail: mirra@telenet.dn.ua*

*Получена 19 октября 2009; принята 26 ноября 2009*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы устойчивости мачт сотовой связи. Выполнен анализ существующих методов расчета мачт на устойчивость. Расчеты устойчивости мачт по точному и приближенному методам реализованы с помощью ЭВМ. Выполнен ряд численных экспериментов на примерах трех мачт сотовой связи: с двумя, тремя и четырьмя уровнями оттяжек, высотой 18, 28 и 34 м соответственно. Приводятся результаты исследований. Проводится сравнение результатов точного и приближенного методов расчета путем сопоставления коэффициентов запаса устойчивости сооружений, определенных по двум методам, для трех мачт. Выполнены расчеты коэффициентов устойчивости отдельных стержней стволов для данных мачт по стандартной методике расчета центрально-сжатых стержней, формулам Эйлера и Ясинского. Выполняется сопоставление результатов, полученных по точному и приближенному методам расчетов между собой и со стандартной методикой расчета центрально-сжатых стержней, формулами Эйлера и Ясинского. В результате анализа полученных

данных даются рекомендации к расчету мачт мобильной связи на устойчивость. Выполняется исследование влияния жесткостей опор на устойчивость мачты с помощью приближенного метода расчета.

**Ключевые слова:** мачта сотовой связи, ствол мачты, устойчивость, расчет на устойчивость, жесткость опор.

## COMPARISON OF DESIGN PROCEDURES FOR CELLULAR TELECOMMUNICATION TOWER BODIES

V.V. Gubanov, I.V. Mezhinskaya

*Department of metal structures, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzavin str. 2, 86123, Makeyevka, Ukraine.  
E-mail: mirra@telenet.dn.ua*

*Received 19 October 2009; accepted 26 November 2009*

**Abstract.** There are considered the problems of cellular telecommunication tower stability. The existing design methods for tower stability have been analyzed. The design of tower stability by the exact and approximate methods was realized with the help of a computer. There were carried out some numerical experiments on the base of three cellular telecommunication towers: with two, three and four levels of guys as high as 18, 28, and 38 m, respectively. There are given the research results. The results of the exact and approximate design methods are compared by the factors of stability margin of the structures which were determined by two methods for three towers. Stability coefficients of separate pillars for these towers were designed by the standard procedure of designing axially-loaded pillars, by Euler and Yasinsky's formulae. The results obtained by the exact and approximate design methods are compared both between themselves and with the standard procedure of designing axially-loaded pillars, by Euler and Yasinsky's formulae. The obtained data being analyzed, there are given recommendations of designing stability for mobile communication towers. An influence of structure rigidity on tower stability is investigated with the help of the approximate design method.

**Keywords:** cellular telecommunication tower, tower body, stability, stability design, structure rigidity.

### 1. Введение

В качестве опор для антенн мобильной связи широко применяются металлические мачты на оттяжках. В городских условиях современные мачты размещаются на крышах многоэтажных общественных зданий, что позволяет уменьшить высоту сооружений до 20-50 метров. Так как данные сооружения размещаются в городской черте, очень важно не допустить аварийной ситуации в связи с обрушением опоры мобильной связи. В результате анализа причин аварий высотных мачт выявлено, что одной из распространенных причин аварий и обрушений была потеря устойчивости. В большинстве случаев потеря устойчивости возникала от снижения или недостаточной жесткости опор [1]. Также потеря устойчивости может возникать

при уменьшении проектного поперечного сечения участка ствола в результате коррозии или расслоения металла [2].

В работах Лейтеса С.Д., Савицкого Г.А., Соколова А.Г. [1, 3, 4] изложены основы расчета мачт на устойчивость. Исследована устойчивость мачт теле- и радиосвязи, достигающих высот 150-300 метров, даны рекомендации по их рациональному проектированию. Мачты мобильной связи относительно небольшой высоты, и поэтому имеют свои отличительные особенности при работе по сравнению с крупнобаритными мачтами. На данный момент не исследована устойчивость мачт сотовой связи.

Целью работы является сравнение существующих методик расчета устойчивости стволов мачт сотовой связи.

## 2. Методы расчета

В работе рассматриваются два метода расчета мачт на устойчивость: точный и приближенный [1]. Для расчета точным методом составляется система уравнений неразрывности упругой линии. В качестве неизвестных принимаются моменты. Составляется определитель  $\Delta$  из коэффициентов при неизвестных системы уравнений. При равенстве определителя системы нулю возникает ряд решений, которые характеризуют состояние неустойчивого равновесия. Задаются значением коэффициента  $\lambda$ , умножают на него продольные силы  $N_i$ , действующие в стволе мачты. Увеличивают коэффициент  $\lambda$  до тех пор, пока не будет выполняться условие  $\Delta(\lambda)=0$ . Из уравнений исключаются составляющие, учитывающие ветровую нагрузку. В расчетах на мачту действует нагрузка только от предварительного натяжения оттяжек. Расчетная схема мачты для расчета точным методом изображена на рисунке 1, а.

Потеря устойчивости мачты в целом наступает при потере устойчивости хотя бы одного пролета ствола между точками закреплений соседних уровней оттяжек.

В целях сокращения трудоемких расчетов был предложен приближенный метод исследования устойчивости. В нем используются уравнения равновесия сил на опоре. Ствол мачты представляется в виде шарнирно-сочлененной цепи на упруго-податливых опорах, при этом жесткость на изгиб каждого стержня этой цепи принимается бесконечной. Остальные расчетные предпосылки остаются такими же, как и в точном методе. Расчетная схема мачты для расчета приближенным методом изображена на рисунке 1, б. Программа Mathcad позволяет легко выполнить необходимые расчетные циклы. Действительный коэффициент устойчивости мачты с неразрезным стволом будет больше, чем шарнирной цепи, так как в реальности на опорах возникают поддерживающие изгибающие моменты. Метод шарнирной цепи удобно применять для исследования влияния изменения жесткости опор на устойчивость мачты в целом.

## 3. Результаты исследований

Численные эксперименты проводились для трех мачт с двумя, тремя и четырьмя уровнями

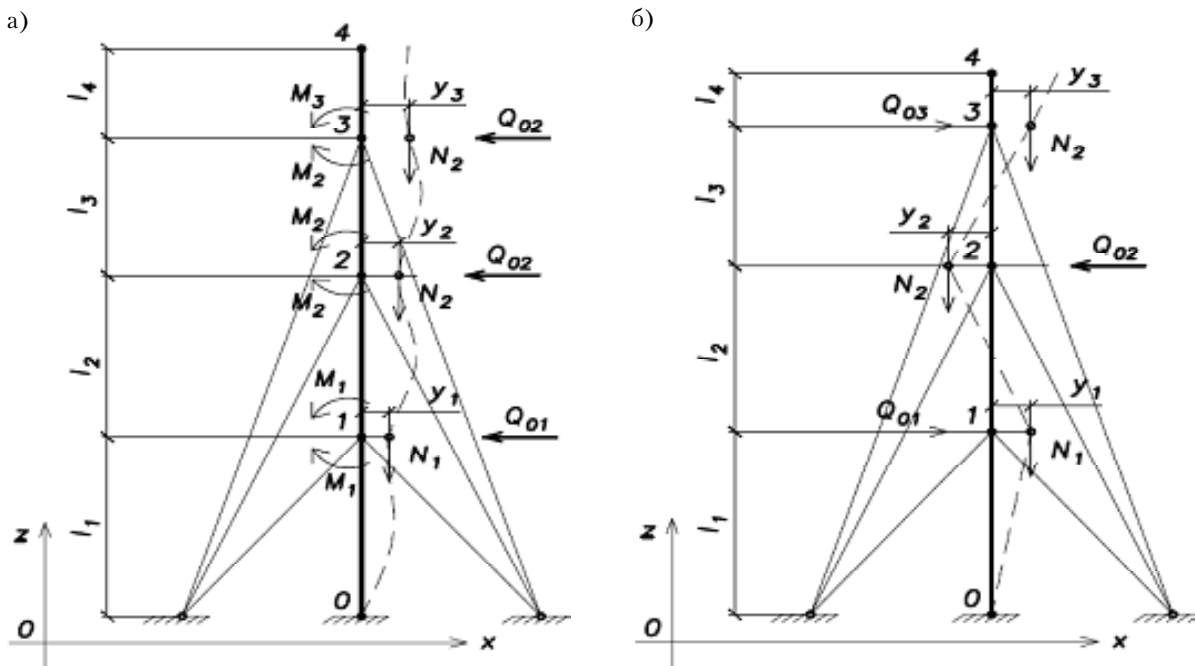


Рис. 1. Расчетные схемы мачт: а — расчетная схема мачты для расчета точным методом; б — расчетная схема мачты для расчета приближенным методом.

Таблица 1. Величины продольных сил в стволе от натяжения одного уровня оттяжек.

№	Количество уровней оттяжек	Продольные силы в стволе от натяжения одного уровня оттяжек, Н			
		1 уровень	2 уровень	3 уровень	4 уровень
1	2	3	4	5	6
1	2	760	17490	-	-
2	3	1991	2353	10050	-
3	4	1434	3464	4571	24660

Таблица 2. Геометрические параметры мачт.

№	Количество уровней оттяжек	$l_1$ , м	$l_2$ , м	$l_3$ , м	$l_4$ , м	$l_5$ , м	Высота мачты, м	В, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	9,0	5,4	3,6	-	-	18,0	4
2	3	9,0	9,0	6,0	4,0	-	28,0	6
3	4	9,0	9,0	6,0	6,0	4,0	34,0	10

Таблица 3. Сравнение  $k_{з.уст}$  всего сооружения по точному и приближенному методам.

№	Количество уровней оттяжек	Точный метод	Приближенный метод
		$k_{з.уст}$ всего сооружения	$k_{з.уст}$ всего сооружения
1	2	3	3
1	2	113,5	16,5
2	3	159,9	132,9
3	4	48,1	105,3

Таблица 4. Сравнение  $k_{з.уст}$  всего сооружения по точному методу с  $k_{з.уст}$  отдельных стержней ствола по формуле Эйлера.

№	Кол-во уровней оттяжек	Точный метод $k_{з.уст}$ всего сооружения	Формула Эйлера $k_{з.уст}$ отдельных стержней ствола			
			$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
1	2	3	5	6	7	8
1	2	113,5	938,5	113,3	-	-
2	3	159,9	399,8	303,2	159,7	-
3	4	48,1	470,5	201,3	346,1	64,5

Таблица 5. Сравнение  $k_{з.уст}$  всего сооружения по точному методу с  $k_{з.уст}$  отдельных стержней ствола по формуле Ясинского и по методике СНиП II-23-81\*.

№	Кол-во уровней оттяжек	Точный метод $k_{з.уст}$ всего сооружения	Формула Ясинского $k_{з.уст}$ отдельных стержней ствола				СНиП II-23-81* $k_{з.уст}$ отдельных стержней ствола			
			$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	113,5	392,0	19,0	-	-	301,9	14,8	-	-
2	3	159,9	167,0	126,6	32,4	-	128,6	97,5	25,3	-
3	4	48,1	196,5	84,1	70,3	13,1	151,4	64,7	54,9	10,2

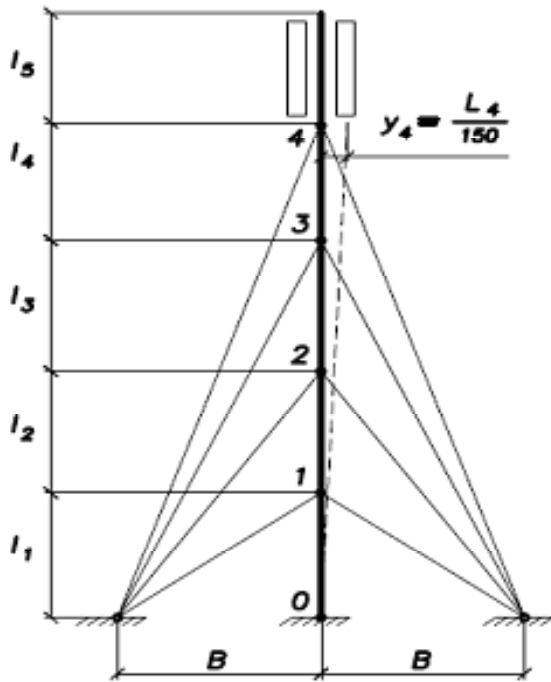


Рис. 2. Общая геометрическая схема мачт.

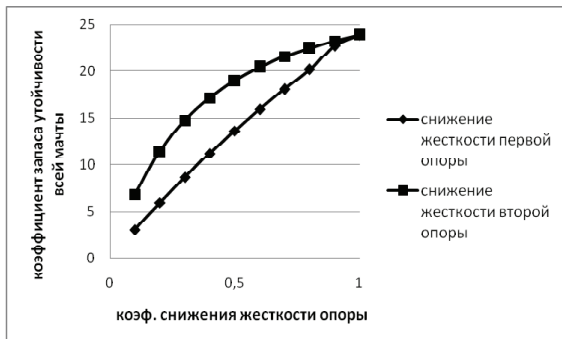


Рис. 3. Влияние снижения жесткостей опор на коэффициент устойчивости мачты с двумя уровнями оттяжек.

оттяжек, расположенных в г. Донецке на отметке +46.000м. Стволы мачт четырехгранные. На основании проведенных ранее исследований характеристик сечений мачт сотовой связи принято расстояние между поясами ствола 300мм и раскосная форма решетки, по специальной методике рассчитаны оптимальные величины предварительных натяжений оттяжек (табл.1) и подобраны диаметры канатов [5, 6].

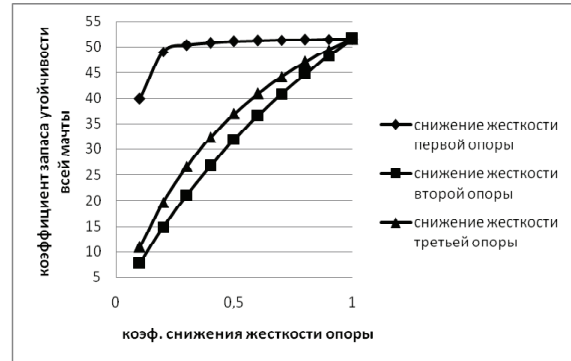


Рис. 4. Влияние снижения жесткостей опор на коэффициент устойчивости мачты с тремя уровнями оттяжек.

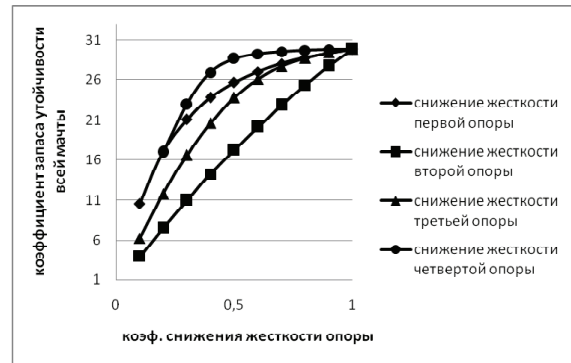


Рис. 5. Влияние снижения жесткостей опор на коэффициент устойчивости мачты с четырьмя уровнями оттяжек.

Все элементы ствола выполнены из равнополочного уголка 40x4. Мачты имеют консольные участки ствола, на которых крепится одинаковое количество антенн. Перемещение верхнего узла крепления оттяжек ограничено величиной  $y_i = L_i/150$ . На консолях мачт размещено оборудование: по 8 антенн GSM и РРЛ диаметрами 0,6м; Flexi BTS (133x447x560мм); по высоте ствола протянуты фидера. Геометрические параметры мачт приведены в табл. 2. Общая геометрическая схема мачт приведена на рис. 2.

Для данных мачт рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости точным и приближенным методами. Выполнен расчет устойчивости отдельных участков стволов мачт между закреплениями оттяжек как стержней, подверженных

центральному сжатию по СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции" [7], а также по формулам Эйлера и Ясинского. В таблицах 3, 4, 5 представлено сравнение полученных результатов.

При недостаточной жесткости упругих опор, образованных оттяжками, или при понижении жесткости во время эксплуатации мачты может потерять устойчивость. Чтобы исследовать, как влияет на общую устойчивость мачты возможный выход из строя каждой отдельной опоры, удобно воспользоваться приближенным методом расчета. Величина жесткости каждой опоры пошагово умножается на понижающий коэффициент, меньший единицы, и вычисляется соответствующий коэффициент запаса устойчивости всей системы. Эксперимент проводится на примере описанных выше трех мачт. Полученные результаты показаны на рис. 3,4,5.

Изменение жесткости каждой опоры оказывает значительное влияние на устойчивость сооружения в целом. По рис.3 для мачты с двумя уровнями оттяжек более критичным является ослабление жесткости верхней опоры. По рис.3 и рис. 4 для мачт с двумя и с тремя уровнями оттяжек снижение жесткости первой опоры имеет наименьшее значение.

#### 4. Выводы

1. Вывод формулы Эйлера основан на интегрировании дифференциального уравнения упругой линии стержня. Это уравнение справедливо только в пределах линейной зависимости между напряжениями и деформациями, поэтому и формула Эйлера применима только до тех пор, пока критические напряжения, определяемые по этой формуле, не превосходят предела пропорциональности. В результате анализа конструктивных решений и габаритов существующих мачт мобильной связи можно сделать вывод о том, что чаще всего гибкости отдельных участков стволов мачт находятся в пределах 36-60, в редких случаях приближаются к 100, т.е. участки между закреплениями канатов являются стержнями малой гибкости. Критическими напряжениями в них являются напряжения предела текучести.
2. Точный метод расчета дает практически равные результаты с формулой Эйлера для отдельных стержней ствола. Значит, при

расчете мачт мобильной связи на устойчивость нельзя использовать точный метод расчета, предложенный Савицким, так как данный метод дает завышенные значения коэффициентов запаса устойчивости по сравнению с действительными.

3. Соседние пролеты оказывают незначительное поддерживающее влияние на участок ствола, который теряет устойчивость. То есть запас устойчивости всей мачты приблизительно равен запасу наименее устойчивого отдельного пролета ствола, представленного в виде шарнирно-закрепленного стержня.
4. При проектировании мачты и подборе величин предварительных натяжений канатов достаточно проверить устойчивость каждого пролета ствола мачты в отдельности по методике, изложенной в СНиП II-23-81\*.
5. Исследование по приближенной методике расчета позволяет оценить влияние поддерживающего воздействия каждой опоры на общую устойчивость сооружения.

#### Литература

1. Савицкий Г.А. Основы расчета радиомачт. — М.: Государственное издательство по вопросам связи и радио, 1953. — С. 93-111.
2. Соколов А.Г. Анализ причин аварий АМС и организация обследования конструкций // Эксплуатация и контроль антенно-мачтовых и башенных сооружений (Сборник докладов) — Рига: Всесоюзное совещание по эксплуатации антенно-мачтовых и башенных сооружений, 1983 — С. 17-27.
3. Соколов А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование). — М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961.—171с.
4. Лейтес С.Д. Справочник по определению свободных длин элементов стальных конструкций — М.: Проектстальконструкция, 1963 — 160с.
5. Межинская И. В. Влияние характеристик оттяжек на работу мачтовых сооружений // Сборник докладов международной научно-технической конференции студентов — М.: МГСУ, апрель 2008. — С. 27-37.
6. Губанов В. В., Межинская И. В. Определение рациональных параметров мачт высотой до 30м // "Металлические конструкции". Том 13, № 4—Макеевка: ДонНАСА, 2007. — С. 204-206.
7. СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции".
8. Editor Madugula. Dynamic response of lattice towers and guyed masts (Committee rapport). — M.K.S. Reston (US): ASCE, 2002 — 266 p.
9. Smith B.W. Communication structures. — Thomas Telford, 2007 — 352 p.

**Губанов Вадим Вікторович** — доцент кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Інституту інженерів будівельників (The Institution of Civil Engineers, Великобританія). Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, розрахунок та проектування висотних споруд.

**Межинська Ірина Валеріївна** — аспірант кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, розрахунок та проектування висотних споруд.

**Губанов Вадим Викторович** — кандидат технических наук, доцент кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Института инженеров строителей (The Institution of Civil Engineers, Великобритания). Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, расчет и проектирование высотных сооружений.

**Межинская Ирина Валерьевна** — аспирант кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, расчет и проектирование высотных сооружений.

**Gubanov Vadim Viktorovich** — Ph. D., an associate professor of the Department "Metal Structures" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the Institution of Civil Engineers, Great Britain. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, design and designing of high-rise structures.

**Mezhinskaya Irina Valer'yevna** — a postgraduate of the Department "Metal Structures" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, design and designing of high-rise structures.