

## АНАЛИЗ ДЕЙСТВИЯ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ПРОЛетах С ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОВОДОВ

Докт. техн. наук, проф. СЕРГЕЙ И. И.,  
канд. техн. наук, доц. БЛАДЫКО Ю. В., канд. техн. наук ПОНОМАРЕНКО Е. Г.,  
инженеры ЦЕМЕХМАН Б. Д., ТАРАСОВ В. Е.

*Белорусский национальный технический университет,  
ИООО «Зарубежэнергопроект-Минск»*

В процессе эксплуатации на гибкие проводники, а также их опорные и изолирующие конструкции оказывают воздействие климатические нагрузки. Начальное положение проводов и тяжения в пролете при изменении температуры, скорости ветра и толщины гололеда могут существенно изменяться. Для определения начального положения проводников, их тяжений и нагрузок на опорные конструкции в различных климатических режимах производится механический расчет. Конструкция пролета должна быть такой, чтобы нагрузки и тяжения во всех режимах не превышали допустимых для данной конструкции, а фазные проводники при максимальной стреле провеса с учетом воздействия ветра не приближались на недопустимые расстояния к соседним токоведущим частям или заземленным конструкциям. Механический расчет, кроме того, позволяет получить начальное положение проводов в момент времени, предшествующий короткому замыканию (КЗ), для расчета электродинамической стойкости пролета с гибкими проводниками.

При совместном действии гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок необходимо учитывать те климатические режимы, при которых в пролете будут наблюдаться максимальные отклонения, сближения и тяжения гибких шин. Согласно ПУЭ [1] расчет гибких проводников воздушных линий электропередачи (ЛЭП) и открытых распределительных устройств (ОРУ) производится в нормальном режиме работы для следующих сочетаний климатических условий: 1) высшая температура, ветер и гололед отсутствуют; 2) низшая температура, ветер и гололед отсутствуют; 3) среднегодовая температура  $\vartheta$ , ветер и гололед отсутствуют; 4) провода и тросы покрыты гололедом, температура  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ветер отсутствует; 5) максимальный нормативный скоростной напор ветра  $q_{\max}$ , температура  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , гололед отсутствует; 6) провода и тросы покрыты гололедом, температура  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скоростной напор ветра  $0,25q_{\max}$  (скорость ветра  $0,5v_{\max}$ ). В районах с толщиной стенки гололеда 15 мм и более скоростной напор ветра при гололеде должен быть не менее  $14\text{ даН/м}^2$  (скорость ветра не менее 15 м/с); 7) фактические сочетания скоростных напоров ветра и размеров отложений гололеда на проводах и тросах при температуре  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в режимах: 7.1 – максимальное отложение гололеда на проводах и тросах и скоростной напор ветра при этом отложении; 7.2 – максимальный скоростной напор ветра и отложения гололеда на проводах и тросах при этом скоростном напоре.

При отсутствии данных наблюдений минимальная и максимальная температуры могут быть приняты соответственно  $-40$  и  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если шины ОРУ длительно загружены током, близким по величине к допустимому  $I_{\text{доп}}$ , то мак-

симальная температура провода  $\vartheta_{\text{доп}}$  должна быть принята равной 70 °С. Максимальные нормативные скоростные напоры ветра и толщину гололедно-изморозевых отложений определяют исходя из их повторяемости раз в 10 лет для воздушных линий и ОРУ напряжением 6–330 кВ по ПУЭ [1].

По данным [2], климатические нагрузки (ветровая, гололедная и ветровая при гололеде), полученные по рекомендациям ПУЭ шестого издания [1], в некоторых случаях значительно ниже расчетных нагрузок, определенных по требованиям ПУЭ седьмого издания [3] (действует в Российской Федерации). Это обусловлено тем, что в новой редакции ПУЭ [3] изменилась методика расчета гололедно-ветровых нагрузок, в соответствии с которой:

$$P_W^n = P_W^H \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f; \quad (1)$$

$$P_r^n = P_r^H \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f \gamma_d,$$

где  $P_W^n$ ,  $P_r^n$  – соответственно расчетные линейные ветровая и гололедная нагрузки на 1 м провода;  $P_W^H$ ,  $P_r^H$  – соответственно нормативные линейные ветровая и гололедная нагрузки, рассчитываемые по той же методике, что и в ПУЭ шестого издания [1];  $\gamma_{nw}$  – коэффициент надежности по ответственности, принимаемый равным от 1,0 до 1,3;  $\gamma_p$  – региональный коэффициент ( $\gamma_p = 1,0–1,5$ );  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по гололедной или ветровой нагрузке ( $\gamma_f = 1,1–1,6$ );  $\gamma_d$  – коэффициент условий работы, равный 1,0 при расчете по первой группе предельных состояний и 0,5 – по второй.

В ПУЭ [3] указано, что расчетная линейная гололедная нагрузка провода, воспринимаемая опорами, определяется по (1), при этом коэффициент  $\gamma_d$  принимается равным 1. Учитывая величину коэффициентов  $\gamma_{nw}$ ,  $\gamma_p$  и  $\gamma_f$ , становится очевидным, что расчетные линейные нагрузки будут иметь большее значение, чем нормативные. В результате расчетные нагрузки на опорные конструкции значительно возрастают. Это оправданно, поскольку, по данным [2], недооценка климатических нагрузок в ряде случаев приводит к аварийным ситуациям. В средствах массовой информации также периодически освещаются случаи падения опор в результате совместного действия ветра и гололеда.

На кафедре «Электрические станции» БНТУ совместно с ИООО «Зарубежэнергопроект-Минск» выполнялся расчет пролетов проводов воздушных ЛЭП 220 кВ одной из электростанций РФ с учетом климатических и электродинамических воздействий. На электростанции предусматривается ввод в эксплуатацию новых блоков, в связи с чем требуется расширение существующего ОРУ 220 кВ. Из-за нехватки площади было принято решение выполнить расширение цепей 220 кВ в виде комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ) 220 кВ. Проектируемые пролеты ЛЭП предназначены для присоединения новых блоков к КРУЭ и связи ОРУ 220 кВ и КРУЭ.

Особенность трех из семи пролетов – их достаточно большая длина (около 100 м), а также закрепление фазных проводников на разных высотах: с одной стороны провода крепятся к опорам главного корпуса с использованием оттяжек (рис. 1), с другой – к анкерной двухцепной опоре. Подобным образом на

разной высоте закреплены провода еще в двух пролетах меньшей длины с использованием порталов и анкерной опоры. Кроме того, оси фаз в данных пролетах расположены не перпендикулярно к опорным конструкциям, что приводит к уменьшению междуфазного расстояния в пролете. Большая длина пролетов ведет к увеличению стрелы провеса проводов, что способствует большему сближению проводников во время их колебаний в результате электродинамического воздействия токов КЗ. Наименьшие расстояния в свету между находящимися под напряжением соседними фазами в момент их наибольшего сближения под действием токов КЗ должны быть не менее 55 см [3, табл. 2.5.17].

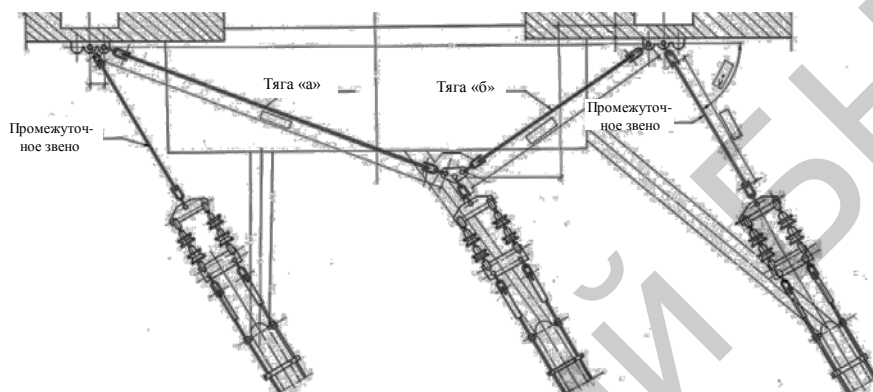


Рис. 1. Схема крепления проводников ЛЭП к стене главного корпуса

Провода и опорные конструкции в данных пролетах должны быть рассчитаны на гололедную нагрузку с толщиной стенки 25 мм (с учетом того, что пролеты располагаются в непосредственной близости от крупного водоема), коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_{mw} = 1,3$ , региональный коэффициент  $\gamma_p = 1,2$ , коэффициент условий работы  $\gamma_d = 1$  (по данным ИООО «Зарубежэнергопроект-Минск»).

Действующий ГОСТ 30323–95 [4] предлагает методику упрощенного расчета электродинамической стойкости пролетов с гибкими проводниками. Однако приведенный в нем алгоритм расчета не учитывает разности высот подвеса и изменяющегося междуфазного расстояния по длине пролета. Поэтому возникла потребность в применении более точных методов расчета, разработанных на кафедре «Электрические станции» БНТУ. Они основаны на алгоритмах численного расчета начального положения и динамики гибких проводников, представленных гибкой упругой нитью. Составленные на его основе компьютерные программы апробированы с использованием экспериментальных данных и успешно зарекомендовали себя в области проектирования распределительных устройств (РУ) и воздушных ЛЭП.

В соответствии с ПУЭ [3] механический расчет производится по методу допускаемых напряжений. Расчетные гололедные и ветровые нагрузки при этом определяются в соответствии с рекомендациями главы 2.5 ПУЭ [3]. Для механического расчета используется компьютерная программа MR-220, разработанная на кафедре «Электрические станции» БНТУ. В программе MR-220 провод моделируется гибкой упругой нитью, что позволяет получить тяжения

и координаты провода практически в любой точке пролета с учетом ветровых и гололедных нагрузок. При расчете учитываются гирлянды изоляторов, аппаратные отпайки, распорки и другие элементы пролета. Алгоритм компьютерной программы был модифицирован для расчета климатических нагрузок в соответствии с [3].

Была решена задача выбора механических параметров и конструктивного исполнения пролетов ЛЭП, при которых суммарные нагрузки на колонны главного корпуса не должны превышать допустимого значения 9000 даН, а тяжение в проводах не должно быть выше допустимых значений. Согласно ПУЭ [3, табл. 2.5.7] допустимое механическое напряжение  $\sigma_{\text{доп}}$  для провода АС-400/51 составляет 126 Н/мм<sup>2</sup>, отсюда допустимое тяжение

$$T_{\text{доп}} = (S_{\text{Al}} + S_{\text{ст}}) \sigma_{\text{доп}} = (394 + 51,1) \cdot 126 = 56083 \text{ Н} \approx 5600 \text{ даН}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{Al}}$ ,  $S_{\text{ст}}$  – соответственно сечения алюминиевой и стальной частей провода, мм<sup>2</sup>.

Кроме перечисленных условий при заданном начальном положении проводов должна обеспечиваться электродинамическая стойкость пролета при расчетном токе КЗ 37,6 кА.

Так как средний провод в пролете крепится к стене главного корпуса с помощью оттяжек, нагрузки, обусловленные его тяжением, определенным образом распределяются на опорные колонны в местах крепления соседних проводов. Для расчета нагрузок на опоры составим поясняющую схему (рис. 2). На схеме осевые нагрузки  $F_o$  направлены вдоль провода, поперечные  $F_n$  – перпендикулярно проводу.

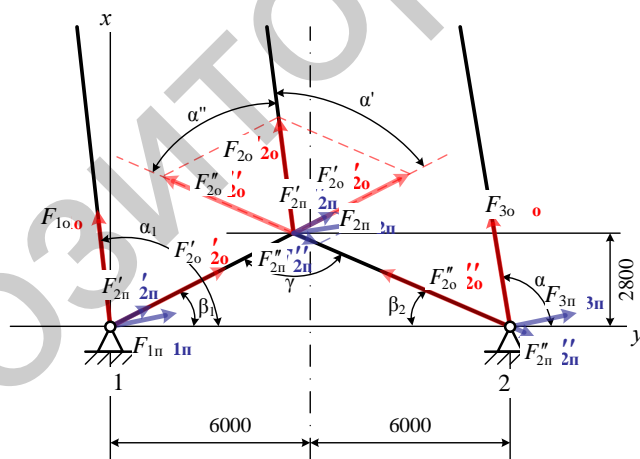


Рис. 2. Поясняющая схема к определению нагрузок на опоры

Приведем все силы к единой системе координат, ось  $x$  которой будет располагаться перпендикулярно стене главного корпуса, а ось  $y$  – параллельно стене (рис. 2). Силы  $F_{2o}$  и  $F_{2n}$  разлагаются на составляющие по направлению оттяжек:

$$F'_{2o} = F_{2o} \frac{\sin \alpha''}{\sin(180^\circ - \gamma)}; \quad F''_{2o} = F_{2o} \frac{\sin \alpha'}{\sin(180^\circ - \gamma)}; \quad (3)$$

$$F'_{2п} = F_{2п} \frac{\sin(90^\circ - \alpha'')}{\sin(180^\circ - \gamma)}; \quad F''_{2п} = F_{2п} \frac{\sin(90^\circ - \alpha')}{\sin(180^\circ - \gamma)}. \quad (4)$$

Суммарные нагрузки на опорные точки колонн 1 и 2 определяются затем путем суммирования составляющих сил по осям (рис. 2).

С использованием компьютерной программы MR-220 были проведены расчеты начального положения гибких проводов в самом длинном пролете для различных климатических режимов с изменением начальной стрелы провеса в диапазоне 2–4 м [4]. Для каждого из расчетных режимов определены нагрузки на колонны главного корпуса. Наибольшие нагрузки наблюдались в режимах совместного действия ветровых и гололедных нагрузок. Выявлено, что при стреле провеса  $f_0 = 3,78$  м (режим со среднегодовой температурой) нагрузки на колонны главного корпуса не превышают 9000 даН, а тяжение – 5600 даН. Для учета совместного действия климатических и электродинамических нагрузок были проведены расчеты электродинамической стойкости. Согласно данным заказчика максимальный расчетный ток трехфазного КЗ  $I_{п,0}^{(3)} = 37,6$  кА, двухфазного  $I_{п,0}^{(2)} = 32,6$  кА. Расчеты показали, что недопустимое сближение фазных проводников в пролете происходит независимо от стрелы провеса (в диапазоне 2–4 м) при токах КЗ, меньше расчетных. Максимальное сближение проводников наблюдалось в режимах с наибольшей температурой и максимальным скоростным напором ветра.

Исключить недопустимое сближение проводников можно путем установки распорок междуфазных изолирующих (РМИ) (рис. 3), которые уже используются в Российской Федерации для предотвращения схлестывания проводов при пляске [5].



Рис. 3. Распорка междуфазная изолирующая полимерная

Численный алгоритм компьютерной программы FLEBUS, разработанной на кафедре электрические станции БНТУ для расчета электродинамического действия токов КЗ на гибкие проводники, был модифицирован для учета междуфазных распорок. Распорки в компьютерной программе представлены как пружины с жесткостью, соответствующей жесткости распорок. Вес распорок переносится на проводники в точки крепления распорок. Силы реакции распорок при сжатии и растяжении под воздействием движущихся проводников определяются по формуле

$$\bar{F}_{sp} = \frac{ES}{l_0} (l_x - l_0) \bar{\tau}. \quad (5)$$

где  $l_0$  – начальная длина распорки, м;  $l_x$  – длина деформированной распорки, м;  $ES/l_0$  – жесткость пружины, Н/м;  $\bar{\tau}$  – единичный вектор, определяющий направление усилия  $\bar{F}_{sp}$ .

Для определения влияния количества распорок на основные параметры электродинамической стойкости – минимальные междуфазные расстояния в процессе колебания проводников  $A_{\phi-\phi.min}$  и максимальные тяжения  $T_{max}$  – был проведен вычислительный эксперимент с использованием модифицированной компьютерной программы FLEBUS. Как видно из рис. 4, достаточно одного комплекта распорок в середине пролета, чтобы не допустить критического сближения проводников, однако при этом в области токов КЗ 36–40 кА  $A_{\phi-\phi.min}$  близко к  $A_{\phi-\phi.доп}$ . При установке двух комплектов распорок данная проблема снимается и наблюдается уменьшение тяжений в пролете на 30–40 % (рис. 5). Это объясняется эффектом уменьшения размаха колебаний проводов под воздействием распорок. Поэтому установка двух комплектов распорок в данном пролете дает наилучший эффект.

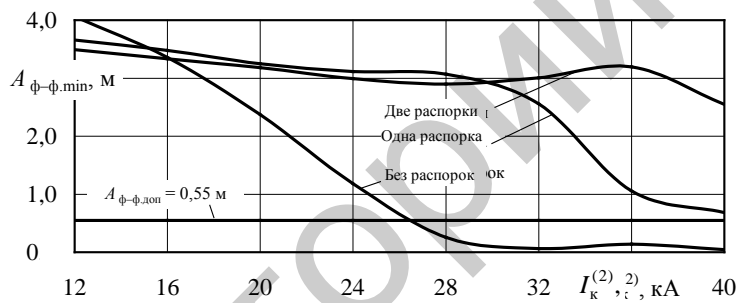


Рис. 4. Сближение проводников в пролете блока № 9 в зависимости от числа междуфазных распорок

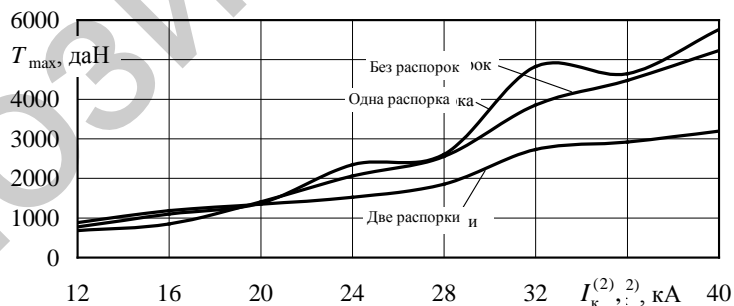


Рис. 5. Максимальные тяжения в пролете блока № 9 в зависимости от числа междуфазных распорок

С использованием компьютерной программы MR-220 для данного пролета рассчитана необходимая длина распорок и определены места их установки (рис. 6). Растягивающие усилия на распорку по результатам расчета могут достигать 250 даН, сжимающие – 150 даН.

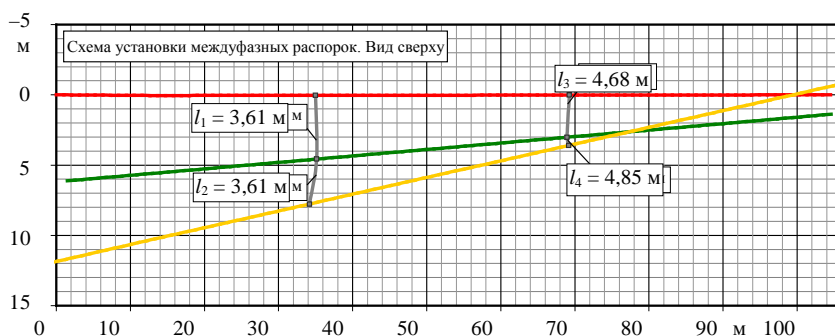


Рис. 6. Схема установки междуфазных распорок в пролете

## ВЫВОДЫ

1. Модифицированы численные методы механического и электродинамического расчетов пролетов ЛЭП электростанций, позволяющие выполнять комплексную оценку совместного действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок от токов КЗ в пролетах с произвольным расположением проводов; выбирать оптимальную конструкцию пролетов, стойких к указанным воздействиям.

2. Предложены и обоснованы технические решения при конструировании пролетов ЛЭП с гибкими проводниками электростанций, обеспечивающие их электродинамическую стойкость при токах КЗ 40 кА и более.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Тимашова, Л. В. Определение климатических нагрузок на воздушные линии. Современный подход / Л. В. Тимашова, В. А. Луговой, С. В. Черешнюк // Новости электротехники: информац.-справ. изд-е. – 2006. – № 3. – С. 34–37.
3. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. и доп. – М., 2007. – 512 с.
4. Короткие замыкания в электроустановках: методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323–95. – Введ. 01.03.1999. – Минск: 1999. – 57 с.
5. Виноградов, А. А. Современные подходы к гашению пляски проводов воздушных ЛЭП с одиночными и расщепленными фазами / А. А. Виноградов // Архив электроэнергетики [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://electro-energetica.ru/index.php/2009-09-19-10-10-43/267-2009-10-20-11-51-41> – Дата доступа: 07.12.2009.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 20.12.2011