

УЧЕТ ГОЛОЛЕДНЫХ И ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

АВТОРЫ:

ЧЕРЕШНЮК С. В.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ЛУГОВОЙ В. А.,
К. Т. Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ТИМАШОВА Л. В.,
К. Т. Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Определение расчетных климатических условий (скорость ветра и толщина гололедно-изморозевых отложений) является ответственным этапом проектирования воздушных линий. Точное и корректное определение этих условий существенно влияет на стоимость строительства, аварийность и безопасность в реальных условиях эксплуатации

и на другие свойства и характеристики линий. Согласно ПУЭ расчетные условия по ветру и гололеду при проектировании должны приниматься из соответствующих карт климатического районирования с учетом ряда коэффициентов.

Климатические карты регионального районирования по гололеду и ветровой нагрузке при гололеде



Гололедно-ветровые аварии сопровождаются многочисленными обрывами проводов и тросов, поломкой деревянных, железобетонных и металлических опор, массовыми отключениями ВЛ всех классов напряжения и нарушением энергоснабжения потребителей в особо крупных масштабах с соответствующим ущербом во всех отраслях народного хозяйства и коммунально-бытовой сфере

базируются на огромном массиве метеоданных. Разработка таких карт представляет собой сложный трудоемкий процесс. В статье представлен современный подход, используемый в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» при построении указанных карт.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

Климатические нагрузки являются базовыми характеристиками, определяющими расчет механической части воздушных линий электропередачи. Проект любой ВЛ должен учитывать ветровую, гололедную и гололедно-ветровую нагрузки.

На территории РФ наибольшие механические нагрузки на ВЛ вызваны гололедно-изморозевыми отложениями на проводах и конструкциях ВЛ (гололедная нагрузка), а также ветровым воздействием на обледенелые провода и конструкции ВЛ (ветровая нагрузка при гололеде). Значения климатических нагрузок, принимаемых при проектировании ВЛ, зависят от ее напряжения и конкретных конструктивных особенностей, таких как конструкция опор, диаметр проводов, тросов и высота их подвеса над поверхностью земли. Современные ВЛ должны быть запроектированы с учетом степени ответственности ВЛ, т.е. способности сохранять работоспособность в течение срока службы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОЛОЛЕДНЫХ НАГРУЗОК НА ВЛ

ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
Основным исходным параметром для определения гололедных нагрузок является эквивалентная тол-

щина стенки гололедного отложения цилиндрической формы, приведенная к плотности $0,9 \text{ г/см}^3$, на проводе диаметром 10 мм, расположенном на высоте 10 м над поверхностью земли.

В качестве исходных параметров для расчета ветровой нагрузки при гололеде приняты условная толщина стенки гололедно-изморозевого отложения цилиндрической формы на проводе стандартной ВЛ и максимальная скорость ветра при этом отложении.

Стандартной ВЛ считается воздушная линия с проводом диаметром 10 мм, подвешенным на высоте 10 м над поверхностью земли.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения гололедных нагрузок на ВЛ на территории РФ используются данные стандартных наблюдений на сети метеорологических станций за гололедно-изморозевыми отложениями и ветром.

На стандартном гололедном станке, находящемся на метеостанции и состоящем из четырех проводов диаметром 4–5 мм, попарно расположенных в меридиальном и широтном направлениях на высотах 1,9 и 2,2 м, определяются вид гололедного отложения, его размеры и масса. При этом фиксируются также сведения о сопутствующих метеорологических параметрах – температуре воздуха, направлении и скорости ветра. Последние два параметра измеряются по флюгеру или анеморумбометру на высоте 10 м над поверхностью земли.

Данные наблюдений за видом, размерами, весом, продолжительностью нарастания отложения и длительностью сохранения его на проводах гололедного станка собираются и накапливаются в базе данных.

ИНФОРМАЦИЯ

ГОЛОЛЕД НА ПРОВОДАХ

Гололедно-изморозевые отложения на проводах и тросах ВЛ происходят при температуре воздуха около $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ и скорости ветра 5 ... 10 м/с.

По толщине стенки гололеда (b) при повторяемости 1 раз в 25 лет территория страны делится на 8 районов:

- I район $b=10 \text{ мм}$;
- II район $b=15 \text{ мм}$;
- III район $b=20 \text{ мм}$;
- IV район $b=25 \text{ мм}$;
- V район $b=30 \text{ мм}$;
- VI район $b=35 \text{ мм}$;
- VII район $b=40 \text{ мм}$;
- особый $b>45 \text{ мм}$.

При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и опор ВЛ. Гололед откладывается по фазным проводам неравномерно. Стрелы провеса проводов с гололедом и без гололеда могут отличаться на несколько метров. Разрегулировка стрел провеса и неодновременный сброс гололеда при его таянии, вызывающий «подскок» отдельных проводов, могут привести к перекрытию и повреждению воздушной изоляции. Гололед является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию.

Массовые инструментальные наблюдения за гололедными отложениями на территории РФ в основном проводятся с 1951 года. На сегодняшний день наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями на территории РФ ведут 1254 метеорологические станции. Период инструментальных наблюдений за гололедными отложениями достигает 58, а по отдельным станциям и более лет.

ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Для использования массива данных наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями были разработаны методы приведения данных наблюдений, полученных с помощью гололедного станка, к условиям открытой местности и стандартной ВЛ.

На некоторых метеорологических станциях гололедные станки могут быть закрыты ограждением метеоплощадки, строениями, деревьями, кустарником (экранирующие объекты), что влияет на их показания. Чтобы исключить влияние такой закрытости и привести данные к условиям открытой местности, вводится поправочный коэффициент,

учитывающий высоту экранирующего объекта и его расстояние до гололедного станка.

При расчетах принимается во внимание ориентация ветра по отношению к приемной части гололедного станка. Вводится поправочный коэффициент для приведения скорости ветра к условиям ветра, перпендикулярного проводам гололедного станка.

Пересчитанные таким образом данные измерений на гололедном станке используются для определения эквивалентной толщины стенки гололеда и ветровой нагрузки при гололеде на проводе стандартной ВЛ.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ РЯДЫ

По каждой метеорологической станции за гололедный сезон для каждого случая обледенения определяются эквивалентная толщина стенки гололеда и ветровая нагрузка при гололеде. По значениям максимальных за сезон эквивалентных толщин стенок гололеда, ветровых нагрузок при гололеде и максимальных скоростей ветра при этих нагрузках (полученных на основе многолетних данных) составляются эмпирические (статистические) ряды.

С помощью этих эмпирических рядов рассчитываются статистические параметры: среднее значение, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Эмпирические данные (распределение максимальных за год величин климатических характеристик) обычно аппроксимируются первым предельным распределением Гумбеля. Если эмпирические ряды годовых максимумов метеорологической станции недостаточно хорошо аппроксимируются первым предельным распределением, то допустимо использовать либо второе предельное распределение

ПЕРВОЕ ПРЕДЕЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГУМБЕЛЯ:

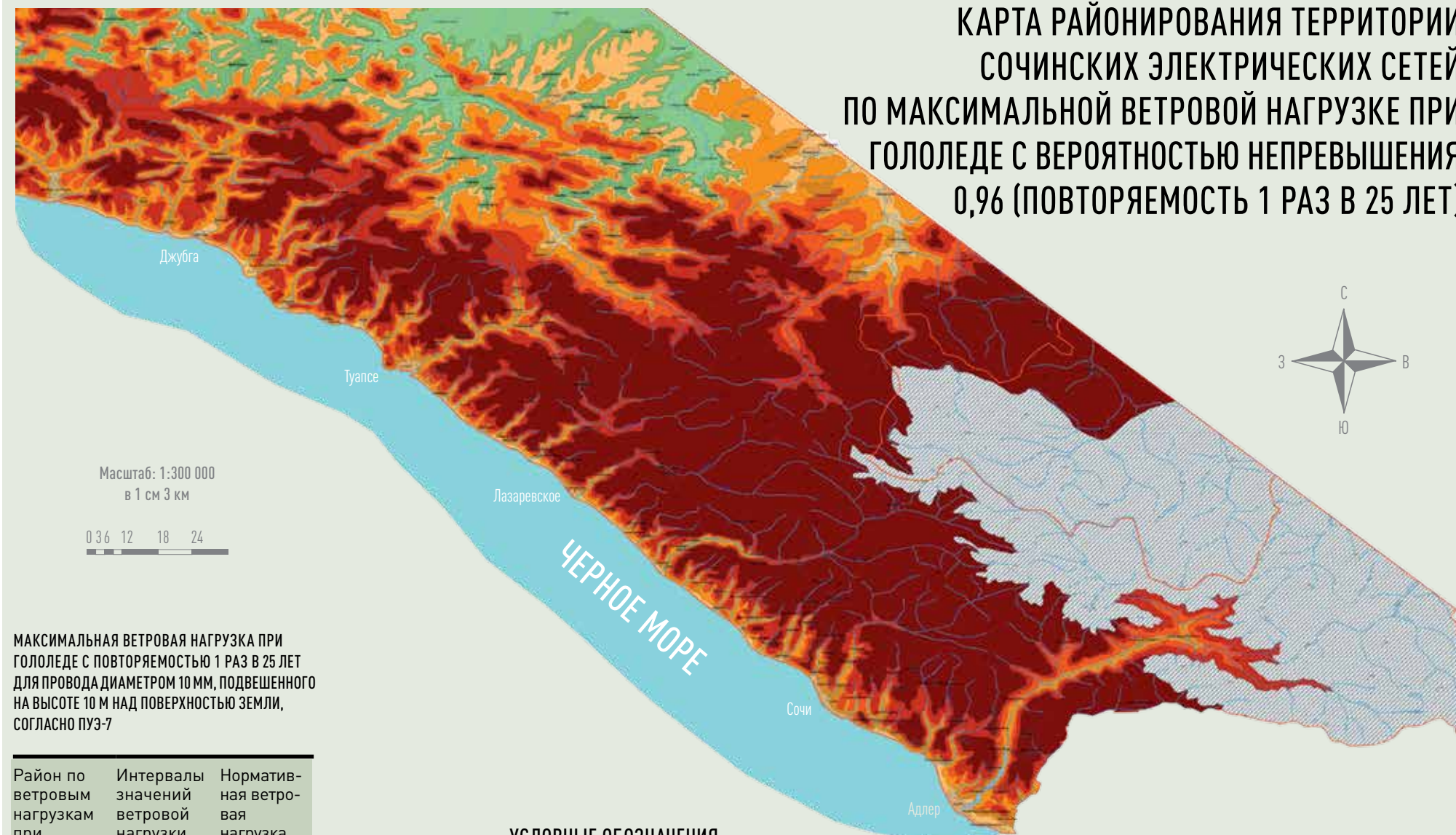
$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

ВТОРОЕ ПРЕДЕЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИШЕРА-ТИППЕТТА:

$$F(x) = e^{-\left[\frac{x}{\beta}\right]^{-\gamma}}$$

x – случайная величина,
 α, β, γ – параметры распределения.

КАРТА РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ СОЧИНСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКЕ ПРИ ГОЛОЛЕДЕ С ВЕРОЯТНОСТЬЮ НЕПРЕВЫШЕНИЯ 0,96 (ПОВТОРЯЕМОСТЬ 1 РАЗ В 25 ЛЕТ)



МАКСИМАЛЬНАЯ ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА ПРИ ГОЛОЛЕДЕ С ПОВТОРЯЕМОСТЬЮ 1 РАЗ В 25 ЛЕТ ДЛЯ ПРОВОДА ДИАМЕТРОМ 10 ММ, ПОДВЕШЕННОГО НА ВЫСОТЕ 10 М НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ, СОГЛАСНО ПУЭ-7

Район по ветровым нагрузкам при гололеде	Интервалы значений ветровой нагрузки при гололеде, Н/м	Нормативная ветровая нагрузка при гололеде, Н/м
I	до 3,0	3,0
II	3,1 – 4,0	4,0
III	4,1 – 6,0	6,0
IV	6,1 – 9,0	9,0
V	9,1 – 13,0	13,0
VI	13,1 – 18,0	18,0
VII	18,1 – 23,0	23,0
VIII	23,1 – 28,0	28,0
особый	выше 28,0	выше 28,0

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- отметки высот местности
- реки
- административные границы
- ▨ населенные пункты
- озера, водохранилища
- моря

ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА ПРИ ГОЛОЛЕДЕ, РАЙОНЫ

- III
- IV
- V
- VI
- VII
- VIII
- особый
- горная часть

АБСОЛЮТНЫЕ ВЫСОТЫ ГРАНИЦ РАЙОНОВ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ГОЛОЛЕДЕ С ВЕРОЯТНОСТЬЮ НЕПРЕВЫШЕНИЯ 0,96 ТЕРРИТОРИИ СОЧИНСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Район по ветровой нагрузке при гололеде	Нормативная ветровая нагрузка при, Н/м	Высота местности, м	
		Южный склон	Северный склон
III	6,0	–	150
IV	9,0	–	200
V	13,0	50	270
VI	18,0	100	360
VII	23,0	150	450
VIII	28,0	250	550
особый	более 28,0	выше 250	выше 550

Рис. 1

Фишера–Типпетта, либо двухэкспоненциальное трехпараметрическое распределение. На основе выбранного теоретического распределения определяются значения климатических характеристик с заданной вероятностью превышения.

Для получения достоверных значений этих характеристик продолжительность наблюдений метеорологических станций должна быть не менее 30 лет. В случае меньшей продолжительности наблюдений такие данные могут быть использованы как вспомогательные для анализа зависимости от высоты местности $x=f(H)$ и плотности распределения гололедных отложений по территории.

УЧЕТ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВЛ

При построении региональных карт и определении климатических нагрузок следует учитывать опыт эксплуатации действующих ВЛ на рассматриваемой территории. Нужную информацию можно получить на основе данных замеров гололедно-изморозевых отложений на проводах действующих ВЛ, проводимых в период осмотра ВЛ или тех-

нологических нарушений ее работы. Причем эти данные должны включать замеры массы и размера отложения при точном определении его вида и плотности. Для каждого отдельного случая необходима также привязка замеров к конкретному географическому пункту (координаты точки местности и ее абсолютная высота). Полученные таким образом данные опыта эксплуатации целесообразно сравнить с данными метеостанций.

Такую оценку опыта эксплуатации ВЛ следует проводить вероятностно-статистическим методом за весь период службы ВЛ. Указанные данные фиксируются и принимаются как наибольшие климатические нагрузки за период эксплуатации ВЛ по каждой конкретной ВЛ.

В настоящее время приняты два основных способа обработки данных опыта эксплуатации:

- максимальные за сезон значения нагрузок (толщина стенки гололеда, ветровая нагрузка при гололеде) ранжируются в возрастающем порядке; на основе соответствующей

функции распределения определяется нагрузка с заданным уровнем превышения; по максимальному значению климатической нагрузки за весь период эксплуатации ВЛ с помощью эмпирических зависимостей определяется нагрузка с заданным уровнем превышения.

УЧЕТ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Одним из существенных факторов, влияющих на распределение параметров климатических характеристик по территории, является рельеф местности. В соответствии с морфометрическими характеристиками (абсолютная высота над уровнем моря и относительное превышение) выделяют два основных типа макрорельефа – равнина и возвышенность (низкогорье). Преобладающие направления ветра, характерные для рассматриваемой местности, определяют подтипы макрорельефа: наветренные и подветренные склоны возвышенностей, долины, открытые и закрытые для преобладающего направления ветра. Для каждой конкретной местности строится карта типов и подтипов макрорельефа.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ УРОВНИ НАДЕЖНОСТИ ВЛ

Класс напряжения ВЛ, кВ	Длина ВЛ, км	Рекомендуемый уровень надежности	Вероятность превышения расчетной нагрузки, P	Период повторяемости T, лет
1	любая длина	I	0,96	25
≤35	10-30	II	0,98	50
110	25-100	III	0,99	100
220	100-300			
330	100-300	IV	0,993	150
500	200-1000			
750	300-2000	V	0,998	500

Таблица 1



25 декабря 2010 года ледяной дождь выпал в Москве и Подмосковье. Было повалено около 4,6 тыс. деревьев, что привело к многочисленным обрывам линий электропередачи. Без электричества остались более 400 тыс. человек, также был полностью обесточен аэропорт Домодедово

ПОСТРОЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ КАРТ КЛИМАТИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Региональные карты районирования (толщина стенки гололеда, ветровая нагрузка при гололеде) являются одним из способов определения гололедных и гололедно-ветровых нагрузок. Региональные карты дают наглядное представление о распределении параметров климатических характеристик в пределах рассматриваемой территории.

На основе карты типов и подтипов макрорельефа определяются зависимости основных климатических характеристик (толщина стенки гололеда, ветровая нагрузка при гололеде, скорость ветра при гололеде) и коэффициентов вариации

статистического ряда от абсолютной отметки местности $H x=f(H)$ (здесь x – значение конкретной характеристики). В качестве базисного параметра при районировании в РФ принято значение климатических характеристик с вероятностью их превышения 0,96. Строятся графики зависимостей $x=f(H)$, с учетом влияния микрорельефа местности.

Таким образом, при построении региональных карт используются высотные зависимости климатических характеристик, коэффициенты вариации. Учитываются также физико-географические характеристики местности.

При построении карт по гололеду на рассматриваемой территории

выделяются 8 районов, на которых толщина стенок гололеда была не менее 10 мм. Градация районов идет по толщине стенок гололеда с шагом 5 мм.

При районировании территории по ветровой нагрузке при гололеде выделяются 9 районов со значениями ветровой нагрузки от 3 до 28 Н/м и более. Для каждого района по данным наблюдений приводится скорость ветра с вероятностью превышения 0,96 и рассчитывается условная толщина стенки гололеда.

В качестве примера на рис. 1 приведена региональная карта районирования территории Сочинского района по ветровой нагрузке при гололеде.

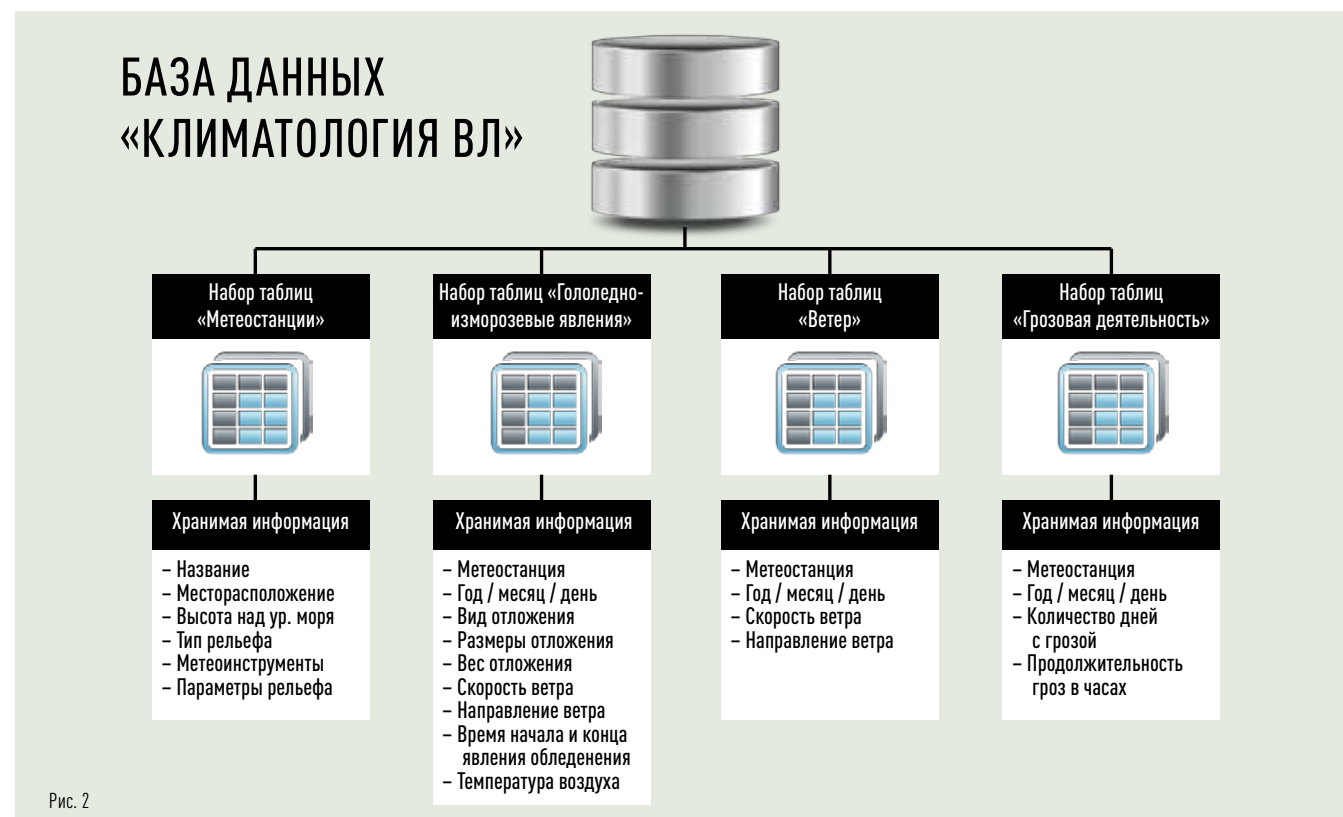


Рис. 2

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ УЧЕТА ГОЛОЛЕДНЫХ НАГРУЗОК И ПОСТРОЕНИЯ ГОЛОЛЕДНЫХ КАРТ

Построение региональных карт – это сложный трудоемкий процесс, который включает в себя обработку исходных данных наблюдений метеостанций, учет опыта эксплуатации, составление эмпирических рядов и их статистическую обработку, анализ физико-географических и рельефных особенностей местности, учет особенностей расположения метеорологических станций и репрезентативности данных наблюдений, анализ синоптических процессов, сопутствующих экстремальным

значениям гололедных отложений. Современные вычислительные средства позволяют автоматизировать значительную часть этого процесса и существенно повысить эффективность и качество указанных работ.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПО КЛИМАТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ И НАГРУЗКАМ

Для определения климатических характеристик в НТЦ ФСК ЕЭС была разработана специализированная информационная система, состоящая из базы данных (БД) климатических условий и программной оболочки.

В БД хранятся сведения (собранные по метеорологическим станциям РФ за многолетний период) по гололеду и скорости ветра при гололеде: дата отложения, вид, размеры и масса отложения, скорость, направление ветра в на-

чале обледенения, максимальная скорость ветра за период обледенения. Также хранится информация по каждой метеорологической станции: название, территориальная принадлежность, высота над уровнем моря, высота флюгера, высота анеморумбометра.

На рис. 2 представлена логическая схема базы данных.

Программная оболочка позволяет производить автоматическое занесение данных в БД, манипулирование ими, приведение их к единообразному виду, а также составление эмпирических рядов, получение статистических параметров, аппроксимацию эмпирических рядов теоретическими распределениями. С помощью программной оболочки можно определять также параметры климатических характеристик с разной вероятностью превышения.

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА

Для построения карт регионального районирования по территории РФ используется геоинформационная система (ГИС). Эта система позволяет управлять и анализировать географическую информацию. Географическая информация представляется в виде серий наборов географических данных, которые моделируют географическую среду посредством простых обобщенных структур данных. ГИС включает ряд современных инструментальных средств для обработки географических данных.

ГИС позволяет создавать региональные карты с высоким уровнем детализации ареалов распространения климатических районов с учетом рельефа местности. Кроме того, использование ГИС позволяет значительно повысить эффективность и качество выполняемых работ.

В работах используется ГИС фирмы ESRI – ArcGIS. Система обладает мощным инструментальным набором, позволяющим работать со всем спектром задач по географической привязке данных, их пространственному анализу, картографированию и финальной подготовке к печати готовых региональных климатических карт.

Из рис. 1 видно, что использование ГИС дает детализированную информацию о климатических районах, их границах по отношению к общегеографическим ориентирам, таким как населенные пункты, реки, береговая линия, отметки высот местности и др.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КЛИМАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ВЛ

Климатические нагрузки на ВЛ определяются в зависимости от ответственности ВЛ. В перспективе при определении климатических нагрузок рекомендуются следующие уровни надежности ВЛ, приведенные в таблице 1, где указаны также соответствующие вероятности превышения (P) и периоды повторяемости расчетных климатических нагрузок (T).

Климатические нагрузки на ВЛ (с заданной вероятностью превышения, зависящей от уровня надежности ВЛ) определяются по методике, разработанной с учетом рекомендаций МЭК и СИГРЭ.

Для протяженных линий (длиной более 100 км) разработана методика определения климатических нагрузок на ВЛ, учитывающая ее длину. Линия электропередачи рассматривается как единый протяженный объект. Считается, что нагрузки на этом объекте изменяются и по времени, и по длине. Период повторяемости и число случаев превышения климатических нагрузок для всей ВЛ отличается от периода повторяемости и числа случаев превышения нагрузок для каждой конкретной точки. Учитывается, что вероятности превышения нагрузок в точке и всей ВЛ отличаются друг от друга.

По данным наблюдений метеорологических станций и по данным опыта эксплуатации ВЛ определяются размеры зоны одновременного превышения нагрузок θ , км.

Вероятность превышения нагрузки в любой конкретной точке ВЛ (ϕ') определяется заданной вероятностью превышения для всей ВЛ P (где l – длина ВЛ, км):

$$\phi' = 1 - P^{l/\theta}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С точки зрения повышения достоверности определения климатических нагрузок на ВЛ представляются перспективными следующие направления:

- организация постов автоматического измерения метеорологических условий в местах, подверженных частым и значительным гололедно-изморозевым явлениям, в том числе в сочетании с ветровым воздействием;
- разработка и внедрение мезомасштабных математических моделей обледенения конструкций воздушных линий и гололедно-ветровых воздействий;
- более широкое использование современных информационных технологий, в том числе специализированных программных комплексов, баз данных и географических информационных систем (ГИС).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимашова Л. В., Луговой В. А., Черешнюк С. В. Определение климатических нагрузок на воздушные линии // Новости электротехники, № 3, 2006.
2. Правила устройства электроустановок. – Раз. 2. 7-е изд.
3. Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ-7 и построению карт климатического районирования. ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2010.
4. Probabilistic design of overhead transmission lines / CIGRE Brochure No 109, 2000, SC 22 Working Group 06 Principles of overhead line design.