

Расчет воздушных линий электропередачи на основе комплексного моделирования

Абдулвелеев И. Р., инж., Корнилов Г. П., доктор техн. наук

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Рассмотрены основные причины повышенной аварийности воздушных линий. Предложен комплексный учет климатических условий с применением геометрического и математического моделирования в системах автоматизированного проектирования SolidWorks и Ansys Workbench. Описаны процессы создания геометрической и математической моделей расчетного участка воздушной линии на стальных решетчатых опорах в указанных средах. На основе результатов проведенных исследований сделаны заключения о механической прочности рассчитываемой модели.

Ключевые слова: механический расчет воздушных линий, климатические условия, индивидуальное проектирование, математическая блочная модель, САПР, SolidWorks, Ansys Workbench, комплексный учет нагрузок, ветровое давление, гололед, температура воздуха, стальная решетчатая опора, коэффициент запаса прочности, надежность воздушных линий электропередачи.

Воздушные линии (ВЛ) являются основным средством передачи и распределения электрической энергии в электрических сетях. Главная их функция как важнейшего звена в непрерывном процессе производства и потребления электроэнергии — обеспечение максимально надежной ее передачи на большие расстояния с минимальными потерями и воздействием на окружающую среду [1]. Нарушения в работе ВЛ влекут за собой перерывы в электроснабжении целых населенных пунктов и крупных промышленных производств, что приводит к сбою важных технологических процессов, недоотпуску продукции и нарушениям нормальной жизнедеятельности людей [2].

Надежность функционирования ВЛ непосредственно зависит от механической надежности ее конструктивных элементов. Более 50 % отказов на линиях (примерно 2000 в год) вызвано механическими разрушениями в результате атмосферных воздействий [3] (ветра, гололеда, температуры воздуха), причем значительное количество нарушений в работе во многом обусловлено принятием ошибочных решений еще на стадии проектирования ВЛ [4]. Основной причиной этого является в первую очередь отсутствие комплексного учета всех разрушающих воздействий при механическом расчете линий. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) регламентируют лишь поочередную проверку механической прочности отдельных элементов (проводов, опор и др.) сначала на горизонтальные (ветер), а затем на вертикальные (гололед) нагрузки [5]. При этом влияние температурных режимов учитывается, как правило, только

для проводов и тросов, хотя изменения механических свойств происходят у всех элементов конструкции ВЛ в целом. Существующие методики механических расчетов ВЛ связаны со сложными, громоздкими и объемными вычислениями, не позволяющими оценить ресурс конструкции [4].

В последнее время наблюдается тенденция постепенного перехода от использования унифицированных конструктивных элементов ВЛ к индивидуальному проектированию линий с учетом всех особенностей местности (рельефа, температуры, ветровых и гололедных режимов, наличия крупных водоемов, количества грозных перенапряжений в год и др.), где планируется ее строительство. Индивидуальный подход, широко применяемый в зарубежных небольших по площади странах [4], должен стать обязательным для России с ее обширной территорией и многообразием климатических и геологических условий.

При решении задачи индивидуального проектирования ВЛ с учетом комплекса одновременно воздействующих механических нагрузок, параметры которых можно варьировать для всесторонней оценки надежности линии, предлагается последовательное использование геометрического и математического моделирования в системах автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks и Ansys Workbench [6].

Геометрическое моделирование в среде SolidWorks представляет собой создание формализованной физической CAD (Computer-Aided Design) модели объекта, максимально приближенной к реальной и обладающей всеми необходимыми для исследования свой-

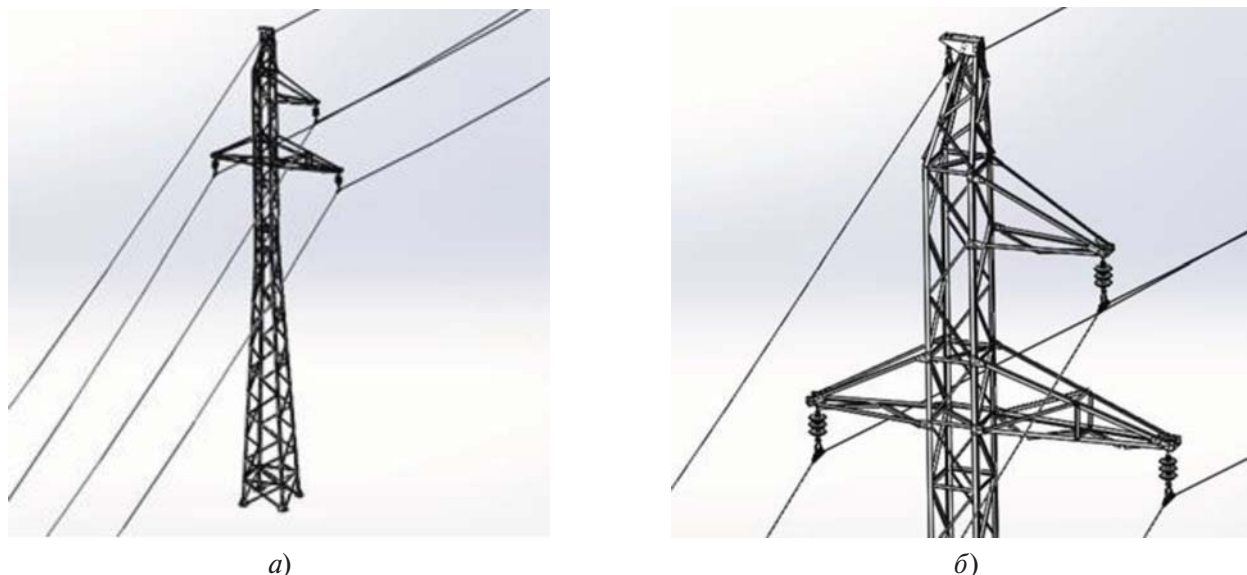


Рис. 1. Конструкция стальной решетчатой опоры ВЛ 35 кВ (а) и верхняя часть опоры с подвесными изоляторами (б)

ствами [7]. Для конструктивных элементов ВЛ (опоры, провода, троса, изолятора) необходимо смоделировать составные части каждого из них, а затем собрать их в единый элемент [6]. Далее для объектов выбирается материал, физические свойства которого удовлетворяют свойствам проектируемой модели. Таким образом, каждый элемент ВЛ описывается совокупностью прочностных характеристик, необходимых для расчетов механических усилий. Например, для моделирования опоры П-35 (рис. 1) нужно предварительно создать более 200 элементарных моделей элементов различных размеров из разных материалов, а затем собрать из них единую конструкцию в соответствии с реальными размерами, расположением отверстий, сварных швов, сгибов и т. д. [8].

В библиотеке SolidWorks кроме известных материалов, широко применяемых на практике, могут быть указаны различные композиты с определенным набором физических свойств (плотность, модуль Юнга, предел текучести, коэффициент температурного расширения и т. д.).

Математическое моделирование в среде Ansys Workbench включает в себя расчет деформаций выбранной конструкции под воздействием различных видов механических нагрузок. Для этого расчетная модель экспортируется из среды SolidWorks в среду Ansys Workbench, где выполняются инженерные расчеты прочностных характеристик: определение статических нагрузок, стационарный тепловой расчет, анализ устойчивости и т. п. [9]. Каждому виду расчета соответствует

определенный блок, содержащий все необходимые этапы проектирования (работа с моделью, задание начальных условий и пр.). В проекте может быть несколько блоков с перекрестными связями.

Таким образом, возможна реализация комплексного инженерного расчета спроектированной модели, при этом в отдельных блоках осуществляются температурный расчет, расчет опоры на вертикальную и горизонтальную нагрузки. Установив между тремя блоками последовательные связи, варьируют исходные значения в каждом из них и выполняют механический расчет для самых разных нагрузочных и температурных режимов (рис. 2). Изменения температуры внешней среды задаются и решаются в блоке *A*, вертикальные и горизонтальные механические нагрузки на модель — в блоках *B* и *C* соответственно. Установленная связь по графе Geometry позволяет использовать одну геометрическую модель участка ВЛ для всех трех видов анализа. Связь по графам Solution-Setup дает возможность последовательно передавать решение от одного блока к другому. Например, начальными условиями для блока *B* будут не только вертикальные механические нагрузки, но и те изменения в начальной модели, которые формирует блок *A*.

На следующем этапе в графе Model создается конечно-элементная сетка (КЭ-сетка), т. е. осуществляется дискретизация объема, занимаемого телом, на элементарные области: для объемного тела — на тетраэдры с гранями, аппроксимируемыми линейными и параболическими функциями координат; для



Рис. 2. Блок-схема выполнения расчетов ВЛ в программе Ansys Workbench

поверхностных моделей — плоскими или криволинейными треугольниками (параболическая зависимость от координат) [10]. Эти области именуются конечными элементами. Таким образом, геометрическая модель САД преобразуется в расчетную математическую конечно-сеточную модель САЕ (Computer-Aided Engineering). Программа позволяет регулировать масштаб сетки, а поскольку он влияет на точность результатов, целесообразно проводить исследования при максимальной разрешающей способности сетки.

Согласно ПУЭ расчет ВЛ в нормальном режиме выполняется для сочетаний следующих климатических условий [5]:

1. Отрицательные температуры t_{-} , °С (включая наиболее низкую), ветер и гололед отсутствуют.
2. Максимальная положительная температура t_{+} , °С, ветер и гололед отсутствуют.
3. Среднегодовая температура $t_{с.г.}$, °С, ветер и гололед отсутствуют.
4. Стенка гололеда различной толщины ($b_{э}$, мм) на проводах и тросах, ветер отсутствует.
5. Ветровая нагрузка с заданным напором W_0 , Па, гололед отсутствует.
6. Гололед на проводах и тросах, присутствует ветер.

Таким образом, для п. 1–4 расчет выполняется только в блоках *A* и *B*, для п. 5 и 6 — в блоках *A*, *B* и *C*.

В качестве примера рассмотрим процесс подготовки и проведения механического расчета прочностных характеристик участка конкретной ВЛ 35 кВ, включающего следующие конструктивные элементы: промежуточную стальную решетчатую опору П-35, сталеалюминевые провода АС-70 (пролет — 200 м), стеклянные изоляторы ПС-70 и грозозащитный стальной трос сечением 38 мм². Для

стального уголка опоры П-35 выбран материал СтЗсп5.

Итоговая масса расчетной модели составила 1474 кг, что незначительно отличается от массы реальной опоры (1500 кг). Габаритные размеры опоры оказались также максимально приближенными к реальным. Для сконструированной геометрической САД-модели далее выполняются механические и тепловые расчеты.

Температурные изменения

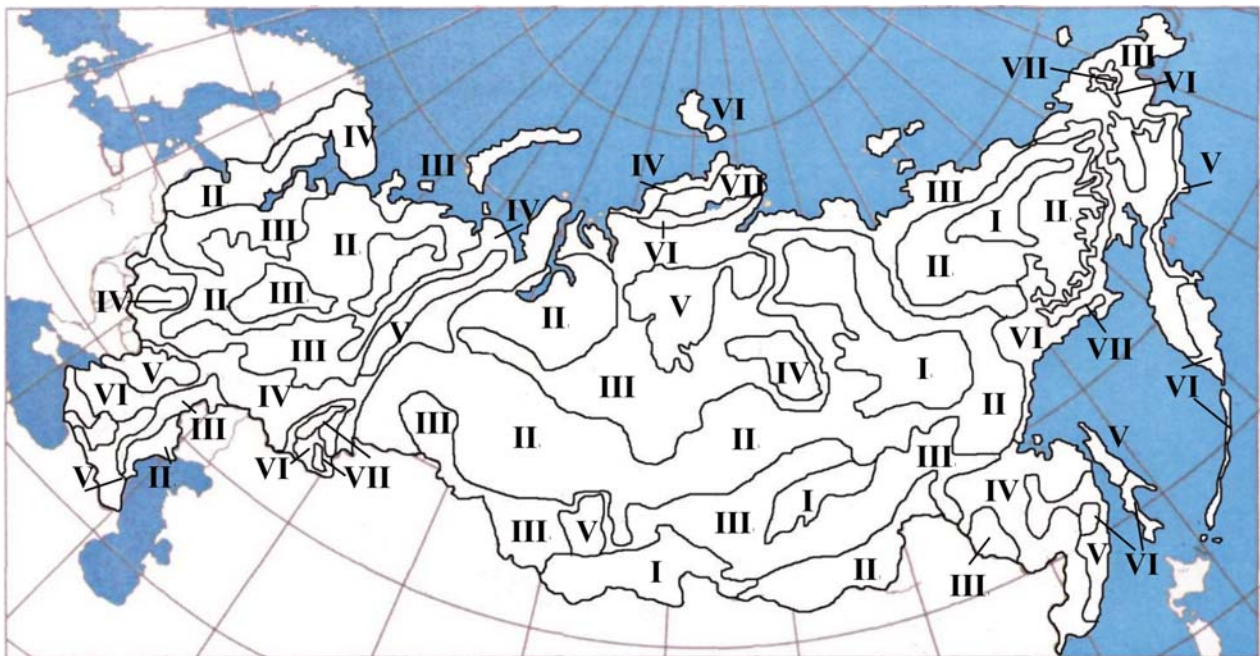
Примем высшую температуру равной +40 °С. В блоке *A* необходимо выделить те элементы модели, на которые будет распространяться температурное воздействие, и задать параметру “Temperature” значение “40” в соответствующее поле. Расчет выполняется аналогично для низшей годовой (–40 °С) и среднегодовой (0 °С) температур. Для расчета по условиям 4–6 в поле значения температуры вводится значение, равное –5 °С [5].

Вертикальные нагрузки

Для расчета вертикальной нагрузки по условиям 1–3 и 5 к модели участка ВЛ 35 кВ необходимо приложить механическую нагрузку, обусловленную собственным весом опоры, проводов, гирлянды изоляторов, арматуры и троса [5]. При этом нагрузка от веса проводов, изоляторов и арматуры прикладывается к траверсам, а от веса арматуры и троса — к тросостойке. В соответствии с ПУЭ рассчитываются значения следующих параметров на 1 м длины:

$G_{п}$ (расчетная нагрузка от собственного веса провода, Н/м);

G_{Σ} (суммарная расчетная нагрузка на траверсу от собственного веса провода, гирлянды изоляторов и арматуры, Н/м);



Районы по гололеду:

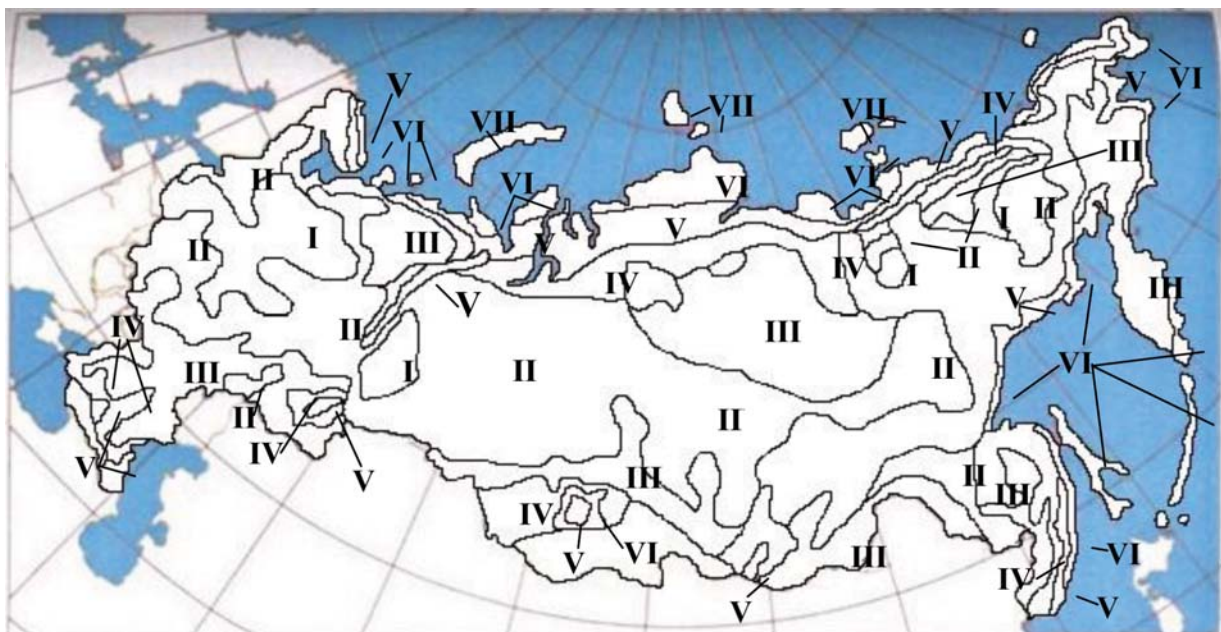
I — 10 мм
II — 15 мм

III — 20 мм
IV — 25 мм

V — 30 мм
VI — 35 мм

VII — 40 мм

a)



Районы по ветровому давлению:

I — 400 Па
II — 500 Па

III — 650 Па
IV — 800 Па

V — 1000 Па
VI — 1250 Па

VII — 1500 Па

б)

Рис. 3. Карты районирования территории РФ по толщине стенки гололеда (а) и по ветровому давлению (б)

$G_{\Sigma T}$ (суммарная расчетная нагрузка на траверсу от собственного веса грозозащитного троса и арматуры, Н/м).

С целью расчета вертикальных нагрузок на опору ВЛ в блоке В следует определить значения и точки приложения нагрузок, а

также точки условного крепления опоры. Крепления устанавливаются в опорных отверстиях башмаков, т.е. в точках, где реальная опора крепится к бетонному фундаменту [11]. Для приложения расчетных нагрузок от веса проводов, троса, изоляторов и арматуры

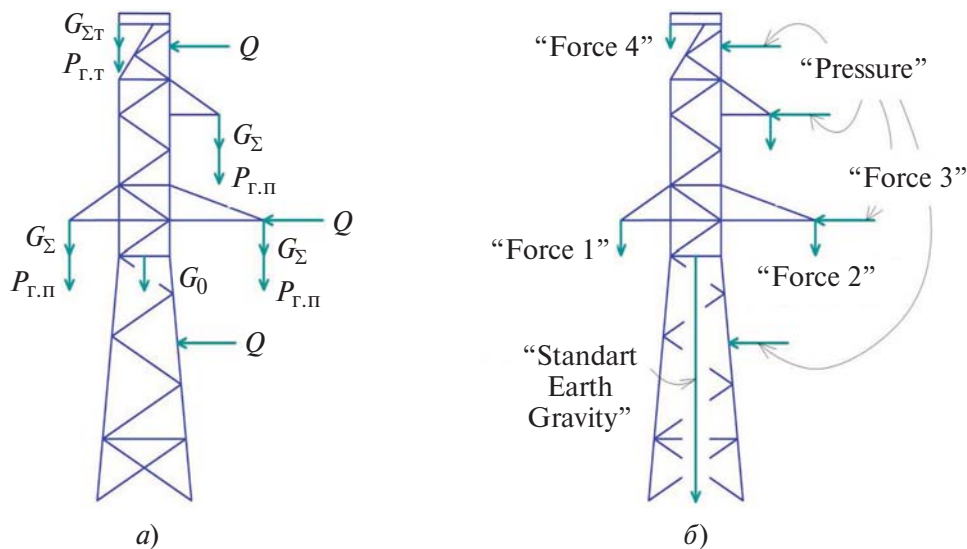


Рис. 4. Схемы распределения расчетных нагрузок стальной решетчатой опоры (а) и точки их приложения на модели (б)

выбирается параметр “Force” (“сила”). Для трех траверс и тросостойки устанавливаются значения рассчитанной силы. Для расчета нагрузки от собственного веса опоры выбирается автоматически рассчитываемый параметр “Standard Earth Gravity” (“земная гравитация”). Для условий 4 и 6 необходимо учитывать нагрузку от гололеда на провода и тросы, которая значительно увеличит суммарную вертикальную нагрузку на исследуемую модель (карта районирования территории РФ по толщине стенки гололеда приведена на рис. 3, а) [5]. В таком случае согласно ПУЭ рассчитываются следующие параметры:

$P_{Г}^H$ (линейная гололедная нагрузка на 1 м провода и троса, Н/м);

$P_{Г.п}^P$ (фактическая линейная гололедная нагрузка на 1 м провода и троса при механическом расчете проводов и тросов по методу допустимых напряжений, Н/м).

Таким образом, в окно значений параметра “Force” для трех траверс в блоке В необходимо вводить значение с учетом веса гололеда. Соответственно возможно изменение вертикальных нагрузок в зависимости от марки провода ВЛ, а также от толщины стенки гололеда для конкретной местности. При этом устанавливается влияние температуры в блоке А на механическую прочность ВЛ при заданных вертикальных нагрузках. Кроме того, есть возможность проанализировать механическую прочность ВЛ при различных гололедных режимах (в блоке В) и неизменном значении температуры. Эти связи делают интерфейс программы весьма гиб-

ким и удобным для проведения инженерных расчетов при изменении исходных параметров в широком диапазоне.

Горизонтальные нагрузки

Расчет горизонтальных нагрузок включает в себя определение реакции опоры на воздействие ветра [12, 13]. Для расчета горизонтальных нагрузок на элементы ВЛ в блоке С выбирается параметр “Pressure” (“давление”). Расчетное давление прикладывается к одной из плоскостей опоры под углом 90° . Ветровые нагрузки задают в паскалях согласно принятым нормированным значениям скорости ветра. Карта районирования территории РФ по ветровому давлению приведена на рис. 3, б) [5]. В соответствии с ПУЭ вычисляются показатели:

Q (расчетная ветровая нагрузка на конструкцию опоры, Н);

$Q_{Г}$ (расчетная ветровая нагрузка при гололеде, Н). Принимается в зависимости от расчетной ветровой нагрузки без гололеда Q .

Для расчета горизонтальной нагрузки выполняют последовательно три операции:

1. В блоке А вычисляют температурные изменения при заданном значении “Temperature”.

2. В блоке В определяют вертикальные нагрузки при заданных значениях собственного веса опоры (“Standard Earth Gravity”), а также проводов, троса, изоляторов, арматуры и (при необходимости) гололеда (“Force”).

3. В блоке С находят горизонтальные нагрузки при заданных значениях нагрузки от

$t, ^\circ\text{C}$	$b_3, \text{мм}$	$W_0 (Q), \text{Па}$	Напряжение (Equivalent Von-Mises Stress), Па	КЗП (Safety Factor)	Отклонение крайней точки (Directional Deformation), мм
1. Отрицательная температура					
- 40	0	0 (0)	3,8447e8	0,8217	–
- 30	0	0 (0)	3,1184e8	0,9069	–
- 25	0	0 (0)	2,6971e8	1,0141	–
- 20	0	0 (0)	2,4652e8	1,0377	–
- 10	0	0 (0)	2,3928e8	1,0448	–
2. Максимальная положительная температура					
+ 40	0	0 (0)	1,2857e8	1,9444	–
3. Среднегодовая температура					
0	0	0 (0)	1,6688e8	1,4981	–
4. Провода и тросы покрыты гололедом					
- 10	10	0 (0)	2,4615e8	1,0156	–
- 5	10	0 (0)	1,8100e8	1,3812	–
- 5	20	0 (0)	2,3927e8	1,0449	–
- 5	21	0 (0)	2,5156e8	0,9938	–
- 5	25	0 (0)	3,1820e8	0,7857	–
- 5	30	0 (0)	5,0824e8	0,4919	–
- 5	35	0 (0)	6,4311e8	0,3887	–
- 5	40	0 (0)	8,0534e8	0,3104	–
5. Ветровая нагрузка, гололед отсутствует					
- 5	0	400 (726)	2,1737e8	1,1501	12,94
- 5	0	500 (907,5)	2,2290e8	1,1216	16,53
- 5	0	650 (1179,8)	2,3186e8	1,0782	22,25
- 5	0	800 (1452)	2,4155e8	1,0350	28,16
- 5	0	1000 (1815)	2,5545e8	0,9787	36,17
- 5	0	1250 (2268,8)	2,7417e8	0,9119	46,30
- 5	0	1500 (2722,5)	3,0573e8	0,8177	56,48
6. Присутствует ветер, провода и тросы покрыты гололедом					
- 5	20	100 (181,5)	2,3976e8	1,0427	17,83
- 5	20	250 (453,8)	2,4454e8	1,0223	13,86
- 5	20	375 (680,6)	2,4853e8	1,0059	12,82

давления ветрового потока на грани опоры (“Pressure”).

На рис. 4 показаны схемы распределения расчетных нагрузок опоры и точки их приложения на математической модели в программе Ansys Workbench. Результаты расчетов по условиям 1 – 6 приведены в таблице.

Результаты исследований

Для оценки результатов исследований выбраны следующие прочностные характеристики: эквивалентное напряжение (Equivalent Von-Mises Stress), Па; коэффициент запаса прочности КЗП (Safety Factor), равный отношению предельно допустимой (разрушающей)

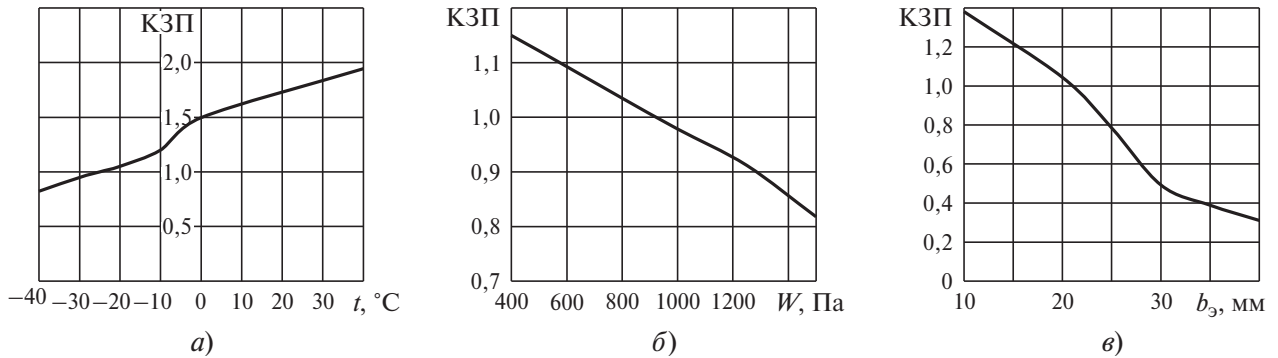


Рис. 5. Кривые зависимости коэффициента запаса прочности участка ВЛ 35 кВ от температуры t (а), ветровой нагрузки W (б) и толщины стенки гололеда b_3 (в)

нагрузки, вызывающей потерю прочности элемента, к фактической при заданных климатических условиях; отклонение крайней точки конструкции (Directional Deformation), мм.

Результат исследования представляется в виде 3D анимации направления деформаций, а также в виде цветowych диаграмм. Цветовая градация модели изменяется от синего цвета до красного по мере приближения параметра к своему критическому значению. Таким образом, наблюдаются области в структуре элементов, испытывающие наибольшие механические напряжения, и точки, в которых вероятнее всего произойдет разрушение опоры.

В таблице приведены результаты расчетов, выполненных для участка ВЛ 35 кВ, состоящего из следующих основных конструктивных элементов: промежуточной стальной решетчатой опоры П-35; трех сталеалюминиевых проводов АС-70 (пролет — 200 м), стеклянных изоляторов ПС-70, объединенных в три гирлянды по три изолятора в каждой; грозозащитного стального троса сечением 38 мм^2 . Расчет проведен для сочетания шести климатических условий, регламентируемых ПУЭ, при нормальном режиме работы ВЛ с применением САПР SolidWorks и Ansys Workbench. В ходе расчета учтены механические нагрузки, обусловленные собственным весом элементов, а также различными атмосферными условиями (гололедом, ветровым давлением, изменением температуры внешней среды). Это позволяет выполнить комплексный механический расчет с учетом трех основных видов воздействий: температурных изменений, вертикальных и горизонтальных нагрузок.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рассматриваемая ВЛ 35 кВ на стальных решетчатых опорах не имеет достаточного ресурса надежности при эксплуатации в условиях низких температур. При температу-

рах ниже $-25 ^\circ\text{C}$ коэффициент запаса прочности меньше допустимого (рис. 5, а).

ВЛ 35 кВ на стальных решетчатых опорах обладают достаточной прочностью при эксплуатации в I–V ветровых районах (рис. 5, б), составляющих большую часть территории России, благодаря низкому аэродинамическому сопротивлению. Однако при ветровой нагрузке, соответствующей VI и VII районам, могут произойти разрушение опоры и обрыв линии. При этом велика вероятность разрушения раскосов и поясов опоры у ее основания.

Довольно прочная при воздействии ветровых нагрузок решетчатая конструкция опоры весьма ненадежна при эксплуатации в условиях гололеда (рис. 5, в). Разрушение ВЛ происходит при образовании на проводах и тросах стенки гололеда толщиной более 20 мм при температуре $-5 ^\circ\text{C}$ или при толщине стенки гололеда, превышающей 10 мм, и температуре $-10 ^\circ\text{C}$. Безопасная эксплуатация подобной линии возможна только для I и II районов по гололеду. Решетчатая стальная конструкция имеет большой собственный вес, и при снижении температуры и появлении дополнительной нагрузки вследствие образования гололеда на проводах ее механическая прочность резко снижается. Все это свидетельствует о низкой надежности функционирования линии в условиях образования гололеда. В данном случае наиболее подвержены разрушению места креплений траверс и тросостоек к поясам опоры и опорные башмаки.

Таким образом, исследуемая ВЛ 35 кВ может надежно эксплуатироваться только при следующих климатических условиях:

температурах окружающей среды не ниже $-25 ^\circ\text{C}$;

ветровом давлении, соответствующем I–V районам по ветру;

толщине стенки гололеда, соответствующей I и II районам по гололеду.

При эксплуатации ВЛ в более экстремальных условиях в ее конструктивных элементах возникают недопустимые деформации и разрушения, которые могут повлечь за собой аварию на линии и нарушение электроснабжения потребителей.

Выводы

1. Применение программ SolidWorks и Ansys Workbench позволяет рассчитывать механические усилия ВЛ широкого класса напряжений с учетом материала и конструкции опор, типа изоляторов, сечения токоведущих проводов и грозозащитных тросов.

2. Благодаря использованию блочной модели можно не только рассчитать комплекс механических нагрузок в зависимости от различных атмосферных условий (температуры воздуха, толщины стенки гололеда и ветрового давления), но и выбрать оптимальную конструкцию на основе известных критериев оптимизации.

3. Результаты расчетов, проведенных для конкретной ВЛ 35 кВ, показали, что наиболее критическим фактором, оказывающим наибольшее влияние на значение коэффициента запаса прочности, является толщина стенки гололеда. Влияние ветровой нагрузки и температурного фактора менее критично.

Список литературы

1. Кесельман Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи. — М.: Энергоатомиздат, 1992.

2. Короткевич М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть. — Минск: Высшая школа, 2010.
3. Каверина Р., Коган Ф., Яковлев Л. Повышение надежности воздушных линий 35 – 750 кВ. — Новости электротехники, 2007, № 4 (46).
4. Study on the limited values of foundation deformation for a typical UHV transmission tower / F. Yang, J. Yang, J. Han, Z. Zhang. — IEEE Transactions on power delivery, vol. 25, No. 4, 2010.
5. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. — М.: Эксмо, 2010.
6. Абдулвелеев И. Р., Корнилов Г. П. Исследование надежности воздушных линий электропередачи 6(10) кВ с применением систем автоматизированного проектирования SolidWorks и CosmosWorks. — В кн.: Электротехнические системы и комплексы (Международ. сб. науч. трудов). Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2013.
7. Огородникова О. М. Конструкционный анализ в среде Ansys: Учеб. пособие. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004.
8. СНиП 3.407-68/73: Унифицированные стальные нормальные опоры ВЛ 35, 110 и 150 кВ. — М., 1963.
9. Алямовский А. А. CosmosWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks. — М.: ДМК Пресс, 2010.
10. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. пособие / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова и др. — Самара : Самарский гос. техн. ун-т, 2010.
11. Тарасов А. Г., Целебровский Ю. В. Воздушные линии. Проблемы жизнестойкости фундаментов опор. — Новости электротехники, 2012, № 6 (78).
12. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. — Изд-во литературы по строительству, 1972.
13. A fibber bragg grating tension and tilt sensor applied to icing monitoring on overhead transmission lines / G. Ma, C. Li, J. Quan, J. Jiang, Y. Cheng. — IEEE Transactions on power delivery, vol. 26, No. 4, 2011.

korn.mgn@mail.ru