



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2023, ТОМ 29, НОМЕР 3, 143–152

EDN: VRETTA

УДК 624.072.222 : 621.311

(23)-0395-1

ВЛИЯНИЕ ГОЛОЛЁДНЫХ И ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ЖЕСТКУЮ ОШИНОВКУ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

С. А. Фоменко^{а, 1}, А. В. Танасогло^{б, 2}, И. М. Гаранжа^{б, 3}

^а ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика,
286128, г. о. Макеевка, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.

^б ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет»,
Российская Федерация, Центральный федеральный округ, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.
E-mail: ¹ Fomenko_SA@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ garigo@mail.ru.

Получена 27 сентября 2023; принята 27 октября 2023.

Аннотация. Жёсткая ошиновка открытых распределительных устройств подвержена воздействию гололёдных и ветровых нагрузок. Определение расчётных условий по ветру должно производиться на основании соответствующих карт климатического районирования территории РФ с уточнением при необходимости их параметров в сторону увеличения или уменьшения по региональным картам и материалам многолетних наблюдений гидрометеорологических станций и метеопостов за скоростью ветра, массой, размерами и видом гололёдно-изморозевых отложений. В малоизученных районах для этой цели могут организовываться специальные обследования и наблюдения. В статье рассмотрена эффективная методика расчёта напряжённого состояния конструкций жёсткой ошиновки при действии гололёдно-ветровых нагрузок. Поперечные ветровые колебания, вызванные ветровым резонансом, могут вызвать усталостные разрушения элементов конструкций жёсткой ошиновки, ослабление болтовых крепёжных и контактных соединений и т. п. Для борьбы с ветровым возбуждением применяются различные методы. Более подробную информацию по данной теме можно найти в работах [7–15].

Ключевые слова: жесткая ошиновка, труба-шина, открытые распределительные устройства, ветровые нагрузки, гололёдные нагрузки, ветровой резонанс.

ВПЛИВ ОЖЕЛЕДНИХ ТА ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЖОРСТКУ ОШИНІВКУ ВІДКРИТИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

С. О. Фоменко^{а, 1}, А. В. Танасогло^{б, 2}, І. М. Гаранжа^{б, 3}

^а ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
Російська Федерація, Донецька Народна Республіка,
286128, м. о. Макіївка, м. Макіївка, вул. Державіна, буд. 2.

^б ФДБОУ ВО «Національний дослідницький Московський державний будівельний університет»,
Російська Федерація, Центральный федеральный округ, 129337, м. Москва, Ярославське шосе, буд. 26.
E-mail: ¹ Fomenko_SA@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ garigo@mail.ru.

Отримана 27 вересня 2023; прийнята 27 жовтня 2023.

Анотація. Жорстка ошиновка відкритих розподільчих пристроїв піддається впливу ожеледних і вітрових навантажень. Визначення розрахункових умов через вітер повинно проводитися на підставі відповідних карт кліматичного районування території РФ з уточненням при необхідності їх параметрів у бік



збільшення або зменшення за регіональними картами і матеріалами багаторічних спостережень гідрометеорологічних станцій і метеопостів за швидкістю вітру, масою, розмірами та видом ожеледно-паморозевих відкладень. У маловивчених районах для цієї мети можуть організуватися спеціальні обстеження і спостереження. У статті розглянуто ефективну методику розрахунку напруженого стану конструкцій жорсткої ошиновки при дії ожеледно-вітрових навантажень. Поперечні вітрові коливання, спричинені вітровим резонансом, можуть викликати втомні руйнування елементів конструкцій жорсткої ошиновки, ослаблення кріпильних болтових і контактних з'єднань тощо. Для боротьби з вітровим збудженням застосовують різні методи. Більш детальну інформацію з цієї теми можна знайти у роботах [7–15].

Ключові слова: жорстка ошиновка, труба-шина, відкриті розподільні пристрої, вітрові навантаження, ожеледиця, вітровий резонанс.

INFLUENCE OF ICE AND WIND LOADS ON THE RIGID BUSBAR OF OPEN SWITCH DEVICES

Serafim Fomenko ^{a, 1}, Anton Tanasoglo ^{b, 2}, Igor Garanzha ^{b, 3}

^a FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,
Russian Federation, 286128, Makeevka, Derzhavin st., 2.

^b FSBEI HE «National Research Moscow State University of Civil Engineering»,
Russian Federation, Central Federal District, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

E-mail: ¹ Fomenko_SA@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ garigo@mail.ru.

Received 27 September 2023; accepted 27 October 2023.

Abstract. The rigid busbar of open switchgears is exposed to ice and wind loads. Determination of design conditions for wind should be made on the basis of appropriate maps of climatic zoning of the territory of the Russian Federation with clarification, if necessary, of their parameters in the direction of increasing or decreasing according to regional maps and materials from long-term observations of hydrometeorological stations and weather stations on wind speed, mass, size and type of ice-frost deposits. In poorly studied areas, special surveys and observations can be organized for this purpose. The article discusses an effective method for calculating the stressed state of rigid busbar structures under the action of ice and wind loads. Transverse wind vibrations caused by wind resonance can cause fatigue failure of structural elements of rigid busbars, weakening of bolted fastening and contact connections, etc. Various methods are used to combat wind excitation. More detailed information on this topic can be found in works [7–15].

Keywords: rigid busbar, pipe-tire, open switchgear, wind loads, ice loads, wind resonance.

Формулировка проблемы

Жесткая ошиновка (ЖО) предназначена для передачи и распределения электрической энергии между высоковольтными аппаратами в составе как открытых (ОРУ), так и закрытых распределительных устройств (ЗРУ) быстромонтируемых комплектных трансформаторных подстанций. Одним из основных вопросов при проектировании конструкции жесткой ошиновки является вопрос стабилизации конструкции под действием гололедно-ветровых нагрузок.

Анализ последних исследований и публикаций

Жёсткая ошиновка ОРУ подвержена воздействию гололедных и ветровых нагрузок. В проектной практике расчётные параметры атмосферных воздействий выбирается на основании карт климатического районирования, приведенных в ПУЭ [1], а также СП 20.13330.2016. «Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*» с уточнением по региональным картам и материалам многолетних наблюдений гидрометеорологических станций и метеопостов.

Цель исследования

Целью исследования является анализ воздействия ветровых и других механических нагрузок на жёсткую ошиновку ОРУ.

Основной материал

Гололёдные нагрузки определяются по нормативным значениям, установленным исходя из цилиндрической формы отложений с плотностью 0,9 г/см³. В таблице приведена районированная по территории Российской Федерации нормативная толщина стенки гололёда, приведенная к высоте 10 м от земли и к диаметру троса (провода) 10 мм [1]. При повторяемости 1 раз в 25 лет, в I–IV районах по гололёду, а также с любой повторяемостью в особых районах толщину сечения рекомендовано принимать на основании обработки данных фактических наблюдений. При этом расчётная толщина стенки гололёда (для повторяемости 1 раз в 25 лет) должна быть не менее 10 мм (таблица).

Согласно [2, 3, 4] для проводов и тросов в зависимости от высоты вводится поправочный коэффициент на толщину стенки гололёда, однако высота расположения жёсткой ошиновки, как правило, не превышает 25 м, что позволяет принимать поправочный коэффициент равным единице.

Значения нормативной толщины, используемые при расчёте тросов, можно приближённо учитывать и для трубчатых шин.

Масса гололёдных отложений на единицу длины шины, кг/м:

$$m_c \approx \pi \rho_l (t_1^2 + dt_1), \quad (1)$$

где ρ_l – нормативная плотность гололёда,

равная 900 кг/м³;

$t_1 = kt_{ин}$ – расчётная толщина стенки гололёда, м;

d – диаметр шины, м.

Напряжения в шине, Па, и нагрузки на изоляторы, Н, вызванные распределённым суммарным весом шины и гололёда, равны

$$\sigma_c = \frac{q_{cm} l^2}{\lambda W} = \frac{g(m + m_c) l^2}{\lambda W}, \quad (2)$$

$$R_c = \beta q_{cm} l = \beta g(m + m_c) l, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;
 m – масса 1 м длины шины.

Анализ прочности шинной конструкции, как правило, включает в себя вычисление напряжения в шинах и силы на изоляторы при сочетании внешних усилий. Такое сочетание, например, может включать усилия от электродинамических нагрузок и гололёда, ветра и гололёда и т. д. Суммарное напряжение в круглой шине при действии нагрузок в двух взаимно перпендикулярных плоскостях – горизонтальной *хоz* и вертикальной *уoz* (рис. 1) вычисляется по формуле

$$\sigma_\Sigma = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (4)$$

где M_x и M_y – изгибающие моменты в плоскостях *хоz* и *уoz*;

σ_x и σ_y – напряжения в шине при изгибе в соответствующих плоскостях.

Таким образом, нормальные напряжения в жёсткой ошиновке с учётом гололёда и собственного веса, например при коротком замыкании, определяются уравнением (4), в котором σ_x – напряжение, вызванной действием электродинамических нагрузок, а σ_y – напряжение от веса жёсткой ошиновки и гололёда.

При действии внешних усилий в двух перпендикулярных плоскостях получаем результирующие нагрузки на изоляторы

$$R_\Sigma = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}, \quad (5)$$

Таблица. Нормативная толщина стенки гололёда для высоты 10 м над поверхностью земли

Район по гололёду	Нормативная толщина стенки гололёда, мм
I	10
II	15
III	20
IV	25
V	30
VI	35
VII	40
Особый	Выше 40

Ветровые нагрузки. «Определение расчётных условий по ветру должно производиться на основании соответствующих карт климатического районирования территории РФ с уточнением при необходимости их параметров в сторону увеличения или уменьшения по региональным картам и материалам многолетних наблюдений гидрометеорологических станций и метеопостов за скоростью ветра, массой, размерами и видом гололёдно-изморозевых отложений. В малоизученных районах для этой цели могут организовываться специальные обследования и наблюдения.

При отсутствии региональных карт значения климатических параметров уточняются путём обработки соответствующих данных многолетних наблюдений согласно методическим указаниям (МУ) по расчёту климатических нагрузок на ВЛ и построению региональных карт с повторяемостью 1 раз в 25 лет.

Основой для районирования по ветровому давлению служат значения максимальных скоростей ветра с 10-минутным интервалом осреднения скоростей на высоте 10 м с повторяемостью 1 раз в 25 лет» [1, 3, 4].

Средняя скорость ветра в зависимости от высоты изменяется значительно. Для нижних слоёв атмосферы эта зависимость хорошо согласуется с уравнением [2–4].

$$\bar{V} = \bar{V}_\phi \frac{\ln z/z_0}{\ln z_\phi/z_0}, \quad (6)$$

где \bar{V}_ϕ – средняя фиксированная скорость ветра на высоте z_ϕ (например, 10 м);
 z – высота над поверхностью земли;
 z_0 – параметр шероховатости.

Параметр шероховатости зависит от состояния подстилающей поверхности (растительного покрова, состояния почвы, наличия снега и т. п.). Среднее значение параметра шероховатости (обычно принимаемое в инженерных расчётах) $z_0 = 0,2$ м [2–4].

В большинстве случаев ветровое воздействие на конструкцию жёсткой ошиновки можно оценить, выполнив расчёт на статическую нагрузку при нормативной скорости, перпендикулярной оси шины. При этом значение статической (средней) ветровой нагрузки, Н/м, действующей на единицу длины шин,

$$q = \frac{1}{2} \rho_\sigma c_x d V^2, \quad (7)$$

где ρ_σ – плотность воздуха, кг/м³;
 c_x – коэффициент лобового сопротивления;
 d – диаметр шины, м.

Плотность воздуха можно взять из справочных материалов либо приближённо её можно определить по формуле

$$\rho_\sigma = \rho_{\sigma \text{ см}} \frac{p_\sigma}{760} \cdot \frac{273 + 15}{273 + V_\sigma},$$

где $\rho_{\sigma \text{ см}} = 1,23$ кг/м³ – плотность воздуха при стандартной атмосфере ($\rho_{\sigma \text{ см}} = 760$ мм. рт.ст., $V_{\sigma \text{ см}} = 15$ °C).

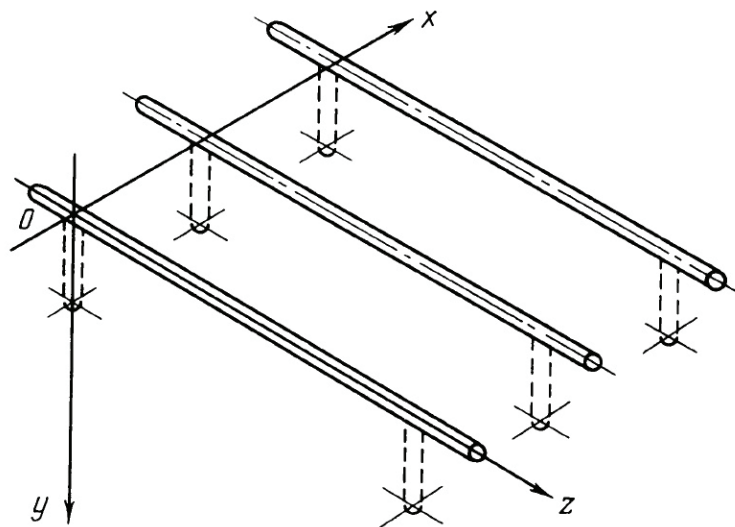


Рисунок 1. Система координат, принятая в расчётах конструкций жёсткой ошиновки при гололёдных и ветровых нагрузках.

Значения коэффициента лобового сопротивления бесконечно длинных гладких круглых цилиндров средней шероховатости обычно определяют по нормативной кривой, приведенной на рис. 2 [5], в зависимости от числа Рейнольдса $Re = Vd/\nu$ (ν – кинетическая вязкость воздуха).

Коэффициент лобового сопротивления до кризиса обтекания, не считая области малых чисел Рейнольдса (т. е. $2,5 \cdot 10^2 \leq Re \leq 1,5 \cdot 10^5$), принимается равным 1,2. В этой области течение в пограничном с цилиндром слое ламинарное. В интервале $1,5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 4 \cdot 10^5$ происходит кризис: пограничный слой обрывается за наибольшим сечением цилиндра. В кризисной области круглый цилиндр как бы приближается к плавно обтекаемым телам. За кризисом ($Re \geq 8 \cdot 10^5$) наблюдается турбулентное течение. Коэффициент лобового сопротивления постепенно растёт, достигая значения 0,7. Для полированного цилиндра коэффициент c_x в этой области несколько меньше и примерно равен 0,5.

По нижеприведенным формулам определяются нормальные напряжения в материале жёсткой ошиновки и нагрузки на изоляторы при статических усилиях:

$$\sigma_{cm} = \frac{q_{cm} l^2}{\lambda W}, \quad R_{cm} = \beta q_{cm} l.$$

Однако расчёт конструкций жёсткой ошиновки на статическую ветровую нагрузку не учитывает динамический характер воздействия ветра.

Динамическое воздействие ветровой нагрузки на конструкцию жёсткой ошиновки. Движение воздуха в атмосфере всегда турбулентное. Поэтому скорость ветра V можно представить как сумму статической и переменной (пульсирующей) $v(t)$ составляющих:

$$V(t) = V + v(t).$$

«Пульсации вызваны торможением частиц воздуха о поверхность земли, конвекционными потоками между различно нагретыми слоями, трениями между слоями, движущимися с разной скоростью. Пульсации скорости носят нерегулярный характер. Вместе с тем в течение интервала времени, достаточно большого по сравнению с преобладающим периодом пульсаций, статистические свойства переменной составляющей скорости ветра можно считать практически неизменными, что позволяет скорость ветра, а также ветровую нагрузку трактовать как стационарные случайные процессы. Учитывая достаточно большой масштаб турбулентности ветра, его скорость по фронту (в пределах пролёта жёсткой ошиновки) можно принять одинаковой и, следовательно, ветровую нагрузку считать стационарной случайной функцией только одной переменной времени» [6].

При оценке прочности конструкций жёсткой ошиновки наибольшие расчётные нормальные напряжения и нагрузки на изоляторы можно представить в виде суммы статической и динамической составляющих

$$\begin{aligned} \sigma_{расч} &= \bar{\sigma} + \sigma^{дин}, \\ R_{расч} &= \bar{R} + R^{дин}. \end{aligned} \quad (8)$$

Статические составляющие – это математические ожидания напряжений и нагрузок, динамические составляющие определяются стандартами (дисперсиями) случайных функций σ и R , а также требуемой надёжностью конструкций. Динамические составляющие можно представить в виде

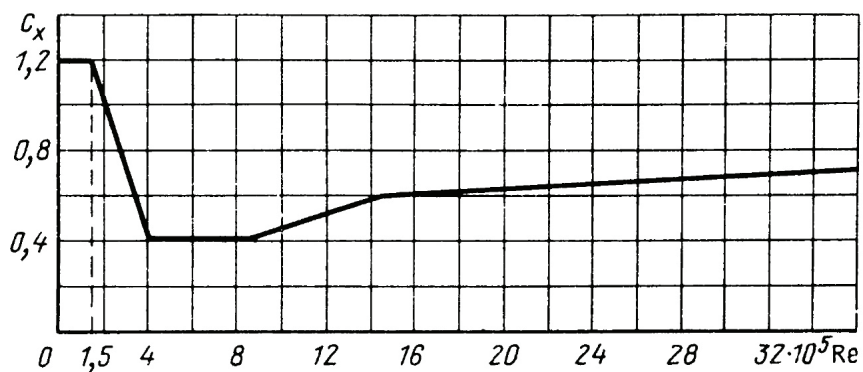


Рисунок 2. Нормативный коэффициент лобового сопротивления круглого цилиндра.

$$\begin{aligned}\sigma^{\text{дин}} &= \gamma_{\sigma} \sqrt{D_{\sigma}} = \gamma_{\sigma} \bar{\sigma} V_{\text{изм}}, \\ R^{\text{дин}} &= \gamma_R \sqrt{D_R} = \gamma_R \bar{R} V_{\text{изм}}.\end{aligned}\quad (9)$$

где γ_{σ} и γ_R – некоторые числовые коэффициенты, косвенно связанные с надёжностью шин и изоляторов, $V_{\text{изм}}$ – коэффициент изменчивости, равный отношению среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию. Если принять, что пульсации ветровых нагрузок отвечают нормальному закону распределения, то напряжения в шинах и нагрузки на изоляторы при ветровом напоре также отвечают гауссовскому распределению. Тогда вероятность обнаружить напряжения или нагрузки больше математического ожидания, например на один стандарт ($\gamma=1$), равна 0,1587; на два стандарта – 0,0228; на 2,5 – 0,0062; на 3 – 0,00135 и т. д.

Подставляя (9) в (8), получаем

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{расч}} &= \bar{\sigma}(1 + \gamma_{\sigma} V_{\text{изм}}), \\ R_{\text{расч}} &= \bar{R}(1 + \gamma_R V_{\text{изм}}),\end{aligned}\quad (10)$$

Условие прочности шин и изоляторов при ветровых воздействиях можно записать в виде

$$\sigma_{\text{расч}} \leq \sigma_{\text{доп}} = N_{\sigma} \sigma_{\sigma}, \quad (11)$$

$$R_{\text{расч}} \leq R_{\text{доп}} = N_R R_{\text{разр}}, \quad (12)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ и $R_{\text{доп}}$ – допустимые значения напряжений и нагрузок;

N_{σ} и N_R – коэффициенты, учитывающие условия работы конструкций жёсткой ошиновки, требуемый запас прочности, вероятность снижения предела прочности (временного сопротивления разрыву) шин σ_{σ} и разрушающих нагрузок изоляторов $R_{\text{раз}}$ по сравнению с нормативными значениями.

На основании опыта проектирования и эксплуатации для отечественных шинных конструкций напряжением 110 кВ отношение $(1 + \gamma V_{\text{изм}})/N$ принято равным 3–3,5. Обычно для ответственных сооружений считают $\gamma=2,5$. В этом случае для жёсткой ошиновки 110 кВ при логарифмическом декременте затухания $\delta=0,5$ и скорости ветра 25 м/с коэффициенты N_R и N_{σ} оказываются примерно равными 0,6–0,7, т. е. близкими к значениям, принятым в расчётах на электродинамическую стойкость.

Поэтому в инженерных расчётах конструкций жёсткой ошиновки на ветровые нагрузки расчётные напряжения в шинах и нагрузки на

изоляторы можно определять в соответствии с формулами (10) при $\gamma_{\sigma} = \gamma_R = 2,5$.

Для сварных шин помимо условия (11) должно выполняться неравенство

$$\sigma_{\text{расч св}} \leq \sigma_{\text{доп св}}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\text{доп св}}$ – допустимое напряжение в области сварного шва;

$\sigma_{\text{расч св}}$ – расчётное напряжение в этой области. Как указывалось выше, уравнения (10) не учитывают ветровые нагрузки на шинные опоры. Во многих случаях это не вносит существенной погрешности. Приблизённо расчётные нагрузки на изоляторы с учётом ветровых усилий, действующих на вертикальные опоры, составляют

$$R \approx \bar{R} + \Delta \bar{R} \approx (\bar{R} + \Delta \bar{R}) \cdot (1 + \gamma V_{\text{изм}}).$$

Поправка $\Delta \bar{R}$ определяется из равенства изгибающих моментов в основании изоляционной опоры от распределённой по её высоте ветровой нагрузки и сосредоточенной силы, приложенной к вершине опоры:

$$\Delta \bar{R} \approx \frac{\bar{q}_{\text{из}} H}{2},$$

где H – высота опоры (изолятора), м;

$\bar{q}_{\text{из}}$ – средняя ветровая нагрузка на опору, Н/м, примерно равная

$$\bar{q}_{\text{из}} = \frac{1}{2} \rho_{\sigma} \bar{c}_{x \text{из}} d_{\text{из}} \bar{V}^2$$

здесь $\bar{c}_{x \text{из}}$ – коэффициент лобового сопротивления изолятора;

$d_{\text{из}}$ – характерный размер, который приближённо можно принять равным среднеарифметическому наибольшего и наименьшего диаметров изолятора.

Следует отметить, что расчёт шинных конструкций на прочность при ветровых нагрузках может проводиться не только исходя из коэффициента изменчивости. В [6] рассматриваются другие подходы, в частности на основе вероятности превышения заданного уровня напряжений (прогибов, нагрузок). Однако такие оценки более трудоёмки для инженерных расчётов.

Поперечные ветровые колебания, вызванные ветровым резонансом, могут вызвать усталостные разрушения элементов конструкций жёсткой ошиновки, ослабление болтовых крепёжных и контактных соединений и т. п. Для борьбы с ветровым возбуждением применяются различные методы. Более подробную информацию по данной теме можно найти в работах [7–15].

Выводы

1. Рассмотрена эффективная методика расчёта напряжённого состояния конструкций жесткой ошиновки при действии гололёдно-ветровых нагрузок.
2. Представленная методика успешно используется при оценке технического состояния конструкций жёсткой ошиновки на подстанциях Донбасса.

Литература

1. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое : издание официальное : утверждены и введены в действие приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 8 июля 2002 г. № 204 : дата введения 2003-01-01 / разработаны с учетом требований государственных стандартов, строительных норм и правил, рекомендаций научно-технических советов по рассмотрению проектов глав. Проекты глав рассмотрены рабочими группами Координационного совета по пересмотру ПУЭ / подготовлено ОАО «ВНИИЭ». – Москва : Минэнерго России, 2002. – 330 с. – Текст : непосредственный.
2. СП 131.13330.2018. Строительная климатология : государственные строительные нормы Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28 ноября 2018 г. № 763/пр : СНИП 23-01-99* актуализированная редакция : дата введения 2019-05-29 / разработан федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН) при участии Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). – Москва : Минстрой России, 2018. – 107 с. – Текст : непосредственный.
3. СТО 56947007-29.240.055-2010. Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ-7 и построению карт климатического районирования : Стандарт Организации ОАО «ФСК ЕЭС» : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 10 сентября 2010 г. № 667 : введен впервые : дата введения 2010-09-10 / разработан Филиалом ОАО «НТЦ электроэнергетики». – Москва : ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 101 с. – Текст : непосредственный.
4. СТО 56947007-29.240.056-2010. Методические указания по определению региональных коэффициентов

Признательность

Статья выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы по теме «Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи, открытых распределительных устройств и опор под оборудование на подстанциях Донбасса на основе диагностики и мониторинга остаточного ресурса и действительной работы конструкций».

References

1. PUE. Rules for electrical installations. Seventh edition : official publication : approved and put into effect by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 8, 2002 № 204 : date of introduction 2003-01-01 / developed taking into account the requirements of state standards, building codes and regulations, recommendations of scientific and technical councils to review draft chapters. Draft chapters were reviewed by the working groups of the Coordination Council for the revision of the PUE / prepared by JSC «VNIIE». – Moscow : Minenergo Russian, 2002. – 330 p. – Text : direct. (in Russian)
2. SP 131.13330.2018. Construction climatology : state building standards of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated November 28, 2018 № 763/pr : SNiP 23-01-99* updated edition : date of introduction 2019-05-29 / developed by the federal state budgetary institution «Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences» (NIISF RAASN) with the participation of the Federal State Budgetary Institution «Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeykov» (FSBI «GGO»). – Moscow : Minstroi Russian, 2018. – 107 p. – Text : direct. (in Russian)
3. STO 56947007-29.240.055-2010. Guidelines for calculating climatic loads in accordance with PUE-7 and constructing climate zoning maps : Standard of the Organization of JSC «FGC UES» : official publication : approved and put into effect by order of JSC «FGC UES» dated September 10, 2010 № 667 : introduced for the first time : date of introduction 2010-09-10 / developed by the Branch of OJSC Scientific and Technical Center of Electric Power Industry. – Moscow : JSC «FGC UES», 2010. – 101 p. – Text : direct. (in Russian)
4. STO 56947007-29.240.056-2010. Guidelines for determining regional coefficients when calculating climatic loads : Standard of the Organization of

- при расчете климатических нагрузок : Стандарт Организации ОАО «ФСК ЕЭС» : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 08 сентября 2010 г. № 663 : введены впервые : дата введения 2010-08-09 / разработан ОАО «НТЦ электроэнергетики». – Москва : ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 17 с. – Текст : непосредственный.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : государственные строительные нормы Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр : СНиП 2.01.07-85* актуализированная редакция : дата введения 2017-06-04 / разработан ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). – Москва : Минстрой России, 2016. – 105 с. – Текст : непосредственный.
 6. Долин, А. П. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой / А. П. Долин, Г. Ф. Шонгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 190, [2] с. : ил. – ISBN 5-283-01003-1. – Текст : непосредственный.
 7. СОУ 40.1-32385941-39:2011. Проектирование жесткой ошиновки в открытых распределительных устройствах напряжением от 110 до 750 кВ. Методические указания : Стандарт Организации Украины : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом от 8 декабря 2010 г. № 545 / разработан Институтом «Укрэнергосеть-проект». – Киев : Объединение энергетических предприятий «ГРИФРЕ», 2011. – 84 с. – Текст : непосредственный.
 8. СТО 56947007-29.060.10.006-2008. Методические указания по расчёту и испытаниям жёсткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110–500 кВ : Стандарт Организации ОАО «ФСК ЕЭС» : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 25 июня 2007 г. № 176 : введен впервые : дата введения 2007-06-25 / разработан ООО Научно-производственное объединение «Техносервис-Электро». – Москва : ОАО «ФСК ЕЭС», 2007. – 64 с. – Текст : непосредственный.
 9. RUS Bulletin 1724E-300. Design Guide for Rural Substations : official publication. – Washington : United States Department of Agriculture, 2001. – 764 p. – Текст : непосредственный.
 10. Фоменко, С. А. Рациональные способы демпфирования изгибных колебаний балочных конструкций (на примере жесткой ошиновки открытых распределительных устройств) : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фоменко Серафим Александрович ; ГОУ ВПО «Донбасская JSC «FGC UES» : official publication : approved and put into effect by order of JSC «FGC UES» dated September 8, 2010 № 663 : introduced for the first time : date of introduction 2010-08-09 / developed by OJSC «Scientific and Technical Center of Electric Power Industry». – Moscow : JSC «FGC UES», 2010. – 17 p. – Text : direct. (in Russian)
 5. SP 20.13330.2016. Loads and impacts = Loads and actions : state building codes of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 3, 2016 № 891/pr : SNiP 2.01.07-85* updated edition : date of introduction 2017-06-04 / developed by TsNIISK named after. V. A. Kucherenko JSC «Research Center «Construction» with the participation of the Federal State Budgetary Institution «Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov» (FSBI «GGO»). – Moscow : Ministry of Construction of Russia, 2016. – 105 p. – Text : direct. (in Russian)
 6. Dolin, A. P.; Shongin G. F. Open switchgears with rigid busbars. – Moscow : Energoatomizdat, 1988. – 190, [2] p. : ill. – ISBN 5-283-01003-1. – Text : direct. (in Russian)
 7. SOU 40.1-32385941-39:2011. Design of rigid busbars in open switchgears with voltage from 110 to 750 kV. Guidelines: Standard of the Organization of Ukraine: official publication : approved and put into effect by order № 545 of December 8, 2010 / developed by the Ukrenergosetproekt Institute. – Kyiv : Association of Energy Enterprises «GRIFRE», 2011. – 84 p. – Text : direct. (in Russian)
 8. STO 56947007-29.060.10.006-2008. Guidelines for the calculation and testing of rigid busbars of outdoor switchgear and indoor switchgear 110–500 kV : Standard of the Organization of JSC «FGC UES» : official publication : approved and put into effect by order of JSC «FGC UES» dated June 25, 2007 № 176 : introduced for the first time : date of introduction 2007-06-25 / developed by LLC Scientific and Production Association «Technoservice-Electro». – Moscow : JSC «FGC UES», 2007 – 64 p. – Text : direct. (in Russian)
 9. RUS Bulletin 1724E-300. Design Guide for Rural Substances: official publication. – Washington : United States Department of Agriculture, 2001. – 764 p. – Text : direct.
 10. Fomenko, S. A. Rational methods of damping flexural vibrations of beam structures (using the example of rigid busbars of open switchgears): specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures» : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Serafim Aleksandrovich Fomenko ; State Educational Institution of Higher Professional Education «Donbass National Academy of Construction and Architecture». – Makeyevka, 2017. – 163 p. : ill. – Bibliography : P. 129–142. – Text : direct. (in Russian)

- национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2017. – 163 с. : ил. – Библиогр.: с. 129–142. – Текст : непосредственный.
11. Theoretical and experimental researches of spring damping flexural oscillations for beam structures / S. Fomenko, I. Garanzha, A. Tanasoglo and [et al.]. – Текст : электронный // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – November 2019. – Volume 661, Issue 1. – Article Number 012053. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/661/1/012053/pdf> (дата обращения: 15.09.2023).
 12. Fomenko, S. Experimental research of dynamic vibration damping for rigid busbar structures / S. Fomenko, I. Garanzha, A. Tanasoglo. – Текст : электронный // E3S Web of Conferences, 24 April 2023. – TT21C-2023. – Volume 383. – Article Number 04092. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/20/e3sconf_tt21c2023_04092.pdf (дата обращения: 15.09.2023).
 13. Garanzha, I. The numerical-analytical method for solving the stability problem for spatial lattice structures of power lines' supports / I. Garanzha, A. Tanasoglo, S. Fomenko. – Текст : электронный // Proceedings of the II scientific conference «Modelling and methods of structural analysis», 11–13 November 2021. – AIP Conference Proceedings. – 4 May 2023. – Volume 2497, Issue 1. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0103488> (дата обращения: 15.09.2023).
 14. Holmes, J. D. Wind Loading of Structures : 4th edition / J. D. Holmes, S. Bekele. – New York : CRC Press, 2022. – 638 p. : 242 b/w illustrations. – ISBN 9780367620691. – Текст : непосредственный.
 15. Numerical simulation of wind loads and aerodynamic characteristics of streamlined bridge decks under tornado-like vortices / Yu. Qin, J. Cao, Sh. Cao and [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Fluids and Structures. – Elsevier, August 2022. – Volume 113. – Article Number 103623. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.-2022.103623> (дата обращения: 15.09.2023).
 11. Fomenko, S.; Garanzha, I.; Tanasoglo, A. and [et al.]. Theoretical and experimental researches of spring damping flexural oscillations for beam structures. – Text : electronic. – In: *UP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – November 2019. – Volume 661, Issue 1. – Article Number 012053. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/661/1/012053/pdf> (date of access : 15.09.2023).
 12. Fomenko, S.; Garanzha, I.; Tanasoglo, A. Experimental research of dynamic vibration damping for rigid busbar structures. – Text : electronic. – In: *E3S Web of Conferences*, April 24, 2023. – TT21C-2023. – Volume 383. – Article Number 04092. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/20/e3sconf_tt21c2023_04092.pdf (date of access: 15.09.2023).
 13. Garanzha, I.; Tanasoglo, A.; Fomenko, S. The numerical-analytical method for solving the stability problem for spatial lattice structures of power lines' supports. – Text : electronic. – In: *Proceedings of the II scientific conference «Modeling and methods of structural analysis»*, 11–13 November 2021. – AIP Conference Proceedings. – May 4, 2023. – Volume 2497, Issue 1. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0103488> (date of access: 15.09.2023).
 14. Holmes, J. D.; Bekele, S. Wind Loading of Structures : 4th edition. – New York : CRC Press, 2022. – 638 p. : 242 b/w illustrations. – ISBN 9780367620691. – Text : direct.
 15. Qin, Yu.; Cao, J.; Cao, V. and [et al.]. Numerical simulation of wind loads and aerodynamic characteristics of streamlined bridges under tornado-like vortices. – Text : electronic. – In: *Journal of Fluids and Structures*. – Elsevier, August 2022. – Volume 113. – Article Number 103623. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.-2022.103623> (date of access: 15.09.2023).

Фоменко Серафим Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: развитие общей методики динамических расчетов элементов строительных конструкций и поиск рациональных способов демпфирования колебаний.

Танасогло Антон Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Научные интересы: эксплуатационная надежность и оптимальное проектирование конструкций воздушных линий электропередачи и антенных опор. Изучение действительной работы металлических решетчатых конструкций башенного типа.

Гаранжа Игорь Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Научные интересы: обеспечение надежной работы и долговечности конструкций опор воздушных линий, порталов и стоек под оборудование, открытых распределительных устройств электрических подстанций в условиях повышения мощностей энергопотребления.

Фоменко Серафим Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розвиток загальної методики динамічних розрахунків елементів будівельних конструкцій та пошук раціональних способів демпфування коливань.

Танасогло Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій ФДБОУ ВО «Національний дослідницький Московський державний будівельний університет». Наукові інтереси: експлуатаційна надійність і оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередачі і антенних опор. Вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Гаранжа Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій ФДБОУ ВО «Національний дослідницький Московський державний будівельний університет». Наукові інтереси: забезпечення надійної роботи і довговічності конструкцій опор повітряних ліній, порталів і стійок під обладнання, відкритих розподільних пристроїв електричних підстанцій в умовах підвищення потужностей енергоспоживання.

Fomenko Serafim – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: development of a general methodology of the dynamic calculations of construction elements and the search for rational ways of vibration damping.

Tanasoglo Anton – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Metal and Timber Structures Department, FSBEI HE «Moscow State University of Civil Engineering». Scientific interests: operational reliability and optimal design of overhead power transmission line and antenna support structures. Studying of the valid work of metal lattice tower supports.

Garanzha Igor – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Metal and Timber Structures Department, FSBEI HE «Moscow State University of Civil Engineering». Scientific interests: reliable operation supply and durability of the transmission line supports structures, portal frames and pillars underneath the equipment of outdoor switchgears of electric substation in terms of the power consumption stepping up.