

УДК 624.014

ГРИНЕВ В. Б., д-р техн. наук,  
ЯРОВОЙ Ю. Н., канд. техн. наук,  
ВИНОГРАДОВ В. В., аспирант,  
ЛЕВАДА В. А., преподаватель,  
АЛЕШЕЧКИНА Т. Н., старший преподаватель (Харьковский национальный университет  
строительства и архитектуры)

## Сравнительный анализ одномерной и пространственной модели для мачт мобильной связи

*В статье рассмотрены вопросы моделирования расчетных схем конструкций мачт мобильной связи. На основе существующих методик расчета были проведены численные эксперименты по исследованию перемещения верхнего обреза мачты для пространственной и стержневой моделей. Расчеты выполнялись в среде ПК SCAD Office.*

**Ключевые слова:** гибкая нить, оттяжка, мачтовая система, упруго-податливая опора, жесткость, одномерная конструкция.

### Введение

Для подвески антенного оборудования, передающего и принимающего сигналы, на необходимой высоте широко применяются металлические мачты на оттяжках. В технической литературе исследованы вопросы расчета и конструирования высоких мачт — от 25 до 400 м [1, 2, 8]. Мачтовые системы имеют особенности, которые влияют на принимаемые конструктивные решения. Это достаточно специфический объект расчета, который характеризуется следующими особенностями:

- нелинейная работа вантовых элементов (оттяжек);
- необходимость задания усилий предварительного напряжения;
- учет «эффекта силы, направленной в полюс» для передачи усилий от оттяжки на ствол;
- проверка устойчивости равновесия ствола относительно принятых нагрузений.

**Целью работы** является: определение перемещения верхнего обреза мачты мобильной связи высотой 60 м при разных методах расчета.

### Методы расчета

Выполнен анализ двух методик расчета мачты мобильной связи, которые реализованы в среде ПК SCAD Office. Рассмотрена одномерная и пространственная расчетная модель. Расчет конструкции в одномерной постановке описывается как стержень с приведенным моментом инерции на оттяжках, которые моделируются конечным элементом типа «гибкая нить» для дальнейшего

нелинейного расчета. Расчет мачты ведется в плоскости действия моментов как сжато-изогнутого стержня, поддерживаемого нелинейно-упругими опорами, на восприятие продольных и поперечных нагрузок. Искомым параметром является перемещение узла крепления верхнего обреза. Пространственная расчетная модель описывается как мачта, смоделированная решетчатой конструкцией с треугольным сечением в плане на оттяжках.

Для решения нелинейной задачи можно использовать три метода [6, 8]:

1. Простой шаговый — на каждом шаге решается линеаризованная задача, в которой жесткость вантового элемента определяется при значении натяжения, полученного на предыдущем шаге.

2. Шаговый с итерационным уточнением — здесь учитывается, что на каждом шаге выполняется итерационное уточнение результата решения; при этом используются данные по предыдущему шагу.

3. Пошагово-итерационный — отличается от предыдущего тем, что жесткости вантовых элементов пересчитываются на каждой итерации.

Общих рекомендаций по выбору метода не существует, и во многих случаях не стоит ограничиваться только одним методом. При расчете нелинейной задачи в ПК SCAD Office использован шаговый метод с итерационным уточнением. Данный метод решения нелинейной задачи был выбран на основе рекомендаций, описанных в [3, 11].

© В. Б. Гринев, Ю. Н. Яровой, В. В. Виноградов, В. А. Левада, Т. Н. Алешечкина, 2017

**Объект исследований**

Выполнен расчет мачты высотой 60 м, с шестью уровнями крепления вант (координаты вант по высоте мачты:  $x_1=10$  м,  $x_2=20$  м,  $x_3=30$  м,  $x_4=40$  м,  $x_5=50$  м,  $x_6=56$  м), загруженной системой статических нагрузок (показанных на рис. 1), соответствующих типичным условиям эксплуатации [12]. Рассматриваемая в качестве расчетного примера мачта имеет в плане треугольное сечение (рис. 2). Пояса мачты выполнены из трубы  $\varnothing 4,8$  см с толщиной стенки 0,2 см.

Мачта представляет собой составную конструкцию, состоящую из двухметровых решетчатых секций с размерами в плане 30 см (рис. 3, 4). Решетка выполнена из круглой стали  $\varnothing 1,4$  см. Между собой секции соединены с помощью болтовых соединений. Эквивалентная стержневая система будет иметь следующие характеристики, полученные на основе конструктора сечений (ссылка на скад):  $F(x)=11,861$  см<sup>2</sup>,  $I(x)=7256,3$  см<sup>4</sup>,

$E=2 \cdot 10^6$  кз/см<sup>2</sup>,  $\gamma=7,8 \cdot 10^{-3}$  кз/см<sup>3</sup>. Для ветровой погонной нагрузки, линейно изменяющейся по высоте, приняты  $q(H)=0,20$  кз/см,  $q(0)=0,12$  кз/см.

Рассмотрены две расчетные модели: в первом случае ствол мачты моделировался как пространственная ферма, а во втором случае – как стержень с указанными выше геометрическими характеристиками. В обеих моделях оттяжки моделировались как нелинейный элемент – гибкая нить. Оттяжки представляют тросы диаметром 1,2 см, натянутые с одинаковым усилием 200 кг.

Существенной характеристикой мачтовой системы является перемещение верхнего обреза мачты –  $v(H)$ . Превышение допустимых значений горизонтальных перемещений ведет к непригодности по условиям нормальной эксплуатации. Вышеуказанный параметр принимается за основной при дальнейшем анализе конструкции.

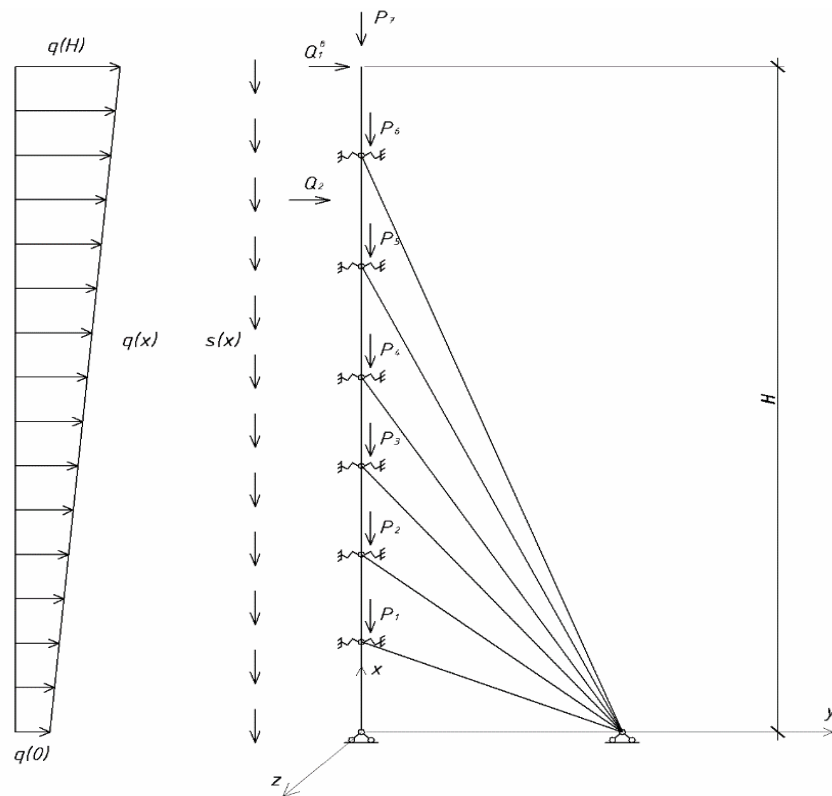


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы мачты (стержневая модель):

$Q_1, Q_2$  – ветровая нагрузка на оборудование;

$P_1 - P_6$  – осевые сосредоточенные силы, реализующие воздействие на вант мачту;

$q(x)$  – ветровая нагрузка на ствол мачты;

$s(x)$  – продольная нагрузка, определяемая весом мачты

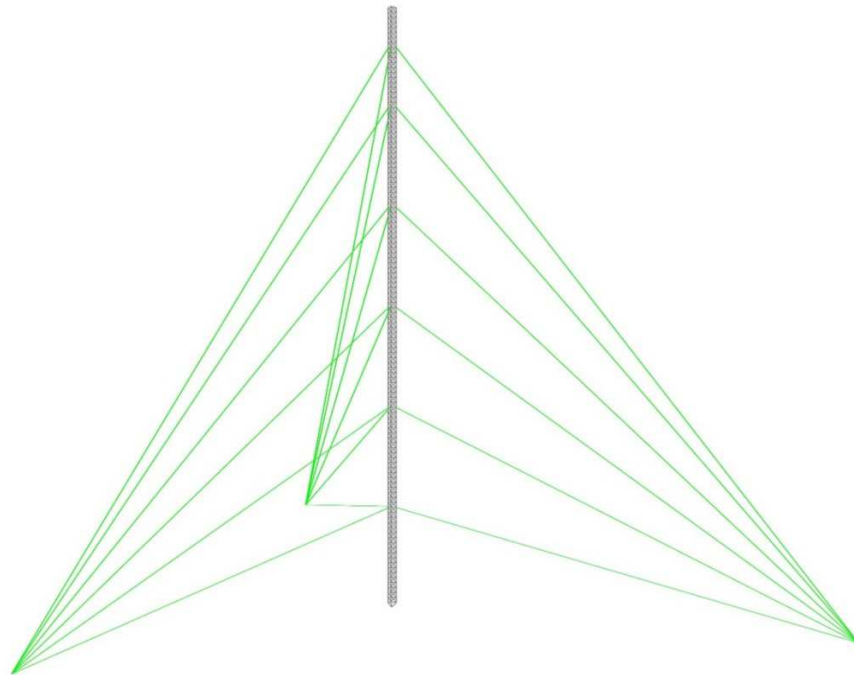


Рис. 2. Общий вид расчетной схемы мачты в ПК SCAD Office (пространственная модель)

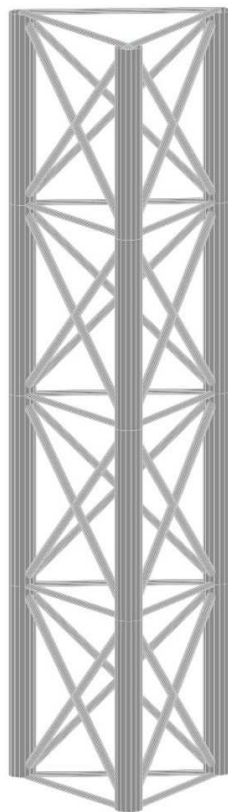


Рис. 3. Секция мачты

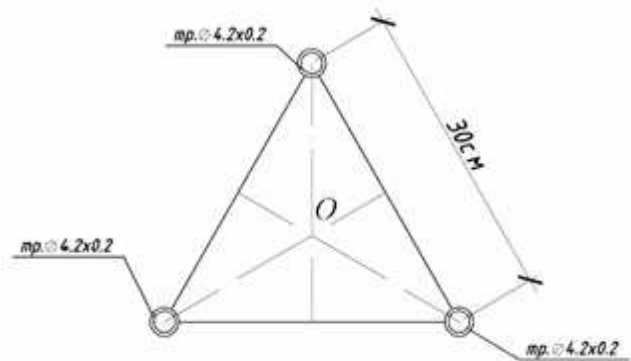


Рис. 4. Схема поперечного сечения мачты

#### Результаты исследования

Как показано в [8], для трехгранной мачты деформации сильно зависят от направления плоскости действия ветрового потока. Рассмотрены два типичных направления. Полученные расчетные данные для пространственной и одномерной моделей сведены в таблицу. Перемещения (в миллиметрах) приведены для шести точек по высоте мачты для двух вариантов направления ветрового потока. Как видно из приведенных численных данных, отличие перемещений для одномерной и пространственной моделей находится в пределах 20 %. Как отмечается в [10, 12], величины моментов инерции в одномерной модели для достаточно хорошего совпадения с

пространственной решеткой могут быть скорректированы в пределах 16-17 %.

Следует отметить, что при расчете первой модели возникают монтажные деформации конструкции от действия предварительного натяжения оттяжек (ввиду

несимметричного расположения раскосов конструкции), так как решетка раскосная. Исходя из соображений минимизации монтажных деформаций при последующих расчетах была применена симметричная (крестовая форма) решетка.

Таблица

Результаты расчетов для различных моделей

Высота, м	Пространственная схема		Стержневая схема	
	Направление $W_1$	Направление $W_2$	Направление $W_1$	Направление $W_2$
	Перемещение, мм			
10	9,9	5,0	11,7	5,4
20	28,5	13,0	36,0	14,7
30	45,8	24,1	56,8	26,8
40	78,7	20,1	82,39	11,47
50	388,86	141,5	439,7	146,96
56	911,2	462,6	1078,8	544,9
60	1384	791,78	1666	960,41

**Выводы**

Предлагаемый подход сравнительного анализа одномерной и пространственной модели может быть применен для построения упрощенных стержневых моделей при решении задач анализа чувствительности и оптимизации, при этом необходимо вводить необходимые корректирующие коэффициенты геометрических характеристик одномерной модели.

**Список использованных источников**

1. Савицкий, Г. А. Основы расчета радиомачт [Текст] / Г. А. Савицкий. — М.: Государственное издательство по вопросам связи и радио, 1953.
2. Соколов, А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование) [Текст] / А. Г. Соколов. — М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. — 171 с.
3. Перельмутер, А. В. SCADOffice. Расчет мачт на оттяжках [Текст] / А. В. Перельмутер. — К.: Изд-во СКАД СОФТ, 2004. — 46 с.
4. Евзеров, И. Д. Расчет и проектирование мачт на оттяжках в среде ПК Лира [Текст] / И. Д. Евзеров, М. В. Лазнюк, Т. А. Ниолова // Металлические конструкции. — 2009. — № 1, т. 15. — С. 23–29.
5. Методика расчета мачт на оттяжках (статика, динамика, устойчивость) [Текст]. — К.: УкрНИИпроект Стальконструкция, 1991.
6. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики [Текст] / С. Ф. Клованич. — Запорожье: Изд-во журнала «Світ геотехніки», 2009. — 400 с.
7. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] /

- А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — 4-е изд., перераб. — М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. — 736 с.
8. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский [и др.]. — М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. — 656 с.
9. Константинов, И. А. Строительная механика. Расчет стержневых систем с использованием программы SCAD [Текст]: учеб.-метод. комплекс / И. А. Константинов, В. В. Лалин, И. И. Лалина. — СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009. — 228 с.
10. Гринев, В. Б. К вопросу построения методики расчета жесткостей опор мачтовых систем в деформированном состоянии [Текст] / В. Б. Гринев, Ю. Н. Яровой, В. А. Левада // Строительная механика и расчет сооружений. — М., 2015. — Вып. 4(261). — С. 29-34.
11. Rimantas Belevic, Donatas Jatulis, Dmitrij Šešok. Optimization of tall guyed masts using genetic algorithms [Text] / Rimantas Belevic, Donatas Jatulis, Dmitrij Šešok // Engineering Structures. — 2013. — P. 239-243.
12. Wahba, Y.M.F.; Madugula, M.K.S.; Monforton, G.R.. Evaluation of non-linear analysis of guyed antenna towers [Text]/ Wahba, Y.M.F.; Madugula, M.K.S.; Monforton, G.R.// Computers & Structures. 1998 Vol. 68 (1) – P. 207-212.

**В. Б. Гринев, Ю. М. Яровой, В. В. Виноградов, В. А. Левада, Т. М. Альошечкіна. Порівняльний аналіз одновимірної і просторової моделі для щогл мобільного зв'язку.** У статті розглядається питання коректного моделювання розрахункових схем конструкцій щогл мобільного зв'язку. На основі

існуючих методик розрахунку були проведені чисельні експерименти з дослідження переміщення верхнього обріза щогли в просторовій і стрижневій моделях. Всі розрахунки виконувалися в середовищі ПК SCAD Office.

**Ключові слова:** гнучка нитка, відтяжка, щоглова система, пружно-податлива опора, жорсткість, одномірна конструкція.

**V. B. Grinyov, Yu. N. Yarovoy, V.V. Vynogradov, V.A. Levada, T.M. Alyoshechkina. Comparative analysis of a one-dimensional and spatial model for mobile communication masts.** In the article the questions of simulation of design schemes of mobile communication masts constructions are considered. On the basis of the existing calculation methods, numerical experiments were carried out to study the movement of the upper mast cut for the spatial rod and one-dimensional computational models. The spatial design model is described as a mast modeled by lattice structures with a triangular cross-section in plan on the braces. The design calculation in a one-dimensional setting is described as a rod with a reduced moment of inertia on the braces, which are modeled by a finite element of the "flexible thread" type for further non-linear calculation. The calculations were carried out in an environment PC SCAD Office software. A comparative analysis was carried out for the possibility of constructing simplified rod models for solving problems of sensitivity analysis and optimization.

**Keywords:** flexible thread, brace, mast system, elastic-compliant support, rigidity, one-dimensional construction.

Надійшла 28.08.2017 р.

**Гринев Владимир Борисович**, д-р техн. наук, профессор кафедры строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, Украина.

**Яровой Юрий Николаевич**, канд. техн. наук, профессор кафедры строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, Украина.

**Виноградов Виталий Владимирович**, аспирант кафедры строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, Украина. E-mail: [vitaliy.vinogradov@yandex.ru](mailto:vitaliy.vinogradov@yandex.ru)

**Левада Владимир Анатолиевич**, преподаватель кафедры строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, Украина.

**Алешечкина Татьяна Николаевна**, старший преподаватель кафедры строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, Украина. E-mail: [atn4042@gmail.com](mailto:atn4042@gmail.com)

**Grinev Vladimir**, Dr. Sc. science Professor Department of Building Mechanics Kharkov National University of Civil engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine.

**Yarovoy Yuriy**, PhD. Sc. Professor Department of Building Mechanics Kharkov National University of Civil engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine.

**Vynogradov Vitaliy**, graduate student Department of Building Mechanics Kharkov National University of Civil engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [vitaliy.vinogradov@yandex.ru](mailto:vitaliy.vinogradov@yandex.ru)

**Levada Vladimir**, lecturer, Department of Building Mechanics Kharkov National University of Civil engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine.

**Aleshechkina Tatyana**, senior lecturer, Department of Building Mechanics Kharkov National University of Civil engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [atn4042@gmail.com](mailto:atn4042@gmail.com)