



## ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВЛАСНІ НЕЗГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ ЛЕГКИХ МЕТАЛЕВИХ ЩОГЛ

**С. М. Царенко<sup>a</sup>, В. В. Губанов<sup>b</sup>, І. В. Межинська<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Донецький національний технічний університет,  
вул. Артема, 58, м. Донецьк, Україна, 83001.*

*E-mail: tzarenko@rambler.ru*

<sup>b</sup> *Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

*E-mail: vadvy@dgasa.dn.ua, ira.meginskaya@yandex.ua*

*Отримана 14 жовтня 2010; прийнята 26 листопада 2010.*

**Анотація.** В статті розглянуті питання динамічної роботи легких металевих щогл на відтяжках. Розглянуто методику динамічного розрахунку тригранної щогли стільникового зв'язку з двома рівнями відтяжок, яку реалізовано за допомогою ЕОМ. Розрахункова схема конструкції представлена у виді вертикальної консолі з двома пружними опорами і зосередженою масою на другій опорі. В основі методики розрахунку лежить диференціальне рівняння коливань систем з розподіленими параметрами, рішення якого знаходиться методом початкових параметрів. В результаті визначені частотні характеристики щогл, проведений аналіз впливу параметра відносної маси антен, розташованих на стовбурі, на частотні характеристики. Розглянуто власні незгасаючі коливання щогли, які виникають при дії пульсаційного вітрового навантаження, представленого у вигляді раптового видалення навантаження постійної інтенсивності, яке відповідає максимально допустимому відхиленню стовбура. Отримано графіки зміни моментів, що вигинають, в різних перетинах стовбура щогли за час періоду першого тону коливань. Виконано оцінку впливу динамічних навантажень на напружено-деформований стан стовбура щогли. В результаті аналізу отриманих даних даються рекомендації щодо розміщення обладнання на опорах стільникового зв'язку.

**Ключеві слова:** легкі металеві щогли на відтяжках, пульсаційне вітрове навантаження, системи з розподіленими параметрами, власні незатухаючі коливання, розрахунок частотних характеристик.

## ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СОБСТВЕННЫЕ НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАЧТ

**С. Н. Царенко<sup>a</sup>, В. В. Губанов<sup>b</sup>, И. В. Межинская<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Донецкий национальный технический университет,  
ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83001.*

*E-mail: vadvy@dgasa.dn.ua*

<sup>b</sup> *Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

*E-mail: vadvy@dgasa.dn.ua, ira.meginskaya@yandex.ua*

*Получена 14 октября 2010; принята 26 ноября 2010.*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы динамической работы легких металлических мачт на оттяжках. Рассмотрена методика динамического расчета трехгранной мачты сотовой связи с двумя уровнями оттяжек, которая реализована с помощью ЭВМ. Расчетная схема конструкции представлена в виде вертикальной консоли с двумя упругими опорами и сосредоточенной массой на второй опоре. В основе методики расчета лежит дифференциальное уравнение колебания систем с распределенными

параметрами, решение которого находится методом начальных параметров. В результате определяют частотные характеристики мачт, проведен анализ влияния параметра относительной массы антенн, размещенных на стволе, на частотные характеристики. Рассмотрены собственные незатухающие колебания мачты, возникающие при действии пульсационной ветровой нагрузки, выраженной в виде внезапного удаления нагрузки постоянной интенсивности, соответствующей максимально допустимому отклонению ствола. Получены графики изменения изгибающих моментов в различных сечениях ствола мачты за время периода первого тона колебаний. Выполнена оценка влияния динамических нагрузок на напряженно-деформированное состояние ствола мачты. В результате анализа полученных данных даются рекомендации к размещению оборудования на опорах сотовой связи.

**Ключевые слова:** легкие металлические мачты на оттяжках, пульсационная ветровая нагрузка, системы с распределенными параметрами, собственные незатухающие колебания, расчет частотных характеристик.

## FREQUENCY RESPONSES AND NATURAL UNDAMPED VIBRATIONS OF LIGHT-WEIGHT METAL GUYED MASTS

Sergey Tsarenko <sup>a</sup>, Vadim Gubanov <sup>b</sup>, Irina Meginskaya <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Donetsk National Technical University,  
58, Artema Str., Donetsk, Ukraine, 83000.

E-mail: tzarenko@rambler.ru

<sup>b</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.

E-mail: vadvy@dgasa.dn.ua, ira.meginskaya@yandex.ua

Received 14 October 2010; accepted 26 November 2010.

**Abstract.** The paper deals with the problems of dynamic behaviour of light-weight metal guyed masts. The design of the dynamic technique of the cellular telephone net two-level trihedral guyed mast implemented with a computer has been considered in the paper. The model of the structure has been presented in the form of a vertical cantilever with two elastic supports and lumped mass on the second support. The design technique base is the solution of differential equation of vibration of the systems with distributed parameters. As a result, the guyed mast frequency characteristics have been determined and the analysis of the relative masses of antenna parameters impact on the structure frequency characteristics has been carried out. The natural continuous oscillations of the light metal guyed mast being brought about by the pulsation wind load expressed in form of the sudden load elimination of regular intensity corresponding to the limit deviation of the mast have been considered. The charts of the bending moment variation in different sections of the mast column for the period of the first tone vibrations have been revealed. The effect of the dynamic loads on the stressed and deformed state of the guyed mast column has been estimated. As the result of the received data, recommendations for the equipment placement on the cellular telephone net supports have been provided.

**Keywords:** light-weight metal guyed masts, pulsation wind loads, systems with distributed parameters, natural undamped vibrations, frequency characteristics calculation.

### Введение

Совершенствование методов расчета и конструктивных форм легких металлических мачт на оттяжках является на сегодняшний день очень актуальной задачей. По всему миру, и в том числе на территории Украины, широко распространена сеть мобильной телефонной связи и беспро-

водного Интернета, которая продолжает охватывать (заполнять) все новые территории. Однако в настоящее время в Украине все еще отсутствуют нормативные документы по расчету и проектированию мачт мобильной связи. В то же время уже накоплен некоторый опыт их проектирования и эксплуатации.

Мачты, как правило, находятся на территории городской застройки, поэтому очень важно уделить внимание их правильному проектированию, изготовлению, монтажу, эксплуатации, чтобы не допустить обрушений и аварийных ситуаций, которые могут привести не только к нарушению беспроводной связи, потере денежных средств, но и к травмированию людей.

Одной из самых сложных и неясных областей исследования мачт является их работа под действием динамических нагрузок. На практике причинами разрушения существующих мачт высотой от 25 до 300 зачастую становятся динамические воздействия [1, 2, 3].

Ветер — это переменчивый динамический процесс, поэтому в действительности мачта постоянно находится в поле динамических воздействий. В настоящее время ветровая нагрузка на мачту рассчитывается как сумма статической и пульсационной составляющих [4, 5]. Для определения пульсационной составляющей необходимо установить частотные характеристики конструкции, однако нормативные документы не приводят соответствующей методики расчета. Таким образом, существует потребность в инженерной методике определения частот собственных колебаний мачт.

Динамическое воздействие учитывается только косвенно путем замены эквивалентной статической нагрузки и не выполняется анализ влияния явления резонанса на работу сооружений.

Исследование динамической работы мачт позволит повысить эффективность конструктивных решений, продлить срок эксплуатации сооружений и предотвратить возможные аварии.

Цели данной работы:

1. Разработать методику динамического расчета легких металлических мачт.
2. Исследовать частотные характеристики мачт.
3. Выполнить динамическое исследование собственных незатухающих колебаний мачты, вызванных импульсной нагрузкой.

### Конструктивная схема мачты

Динамические исследования были выполнены для существующей мачты (город Горловка Донецкая область) высотой 20 м трехгранной фор-

мы в плане и с двумя уровнями оттяжек по высоте (рис. 1), которая расположена на крыше здания на отметке 7,00 м. Ствол мачты собран из отдельных секций длиной по 2 м. Соединение секций между собой — фланцевое (на четырех болтах). Пояса выполнены из трубы 50,0×3,5, решетка — из круглой стали Ø 12 мм. Расстояние между поясами ствола 300 мм. Длина горизонтальной проекции оттяжки равна 5,56 м. На мачте размещается такое оборудование: отм. 19,00 м — 1 РРЛ Ø 0,6 м; отм. 17,00 м — 3 GSM типа «Kathrein» размерами 1319×323×71 мм; отм. 15,00 м — дополнительное оборудование общей площадью 0,80 м<sup>2</sup>. Вдоль всей длины ствола протянуты фидеры площадью 0,09 м<sup>2</sup> на 1 метр высоты сооружения. Предварительное натяжение в оттяжках равно: для первого уровня 2,5 кН, для второго уровня — 5,0 кН. Диаметр каната Ø11 мм. Таким образом, жесткость опорных узлов составляет для первого уровня  $c_1 = 180$  кН/м,  $c_2 = 70$  кН/м.

При расчете было принято жесткое сопряжение ствола мачты с фундаментом.

### Расчет собственных незатухающих колебаний мачты как системы с распределенными параметрами

Расчетную схему мачты представим в виде вертикальной консоли с двумя упругими опорами и сосредоточенной массой на второй опоре (рис. 2). Таким образом, вся масса антенн  $M = 54$  кг условно сконцентрирована на верхней опоре.

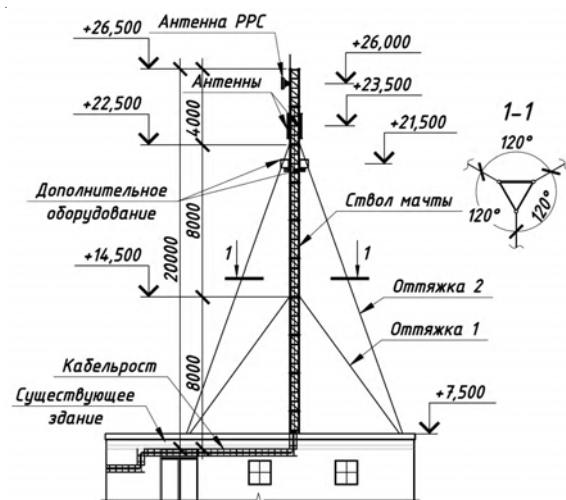


Рисунок 1. Геометрическая схема мачты.

Дифференциальное уравнение перемещений сечений имеет вид [6]:

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{m}{EJ_z} \cdot \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

Решение уравнения, т. е. уравнение движения сечений, имеет вид:

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n). \quad (2)$$

Уравнение изогнутой оси балки для произвольной гармоники составим по методу начальных параметров в динамических функциях Крылова [7]

$$\begin{aligned} y(x) = & \frac{M_0}{k^2 EJ_z} C_{kx} + \frac{P_0}{k^3 EJ_z} D_{kx} - \\ & - \frac{\chi_1}{k^3 l^3} \left( \frac{M_0}{k^2 EJ_z} C_{ka} + \frac{P_0}{k^3 EJ_z} D_{ka} \right) \times \\ & \times D_{k(x-a)} e(x-a) - \left( \frac{\chi_2}{k^3 l^3} - \xi l k \right) \times \\ & \times \left( \frac{M_0}{k^2 EJ_z} C_{kb} + \frac{P_0}{k^3 EJ_z} D_{kb} - \frac{\chi_1}{k^3 l^3} \left( \frac{M_0}{k^2 EJ_z} C_{ka} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{P_0}{k^3 EJ_z} D_{ka} \right) D_{k(b-a)} \right) D_{k(x-b)} e(x-b), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $M_0$  и  $P_0$  – изгибающий момент и поперечная сила в заделке,  $\chi_1 = c_1 l^3 / EJ_z$ ,  $\chi_2 = c_2 l^3 / EJ_z$ ,  $\xi$  – это относительный вес антенн (показывает отношение массы антенн к массе ствола):  $\xi = M/ml$ .

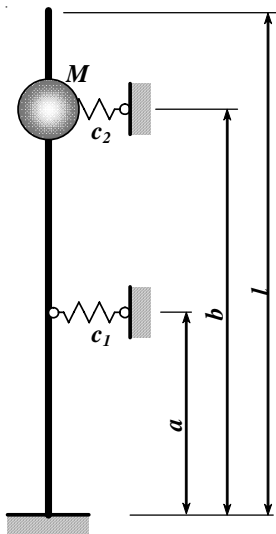


Рисунок 2. Расчетная схема мачты.

Представим уравнение (3) в виде:

$$y(x) = \frac{M_0}{k^2 EJ_z} K_{kx} + \frac{P_0}{k^3 EJ_z} L_{kx}. \quad (4)$$

Уравнения углов поворота, моментов и поперечных сил имеют вид:

$$\begin{aligned} \Theta(x) = \frac{dy}{dx} = & \frac{M_0}{k EJ_z} K'_{kx} + \frac{P_0}{k^2 EJ_z} L'_{kx}; \\ M(x) = EJ_z \frac{d^2 y}{dx^2} = & M_0 K''_{kx} + \frac{P_0}{k} L''_{kx}; \\ Q(x) = EJ_z \frac{d^3 y}{dx^3} = & k M_0 K'''_{kx} + P_0 L'''_{kx}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $K'_{kx}$ ,  $K''_{kx}$ ,  $K'''_{kx}$ ,  $L'_{kx}$ ,  $L''_{kx}$ ,  $L'''_{kx}$  производные функций  $K_{kx}$ ,  $L_{kx}$  по переменной  $z = kx$ . Начальные параметры  $M_0$  и  $P_0$  определяем из условия закрепления на втором конце консоли:

$$M(l) = 0; Q(l) = 0. \quad (6)$$

Из первого уравнения получаем  $P_0 = -M_0 k \frac{K''_{\lambda l}}{L''_{\lambda l}}$ ,

где  $\lambda = kl$ , подставив во второе условие (6), мы получим частотное уравнение

$$K'''_{\lambda} - \frac{K''_{\lambda}}{L''_{\lambda}} L'''_{\lambda} = 0. \quad (7)$$

Из уравнения (7) находим спектр собственных чисел и определяем собственные частоты

$$\omega = \frac{\lambda^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Принимая во внимание то, что жесткости оттяжек определяются из условия равнопрочности соответствующих сечений мачты при статическом расчете, проанализируем влияние сосредоточенной массы на частотные характеристики конструкции. На рисунке 3 представлена зависимость первых двух собственных частот от параметра  $\xi$ , а также собственной частоты колебания массы  $M$  на упругой связи  $\omega_c = \sqrt{c_2/M}$ . Из графика видим, что при  $\xi = 1,32$  частота  $\omega_c$  совпадает с первой частотой, это приводит к тому, что сила инерции массы (от первой формы колебания) будет равна реакции упругой опоры. То есть сила инерции массы уравновесит удерживающую силу, создаваемую оттяжками второго уровня. Другими словами, вторая опора мачты выключится из работы, что приведет к переносу всей нагрузки только на нижние

опоры. Также из графика следует, что вторая частота колебаний не зависит от наличия и величины сосредоточенной массы на уровне второй оттяжки.

При пульсационной ветровой нагрузке в мачте возникают как собственные колебания при внезапном удалении нагрузки, так и вынужденные — при внезапном ее приложении и последующем воздействии. На первом этапе рассмотрим собственные незатухающие колебания, возникающие при внезапном удалении ветровой нагрузки постоянной интенсивности  $q$ , расчетная схема представлена на рисунке 4.

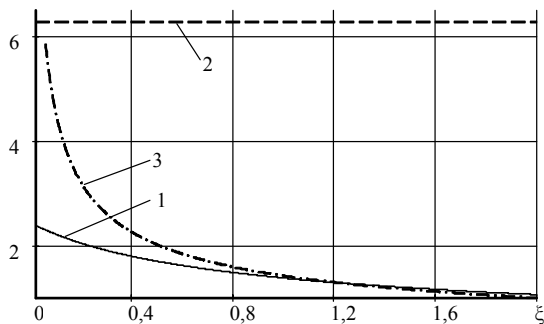
Принимаем равномерно распределенную по высоте мачты нагрузку с интенсивностью  $q = 1,35 \text{ кН/м}$ , от которой предельное отклонение мачты составит,  $f(l) = 0,2 \text{ м}$ .

Уравнение перемещений (4) запишем в виде:

$$y(x) = \frac{M_0}{k^2 EJ_z} \left( K_{kx} - \frac{K''_{\lambda}}{L''_{\lambda}} L_{kx} \right) = \frac{D_M l^2}{\lambda^2 EJ} Y(x). \quad (8)$$

Рассмотрим начальное условие, требующее, чтобы в начале колебаний изогнутая ось мачты соответствовала уравнению статического равновесия от нагрузки  $q$  по методу начальных параметров

$$f(x) = \frac{M_0 x^2}{2EJ} - \frac{P_0 x^3}{6EJ} + \frac{q x^4}{24EJ} - \frac{\chi_1 (x-a)^3}{6l^3} \times \left( \frac{M_0 a^2}{2EJ} - \frac{P_0 a^3}{6EJ} + \frac{q a^4}{24EJ} \right) e^{(x-a)} - \frac{\chi_2 (x-b)^3}{6l^3} \times \left( \frac{M_0 b^2}{2EJ} - \frac{P_0 b^3}{6EJ} + \frac{q b^4}{24EJ} - \frac{\chi_1 (b-a)^3}{6l^3} \left( \frac{M_0 a^2}{2EJ} - \frac{P_0 a^3}{6EJ} + \frac{q a^4}{24EJ} \right) \right) \times e^{(x-b)}. \quad (9)$$



**Рисунок 3.** Графики изменения частот в зависимости от параметра  $\xi$ : 1 — первая собственная частота  $\omega_1$ ; 2 — вторая собственная частота  $\omega_2$ ; 3 — частота колебаний массы  $M$  на упругой связи  $c_2$ .

Начальные параметры  $M_0, P_0$  определим из условия закрепления второго конца балки:

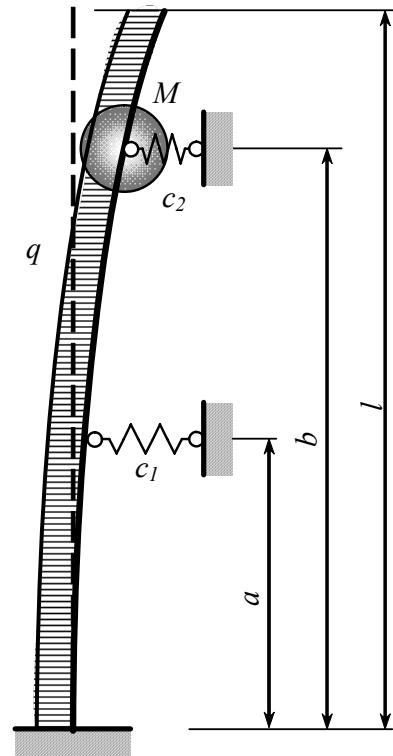
$$M(l) = EJ \frac{d^2}{dx^2} f(l) = 0, \quad Q(l) = EJ \frac{d^3}{dx^3} f(l) = 0.$$

Из начального условия следует

$$\sum_1^{\infty} \frac{D_M l^2}{\lambda^2 EJ} Y(x) = f(x). \quad (10)$$

По схеме Фурье это равенство нужно умножить на собственную функцию другого индекса и проинтегрировать по длине.

$$\begin{aligned} & \sum_1^{\infty} \frac{D_M l^2}{\lambda^2 EJ} \left( \int_0^a Y_n(x) Y_m(x) dx + \right. \\ & \left. + \int_a^b Y_n(x) Y_m(x) dx + \int_b^l \rho(x) Y_n(x) Y_m(x) dx \right) = \\ & = \int_0^a f(x) Y(x) dx + \int_a^b f(x) Y(x) dx + \\ & \quad + \int_b^l \rho(x) f(x) Y(x) dx. \end{aligned} \quad (11)$$



**Рисунок 4.** Деформированное состояние ствола мачты, соответствующее начальным условиям собственных колебаний.

Собственные функции на первых двух участках от 0 до  $b$  ортогональны, а на третьем участке ортогональны с весом, где  $\rho(x) = 1 + \xi l \delta(x - b)$  – весовая функция [8]. Левый интеграл представляет собой квадрат нормы собственных функций – для ортогональных функций определяется зависимостью [7]:

$$\Delta_n^2 = \frac{1}{4k} \times \left( 3 Y Y''' + kx(Y^2 - 2 Y' Y''' + (Y'')^2) - Y' Y'' \right) \Big|_0^l.$$

Учитывая то, что интегрировать следует по участкам, введем обозначения собственных функций для каждого участка: от 0 до  $a$  –  $Y_1(x)$ ; от  $a$  до  $b$  –  $Y_2(x)$ ; от  $b$  до  $l$  –  $Y_3(x)$ . Из граничных условий получаем  $Y_1(0) = 0$ ,  $Y_1'(0) = 0$ ,  $Y_3''(l) = 0$ ,  $Y_3'''(l) = 0$ , а также учтем, что на границе участков совпадают перемещения, углы поворотов и моменты, квадрат нормы будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta_n^2 = & \frac{l}{4\lambda} (3Y_1(a)Y_1''(a) - 3Y_2(a)Y_2''(a) - \\ & - \frac{2\lambda a}{l} Y_1'(a)Y_1''(a) + \frac{2\lambda a}{l} Y_2'(a)Y_2''(a) + \\ & + 3Y_2(b)Y_2''(b) - 3Y_3(b)Y_3''(b) - \\ & - \frac{2\lambda b}{l} Y_2'(b)Y_2''(b) + \frac{2\lambda b}{l} Y_3'(b)Y_3''(b) + \lambda Y_3(l)^2) + \\ & + \xi Y_3^2(b). \end{aligned} \quad (12)$$

Правую часть определим путем интегрирования по частям. Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} Y_{x^2} &= \int_0^l x^2 Y(x) dx, \quad Y_{x^3} = \int_0^l x^3 Y(x) dx, \\ Y_{x^4} &= \int_0^l x^4 Y(x) dx, \quad Y_{(x-a)^3} = \int_0^l (x-a)^3 Y(x) dx, \\ Y_{(x-b)^3} &= \int_0^l (x-b)^3 Y(x) dx. \end{aligned}$$

Подставляя полученные интегралы и квадрат нормы в условие (11), определяем начальный параметр  $D_M$  для произвольной гармоники.

$$\begin{aligned} D_M = & \frac{q\lambda^2}{24l^2\Delta_n^2} \left( M_q \left( Y_{x^2} - Y_{(x-a)^3} \frac{\chi_1 a^2}{6l^3} - \right. \right. \\ & \left. \left. - Y_{(x-b)^3} \frac{\chi_2}{6l^3} \left( b^2 - \frac{\chi_1 (b-a)^3}{6l^3} a^2 \right) \right) - \right. \\ & \left. - P_q \left( Y_{x^3} - Y_{(x-a)^3} \frac{\chi_1 a^3}{6l^3} - Y_{(x-b)^3} \frac{\chi_2}{6l^3} \left( b^3 - \frac{\chi_1 (b-a)^3}{6l^3} a^3 \right) \right) \right) + \\ & \left. + \left( Y_{x^4} - Y_{(x-a)^3} \frac{\chi_1 a^4}{6l^3} - Y_{(x-b)^3} \frac{\chi_2}{6l^3} \left( b^4 - \frac{\chi_1 (b-a)^3}{6l^3} a^4 \right) \right) \right). \end{aligned}$$

Уравнение собственных незатухающих колебаний сечений балки, описанное зависимостью (2), а также уравнения углов поворота, моментов и поперечных сил принимают вид:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_{Mn} l^2}{\lambda_n^2 EJ} Y_n(x) \cos(\omega_n t), \\ \Theta(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_{Mn} l}{\lambda_n EJ} Y_n'(x) \cos(\omega_n t), \\ M(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} D_{Mn} Y_n''(x) \cos(\omega_n t), \quad (13) \\ Q(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_{Mn} \lambda_n}{l} Y_n'''(x) \cos(\omega_n t). \end{aligned}$$

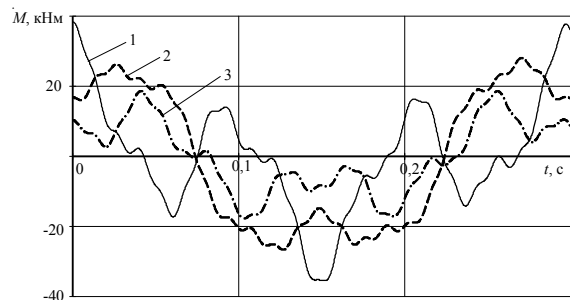
На основе сравнения эпюры изгибающих моментов, построенной по зависимости (13) в начальный момент времени ( $t = 0$ ), с эпюрой от статического нагружения, можно сделать вывод о том, что ряды сходятся быстро, и первые пять членов дают достаточную точность.

Рассмотрим изменение моментов в сечениях балки за один период колебания первой формы (рис. 5).

Из графика видим, что в сечении  $x = 0$  М динамический момент не превышает статический, а в сечениях  $a$  и  $b$  динамические коэффициенты соответственно будут составлять  $k_{\partial a} = 1,69$ ,  $k_{\partial b} = 1,72$ .

**Выводы:**

1. Из анализа полученных данных (рис. 3) следует, что на верхней опоре не рекомендуется располагать массу более 450 кг. Иначе сила инерции массы уравновесит удерживающую силу, создаваемую оттяжками второго уровня. Другими



**Рисунок 5.** График изменения изгибающих моментов за время периода первого тона колебаний равно: 1 – в сечении  $x = 0$  м, 2 – в сечении  $x = a$  м, 3 – в сечении  $x = b$  м.

словами, вторая опора мачты выключится из работы, что приведет к переносу всей нагрузки только на нижние опоры.

2. Также из рисунка 3 следует, что вторая частота не зависит от наличия и величины сосредоточенной массы на уровне второй оттяжки, что увеличение массы приводит к увеличению значимости последующих частот.

3. Из графика (рис. 5) видим, что в сечении  $x = 0$  м динамический момент не превышает статический (т. е.  $k_{\partial 0} = 1$ ), а в сечениях  $a$  и  $b$  динамические коэффициенты соответственно будут составлять  $k_{\partial a} = 1,69$ ,  $k_{\partial b} = 1,72$ .

4. Полученные расчетные зависимости являются базовыми для расчета заданной конструкции на динамическое действие нагрузок.

5. Рассмотренный алгоритм расчета мачты является основой для разработки инженерной методики динамического анализа работы легких металлических мачт.

6. В перспективе планируется ввести в расчет коэффициент затухания колебаний, обусловленный сухим и вязким трением в канатах, разработать методику расчета для расчетной схемы с шарнирным закреплением в основании ствола, для конструктивных схем мачт с тремя и более уровнями оттяжек по высоте.

## Литература

1. Соколов, А. Г. Анализ причин аварий АМС и организация обследования конструкций / А. Г. Соколов // Эксплуатация и контроль антенно-мачтовых

вых и башенных сооружений : сб. докладов / М-во связи СССР. — Рига, 1983. — С. 17–27.

2. Editor Madugula. Dynamic response of lattice towers and guyed masts (Committee rapport) / Editor Madugula. — M.K.S. Reston (US) : ASCE, 2002. — 266 p.
3. Smith, B. W. Communication structures / Smith B. W. — Thomas Telford, 2007. — 352 p.
4. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования : ДБН В.1.2-2:2006. — [Действителен с 2007-01-01]. — К. : Минстрой Украины, 2006 — 78 с.
5. Савицкий, Г. А. Основы расчета радиомачт / Савицкий Г. А. — М. : Гос. изд-во по вопросам связи и радио, 1953. — 275 с.
6. Шевченко, Ф. Л. Будівельна механіка. Спеціальний курс. Динаміка пружних стержневих систем / Шевченко Ф. Л. — Донецьк : РІА ДонНТУ, 2000. — 293 с.
7. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / Тимошенко С. П. — М. : Наука, 1967. — 444 с.
8. Шевченко, Ф. Л. Задачі з опору матеріалів : навч. посіб. / Ф. Л. Шевченко, С. М. Царенко. — Донецьк : РІА ДонНТУ, 2009. — 343 с.
9. Соколов, А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование) / Соколов А. Г. — М. : Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. — 171 с.
10. Воеводин, А. А. Шпренгельные радиомачты / Воеводин А. А. — М. : Радио и связь, 1981. — 175 с.
11. Збірник наукових праць Українського науководослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського / під ред. О. В. Шимановського. — К. : Вид-во «Сталь», 2008. — 167 с.

**Царенко Сергій Миколайович** — к. т. н., доцент кафедри опіру матеріалів Донецького національного технічного університету. Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану та розробка інженерних методів розрахунку на міцність, жорсткість та стійкість будівельних металевих конструкцій та споруд гірничої промисловості.

**Губанов Вадим Вікторович** — к. т. н., доцент кафедри металевих конструкцій 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 металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, розрахунок та проектування висотних споруд.

**Царенко Сергей Николаевич** — к. т. н., доцент кафедры сопротивления материалов Донецкого национального технического университета. Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния и разработка инженерных методов расчета на прочность, жесткость и устойчивость строительных металлических конструкций и сооружений горной промышленности.

**Губанов Вадим Викторович** — к. т. н., доцент кафедры металлических конструкций 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 металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, расчет и проектирование высотных сооружений.

**Sergey Tsarenko** — a Philosophy Doctor and a Docent of «Resistance of materials» department of the Donetsk National Technical University. His research interests include researches of state of tense-strain of metal structures of building metal designs and mining industry constructions.

**Vadim Gubanov** — a Ph. D. (Engineering), an Assistant Professor of the Metal Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A Fellow of the Institution for Civil Engineers (Great Britain). Research interests: operational reliability of metal structures and designing of high-rise constructions.

**Irina Meginskaya** — a postgraduate of the Metal Structures Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: operational reliability of metal structures and design of high-rise constructions.