

Анализ ожидаемых механических нагрузок на провода (грозотросы) воздушных линий электропередачи в процессе их эксплуатации

В статье сформулирована научно-техническая задача и представлены результаты расчета и анализа ожидаемых механических нагрузок на провода (грозотросы) воздушных линий электропередачи (ВЛ) при всех возможных условиях эксплуатации линии. Отражены зависимости значений механических нагрузок от величин температуры воздуха, скорости ветра, толщины стенки отложений различных видов и гололедных отложений в сочетании с ветром, а также от динамических нагрузок пляски проводов.

P.A. Kuznetsov
S.V. Averyanov**The analysis of expected mechanical loadings on wires (storm-tow) on the overhead power lines during their operation**

The scientific and technical problem is formulated and results of calculation and analysis of expected mechanical loadings on wires (storm-tow) on the overhead power lines are presented under all possible conditions of the line operation in the article. Dependences of values mechanical loadings on sizes of air temperature, speed of a wind, thickness of a wall of various kinds adjournment and ice adjournment in a combination to a wind, and also from dynamic loadings of galloping wires are reflected.

В настоящее время при проектировании механической части ВЛ используется, как правило, общепринятая методика расчета механических нагрузок на элементы линий [1, 2, 3, 4]. Цель этих расчетов – спроектировать механически прочную и экономически целесообразную ВЛ. Метеорологические воздействия на ВЛ в этой методике определяются в виде статических величин максимальных механических нагрузок в соответствии с представленными в [1] требованиями, таблицами, картами районирования территории СНГ по толщине стенки гололеда, скоростным напорам ветра, и пляске проводов.

При разработке информационно-измерительных систем мониторинга ВЛ (СМВЛ) возникает задача расчета величин ожидаемых механических нагрузок на провода (фазные провода и грозотросы) ВЛ при изменяющихся во времени метеоусловиях. По результатам расчета проводится анализ и прогнозирование величин механических воздействий на элементы ВЛ с учетом динамики их изменения, и определение пороговых значений воздействующих метеопараметров, при достижении которых возникает опасность аварии на ВЛ. Пороговые значения закладываются в качестве априорной информации в алгоритм работы СМВЛ, являются ключевыми при принятии системой мониторинга решений о наличии воздействия и его виде, степени опасности и динамике его развития.

Для повышения практической ценности результатов расчета в статье представлены результаты расчета ожидаемых механических нагрузок на провода для наиболее широко распространенных ВЛ напряжением 110 кВ с опорами типа ПБ110-5 и фазными проводами АС-120/19, т.к. эти результаты планируется использовать при внедрение СМВЛ на территории Саратовской области, относящейся к 4-ому климатическому району по толщине стенки отложений ($b_{г.н.} = 20$ мм) и 3-ему климатическому району по скоростному напору ветра ($v = 29$ м/с).

Для достижения поставленной цели авторами проведен расчет механических нагрузок по общепринятой методике до этапа определения стрелы провеса проводов. При этом длина промежуточного пролета рассчитана в соответствии с этой методикой (для проектируемой ВЛ) и названа расчетной: $l_{расч} = 190$ м. При расчетах для действующих линий длину промежуточного пролета необходимо определять исходя из реальных данных о длинах пролетов, контролируемых СМВЛ.

Далее произведен расчет ожидаемых механических нагрузок в виде горизонтальных, вертикальных и полных тяжений проводов ВЛ при изменяющихся метеоусловиях, включая воздействия на ВЛ динамических нагрузок. В статье представлены зависимости величин тяжений от переменных метеорологических параметров при:

- 1) исходных эксплуатационных механических нагрузках;
- 2) воздействию ветровых нагрузок на провод без отложений;
- 3) воздействию нагрузок от отложений без ветра;
- 4) воздействию гололедно-ветровых нагрузок;
- 5) динамических воздействиях пляски проводов.

1. Анализ исходных эксплуатационных механических нагрузок.

Проведение анализа гололедно-ветровых воздействий на провода ВЛ предполагает определение исходных эксплуатационных механических параметров линии, отражающих ее состояние при отсутствии неблагоприятных метеорологических воздействий на элементы ВЛ. В соответствии с методикой механического расчета ВЛ определены согласно выбранным условиям значения расчетных коэффициентов, определены параметры для выбранных проводов ВЛ-110 кВ, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры выбранных для механического расчета проводов марки АС-120/19

F	d_n	M_0	k_d	E	$\alpha_{л.р.}$	$R_{раз}$	$\sigma_{пр}$	$\sigma_{доп}$	$T_{доп}$	σ_s	T_s
136,8	15,2	471	0,918	$82,5 \times 10^3$	$19,2 \times 10^{-6}$	40520	296,2	118,5	1621	88,9	1216

В таблице 1: F - полное поперечное сечение провода, мм²; d_n - внешний диаметр провода, мм; M_0 - погонная масса провода, кг/км; k_d - коэффициент, учитывающий действительный диаметр провода, $k_d = \frac{0,83}{\sqrt[4]{0,1 \times d_n}} + 0,17$ [4]; E - модуль упругости провода, Н/мм²; $\alpha_{л.р.}$ - температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$; $R_{раз}$ - разрывное усилие провода, Н; $\sigma_{пр}$ - предел прочности провода при растяжении, кгс; $\sigma_{доп}(T_{доп})$ - нормативное допускаемое напряжение (тяжение) провода, кгс, $T_{доп} = \sigma_{доп} \times F/g$, где g - ускорение свободного падения, м/с²; $\sigma_s(T_s)$ - эксплуатационное напряжение (тяжение) провода, кгс, $T_s = \sigma_s \times F/g$;

Результаты расчета удельных механических нагрузок $\gamma_i, \frac{Н}{М \times ММ^2}$ на провода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Удельные механические нагрузки на провода

Провод	b_r	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	γ_7
АС-120/19	18,35	0,034	0,125	0,159	0,056	0,192	0,065	0,249

В таблице 2: $b_r = k_d \times k_h \times b_{г.н.}$ - расчетная толщина стенки гололедных отложений, мм (k_h - поправочный коэффициент на высоту расположения над землей центра тяжести всех проводов рассматриваемого участка линии); γ_1 - удельная нагрузка от веса провода; γ_2 - удельная нагрузка от веса отложений на проводе; γ_3 - удельная нагрузка от суммарного веса провода и отложений на нем; γ_4 - удельная нагрузка от давления ветра на провод без отложений на нем; γ_5 - удельная нагрузка от давления ветра на провод с отложениями на нем; γ_6 - результирующая удельная нагрузка от веса провода без отложений и давления ветра на него; γ_7 - результирующая удельная нагрузка от веса провода с отложениями и давления ветра на него.

Расчет исходных механических нагрузок на провода ВЛ: горизонтальной составляющей тяжения (H_Θ), вертикальной составляющей тяжения (V_Θ), полного тяжения провода (T_Θ), - произведен с определением механического напряжения в проводах σ_Θ из уравнения состояния провода (1):

$$\sigma_\Theta - \frac{\gamma_1^2 \times (I_{расч})^2 \times E}{24 \times (\sigma_\Theta)^2} = \sigma_{доп} - \frac{\gamma_7^2 \times (I_{расч})^2 \times E}{24 \times (\sigma_{доп})^2} - \alpha_{л.р.} \times E \times (\Theta - \Theta_s). \quad (1)$$

где $\Theta, ^\circ\text{C}$ – переменная температура;

$\Theta_s = 0 ^\circ\text{C}$ – эксплуатационная температура.

Стрелы провеса f_Θ , м, в соответствии с [2] определены из выражения:

$$f_\Theta = \frac{\gamma_1 \times (I_{расч})^2}{8 \times \sigma_\Theta}. \quad (2)$$

Горизонтальные составляющие полного тяжения H_Θ , кгс, согласно [4]:

$$H_\Theta = \frac{M_0 \cdot 10^{-3} \times (I_{расч})^2}{8 \times f_\Theta}. \quad (3)$$

Вертикальные составляющие полного тяжения провода V_Θ , кгс, в соответствии с [4]:

$$V_\Theta = M_0 \cdot 10^{-3} \times I_{расч}. \quad (4)$$

Полные тяжения провода T_Θ , кгс:

$$T_\Theta = \sqrt{(H_\Theta)^2 + (V_\Theta)^2}. \quad (5)$$

В результате расчета получены зависимости величин тяжений проводов от переменных значений температуры воздуха: $H_\Theta, V_\Theta, T_\Theta = F(t^\circ)$. Графики этих зависимостей представлены на рис. 1а.

Из графиков следует, что вертикальная составляющая тяжения провода (V_Θ) остается всегда неизменной, равной 70 кгс, и не зависит от изменений температуры, горизонтальная составляющая (H_Θ) зависит от изменения температуры, изменяясь в диапазоне 280 ÷ 235 кгс, и при любых условиях значительно превышает вертикальную составляющую тяжения провода (V_Θ), и составляет основную долю полного тяжения (T_Θ), изменяющегося в диапазоне 295 ÷ 250 кгс. В рассмотренном диапазоне температур без воздействий отложений и ветра значения тяжений в проводах значительно меньше допустимых предельных значений, поэтому температурные воздействия на провода не являются аварийноопасными.

2. Анализ ожидаемых ветровых нагрузок.

Значения тяжений H_v, V_v, T_v , возникающих в проводах без отложений, но с изменяющейся скоростью ветра $v = 0, 10, 20, 30, 40$ м/с при фиксированной температуре гололедообразования $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ определены по формулам:

Стрелы провеса f_v , м, рассчитаны по формуле:

$$f_v = \frac{\gamma_6 \times (l_{\text{расч}})^2}{8 \times \sigma_v}, \quad (6)$$

здесь

$$\gamma_6 = \sqrt{(\gamma_1)^2 + \left(\frac{\alpha \times k_1 \times C_x \times v^2 \times d_n}{1,6 \times 10^{-3} \times F} \right)^2}, \quad (7)$$

где α - коэффициент неравномерности скоростного напора по пролету; k_1 - коэффициент влияния длины пролета; C_x - коэффициент лобового сопротивления провода скоростному напору ветра.

Уравнение состояния провода:

$$\sigma_v - \frac{\gamma_6^2 \times (l_{\text{расч}})^2 \times E}{24 \times (\sigma_v)^2} = \sigma_{\text{доп}} - \frac{\gamma_7^2 \times (l_{\text{расч}})^2 \times E}{24 \times (\sigma_{\text{доп}})^2} - \alpha_{\text{л.р.}} \times E \times (\Theta_r - \Theta_3). \quad (8)$$

Горизонтальные составляющие H_v , кгс, полного тяжения провода равны:

$$H_v = \frac{\sqrt{(M_0 \cdot 10^{-3})^2 + (P_v)^2} \times (l_{\text{расч}})^2}{8 \times f_v}, \quad (9)$$

где давление ветрового потока, кгс:

$$P_v = 6,25 \times 10^{-5} \times \alpha \times k_1 \times C_x \times v^2 \times d_n. \quad (10)$$

Вертикальные составляющие V_v , кгс, полного тяжения провода равны:

$$V_v = \sqrt{(M_0 \cdot 10^{-3} \times l_{\text{расч}})^2 + (P_v \times l_{\text{расч}})^2}. \quad (11)$$

Полные тяжения провода T_v , кгс:

$$T_v = \sqrt{(H_v)^2 + (V_v)^2}. \quad (12)$$

График зависимости H_v , V_v , $T_v = F(v)$ величин тяжений проводов без отложений при фиксированной температуре $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ от скорости ветра, построенный по результатам расчетов по выражениям (6)-(12), представлен на рис. 1б.

Из графика видно, что независимо от величины ветрового воздействия полное тяжение провода не превышает допустимой ($T_{\text{доп}} = 1653$ кгс) и эксплуатационной величин ($T_3 = 1240$ кгс). Следовательно, ветровое воздействие на провод без отложений при скорости ветра до 40 м/с не является аварийно-опасным для ВЛ.

3. Анализ ожидаемых нагрузок от отложений различных видов.

Тяжения H_{Θ_r} , V_{Θ_r} , T_{Θ_r} , возникающие в проводах без ветра и при фиксированной температуре гололедообразования $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ при наличии отложений различных видов: чистого гололеда с плотностью $g_0 = 900$ кг/м³, смеси гололеда со снегом – $g_0 = 450$ кг/м³, изморози – $g_0 = 225$ кг/м³, и с разной толщиной стенки отложений ($b_{\text{г.н.}} = 0, 5, 10, 20, 30, 40$ мм), - определены по следующим формулам.

Стрелы провеса f_{Θ_r} , м, найдены по формуле:

$$f_{\Theta_r} = \frac{\gamma_3 \times (l_{\text{расч}})^2}{8 \times \sigma_{\Theta_r}}, \quad (13)$$

где

$$\gamma_3 = \gamma_1 + g \times \frac{g_0 \times \pi \times b_r \times (d_n + b_r)}{F} \times 10^{-6}, \quad (14)$$

Уравнение состояния провода:

$$\sigma_{\Theta_r} - \frac{\gamma_3^2 \times (I_{\text{расч}})^2 \times E}{24 \times (\sigma_{\Theta_r})^2} = \sigma_{\text{доп}} - \frac{\gamma_7^2 \times (I_{\text{расч}})^2 \times E}{24 \times (\sigma_{\text{доп}})^2} - \alpha_{\text{л.р.}} \times E \times (\Theta_r - \Theta_3). \quad (15)$$

Горизонтальные составляющие H_{Θ_r} , кгс, полного тяжения провода:

$$H_{\Theta_r} = \frac{(M_0 \cdot 10^{-3} + g_0 \cdot 10^{-6} \times F_{\text{отл}}) \times (I_{\text{расч}})^2}{8 \times f_{\Theta_r}}, \quad (16)$$

где $F_{\text{отл}}$ - площадь поперечного сечения стенки отложений, мм^2 , вычисляется в соответствии с [4] по формуле:

$$F_{\text{отл}} = \frac{\pi \times ((d_n + 2 \cdot b_r)^2 - d_n^2)}{4}. \quad (17)$$

Вертикальные составляющие V_{Θ_r} , кгс, полного тяжения провода равны:

$$V_{\Theta_r} = (M_0 \cdot 10^{-3} + g_0 \cdot 10^{-6} \times F_{\text{отл}}) \times I_{\text{расч}}. \quad (18)$$

Полные тяжения провода T_{Θ_r} , кгс:

$$T_{\Theta_r} = \sqrt{(H_{\Theta_r})^2 + (V_{\Theta_r})^2}. \quad (19)$$

По результатам расчетов по выражениям (13) ÷ (19) для каждого провода построены графики зависимостей H_{Θ_r} , V_{Θ_r} , $T_{\Theta_r} = F(b_{г.н.})$ величин тяжений проводов без воздействия ветра и при фиксированной температуре воздуха $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ от толщины стенки отложений в виде: чистого гололеда с плотностью $g_0 = 900 \text{ кг/м}^3$ (рис.1в), смеси гололеда со снегом – $g_0 = 450 \text{ кг/м}^3$ (рис.2а) и изморози – $g_0 = 225 \text{ кг/м}^3$ (рис.2б).

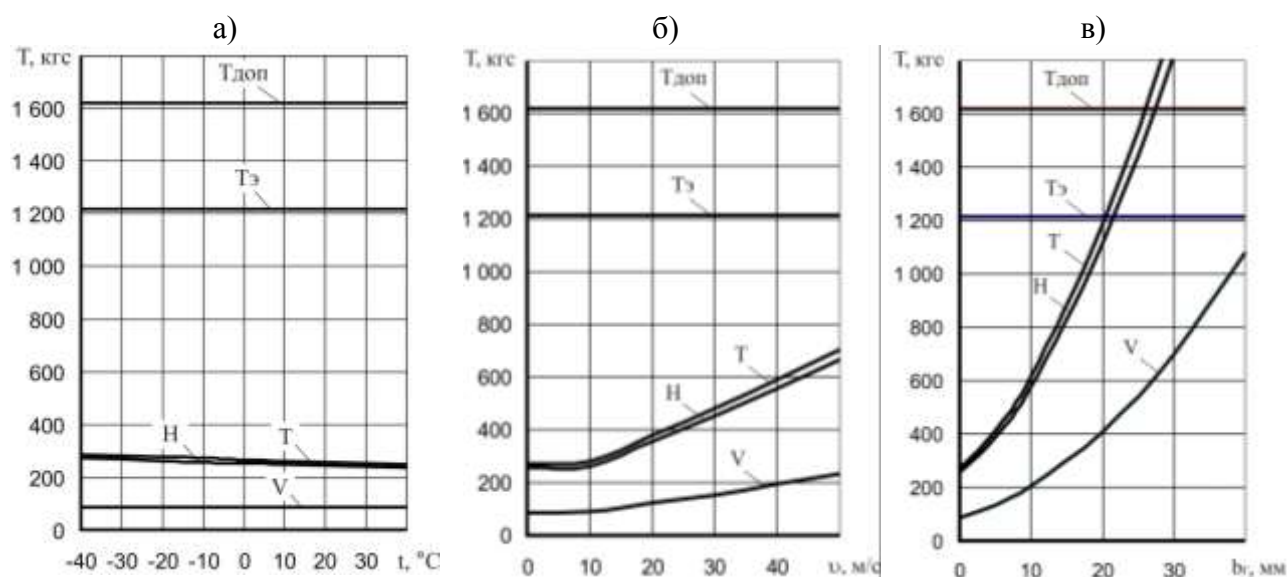


Рис. 1. Графики зависимости величин тяжений проводов:

- а) без отложений и ветра от температуры воздуха;
- б) без отложений от скорости ветра при фиксированной температуре $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$;
- в) без ветра при фиксированной температуре $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ от толщины стенки отложений в виде чистого гололеда с плотностью $g_0 = 900 \text{ кг/м}^3$

Из графиков следует:

- 1) При возникновении отложений в виде изморози независимо от толщины стенки отложений полное тяжение провода не превышает допустимой и эксплуатационной величин ($T < T_3 < T_{\text{доп}}$).

2) При возникновении отложений в виде смеси гололеда со снегом полное тяжение провода достигает критических значений эксплуатационного тяжения ($T = T_э$) при $b_г = 32$ мм, и нормативного допустимого тяжения ($T = T_{доп}$) при $b_г = 40$.

3) При возникновении отложений в виде чистого гололеда полное тяжение провода достигает критических значений эксплуатационного тяжения ($T = T_э$) при $b_г = 21$ мм, и нормативного допустимого тяжения ($T = T_{доп}$) при $b_г = 27$ мм.

Заметное влияние значения плотности (вида) отложений на величины H , V и T указывает на необходимость решения информационно-измерительными системами мониторинга ВЛ задачи распознавания вида отложений.

4. Анализ ожидаемых гололедно-ветровых нагрузок.

Тяжения H_{v, Θ_r} , V_{v, Θ_r} , T_{v, Θ_r} , возникающие в проводах с действием на них ветра со скоростью $v = 20$ м/с и отложений толщиной $b_{г.н.} = 0, 5, 10, 20, 30, 40$ мм при фиксированной температуре гололедообразования $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ и плотности отложений $g_0 = 900$ кг/м³ (чистый гололед) рассчитаны по следующим формулам.

Стрелы провеса f_{v, Θ_r} , м, найдены по формуле:

$$f_{v, \Theta_r} = \frac{\gamma_7 \times (I_{расч})^2}{8 \times \sigma_{v, \Theta_r}}, \quad (20)$$

Уравнение состояния провода:

$$\sigma_{v, \Theta_r} - \frac{\gamma_7^2 \times (I_{расч})^2 \times E}{24 \times (\sigma_{v, \Theta_r})^2} = \sigma_{доп} - \frac{\gamma_7^2 \times (I_{расч})^2 \times E}{24 \times (\sigma_{доп})^2} - \alpha_{л.р.} \times E \times (\Theta_r - \Theta_э). \quad (21)$$

Горизонтальные составляющие H_{v, Θ_r} , кгс, полного тяжения провода:

$$H_{v, \Theta_r} = \frac{\sqrt{(M_0 \cdot 10^{-3} + g_0 \cdot 10^{-6} \times F_{отл})^2 \times (P_v)^2 \times (I_{расч})^2}}{8 \times f_{\Theta_r}}, \quad (22)$$

где $F_{отл}$ вычислено из выражения (17), а P_v - по формуле (10).

Вертикальные составляющие V_{v, Θ_r} , кгс, полного тяжения провода рассчитаны:

$$V_{v, \Theta_r} = \sqrt{((M_0 \cdot 10^{-3} + g_0 \cdot 10^{-6} \times F_{отл}) \times I_{расч})^2 + (P_v \times I_{расч})^2}. \quad (23)$$

Полные тяжения провода T_{v, Θ_r} , кгс:

$$T_{v, \Theta_r} = \sqrt{(H_{v, \Theta_r})^2 + (V_{v, \Theta_r})^2}. \quad (24)$$

По результатам расчетов по выражениям (20) ÷ (24) построен график зависимостей H_{v, Θ_r} , V_{v, Θ_r} , $T_{v, \Theta_r} = F(b_{г.н.})$ тяжений провода при температуре $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$, скорости ветра $v=20$ м/с и плотности отложений $g_0 = 900$ кг/м³ (чистый гололед) от толщины стенки отложений (рис.2в).

Из графика видно, что при возникновении отложений и ветрового воздействия в соответствии с принятыми в расчете условиями полное тяжение провода достигает критических значений эксплуатационного тяжения ($T = T_э$) при $b_г = 17$ мм, и нормативного допустимого тяжения ($T = T_{доп}$) при $b_г = 22$ мм. При сочетании гололедных и ветровых воздействий имеет место режим максимальных статических нагрузок на провода ВЛ.

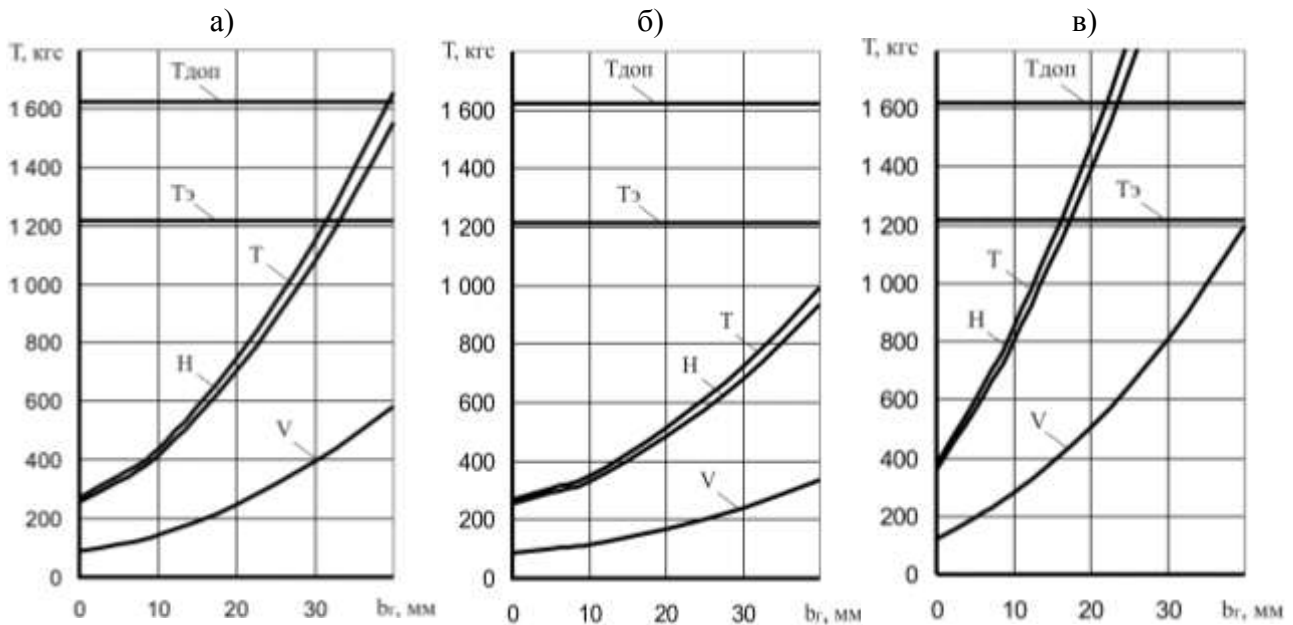


Рис. 2. Графики зависимости тяжений проводов при фиксированной температуре $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$:
 а) без ветра от толщины стенки отложений в виде гололеда со снегом с плотностью $g_0 = 450 \text{ кг/м}^3$;
 б) без ветра от толщины стенки отложений в виде изморози с плотностью $g_0 = 225 \text{ кг/м}^3$;
 в) скорости ветра $v=20 \text{ м/с}$ и плотности отложений $g_0 = 900 \text{ кг/м}^3$ (чистый гололед) от толщины стенки отложений

5. Анализ ожидаемых динамических нагрузок пляски проводов.

Пляска проводов возникает при сочетании условий, способствующих возникновению и развитию динамических колебаний проводов [5]. Сочетание этих условий наиболее вероятно в режиме по п. 3 гололедно-ветровых нагрузок. Этот режим принят в качестве исходного для режима динамических нагрузок, т.е. скорость ветра $v = 20 \text{ м/с}$, толщина стенки отложений $b_{г.н.} = 0, 5, 10, 20, 30, 40 \text{ мм}$ при фиксированной температуре воздуха $\Theta_r = -5^\circ\text{C}$ и плотности отложений $g_0 = 900 \text{ кг/м}^3$ (чистый гололед).

Величина динамических нагрузок пляски проводов в рассматриваемом случае складывается из величины исходной статической нагрузки и величины изменения тяжения ($\Delta T_{пл}$), обусловленной колебаниями проводов:

$$T_{пл} = T + \Delta T_{пл}, \quad (25)$$

Расчет $\Delta T_{пл}$ осуществлен с использованием методики, предложенной в [6] Бекметьевым Р.М. и Жолдасовой К.А., по которой тяжение провода $\Delta T_{пл(анк)}$ при колебаниях провода в анкерном пролете определяется из выражения:

$$\frac{\Delta T_{пл(анк)} \times l_{расч}}{E \times F} = \frac{p^2 \times l_{расч}^3}{24 \times (T + \Delta T_{пл(анк)})^2} - \frac{p^2 \times l_{расч}^3}{24 \times T^2} + \frac{1}{4} \frac{m^2 \times \pi^2}{l_{расч}} \times A^2 \times \cos^2 \omega t, \quad (26)$$

где m - число полувольт в пролете;

A – амплитуда колебаний пляски проводов, м;

ωt - фаза колебания провода.

В расчете принято, что для рассматриваемой линии амплитуда колебаний проводов при пляске с двумя ($m = 2$) полуволнами в пролете в среднем составит 2 метра ($A = 2 \text{ м}$). Тяжение провода при пляске достигает максимума (амплитудного значения) в моменты, когда провод находится в крайних (верхнем или нижнем) положениях, т.е. при $\cos \omega t = 1$.

В отличие от авторов, принявших в расчете в качестве исходного режим эксплуатационных механических нагрузок, в данном расчете для оценки разрушающего воздействия на ВЛ пляски проводов в качестве исходных приняты условия максимальных статических нагрузок на элементы ВЛ, при которых возможно возникновение пляски. В связи с этим вместо значения погонной массы провода (p) использована величина массы провода с отложениями на нем, и величина начального статического тяжения (T) выбрана не для режима исходных механических нагрузок, а для режима максимальных гололедно-ветровых воздействий.

Изменение тяжения ($\Delta T_{\text{пл(пром)}}$) провода в промежуточном пролете с учетом движения подвесных гирлянд изоляторов зависит от режима колебаний в многопролетной системе: при противофазных колебаниях провода (гирлянды изоляторов не отклоняются) расчет производится из выражения (26), при синфазных колебаниях (сдвиге по фазе на четверть периода) отклонение гирлянд будет максимальным, а изменение тяжения минимальным. Во всех остальных случаях величины изменения тяжения будут находиться между этими предельными значениями: $\Delta T_{\text{пл(пром)}}$ и $\Delta T_{\text{пл(анк)}}$.

Для синфазных колебаний $\Delta T_{\text{пл(пром)}}$ определено из выражения [6]:

$$\frac{\Delta T_{\text{пл(пром)}} \times l_{\text{расч}}}{E \times F} = \frac{p^2 \times l_{\text{расч}}^3}{24 \times (T + \Delta T_{\text{пл(пром)}})^2} - \frac{p^2 \times l_{\text{расч}}^3}{24 \times T^2} + \frac{1}{8} \frac{m^2 \times \pi^2}{l_{\text{расч}}} \times A^2 \times \cos^2 \omega t, \quad (27)$$

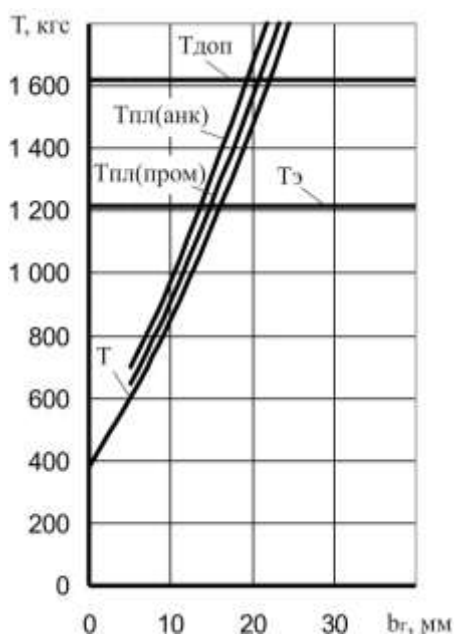


Рис. 3. График зависимости тяжений при пляске проводов от толщины стенки гололедных отложений

По результатам расчета построен график зависимости $T_{\text{пл(пром)}}, T_{\text{пл(анк)}} = F(b_{Г.н.})$ тяжений при пляске проводов от толщины стенки гололедных отложений, представленный на рис. 3.

Из графика видно, что в соответствии с принятыми в расчете условиями полное тяжение провода при пляске в анкерном пролете достигает значений эксплуатационного тяжения ($T_{\text{пл(анк)}} = T_э$) при $b_Г = 13$ мм, и нормативного допустимого тяжения ($T_{\text{пл(анк)}} = T_{\text{доп}}$) при $b_Г = 19$ мм. При колебаниях в промежуточном пролете величина тяжения в зависимости от режима колебаний может быть ниже, чем в анкерном пролете, достигая минимума (срединная кривая на рис.3) при синфазных колебаниях, при которых полное тяжение провода достигает значений эксплуатационного тяжения ($T_{\text{пл(пром)}} = T_э$) при $b_Г = 15$ мм, и нормативного допустимого тяжения ($T_{\text{пл(пром)}} = T_{\text{доп}}$) при $b_Г = 21$ мм.

Несмотря на относительно небольшое возрастание величины тяжения $\Delta T_{\text{пл(пром)}}$ при синфазных колебаниях проводов в многопролетной системе, наряду с отклонениями гирлянд изоляторов на траверсе, тросостойке и теле опоры приложенный к ним вектор суммарных сил механических воздействий с частотой колебаний меняет свое направление в соответствии с величиной δ - горизонтального отклонения гирлянды изоляторов. При этом возникает динамическая горизонтальная составляющая суммарных сил воздействий: $H_{\text{пл(пром)}} = F(T_{\text{пл(пром)}}, \delta)$. Если в режиме статических нагрузок эта составляющая за счет баланса сил равна нулю, то при пляске она действует перпендикулярно траверсам и телу опоры, т.е. приложена на максимально возможные плечи воздействий на них в направлении их наименьшей механической прочности [5]. Такое перераспределение сил является основной причиной возникновения аварий на ВЛ при пляске проводов.

Выводы:

1. По результатам анализа ожидаемых механических нагрузок на провода (грозотросы) ВЛ получены конкретные величины тяжений в проводах при конкретных условиях, отражающих обобщенное воздействие на элементы ВЛ эксплуатационных и метеорологических параметров.

2. Графически сформирована динамика изменения величин тяжений при изменениях основных воздействующих параметров с учетом остальных воздействий, в совокупности отражающих наиболее реальные сочетания воздействий на ВЛ.

3. Полученные значения ожидаемых механических нагрузок могут быть использованы в качестве априорной информации при создании базы данных ожидаемых величин и пороговых значений измеряемых параметров для СМВЛ.

4. Представленная методика анализа и расчета может быть использована при разработке и проектировании СМВЛ для других типов линий любых классов напряжений, находящихся в любых метеорологических условиях.

5. Предложенная методика в отличие от известных наряду со статическими воздействиями учитывает динамические воздействия пляски проводов, что является принципиально новым в механическом расчете ВЛ и позволяет разработать конструкции линий, имеющих более высокую устойчивость к динамическим нагрузкам.

6. Оценка опасности воздействия на элементы ВЛ по величине толщины стенки отложений является ошибочной. Принятие решения о начале проведения плавки отложений на проводах по общепринятому электросетевыми предприятиями порогу в 5 мм является необоснованным и влечет за собой неоправданные затраты электроэнергии, т.к. при этом, по результатам анализа графиков на рис.1 и рис. 2, запас механической прочности проводов ВЛ значительно превышает величину воздействия и угрозы аварии на линии нет.

7. Зависимость $T_{пл(пром)} = F(b_{г.н.})$, представленная на графике рис.3, справедлива только при оценке величины воздействий на провода ВЛ. Возникающая при пляске величина динамической горизонтальной составляющей суммарной силы $H_{пл(пром)}$, приложенная к траверсам, тросостойкам и телу опоры в направлении их минимальной механической прочности, по амплитуде может достигать значений, превышающих прочность элементов опор. Возникновение $H_{пл(пром)}$ является основной причиной аварий на ВЛ при пляске.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
2. Бошнякович А.Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. – Л.: Энергия, 1971, 367 с..
3. Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Работа и расчет проводов и тросов. Т.1. – М.: Госэнергоиздат, 1956, 411 с..
4. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. – Л.: Энергия, 1970, 434 с..
5. Кузнецов П.А. Анализ динамических воздействий пляски проводов и грозотросов на конструктивные элементы промежуточных пролетов воздушных линий электропередачи 110, 500 кВ / П.А Кузнецов, С.В. Аверьянов, Г.Г. Угаров и др.// Электронный журнал "Новое в российской электроэнергетике". – 2006. – №2. – С.29-36.
6. Бекметьев Р.М., Жолдасова К.А. Оценка изменения тяжения провода при колебаниях / Труды института Энергосетьпроект. – М. 1981. – С.12-23.