

**Пояснительная записка к расчету мачты на
оттяжках с ветроэнергетической установкой (ВЭУ)
методом конечных элементов (МКЭ).**

Инженер: Кузнецов Д.В

Москва, 2010

Техническое задание на расчет:

Содержание:

Введение

1. Методика линейного расчета мачты на оттяжках.
2. Методика динамического расчета мачты на оттяжках.
3. Методика нелинейного расчета мачты на оттяжках.
4. Методика расчета ствола мачты на устойчивость.
5. Подбор сечений ствола мачты и оттяжек. Таблица сечений с материалами.
6. Рекомендации к проектированию мачты на оттяжках.
7. Расчет монтажных узлов мачты:
 - 7.1. Расчет сварных соединений в монтажных узлах мачты.
 - 7.1.1. Расчет сварных соединений в лацменном узле.
 - 7.1.2. Расчет сварных соединений в анкерном узле.
 - 7.1.3. Расчет сварных соединений во фланцевом соединении ствола мачты.
 - 7.2. Расчет фланцевого соединения на высокопрочных болтах.
8. Проверочный расчет свайного фундамента.

Приложения.

Приложение 1. Результаты линейного расчета.

Приложение 2. Результаты динамического расчета.

Приложение 3. Результаты нелинейного расчета.

Приложение 4. Результаты подбора сечений. Итоговая проверка сечений.
9. Выводы и рекомендации к последующему использованию расчета.
10. Список литературы.

Введение.

Общие принципы решения задач по расчету стальных мачт на оттяжках с помощью метода конечных элементов МКЭ.

В задачах на расчет мачт особое внимание уделено основным проблемам, которые могут возникнуть при задании исходных данных для расчета таких конструкций, а также используемым методам расчета. Показано, что нормативные методы расчета динамических задач не допускают выполнение расчетов в нелинейной постановке. Определение частот собственных колебаний для мачт на оттяжках с учетом геометрической нелинейности работы ее элементов на современной стадии развития программных комплексов МКЭ вызывает большие трудности. Пути упрощения расчетной схемы (линеаризации модели), а так же попытки решения таких задач с помощью приближенных методов могут привести в ряде случаев к некорректным результатам. Поэтому очень важным шагом является составление расчетной схемы мачты и ее выбор пути её упрощения.

В данном расчете используется метод, максимально учитывающий реальную работу конструкции и её элементов.

1. Методика линейного расчета мачты на оттяжках.

РСУ в линейной задаче формируется из следующих нагрузок:

- собственный вес ствола мачты и оттяжек,
- статическая составляющая ветровой нагрузки,
- приведенная горизонтальная нагрузка от работы ВЭУ.

Причем следует рассматривать два варианта направлений ветрового воздействия:

- направление ветра вдоль одной из оттяжек,

- направление ветра между оттяжками.

Первый вариант направления ветра является наиболее опасным, так как в такой ситуации из работы выключаются три оттяжки из четырех.

2. Методика динамического расчета мачты на оттяжках.

Основные динамические воздействия на мачтовые конструкции – ветровое (пульсационная составляющая), импульсное и возможно сейсмическое, а так же инерционные нагрузки, возникающие при движении и перемещении сооружения.

Для определения нагрузок от указанных видов воздействия необходимо создавать и рассчитывать отдельные динамические задачи с учетом опасных направлений действия ветра.

Для решения динамической задачи методом форм можно выполнить так называемую её линеаризацию. Этот инженерный метод может выполняться различными способами. В нашем случае, один из простых методов - замена включающихся на заданное направление ветра оттяжек рамными стержнями с такой же гибкостью EI и при необходимости малой изгибной жесткостью EI и удаление из расчетной схемы остальных оттяжек.

В расчет на динамическую составляющую нагрузки, в качестве дополнительного вида загрузки, мы учитываем нагрузку от обледенения ствола мачты и оттяжек. Ввиду незначительности оказываемого влияния на конструкцию в сравнении с максимально возможной нагрузкой от ветрогенератора, отдельная динамическая задача с обледенением не рассматривается.

В итоге расчета получаются периоды и формы собственных колебаний конструкции, перемещения и составляющие инерционных сил в стволе мачты (см. Приложение 1).

3. Методика нелинейного расчета мачты на оттяжках.

В геометрически нелинейной постановке учитываются несколько опасных направлений ветра, а так же зональности ветровых воздействий. Для некоторых элементов мачты более опасным может быть спад ветрового давления в отдельных зонах по высоте.

При моделировании оттяжек используется геометрически нелинейные элементы - КЭ 310(нить). Вычисления производятся простым пошаговым методом для физически и геометрически нелинейных задач (см. Приложение 2).

4. Методика расчета ствола мачты на устойчивость.

Для проверки устойчивости ствола мачты используются два метода:

- решение линеаризованной задачи (по недеформированной схеме) и нахождение коэффициента запаса устойчивости,
- выполнение нелинейного расчета, увеличивая прикладываемые нагрузки на коэффициент запаса устойчивости (см. Приложение 3).

5. Подбор сечений ствола мачты и оттяжек. Таблица сечений с материалами.

Для подбора или проверки сечений элементов ствола мачты и оттяжек используется специализированный программный комплекс (см. Приложение 4).

Таблица материалов для составной мачты (рекомендуемые размеры)

№ п/п	Сортамент	Марка стали	Геометрические характеристики		Кол- во, шт.
			Сечение, мм	Длина, м	
1	Труба бесшовная горячекатаная	ВСт3кп (ГОСТ1076-76*)	----	----	----
2	Труба бесшовная горячекатаная	ВСт3кп (ГОСТ1076-76*)	----	----	----
3	Труба бесшовная горячекатаная	ВСт3кп (ГОСТ1076-76*)	----	----	----
4	Труба бесшовная горячекатаная	ВСт3кп (ГОСТ1076-76*)	----	----	----
5	Труба бесшовная горячекатаная	ВСт3кп (ГОСТ1076-76*)	----	----	----

Таблица материалов оттяжек мачты (рекомендуемые размеры)

№ п/п	Сортамент	Марка стали	Геометрические характеристики		Кол- во, шт.
			Сечение, мм	Расчетная длина, м	
1	Канат DIN 3055	6 x 7 + FC	----	----	----
2	Канат DIN 3055	6 x 7 + FC	----	----	----

6. Рекомендации к проектированию мачты на оттяжках.

В качестве основания принимается свайный фундамент глубокого заложения, который состоит из винтовых свай диаметром ---- мм с лопастью 500 мм.

Угол наклона свай к стволу мачты принимается равным ---- градусов.

Для удобства монтажа, ствол мачты формируется из составных элементов, которые монтируются между собой посредством фланцевых соединений и «переходов» (прокатных изделий для уменьшения сечения труб).

Монтаж мачты производится с помощью рычажного устройства и лебедки с тросом.

Натяжение оттяжек контролируется талрепами, которые входят в состав монтажных узлов.

Технический контроль за состоянием конструкции должен производиться не менее 4 раз в год.

Все рекомендации согласованы с заказчиком и требуют дальнейшей разработки в проекте конструкции.

7. Расчет монтажных узлов мачты.

7.1. Расчет сварных соединений в монтажных узлах мачты.

7.1.1. Расчет сварных соединений в лацменном узле (см. рис.1).

Фасонка для верхнего яруса оттяжек

Расчет сварки на уловный срез.

При действии продольной и поперечной сил на соединение, расчет ведется по двум направлениям:

- По металлу шва

$$\frac{N}{\beta_f \cdot l_w \cdot k_f} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c;$$

- По металлу границы сплавления

$$\frac{N}{\beta_z \cdot l_z \cdot k_f} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c;$$

k_f – катет шва

l_w – расчетная длина шва

β_f, β_z – безразмерные коэффициенты, принимаются в зависимости от вида сварки.

γ_{wf}, γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва.

Решение:

$$N = H \cdot \cos \alpha;$$

$$\beta_f = 0,7; \beta_z = 1; \gamma_{wf} = 1, \gamma_{wz} = 1, \gamma_c = 1$$

Из табл. 56 СНиП II-23-81* , принимаем тип сварки - ручная,
электродом Э-46, и материал проволоки-СВ-08ГА
Катет шва назначаем, минимальный по СНиП II-23-81* , табл. 38
 $K_f = 5\text{мм}$
Марка стали - ВстЗкп

$R_{yn} = 225\text{МПа}$; $R_{un} = 370\text{МПа}$, - нормативные сопротивления стали.

$R_y = 215\text{МПа}$, $R_u = 350\text{МПа}$, - расчетные сопротивления стали.

$R_{wf} = 200\text{МПа}$, из табл. 56 СНиП II-23-81*

$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un} = 16,65\text{кН/см}^2$ из табл. 3 СНиП II-23-81*

$$R_{wf} \cdot \beta_f = 0,7 \cdot 20 = 14\text{кН/см}^2$$

$$R_{wz} \cdot \beta_z = 1 \cdot 16,65\text{кН/см}^2$$

Т.к $R_{wf} \cdot \beta_f < R_{wz} \cdot \beta_z$, расчет ведем по металлу шва

Соответственно минимальная длина сварного шва:

$$l_w = \frac{N}{R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c \cdot \beta_f \cdot k_f} = \frac{74,1 \cdot \cos 14^\circ}{20 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,5} = 10,3\text{см.}$$

Принимаем 40 см, из конструктивных особенностей узла.

Расчет сварного соединения на центральное растяжение-сжатие.

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c;$$

$$R_{wy} = R_y, \text{ из табл. 4 СНиП II-23-81*}$$

$$N = H \cdot \sin \alpha;$$

$$\frac{74,1 \cdot \sin 14^\circ}{0,8 \cdot 40} \leq 21,5;$$

$$0,56 \leq 21,5 .$$

Условие выполняется.

Фасонка для нижнего яруса оттяжек

Расчет сварки на условный срез.

При действии продольной и поперечной сил на соединение, расчет ведется по двум направлениям:

- По металлу шва

$$\frac{N}{\beta_f \cdot l_w \cdot k_f} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c;$$

- По металлу границы сплавления

$$\frac{N}{\beta_z \cdot l_z \cdot k_f} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c;$$

k_f – катет шва

l_w – расчетная длина шва

β_f, β_z – безразмерные коэффициенты, принимаются в зависимости от вида сварки.

γ_{wf}, γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва.

Решение:

$$N = H \cdot \sin \alpha;$$

$$\beta_f = 0,7; \beta_z = 1; \gamma_{wf} = 1, \gamma_{wz} = 1, \gamma_c = 1;$$

Из табл. 56 СНиП II-23-81*, принимаем тип сварки - ручная, электродом Э-46, и материал проволоки-СВ-08ГА

Катет шва назначаем, минимальный по СНиП II-23-81*, табл. 38

$k_f = 5$ мм

Марка стали - Вст3кп

$R_{yn}=225\text{МПа}$; $R_{un}= 370 \text{ МПа}$, - нормативные сопротивления стали.

$R_y = 215 \text{ МПа}$, $R_u = 350\text{МПа}$, - расчетные сопротивления стали.

$R_{wf} = 200\text{МПа}$, из табл. 56 СНиП II-23-81*

$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un}=16,65 \text{ кН/см}^2$ из табл. 3 СНиП II-23-81*

$$R_{wf} \cdot \beta_f = 0,7 \cdot 20 = 14\text{кН/см}^2 ;$$

$$R_{wz} \cdot \beta_z = 1 \cdot 16,65\text{кН/см}^2 ;$$

Т.к. $R_{wf} \cdot \beta_f < R_{wz} \cdot \beta_z$, расчет ведем по металлу шва

Соответственно минимальная длина сварного шва:

$$l_w = \frac{N}{R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c \cdot \beta_f \cdot k_f} = \frac{50,6 \cdot \sin 17}{20 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,5} = 6,9\text{см.}$$

Принимаем 40 см, из конструктивных особенностей узла.

Расчет сварного соединения на центральное растяжение-сжатие.

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c;$$

$$N = H \cdot \sin \alpha;$$

$$R_{wy} = R_y, \text{ из табл. 4 СНиП II-23-81*}$$

$$\frac{50,6 \cdot \sin 17^\circ}{0,8 \cdot 40} \leq 21,5 ;$$

$0,41 \leq 21,5$ Условие выполняется.

7.1.2. Расчет сварных соединений анкерного узла (см.рис.2).

Расчет сварки на условный срез.

$$N = H_1 \cdot \sin \alpha + H_2 \cdot \sin \alpha;$$

$$\beta_f = 0,7; \beta_z = 1; \gamma_{wf} = 1, \gamma_{wz} = 1, \gamma_c = 1;$$

Из табл. 56 СНиП II-23-81*, принимаем тип сварки - ручная, электродом Э-46, и материал проволоки-СВ-08ГА

Катет шва назначаем, минимальный по СНиП II-23-81*, табл. 38

$$K_f = 5 \text{ мм}$$

Марка стали - Вст3кп

$R_{yn} = 225 \text{ МПа}; R_{un} = 370 \text{ МПа}$, - нормативные сопротивления стали.

$R_y = 215 \text{ МПа}, R_u = 350 \text{ МПа}$, - расчетные сопротивления стали.

$R_{wf} = 200 \text{ МПа}$, из табл. 56 СНиП II-23-81*

$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un} = 16,65 \text{ кН/см}^2$ из табл. 3 СНиП II-23-81*

$$R_{wf} \cdot \beta_f = 0,7 \cdot 20 = 14 \text{ кН/см}^2 ;$$

$$R_{wz} \cdot \beta_z = 1 \cdot 16,65 \text{ кН/см}^2 ;$$

Т.к $R_{wf} \cdot \beta_f < R_{wz} \cdot \beta_z$, расчет ведем по металлу шва.

Соответственно минимальная длина сварного шва:

$$l_w = \frac{N}{R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c \cdot \beta_f \cdot k_f} = \frac{(74,1 + 50,6) \sin \alpha}{20 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,5} = 4,7 \text{ см} .$$

Принимаем 30 см, из конструктивных особенностей узла.

Расчет сварного соединения на центральное растяжение-сжатие

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c ;$$

$$R_{wy} = R_y, \text{ из табл. 4 СНиП II-23-81*}$$

$$N = H_1 \cdot \cos \alpha + H_2 \cdot \cos \alpha ;$$

$$\frac{120,3}{0,8 \cdot 30} \leq 21,5 ;$$

$$4 \leq 21,5 .$$

Условие выполняется.

7.1.3. Расчет сварных соединений во фланцевом соединении ствола мачты.

Расчет сварки на условный срез

Длина сварного шва численно равна длине окружности.

Расчет ведется на растяжение-сжатие сварочного шва.

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c ;$$

Марка стали - ВстЗсп

$R_{yn} = 225 \text{ МПа}$; $R_{un} = 370 \text{ МПа}$, - нормативные сопротивления стали.

$R_y = 215 \text{ МПа}$, $R_u = 350 \text{ МПа}$, - расчетные сопротивления стали.

$R_{wy} = R_y$, из табл. 4 СНиП II-23-81*

$N = 16.8 \text{ т} = 168 \text{ кН}$ (max усилия, из нелинейного нагружения, в стволе мачты) ;

$$L_w = 2\pi R = 3.14 * 27.3 = 85.7 \text{ см};$$

$$\frac{168}{0,8 \cdot 85,7} \leq 21,5 \text{ кН};$$

$$2,45 \leq 21,5.$$

Условие выполняется.

7.2. Расчет фланцевого соединения на высокопрочных болтах.

(В расчете используются фланцы марки Ф 1-250-6 по ГОСТ 12820-80 .)

Соединения на высокопрочных болтах следует рассчитывать в предположении передачи, действующих в стыках и прикрепленных усилиях через трение, возникающее по соприкасающимся плоскостям соединяемых элементов от натяжения высокопрочных болтов. При этом распределение продольной силы между болтами следует принимать равномерным.

Расчетное усилие, воспринимаемое одним болтом, рассчитывается по формуле:

$$Q_{bh} = \frac{R_{bn} \cdot \gamma_b \cdot A_{bn} \cdot \mu}{\gamma_h};$$

R_{bn} – расчетное сопротивление растяжению высокопрочного болта;

μ – коэффициент трения по табл. СНиП II-23-81*;

γ_h – коэффициент надежности;

A_{bn} – площадь сечения болта нетто;

γ_b – коэффициент условий работы ($\gamma_b = 1$);

$$R_{bn} = 110 \text{ кН.}$$

Решение:

$$R_{bt} = 0,38R_{bun} = 0,38 \cdot 110 = 41,8 \text{ (кН)}$$

$$R_{bs} = 0,4R_{bun} = 0,4 \cdot 110 = 44 \text{ (кН)}$$

Диаметр отверстия в соединении 18мм, принимаем высокопрочные болты на 2-3 мм меньше отверстия:

М 16x65.

$$A_{bn} = 1,57 \text{ см}^2;$$

$$A = 2,01 \text{ см}^2;$$

$$R_{bn} = 110 \text{ кН};$$

Из условий работы болтового соединения, расчет ведется на растяжение, смятие и срез.

$$N_b = R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot A_s \cdot n_s \text{ - на срез};$$

$$N_b = R_{bt} \cdot A_{bn} \text{ - на растяжение};$$

$$N_b = R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot d_t \cdot \sum t \text{ - на смятие.}$$

На срез:

$$N_b = R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot A_s \cdot n_s;$$

$$\gamma_b = 0,9;$$

$$A_s = 2,01 \text{ см}^2;$$

$$n_s = 1;$$

$$N_b = 44 \cdot 0,9 \cdot 2,01 \cdot 1 = 79,59 \text{ кН.}$$

В соединении 12 болтов, соответственно,

Усилие воспринимаемое на высокопрочных болтах составляет

$$N_b \cdot 12 = 79,59 \cdot 12 = 955,08 \text{ кН.}$$

Максимальные нагрузки на срез болтов в сечениях составляют до 20 кН

Несущая способность болтов на нагрузки обеспечена.

На растяжение-сжатие:

$$N_b = R_{bt} \cdot A_{bn};$$

$$N_b = 41,8 \cdot 1,57 = 65,63 \text{ кН.}$$

В соединении 12 болтов, соответственно,

Усилие воспринимаемое на высокопрочных болтах составляет

$$N_b \cdot 12 = 65,63 \cdot 12 = 787 \text{кН.}$$

Максимальные нагрузки на растяжение составляют 168кН

Несущая способность болтов на нагрузки обеспечена.

8. Проверочный расчет винтовых свай ---- мм, с диаметром лопасти ---- мм, длиной ----м.

Расчетная несущая способность сваи на выдергивающее усилие определяется в соответствии с СП 50-10-2003 по формуле:

$$F_{dc} = \gamma_c \cdot (\alpha_1 \cdot C_1 + \alpha_2 \cdot \gamma_1 \cdot l_1) \cdot A + f_u \cdot U(l_1 - D_1);$$

D₁ – диаметр лопасти;

f- расчетное сопротивление грунта;

l- Длина ствола сваи, погруженной в грунт;

U-периметр поперечного сечения ствола сваи;

γ_c- коэффициент условий работы (γ_c = 0,7 для выдергивающих усилий);

C₁- расчетное удельное сцепление грунта;

γ_{cd} – коэффициент зависит от диаметра лопасти;

n- безразмерный коэффициент по графику;

α₁, α₂ – по табл. СП «Свайные фундаменты»;

A- рабочая площадь лопасти(в случае расчета на выдергивающее усилие, площадь берется за вычетом площади ствола мачты).

$$F_{dc} = 0,7 \cdot (9,4 \cdot 36 + 3,8 \cdot 5,5 \cdot 19,5) \cdot 0,176 \cdot 1 + 35 \cdot 3,14 \cdot 0,16(6 - 0,5) = 181,61 \text{кН.}$$

Расчетная несущая способность сваи на сжимающее усилие определяется по формуле:

$$F_{dc} = \gamma_c \cdot \gamma_{cd} \cdot (\alpha_1 \cdot C_1 + \alpha_2 \cdot \gamma_1 \cdot l_1) \cdot A \cdot n + f_u \cdot U(l_1 - D_1);$$

где $\gamma_c = 0.8$ для сжимающих нагрузок

$$F_{dc} = 0,8 * (9,4 * 36 + 3,8 * 5,5 * 19,5) * 0,196 * 1 + 35 * 3,14 * 0,16(6 - 0,5) = 213,67 \text{ кН.}$$

9. Выводы и рекомендации дальнейшего использования расчета.

В результате расчета получены сочетания усилий и нагрузок на сооружение, а так же прочностные характеристики мачты с оттяжками при воздействии этих нагрузок. В результате были подобраны минимальные сечения для данной конструкции в целях расхода материалов, но с сохранением прочностных характеристик.

В расчет включены рекомендации по конструированию узлов и соединений мачты (проверка сварочных и болтовых соединений), а так же проверочный расчет фундаментных свай на выдергивание и сжимающее усилия.

Получены минимальные длины и катеты сварных швов, и необходимый диаметр болтов.

Расчет мачты выполнен при условии эксплуатации ВЭУ, указанного в техническом задании.

Расчет был выполнен в качестве основания к проектированию мачты на оттяжках.

Соблюдение рекомендаций к проектированию и выбор исходных данных остается на усмотрение проектной организации, использующей данный расчет.

Вышеизложенный расчет не является основой для выбора конструктивного и технологического решений мачты с оттяжками, а его результаты являются исходными данными для последующей разработки в проекте.

10. Список литературы:

1. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».
2. СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».
3. СП 50-10-2003 «Свайные фундаменты».
4. Перельмутер А.В SCAD Office. Расчет мачт на оттяжках. К.: Издание ООО SCAD soft, 2004.-46с.
5. Справочник проектировщика. Металлические конструкции (в 3-ёх томах). Том 3.-М.: Издательство АСВ, 1999.
6. Методика расчета мачт на оттяжках (статика, динамика, устойчивость).- К.: УкрНИИпроектстальконструкция ,1999.