

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Электроснабжение транспорта»

**А. В. Паранин**  
**Д. А. Ефимов**

**КОНТАКТНЫЕ СЕТИ И  
ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Екатеринбург  
УрГУПС  
2015

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Электроснабжение транспорта»

**А. В. Паранин**  
**Д. А. Ефимов**

## **КОНТАКТНЫЕ СЕТИ И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Практикум  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль: «Электроснабжение») всех форм обучения

Екатеринбург  
УрГУПС  
2015

УДК 621.332.3  
ББК 3.39.217

**Паранин А. В.**

**Н61** Контактные сети и линии электропередачи: практикум / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 82 с.

Практикум подготовлен в соответствии с программой дисциплины «Контактные сети и линии электропередачи» и содержит краткие теоретические сведения, а также рекомендации для решения задач на практических занятиях. Даны справочные материалы, необходимые для выполнения расчетов.

Практикум предназначен для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль: «Электроснабжение») всех форм обучения.

УДК 621.332.3  
ББК 3.39.217

*Издано по решению редакционно-издательского совета университета*

*Авторы:* А. В. Паранин, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», канд. техн. наук, УрГУПС;  
Д. А. Ефимов, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», канд. техн. наук, УрГУПС

*Рецензент:* А. А. Ковалев, канд. техн. наук, доцент, УрГУПС

© Уральский государственный  
университет путей сообщения  
(УрГУПС), 2015

## Оглавление

Введение .....	6
1. Исходные данные .....	7
1.1. Данные для расчета проводов воздушной линии электропередач ...	7
1.2. Данные для расчета цепной контактной подвески .....	9
1.3. Данные для расчета допустимой длины пролета .....	11
1.4. Данные для расчета жесткой поперечины .....	11
1.5. Данные для определения динамических характеристик контактной подвески .....	12
2. Нагрузки на провода воздушной линии электропередачи и цепной контактной подвески .....	12
2.1. Нагрузки от собственного веса провода .....	13
2.2. Суммарный вес контактной подвески .....	14
2.3. Нагрузка на провода от веса гололеда .....	15
2.4. Суммарный вес контактной подвески с гололедом .....	15
2.5. Ветровая нагрузка .....	16
2.6. Ветровая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ при наличии гололеда .....	16
2.7. Результирующая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ в режиме максимального ветра .....	17
2.8. Результирующая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ в режиме гололеда с ветром .....	18
2.9. Пример решения .....	18
3. Механический расчет провода ВЛ с подвижными точками подвеса	23
3.1. Эквивалентный пролет .....	24
3.2. Критический пролет .....	24
3.3. Выбор исходного режима .....	25
3.4. Зависимость натяжения провода от температуры .....	25
3.5. Натяжение провода в режиме гололеда с ветром .....	26

3.6. Натяжения провода в режиме ветра максимальной интенсивности .....	27
3.7. Стрелы провеса для различных длин пролетов .....	27
3.8. Пример решения .....	28
4. Механический расчет провода ВЛ с неподвижными точками подвеса.....	32
4.1. Выбор исходного расчетного режима.....	32
4.2. Зависимость натяжения провода от температуры.....	33
4.3. Натяжение провода в режиме гололеда с ветром и ветра максимальной интенсивности .....	33
4.4. Пример решения .....	33
5. Допустимая длина пролета цепной подвески .....	38
5.1. Максимальная допустимая длина пролета на прямом участке пути.....	39
5.2. Максимальная допустимая длина пролета на кривом участке пути.....	40
5.3. Пример решения .....	41
6. Механический расчет анкерного участка полукompенсированной цепной подвески.....	44
6.1. Эквивалентный пролет .....	44
6.2. Критический пролет .....	44
6.3. Температура беспровесного положения контактного провода.....	46
6.4. Натяжение несущего троса при беспровесном положении контактного провода .....	46
6.5. Натяжение нагруженного несущего троса при изменении температуры .....	47
6.6. Стрела провеса несущего троса $F_{xi}$ в пролете $l_i$ .....	47
6.7. Стрела провеса контактного провода .....	48
6.8. Пример решения .....	48

7.	Подбор типовой жесткой поперечины.....	58
7.1.	Преобразование схемы расположения путей в расчетную нагрузочную схему.....	58
7.2.	Вертикальные нагрузки от веса подвесок .....	59
7.3.	Предварительный подбор поперечины.....	60
7.4.	Нагрузка на жесткую поперечину от ветра максимальной интенсивности .....	61
7.5.	Изгибающие моменты, действующие на жесткую поперечину, от веса подвесок и гололеда .....	61
7.6.	Расчет изгибающих моментов от всех внешних сил .....	63
8.	Определение динамических характеристик контактной подвески ..	66
8.1.	Расчет скорости распространения механической волны в контактной подвеске .....	66
8.2.	Расчет коэффициента отражения .....	67
8.3.	Расчет коэффициента Доплера.....	67
8.4.	Расчет коэффициента усиления .....	68
8.5.	Определение собственных частот контактной подвески и резонансных скоростей.....	69
8.6.	Пример расчета .....	70
	Библиографический список .....	74
	Приложение А .....	75

## **Введение**

Дисциплина «Контактные сети и линии электропередачи» изучает вопросы, связанные с передачей электрической энергии от тяговых подстанций к движущемуся подвижному составу через сильноточный скользящий контакт. Она относится к специальным дисциплинам и изучается на четвертом курсе.

При освоении дисциплины «Контактные сети и линии электропередачи» учебным планом предусмотрены следующие виды занятий:

- лекции, на которых студент получает теоретические сведения по дисциплине;
- лабораторные работы, позволяющие изучить при помощи специализированного лабораторного комплекса процессы, которые происходят в элементах контактной сети при воздействии на нее климатических и эксплуатационных факторов;
- курсовое проектирование, позволяющее применить полученные теоретические знания при проектировании основных устройств и элементов контактной сети на станции и перегоне магистрального участка железной дороги;
- практические занятия, предназначенные для более полного усвоения вопросов, рассматриваемых при курсовом проектировании и на лабораторных занятиях.

Практические занятия проходят в форме практикума. В его ходе студенты решают ряд инженерных задач, связанных с проектированием контактной сети и определением ее параметров. Ряд задач посвящены темам, которые не нашли своего отражения в курсовом проекте.

Данное пособие содержит краткие теоретические сведения и рекомендации для решения задач на практических занятиях, а также необходимые для этого справочные данные.

## 1. Исходные данные

Исходные данные выбираются студентом из табл. 1.1–1.11 по двухзначному шифру, заданному преподавателем.

### 1.1. Данные для расчета проводов воздушной линии электропередач

Таблица 1.1

Марка провода воздушной линии электропередач

Первая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Провод	A-120	A-150	A-185	AC-70/11	AC-50/80	M95	M120	ПБСМ50	ПБСМ70	ПБСМ95

*Примечание* – плотность материала провода  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), коэффициент температурного линейного расширения  $\alpha$  (1/°C), модуль упругости  $E$  (МПа), временное сопротивление разрыву  $\sigma$  (МПа), расчетный диаметр  $d$  (м), фактическую площадь сечения  $S$  (м) можно выбрать из табл. 1.5, 1.7 [6];

Таблица 1.2

## Характеристика метеорологических условий

Вторая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Климатический район	Ia	Iб	IIa	IIав	IIб	IIбв	III	IVa	IVав	Ia
Гололедный район	I	III	II	III	I	I	II	I	II	I
Ветровой район	III	I	II	I	III	VI	I	II	I	IV

Примечания:

1. Годовую температуру  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  с повторяемостью раз в 10 лет можно выбрать из табл. А.9;
2. Нормативную стенку гололеда  $b_{\text{нг}}$  можно выбрать из А.8;
3. Нормативную скорость ветра  $V_{\text{н}}$  в известном ветровом районе можно выбрать из табл. А.7.

Таблица 1.3

## Коэффициент толщины стенки гололеда

Первая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{\text{г}}$	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,1	1,15	1,20	1,25

Таблица 1.4

## Коэффициент скорости ветра

Вторая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{\text{в}}$	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,1	1,15	1,20	1,25

Таблица 1.5

Длины (числитель) и количество (знаменатель) пролетов

Первая цифра шифра	$L_1$ , м/кол.	$L_2$ , м/кол.	Вторая цифра шифра	$L_3$ , м/кол.	$L_4$ , м/кол.
0	90/12	85/3	0	50/4	40/2
1	88/11	82/16	1	55/5	40/8
2	85/12	80/4	2	56/6	42/2
3	86/14	78/8	3	60/8	45/3
4	84/12	76/6	4	62/4	44/2
5	82/8	75/8	5	64/6	46/5
6	80/10	73/6	6	65/8	48/4
7	78/8	70/10	7	68/4	50/5
8	76/6	68/7	8	73/8	52/9
9	73/8	66/12	9	78/9	54/6

**1.2. Данные для расчета цепной контактной подвески**

Таблица 1.6

Род тока и марки проводов

Первая цифра шифра	Несущий трос	Контактный провод	Род тока
1	2	3	4
0	ПБСМ70	МФ100	Переменный
1	ПБСМ95	НЛФ100	Переменный
2	ПБСА50/70	МФ100	Переменный
3	М95	МФ100	Переменный
4	М120	2МФ100	Постоянный
5	М95	2НЛФ100	Постоянный

Окончание таблицы 1.6

1	2	3	4
6	ПБСМ95	2МФ100	Постоянный
7	ПБСМ70	МФ100	Переменный
8	ПБСА50/70	2МФ100	Переменный
9	ПБСМ70	НЛФ100	Переменный

*Примечание* – рекомендации по определению характеристик несущего троса и контактного провода приведены в примечании к табл. 1.1 настоящего руководства.

Таблица 1.7

Длины (числитель) и количество (знаменатель) пролетов цепной подвески

Первая цифра шифра	L1, м/кол.	L2, м/кол.	Вторая цифра шифра	L3, м/кол.	L4, м/кол.
0	70/8	60/5	0	50/5	40/6
1	70/5	65/3	1	60/10	50/6
2	65/5	60/4	2	55/10	50/6
3	70/8	65/6	3	60/5	50/8
4	60/8	55/4	4	50/6	45/5
5	70/5	65/6	5	60/5	50/8
6	70/8	60/8	6	55/6	50/5
7	70/5	65/5	7	60/8	50/4
8	70/5	60/5	8	50/8	40/4
9	65/5	60/6	9	55/10	50/4

### 1.3. Данные для расчета допустимой длины пролета

Таблица 1.8

Радиусы кривых

в метрах

Первая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R1		450	400	350	300	480	500	420	520	530
Вторая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R2		850	900	950	700	840	750	650	860	870

### 1.4. Данные для расчета жесткой поперечины

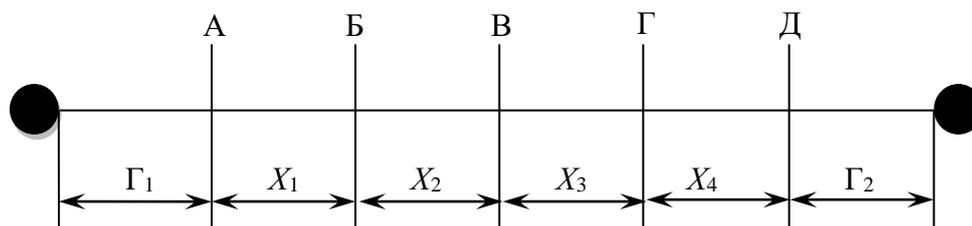


Рис. 1.1. Схема жесткой поперечины

Таблица 1.9

Главные пути

Первая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пути	А, Б	Б, В	В, Г	Г, Д	А, В	Б, Г	В, Д	А, Г	Б, Д	А, Д

Примечание – тип подвески на боковых путях ПБСМ70 + МФ100, на главных путях согласно табл. 1.6

Таблица 1.10

Размеры, указанные на схеме жесткой поперечины (рис. 1.1), м

Первая цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Gamma_1$	3,3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,6	5,7	4,9
$X_1$	5,1	5,2	5,3	5,4	5,7	6,3	5,6	5,5	5,4	5,2
$X_2$	5,5	5,2	6,5	5,1	5,5	5,2	6,2	6,0	5,7	5,6
$X_3$	7,5	7,1	6,1	6,0	6,4	5,6	5,8	7,2	7,1	6,4
$X_4$	6,0	6,0	6,4	5,8	5,1	6,8	5,8	5,6	6,5	7,0
$\Gamma_2$	3,3	5,7	3,1	3,2	4,9	3,4	3,5	3,6	4,9	3,5

### 1.5. Данные для определения динамических характеристик контактной подвески

Таблица 1.11

Граничные значения динамических параметров контактной подвески для расчета допустимой скорости движения электроподвижного состава (ЭПС)

Параметр	Первая цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Максимальное отношение скорости ЭПС к скорости волны в КП	0.63	0.56	0.64	0.62	0.58	0.64	0.61	0.56	0.58	0.58
Максимальное значение коэффициента усиления	1.46	1.43	1.62	1.87	2.01	1.6	1.5	1.84	1.9	1.87

### 2. Нагрузки на провода воздушной линии электропередачи и цепной контактной подвески

**Воздушная линия электропередачи (ВЛ)** – устройство для передачи электроэнергии от стационарного источника к стационарному потребителю по

проводам, расположенным на открытом воздухе и закрепленных с помощью изоляторов и арматуры к опорам.

**Тяговая сеть** – часть системы тягового электроснабжения, передающая электроэнергию от тяговых подстанций к движущемуся потребителям (электроподвижному составу) через сильноточный скользящий контакт. Состоит из питающих фидеров, контактной сети, рельсовой сети и фидеров обратного тока.

**Контактная сеть** – распределенное в пространстве техническое устройство обеспечивающее подключение электроподвижного состава к питающим шинам тяговых подстанций. Состоит из контактной подвески или тягового рельса, опорных и поддерживающих конструкции, фиксирующих устройств, изоляционных конструкции, устройств заземления, устройств секционирования и защиты от перенапряжений.

**Контактная подвеска** – составная часть контактной сети, включающая в себя систему проводов (контактные провода, несущие троса, усиливающие провода, струны и электрические соединители), обеспечивающая токосъем с приемлемым качеством.

**Цепная контактная подвеска** – контактная подвеска, в которой контактный провод при помощи струн подвешен к несущему тросу, в отличие от простой подвески, в которой применен только контактный провод.

**Длина пролета** – расстояние между точками подвеса провода (измеренное по горизонтали).

**Условие задачи:** Необходимо рассчитать приведенные нагрузки на заданные провода ВЛ и контактной подвески.

## **2.1. Нагрузки от собственного веса провода**

Нагрузки на провода принято подразделять на вертикальные и горизонтальные. К вертикальным относятся нагрузка от собственного веса провода и гололеда. Горизонтальная нагрузка – от действия ветра.

Нагрузка от собственного веса провода определяется по формуле

$$g = 9,81k_{\pi}S_jY_j \quad (2.1)$$

где  $k_{\pi}$  – коэффициент, учитывающий конструкцию провода, ( для цельного провода  $k_{\pi} = 1$ , для многопроволочного  $k_{\pi} = 1,025$ );

$S_j$  – фактическая площадь поперечного сечения провода, м<sup>2</sup>;

$Y_j$  – плотность материала провода, кг/м<sup>3</sup>.

Для комбинированных проводов, состоящих из двух видов проволок, нагрузка от собственного веса может быть определена по формуле

$$g = 9,81k_{\pi}(S_1Y_1 + S_2Y_2) \quad (2.2)$$

где  $S_1, S_2$  – площади сечения проволок, состоящих из различных материалов, м<sup>2</sup>;

$Y_1, Y_2$  – плотности материалов проволок, кг/м<sup>3</sup>.

## 2.2. Суммарный вес контактной подвески

Суммарный вес контактной подвески равен

$$g = ng_k + g_n + g_c, \quad (2.3)$$

где  $g_k$  – нагрузка от собственного веса контактного провода, Н/м;

$n$  – число контактных проводов;

$g_n$  – нагрузка от собственного веса несущего троса, Н/м;

$g_c$  – нагрузка от веса от струн, зажимов и электрических соединителей (принимается 1 Н/м).

### 2.3. Нагрузка на провода от веса гололеда

Нагрузка от веса гололеда на провода контактной подвески и ВЛ определяется по формуле

$$g_{\Gamma} = 27,7b_{\Gamma}(d + b_{\Gamma})10^3, \quad (2.4)$$

где  $b_{\Gamma}$  – расчетная толщина стенки гололеда,  $b_{\Gamma} = k_{\Gamma} \cdot b_{\text{н}}$ , для контактного провода  $b_{\Gamma} = k_{\Gamma} \cdot (b_{\text{н}}/2)$ , м;

$b_{\text{н}}$  – нормативная толщина стенки гололеда с повторяемостью не реже одного раза в 10 лет (см. табл. А.8), м;

$k_{\Gamma}$  – расчетный коэффициент гололеда, учитывающий местные условия (см. табл. 1.3);

$d$  – расчетный диаметр провода (см. табл. А.1, А.4, А.5, А.6), м.

При определении нагрузок на контактный провод в качестве расчетного диаметра используется полусумма высоты и ширины его сечения

$$d_{\text{ср}} = \frac{(A + H)}{2}, \quad (2.5)$$

где  $H$  – высота сечения контактного провода (см табл. А.1), м;

$A$  – ширина сечения провода (см табл. А.1), м.

Вес гололеда на контактном проводе, рассчитанный по формуле 2.3, уменьшается в два раза, т.к. в процессе эксплуатации гололед с нижней части провода удаляется техническим персоналом и токоприемниками подвижного состава.

### 2.4. Суммарный вес контактной подвески с гололедом

Суммарный вес контактной подвески с гололедом равен

$$g_{\Gamma} = (g_{\text{к}} + g_{\text{гк}})n + g_{\text{н}} + g_{\text{гн}} + g_{\text{с}}, \quad (2.6)$$

где  $g_{гк}$  – нагрузка от веса гололеда на контактном проводе, Н/м;

$g_{гн}$  – нагрузка от веса гололеда на несущем тросе, Н/м.

## 2.5. Ветровая нагрузка

Ветровая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ равна

$$P = 0,615V_p^2 C_x d, \quad (2.7)$$

где  $V_p$  – расчетная скорость ветра,  $V_p = k_B V_H$ , м/с;

$k_B$  – расчетный ветровой коэффициент (см. табл. 1.4);

$V_H$  – нормативная скорость ветра для заданного ветрового района с повторяемостью не реже 1 раза в 10 лет (см. табл. А.7), м/с;

$C_x$  – аэродинамический коэффициент (см. табл. А.10).

## 2.6. Ветровая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ при наличии гололеда

При гололеде расчетный диаметр провода увеличивается на удвоенную толщину стенки гололеда. Это приводит к увеличению площади, на которую воздействует ветровой поток. Поэтому формула 2.6 для определения ветровой нагрузки переписывается

$$P_{г} = 0,615V_{гр}^2 C_x (d + 2b_{г}), \quad (2.8)$$

где  $V_{гр}$  – расчетная скорость ветра при гололеде,  $V_{гр} = 0,6 V_p$ , так как максимумы ветровых и гололедных нагрузок не совпадают, м/с.

При определении ветровой нагрузки на контактный провод  $P_{гк}$  толщина стенки гололеда  $b_{г}$  не удваивается.

## 2.7. Результирующая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ в режиме максимального ветра

Результирующая нагрузка на провод определяется как векторная сумма вертикальных и горизонтальных нагрузок. Величина результирующей нагрузки на контактный провод и провод ВЛ при отсутствии гололеда определяется по теореме Пифагора

$$q = \sqrt{g^2 + P^2}, \quad (2.9)$$

где  $P_k$  – ветровая нагрузка на контактный провод, Н/м.

Аналогично определяется результирующая нагрузка на провода ВЛ  $q_{вл}$ .

При расчете результирующей нагрузки на несущий трос  $q$  учитывается, что несущий трос принимает на себя не только нагрузку от собственного веса  $g_n$ , но и от веса контактного провода  $g_k$ . Нагрузка от струн, зажимов и электрических соединителей принимается равной 1 Н/м. При расчете принимается допущение, что ветровая нагрузка на контактный провод полностью передается на опорные конструкции через фиксаторы.

$$q = \sqrt{[n \cdot (g_k + 1) + g_n]^2 + P_n^2}, \quad (2.10)$$

где  $g_k$  – нагрузка от собственного веса на контактный провод, Н/м;

$g_n$  – нагрузка от собственного веса на несущий трос, Н/м;

$P_n$  – ветровая нагрузка на несущий трос, Н/м.

## 2.8. Результирующая нагрузка на провода контактной подвески и ВЛ в режиме гололеда с ветром

Результирующие нагрузки в режиме гололеда с ветром на цепную контактную подвеску, контактный провод и провод ВЛ определяются по формулам 2.11, 2.12 и 2.13 соответственно.

$$q_{\Gamma} = \sqrt{g_{\Gamma}^2 + P_{\Gamma\text{H}}^2}, \quad (2.11)$$

$$q_{\text{кГ}} = \sqrt{(g_{\text{к}} + g_{\text{ГК}})^2 + P_{\text{ГК}}^2}, \quad (2.12)$$

$$q_{\text{ВЛГ}} = \sqrt{(g_{\text{ВЛ}} + g_{\text{ГВЛ}})^2 + P_{\text{ВЛГ}}^2}, \quad (2.13)$$

где  $g_{\text{ВЛ}}$  – нагрузка от собственного веса провода ВЛ, Н/м;

$g_{\text{ГВЛ}}$  – нагрузка от веса гололеда на проводе ВЛ, Н/м;

$P_{\text{ВЛГ}}$  – ветровая нагрузка на провод ВЛ при гололеде, Н/м.

## 2.9. Пример решения

Исходные данные:

- провод ЛЭП – АС-70/11;
- несущий трос – ПБСМ70;
- контактный провод – МФ85;
- ветровой район – I;
- гололедный район – 2.

### Расчет нагрузок на провода ВЛ

Нагрузку от собственного веса провода ВЛ определим по формуле (2.2).

Для провода ЛЭП АС-70/11

$$k_{\Pi} = 1,025; Y_1 = 7850 \text{ кг/м}^3; S_1 = 11,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$Y_2 = 2750 \text{ кг/м}^3; S_1 = 68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$g_{\text{вл}} = 9,81 \cdot 1,025 \cdot (7850 \cdot 11,3 + 2750 \cdot 68) \cdot 10^{-6} = 2,77 \text{ Н/м.}$$

Нагрузка от веса гололеда определяется по формуле (2.4).

$$b_{\Gamma} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м, } d_{\text{н}} = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$g_{\text{гвл}} = 27,7 \cdot 10 \cdot 10^{-3} (11,4 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^3 = 5,93 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка определяется по формуле (2.7). Для заданного ветрового района нормативная скорость ветра  $V_{\text{н}} = 25 \text{ м/с}$ . Расчетный ветровой коэффициент  $k_{\text{в}} = 1,0$ , аэродинамический коэффициент для одиночного провода  $C_x = 1,2$ . Ветровая нагрузка на провод ВЛ

$$P_{\text{вл}} = 0,615 \cdot (1 \cdot 25)^2 \cdot 1,2 \cdot 11,4 \cdot 10^{-3} = 5,26 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка на провод ВЛ при наличии гололеда определяется по формуле (2.8).

$$P_{\text{влг}} = 0,615 \cdot (0,6 \cdot 25)^2 \cdot 1,2 \cdot (11,4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}) = 5,21 \text{ Н/м.}$$

Результирующая нагрузка без гололеда на провод ВЛ определяется по формуле (2.9).

$$q_{\text{вл}} = \sqrt{2,77^2 + 5,26^2} = 5,94 \text{ Н/м.}$$

Результирующая нагрузка на провод ВЛ в режиме гололеда с ветром

$$q_{\text{влг}} = \sqrt{(2,77 + 5,93)^2 + 5,21^2} = 10,14 \text{ Н/м.}$$

### **Расчет нагрузок на провода цепной контактной подвески**

Нагрузка от собственного веса несущего троса  $g_{\text{н}}$  и контактного провода  $g_{\text{к}}$  определяется по формуле (2.1).

Для несущего троса ПБСМ70

$$k_{\text{п}} = 1,025; S = 72,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; Y = 8230 \text{ кг/м}^3;$$

$$g_{\text{н}} = 9,81 \cdot 1,025 \cdot 72,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8230 = 5,97 \text{ Н/м.}$$

Для контактного провода МФ85

$$k_{\text{к}} = 1; S = 85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; Y = 8900 \text{ кг/м}^3;$$

$$g_{\text{к}} = 9,81 \cdot 1 \cdot 85 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 7,42 \text{ Н/м.}$$

Суммарный вес контактной подвески определим по формуле (2.3)

$$g = 1 \cdot 7,42 + 5,97 + 1 = 14,39 \text{ Н/м.}$$

Нагрузка от веса гололеда определяется по формуле (2.4).

Для несущего троса

$$b_{\text{г}} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_{\text{н}} = 11,0 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$g_{\text{гн}} = 27,7 \cdot 10 \cdot 10^{-3} (11 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^3 = 5,82 \text{ Н/м.}$$

Найдем расчетный диаметр контактного провода по формуле как полусумму высоты и ширины его сечения

$$d_{\text{ср}} = \frac{(11,76 + 10,80) \cdot 10^{-3}}{2} = 11,28 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

тогда

$$g_{\text{гк}} = 0,5 \cdot 27,7 \cdot 10,0 \cdot 10^{-3} \cdot (11,28 \cdot 10^{-3} + 10,0 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^3 = 2,95 \text{ Н/м.}$$

Суммарный вес контактной подвески с гололедом определим по формуле (2.6)

$$g_{\text{г}} = (7,42 + 2,95) \cdot 1 + 5,97 + 5,82 + 1 = 23,16 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка на провода контактной подвески определяется по формуле (2.7). Для заданного ветрового района расчетный ветровой коэффициент  $k_{\text{в}} = 1,0$ ; нормативная скорость ветра  $V_{\text{н}} = 25 \text{ м/с}$ ; аэродинамический коэффициент для одиночных проводов контактной подвески  $C_x = 1,25$ . Найдем расчетную скорость ветра

$$V_{\text{р}} = 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ м/с.}$$

Тогда ветровая нагрузка на несущий трос составит

$$P_n = 0,615 \cdot 25^2 \cdot 1,25 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 5,29 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка на контактный провод

$$P_k = 0,615 \cdot 25^2 \cdot 1,25 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} = 5,19 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка на провода цепной контактной подвески при наличии гололеда определяется по формуле (2.8). Найдем расчетную скорость ветра при гололеде

$$V_{\text{пр}} = 0,6 \cdot 25 = 15 \text{ м/с.}$$

Ветровая нагрузка на несущий трос при наличии гололеда равна

$$P_{\text{нт}} = 0,615 \cdot 15^2 \cdot 1,25 \cdot (11 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}) = 3,63 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка на контактный провод при наличии гололеда

$$P_{\text{кт}} = 0,615 \cdot 15^2 \cdot 1,25 \cdot (10,8 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}) = 3,60 \text{ Н/м.}$$

Результирующая нагрузка на контактный провод без гололеда  $q_k$  определяется по формуле (2.9), для несущего троса  $q$  по формуле (2.10)

$$q_k = \sqrt{7,42^2 + 5,19^2} = 9,05 \text{ Н/м;}$$

$$q = \sqrt{[1 \cdot (7,42 + 1) + 5,97]^2 + 5,29^2} = 15,33 \text{ Н/м.}$$

Результирующая нагрузка на несущий трос в режиме гололеда с ветром  $q_r$  определяется по формуле (2.11), на контактный провод  $q_{гк}$  по формуле (2.12)

$$q_r = \sqrt{23,16^2 + 3,63^2} = 23,44 \text{ Н/м};$$

$$q_{гк} = \sqrt{(7,42 + 2,95)^2 + 3,60^2} = 10,98 \text{ Н/м}.$$

### 3. Механический расчет провода ВЛ с подвижными точками подвеса

**Анкерный участок** – участок ВЛ (контактной подвески) ограниченный анкерными опорами контактной сети, на которые анкеруются (закрепляются) провода контактной подвески.

**Эквивалентный пролет** – пролет, в котором при изменении температуры и дополнительной нагрузки (гололед с ветром) натяжение провода будет изменяться так же, как и в реальном анкерном участке.

**Критический пролет** – пролет, в котором натяжение провода в режиме минимальных температур равно натяжению в режиме дополнительных нагрузок и равно максимально допустимому натяжению данного провода.

**Исходный (расчетный) режим** – наиболее тяжелый режим работы ВЛ (контактной сети), в котором рассматриваемый параметр провода принимает свое максимально или минимально допустимое значение.

**Стрела провеса** – расстояние, измеренное по вертикали от точки подвеса до точки наибольшего провисания провода в пролете.

**Уравнение состояния контактной подвески** – это уравнение, которое устанавливает зависимость между натяжениями или стрелами провеса проводов ВЛ (контактной подвески) в двух различных режимах.

**Условие задачи:** необходимо рассчитать монтажные кривые для анкерного участка ЛЭП.

### 3.1. Эквивалентный пролет

Длину эквивалентного пролета определяют из выражения

$$L_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^3}{\sum_{i=1}^n L_i}}, \quad (3.1)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го пролета анкерного участка, м;

$n$  – количество пролетов в анкерном участке.

### 3.2. Критический пролет

Длину критического пролета определяют из выражений,

$$L_{кр} = H_{дп} \sqrt{\frac{24\alpha(t_r - t_{min})}{q_r^2 - g^2}}, \quad (3.2)$$

$$H_{дп} = \sigma_{вр} \frac{S}{k_3},$$

где  $H_{доп}$  – допустимое натяжение провода, Н;

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала провода,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$t_r$  – температура гололедообразования, принимается  $-5^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{min}$  – минимальная температура для данной климатической зоны с повторяемостью раз в 10 лет,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\sigma_{вр}$  – временное сопротивление разрыву, Па;

$S$  – фактическая площадь поперечного сечения провода,  $\text{м}^2$ ;

$k_3$  – коэффициент запаса (см. табл. 3.1).

Таблица 3.1

## Коэффициент запаса

Материал провода	$k_3$
Медь	2
Бронза	2
Алюминий	2
АС	2,5
БСМ	3
Сталь	4

*Примечание* – для многопроволочных проводов коэффициент запаса необходимо увеличить на 10 %.

### 3.3. Выбор исходного режима

По результатам сравнения длин эквивалентного и критического пролетов делается вывод об исходном режиме. Если  $L_3 < L_{кр}$ , то исходным будет режим минимальной температуры. Если  $L_3 > L_{кр}$ , то исходным режимом будет режим гололеда с ветром.

### 3.4. Зависимость натяжения провода от температуры

Запишем уравнение состояния контактной подвески

$$t_x = \left[ t_1 - \frac{L_3^2 q_1^2}{24\alpha H_1^2} + \frac{H_1}{\alpha ES} \right] + \frac{L_3^2 q_x^2}{24\alpha H_x^2} - \frac{H_x}{\alpha ES}, \quad (3.3)$$

где  $H$  – натяжение провода, Н;

$E$  – модуль упругости провода, Па;

Параметры с индексом «1» относятся к исходному режиму, а с индексом «х» – к текущему.

Для построения графика зависимости  $H(t)$  задаются значениями  $H_x$  с некоторым шагом и рассчитывают соответствующие им значения  $t_x$ . Затем на миллиметровой бумаге можно построить полученный график. Монтажные таблицы можно построить с помощью полученного графика зависимости  $H(t)$ . Для этого с шагом по температуре в  $10^\circ\text{C}$  с графика считываются значения  $H$ , которые и заносятся в соответствующие строки таблицы.

### 3.5. Натяжение провода в режиме гололеда с ветром

Если исходный режим – режим гололеда с ветром, то принимаем натяжение провода для этого режима равным максимально допустимому. Температура гололеда равна  $-5^\circ\text{C}$ .

В случае если исходный режим – режим минимальных температур, для определения натяжения провода воспользуемся формулой (3.3). При этом  $q_x = q_\Gamma$  (результатирующая нагрузка на провод в режиме гололеда с ветром),  $q_1 = q$  (результатирующая нагрузка на провод в режиме минимальных температур), натяжение провода в исходном режиме  $H_1$  равно максимально допустимому. Задаваясь произвольным значением  $H'_x$ , находят температуру  $t'_x$ . Если  $t'_x$  окажется меньше  $t_\Gamma = -5^\circ\text{C}$ , то берут несколько меньшее значение  $H''_x$  и находят  $t''_x$ . Если  $t'_x$  окажется больше  $t_\Gamma = -5^\circ\text{C}$ , то берут несколько большее значение  $H''_x$  и находят  $t''_x$ . Изменяя значения натяжения, добиваются чтобы  $t_\Gamma$  принадлежала отрезку  $[t', t'']$ . В этом случае можно применить метод линейной интерполяции для более точного нахождения  $H_\Gamma$

$$H_\Gamma = H''_x + \frac{(H'_x - H''_x)(t_\Gamma - t''_x)}{t'_x - t''_x}. \quad (3.4)$$

### 3.6. Натяжения провода в режиме ветра максимальной интенсивности

Расчет проводят по формуле (3.3), задаваясь  $q_x = q$  (результатирующей нагрузке в режиме максимального ветра) и  $t_x = t_b = -5^\circ\text{C}$ . При расчете используют метод линейной интерполяции по аналогии с нахождением  $H_T$  (см. формулу 3.4).

### 3.7. Стрелы провеса для различных длин пролетов

Расчет стрел провеса выполняют по формуле

$$f_{xi} = \frac{q_x L_i^2}{8H_x}, \quad (3.5)$$

где  $i$  – номер пролета в анкерном участке;

$q_x$  – результирующая нагрузка в режиме «х», Н/м.

$H_x$  берут из монтажной таблицы с шагом в  $10^\circ\text{C}$ .

Полученные зависимости строят в виде графиков  $f_{xi}(t)$  и представляют в монтажной табл. 3.2.

Таблица 3.2

Монтажная таблица провода ВЛ

Температура, °С	Натяжение, Н	Стрела провеса, м			
		$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
$t_{\min}$	.....	...	...	...	...
.....	.....	...	...	...	...
$t_{\max}$	.....	...	...	...	...

### 3.8. Пример решения

Исходные данные:

Провод ВЛ: А-150;

длины и количество пролетов:  $L_1 = 80$  м (8 шт.),  $L_2 = 70$  м (8 шт.),  
 $L_3 = 60$  м (4 шт.),  $L_4 = 50$  м (5 шт.);

климатическая зона: IV<sub>a</sub> (минимальная и максимальная температура с повторяемостью раз в 10 лет соответственно  $t_{\min} = -25$  °С,  $t_{\max} = 43$  °С);

приведенные нагрузки на провод ВЛ (определяются по формулам, приведенным в разделе 2):  $g_{\text{вл}} = 4,09$  Н/м,  $q_{\text{вл}} = 6,97$  Н/м,  $q_{\text{влг}} = 16,02$  Н/м.

Найдем длину эквивалентного пролета по формуле (3.1)

$$L_3 = \sqrt{\frac{80^3 \cdot 8 + 70^3 \cdot 8 + 60^3 \cdot 4 + 60^3 \cdot 4 + 50^3 \cdot 5}{80 \cdot 8 + 70 \cdot 8 + 60 \cdot 4 + 50 \cdot 5}} = 70,2 \text{ м.}$$

Определим длину критического пролета  $L_{\text{кр}}$  по формуле (3.2). Для провода А-150 коэффициент запаса  $k_3 = 2$  (см. табл. 3.1). Для многопроволочных проводов коэффициент запаса необходимо увеличить на 10 %. Температурный коэффициент линейного расширения материала провода  $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}$  С<sup>-1</sup>.

$$H_{\text{дп}} = \frac{147 \cdot 10^6 \cdot 148 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,1} = 9889,1 \text{ Н,}$$

$$L_{\text{кр}} = 9889,1 \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} (-5 - (-25))}{16,02^2 - 4,09^2}} = 67,08 \text{ м.}$$

Выбор исходного расчетного режима.

$$L_3 > L_{кр} (70,2 > 67,8 \text{ м}),$$

следовательно, расчетный режим – режим гололеда с ветром.

Зависимость натяжения провода от температуры находится по уравнению (3.3), где  $t_1 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  (температура гололедообразования),  $H_1 = H_{дп}$ ,  $q_1 = q_{вл}$ ,  $q_x = g_{вл}$ .

Найдем натяжение провода ВЛ при минимальной температуре заданной климатической зоны  $t_{\min} = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Воспользуемся для этого методом линейной интерполяции, приведенным в пункте 3.5. В результате получим значение  $H_x = 9514,86 \text{ Н}$ . Подстановка этого значения в формулу (3.3) дает тождество

$$t_x = \left[ -5 - \frac{70,2^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \\ + \frac{70,2^2 \cdot 4,09^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9514,86^2} - \frac{9514,86}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -25,00 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Уменьшая величину  $H_x$ , выполняем аналогичные вычисления. В результате получаем соответствующие значения  $t_x$ .

Вычислим точку гололеда  $T_{г}$ , при этом  $q_x = q_{вл} = 16,02 \text{ Н/м}$ , а  $t_x$  должно быть равно температуре гололедообразования  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ . В результате расчетов получаем  $H_x = 9888,13 \text{ Н}$ .

$$t_x = \left[ -5 - \frac{70,2^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \\ + \frac{70,2^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,13^2} - \frac{9889,13}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -5,0 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вычислим точку ветра  $T_B$ , при этом,  $q_x = q_{вл} = 6,97$  Н/м, а  $t_x$  должно быть равно  $-5$  °С (температура максимального ветра). В результате расчетов получаем  $H_x = 5682,29$  Н.

$$t_x = \left[ -5 - \frac{70,2^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \frac{70,2^2 \cdot 6,97^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 5682,29^2} - \frac{5682,29}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -5,0 \text{ °С.}$$

Найдем стрелы провеса  $f_i$  для всех заданных длин пролетов  $L_i$  при минимальной температуре по формуле (3.5), где  $q_x = g_{вл}$ ,  $H_x = 9514,86$  Н.

$$f_{x_1} = \frac{4,09 \cdot 80^2}{8 \cdot 9514,86} = 0,344 \text{ м,}$$

$$f_{x_2} = \frac{4,09 \cdot 70^2}{8 \cdot 9514,86} = 0,263 \text{ м,}$$

$$f_{x_3} = \frac{4,09 \cdot 60^2}{8 \cdot 9514,86} = 0,193 \text{ м,}$$

$$f_{x_4} = \frac{4,09 \cdot 50^2}{8 \cdot 9514,86} = 0,134 \text{ м.}$$

Выполняя аналогичные вычисления, найдем  $f_{xi}$  на всем диапазоне температур для каждого значения  $H_x$  и занесем их в табл. 3.3, построим зависимость натяжения (рис. 3.1) и стрел провеса (рис. 3.2) провода ВЛ от температуры.

## Монтажная таблица для провода ВЛ

$t_x, ^\circ\text{C}$	$H_x, \text{H}$	$f_{x1}, \text{M}$ ( $L_1 = 80\text{M}$ )	$f_{x2}, \text{M}$ ( $L_2 = 70\text{M}$ )	$f_{x3}, \text{M}$ ( $L_3 = 60\text{M}$ )	$f_{x4}, \text{M}$ ( $L_4 = 50\text{M}$ )
-25	9514,86	0,344	0,263	0,193	0,134
-15	7607,07	0,430	0,392	0,242	0,168
-5	5871,75	0,557	0,427	0,313	0,218
5	4446,12	0,736	0,563	0,414	0,287
15	3540,63	0,955	0,731	0,537	0,373
25	2763,64	1,148	0,906	0,666	0,462
35	2330,46	1,404	1,075	0,790	0,548
45	2034,24	1,608	1,231	0,905	0,628

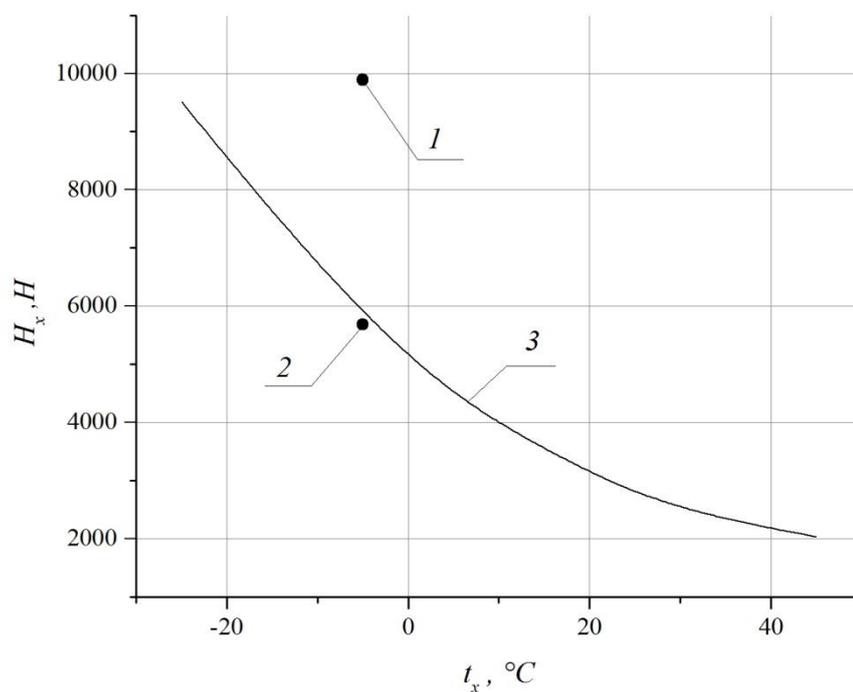


Рис. 3.1. Натяжение провода ВЛ с подвижными точками крепления: 1 – значение натяжения в режиме гололеда с ветром; 2 – значение натяжения в режиме максимального ветра; 3 – зависимость натяжения от температуры без дополнительных нагрузок

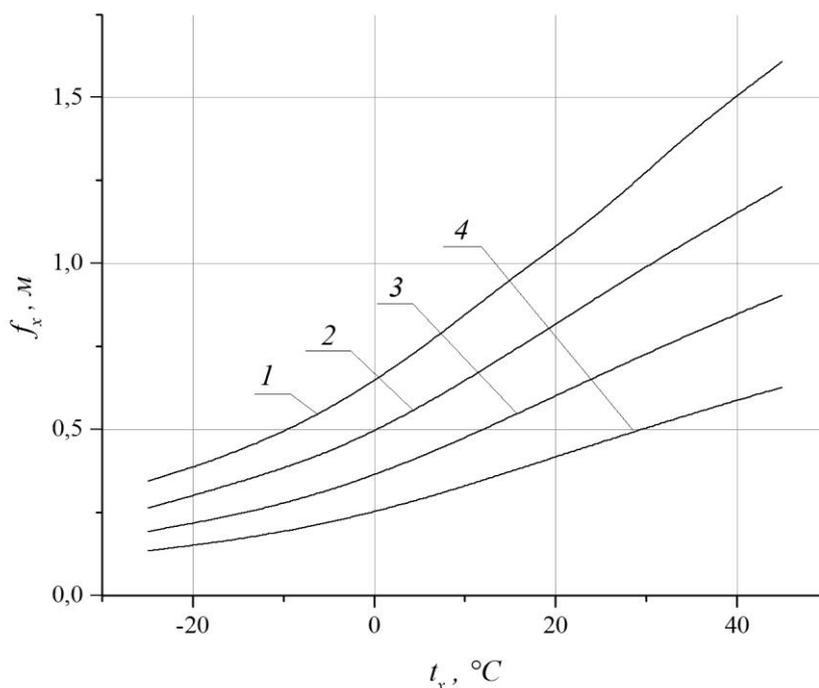


Рис. 3.2. Стрелы провеса провода ВЛ с подвижными точками крепления: 1 – длина пролета 80 м; 2 – длина пролета 70 м; 3 – длина пролета 60 м; 4 – длина пролета 50 м

#### 4. Механический расчет провода ВЛ с неподвижными точками подвеса

**Условие задачи:** необходимо рассчитать монтажные кривые для анкерного участка ЛЭП с неподвижными (жестко фиксированными) точками подвеса. Исходные данные для расчетов те же, что в п. 3.

##### 4.1. Выбор исходного расчетного режима

При определении сходного режима возможны три варианта.

Вариант А: если все пролеты меньше критического, то исходным будет режим минимальной температуры. При этом расчет надо вести по наименьшему пролету.

Вариант Б. Если все пролеты больше критического, то за исходный режим надо взять режим гололеда. Расчетный пролет выбирается в зависимости от

температуры, при которой будет производиться монтаж. Если температура монтажа меньше критической, то расчетным будет максимальный пролетом, в противном случае – минимальный. Поскольку заранее температура монтажа неизвестна, то необходимо провести две серии расчетов для максимального и минимального пролетов.

Вариант В. Если наибольший пролет больше критического, а наименьший меньше его, то необходимо вести расчет как для того, так и для другого пролета и при составлении монтажных таблиц выбрать для одной и той же температуры наименьшее из полученных значений. Исходный расчетный режим определяется по соотношению длин расчетного и критического пролетов.

#### **4.2. Зависимость натяжения провода от температуры**

Значение натяжения проводов находится для определенных в п. 4.1 расчетных пролетов и исходных режимов по формуле (3.3). По графикам  $H(t)$  с шагом в  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  строятся монтажные таблицы.

#### **4.3. Натяжение провода в режиме гололеда с ветром и ветра максимальной интенсивности**

Расчет натяжения провода в режиме гололеда с ветром  $H_{\Gamma}$  и ветра максимальной интенсивности  $H_{\text{В}}$  проводятся в соответствии с п.п. 3.4, 3.5.

#### **4.4. Пример решения**

Длина критического пролета определена в третьем разделе  $L_{\text{кр}} = 67,08\text{ м}$ .

Наибольший пролет больше критического  $L_{\text{max}} > L_{\text{кр}}$  ( $80 > 67,8\text{ м}$ ), а наименьший меньше  $L_{\text{min}} < L_{\text{кр}}$  ( $50 < 67,08\text{ м}$ ), следовательно, расчет ведем по двум пролетам:

для  $L_{\text{max}}$  – режим гололед с ветром,

для  $L_{\text{min}}$  – режим минимальных температур.

Расчет зависимости натяжения провода от температуры выполним по формуле (3.3).

Вариант А. Для  $L_{\max}$  (режим гололед с ветром):

$$t_1 = t_r = -5 \text{ }^\circ\text{C}, \quad q_1 = q_{\text{влг}} = 16,02 \text{ Н/м}, \quad H_1 = H_{\text{дп}} = 9889,1 \text{ Н},$$

$$L_3 = L_{\max} = 80 \text{ м}, \quad q_x = g_{\text{вл}} = 4,09 \text{ Н/м}.$$

В соответствии с п.п. 3.4 и 3.5 найдем натяжение провода ВЛ при минимальной температуре –  $H_x = 8289,48 \text{ Н}$  (здесь и далее полный расчет опущен).

$$t_x = \left[ -5 - \frac{80^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \\ + \frac{80^2 \cdot 4,09^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 8289,48} - \frac{8289,48}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -25,00 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Уменьшая величину  $H_x$  и выполняя аналогичные вычисления, рассчитаем остальные значения  $t_x$ .

Натяжение провода ВЛ в режиме «гололед с ветром» должно быть равно максимально допустимому значению, которое было определено в п. 3.8 –  $H_r = 9888,13 \text{ Н}$ , при этом  $t_x$  должно быть равно  $-5^\circ\text{C}$ .

$$t_x = \left[ -5 - \frac{80^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \\ + \frac{80^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,13^2} - \frac{9889,13}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -5,00 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В соответствии с п.п. 3.4 и 3.5 найдем натяжение провода ВЛ в режиме максимального ветра, при этом  $q_x = q_{вл} = 6,97$  Н/м,  $t_x$  должно быть равно  $-5$  C –  $H_B = 6390$  Н.

$$t_x = \left[ -5 - \frac{80^2 \cdot 16,02^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \frac{80^2 \cdot 6,97^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6390^2} - \frac{6390}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -5,00 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вариант Б. Для  $L_{\min}$  (режим минимальных температур)

$$t_1 = -25 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad q_1 = g_{вл} = 4,09 \text{ Н/м}, \quad H_1 = H_{дп} = 9889,1 \text{ Н},$$

$$L_3 = L_{\min} = 50 \text{ м}, \quad q_x = g_{вл} = 4,09 \text{ Н}.$$

В соответствии с п.п. 3.4 и 3.5 найдем натяжение провода ВЛ при минимальной температуре –  $H_x = 9889,11$  Н.

$$t_x = \left[ -25 - \frac{50^2 \cdot 4,09^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,1^2} + \frac{9889,1}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} \right] + \frac{50^2 \cdot 4,09^2}{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 9889,11} - \frac{9889,11}{23 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8 \cdot 10^9 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = -25,00 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Уменьшая величину  $H_x$  и выполняя аналогичные вычисления, рассчитаем остальные значения  $t_x$ .

Расчет стрел провеса в режиме «гололед с ветром» для всех заданных длин пролетов  $L_i$  выполняем по формуле (3.5). Определим стрелы провеса при минимальной температуре ( $t_x = -25$  °C,  $H_x = 8289,48$  Н,  $q_x = g = 4,09$  Н/м)

$$f_{x_1} = \frac{4,09 \cdot 80^2}{8 \cdot 8289,48} = 0,395 \text{ м}, \quad f_{x_2} = \frac{4,09 \cdot 70^2}{8 \cdot 8289,48} = 0,302 \text{ м},$$

$$f_{x_3} = \frac{4,09 \cdot 60^2}{8 \cdot 8289,48} = 0,222 \text{ м}, \quad f_{x_4} = \frac{4,09 \cdot 50^2}{8 \cdot 8289,48} = 0,154 \text{ м}.$$

Выполняя аналогичные вычисления, найдем  $f_i$  для каждого значения  $H_x$ .  
Результаты расчетов сведем в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Монтажная таблица для провода ЛЭП

$t_x, ^\circ\text{C}$	$H_x, \text{Н}$ (режим «гололед с ветером»)	$H_x, \text{Н}$ (без дополнительных нагрузок)	$f_{x1}, \text{м}$ ( $L_1 = 80$ )	$f_{x2}, \text{м}$ ( $L_2 = 70$ )	$f_{x3}, \text{м}$ ( $L_3 = 60$ )	$f_{x4}, \text{м}$ ( $L_4 = 50$ )
1	2	3	4	5	6	7
-25	8289,48	9889,11	0,395	0,302	0,222	0,154
-15	6544,62	7879,20	0,500	0,383	0,281	0,195
-5	5073,53	5966,56	0,645	0,494	0,363	0,252
5	3971,48	4283,72	0,824	0,631	0,463	0,322
15	3219,96	3038,25	1,077	0,825	0,606	0,421
25	2714,51	2278,29	1,436	1,100	0,808	0,561
35	2365,47	1835,39	1,783	1,365	1,003	0,696
45	2112,53	1558,89	2,099	1,607	1,181	0,820

Для наглядности табличные данные представим в виде графиков (рис. 4.1 и 4.2)

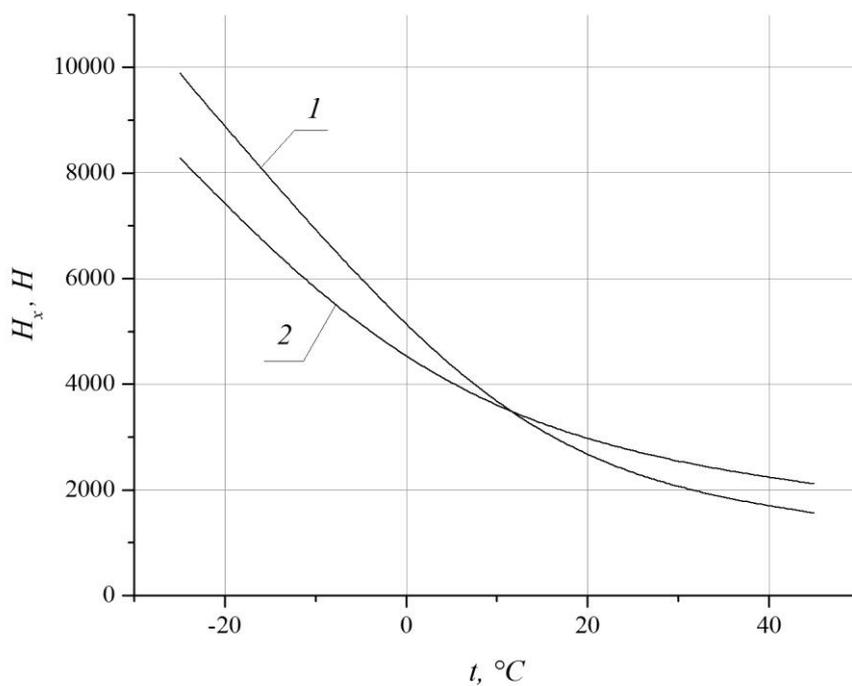


Рис. 4.1. Натяжение провода ВЛ с неподвижными точками крепления: 1 – натяжение без дополнительных нагрузок; 2 – натяжение в режиме гололеда с ветром

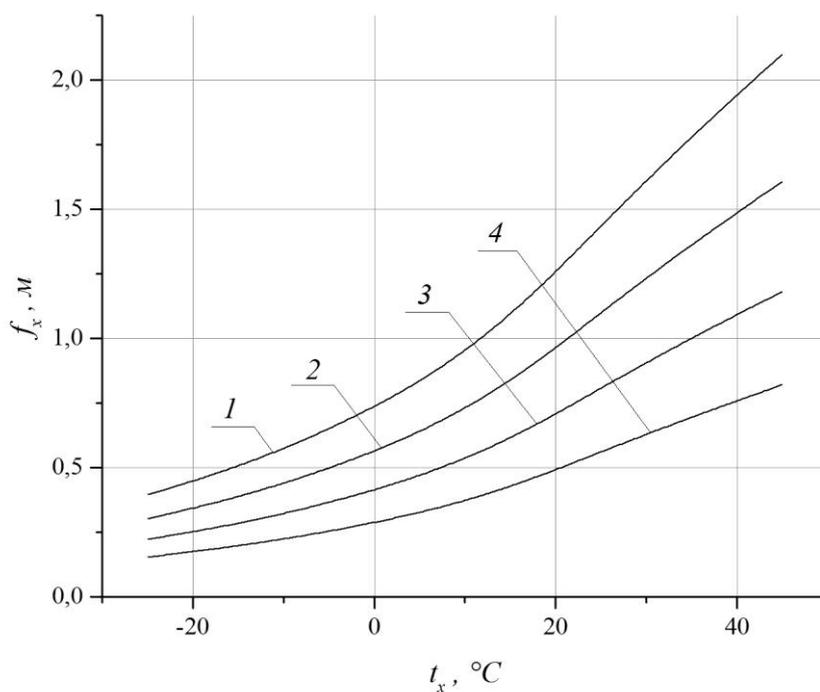


Рис. 4.2. Стрелы провеса провода ВЛ с неподвижными точками крепления: 1 – длина пролета 80 м; 2 – длина пролета 70 м; 3 – длина пролета 60 м; 4 – длина пролета 50 м

## 5. Допустимая длина пролета цепной подвески

**Цепная контактная подвеска** – система проводов контактный провод и несущий трос, соединенных между собой струнами.

**Эквивалентная нагрузка** – это такая равномерно распределенная по длине всего пролета удельная нагрузка, которая вызывает такое же горизонтальное отклонение контактного провода, как и сосредоточенные нагрузки, передающиеся через струны в средней части пролета с контактного провода на несущий трос (или наоборот) при ветровом отклонении проводов.

В токосъеме участвует контактный провод. Несущий трос выполняет две основные функции:

- служит опорной конструкцией для контактного провода;
- увеличивает сечение контактной подвески.

Упрощенная схема цепной контактной подвески приведена на рис. 5.1.

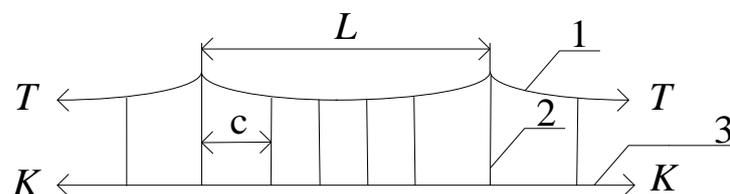


Рис. 5.1. Цепная контактная подвеска: 1 – несущий трос; 2 – струна; 3 – контактный провод; c – расстояние между струнами; T – сила натяжения несущего троса; K – сила натяжения контактного провода; L – длина пролета

**Условие задачи:** необходимо рассчитать допустимые длины пролетов цепной подвески для прямого участка пути и для кривых с заданными радиусами. Исходные данные для расчетов те же, что в п. 2.

Определение допустимой длины пролета цепной подвески  $L_{\max}$  имеет одну особенность. Для ее расчета по формулам (5.1) и (5.3) необходимо знать значение эквивалентной нагрузки  $p_3$ , в свою очередь для определения  $p_3$

(формула 5.5) требуется рассчитать  $L_{\max}$ . Налицо рекурсия. Поэтому в расчетах применяется метод последовательных приближений, при помощи его можно получить значение  $L_{\max}$  с заданной точностью.

В первом приближении  $p_э$  принимается равной нулю и определяется  $L_{\max}$  по формуле (5.1) или (5.3). Полученное значение  $L_{\max}$  подставляется в формулу (5.5) для определения  $p_э$ . Для определения  $L_{\max}$  во втором приближении полученное значение  $p_э$  подставляется в формулу (5.1) или (5.3). Аналогично можно получить следующие приближения максимально допустимой длины пролета. Как только разница между значениями  $L_{\max}$  на текущем и предыдущем шагах итерации по модулю станет меньше требуемой точности (примем ее 2 м), расчет останавливают и принимают за допустимую длину значение, полученное на последнем шаге итерации. Обычно требуется не более трех итераций. Значение  $L_{\max}$  округляют до целого в меньшую сторону.

### **5.1. Максимальная допустимая длина пролета на прямом участке пути**

Максимальная допустимая длина пролета на прямом участке пути по условию ветроустойчивости определяется по формуле

$$L_{\max} = 2\sqrt{KB_{\text{пр}} / (p_k - p_э)}, \quad (5.1)$$

где  $K$  – натяжение контактного провода (при двух проводах – удвоенное натяжение), Н;

$p_k$  – ветровая нагрузка на контактный провод, Н/м;

$p_э$  – эквивалентная нагрузка, Н/м;

$B_{\text{пр}}$  – допустимое отклонение контактного провода на прямом участке пути от оси пути с учетом зигзага и прогиба опоры под действием ветра.

$$B_{\text{пр}} = b_{\text{кдп}} - (a_1 \pm a_2) / 2 - \gamma_{\text{к}} + \sqrt{(b_{\text{кдп}} - (a_1 \pm a_2) / 2 - \gamma_{\text{к}})^2 - a}, \quad (5.2)$$

где  $b_{\text{кдп}}$  – допустимое отклонение контактного провода от оси пути, на прямом участке  $b_{\text{кдп}} = 0,5$  м, на кривом – 0,45 м;

$a_1, a_2$  – зигзаги контактного провода по краям пролета с учетом знака (как правило, на прямом участке  $a_1 = a_2 = 0,3$  м, на кривом – 0,4 м);

$\gamma_{\text{к}}$  – прогиб опоры под действием ветра на уровне контактного провода, м.

## 5.2. Максимальная допустимая длина пролета на кривом участке пути

Максимальная допустимая длина пролета на кривом участке пути по условию ветроустойчивости определяется по формуле

$$L_{\text{max}} = 2\sqrt{2KB_{\text{кр}} / (p_{\text{к}} - p_{\text{э}} + K / R)}, \quad (5.3)$$

где  $R$  – радиус кривой, м.

$B_{\text{кр}}$  – допустимое отклонение контактного провода на кривом участке пути от оси пути с учетом зигзага и прогиба опоры под действием ветра.

$$B_{\text{кр}} = b_{\text{кдп}} - \gamma_{\text{к}} + a. \quad (5.4)$$

Эквивалентная нагрузка  $p_{\text{э}}$ , определяется по формуле

$$p_{\text{э}} = \frac{p_{\text{к}}T_{\text{в}} - p_{\text{н}}K - 8KT_{\text{в}}(h_{\text{н}}p_{\text{н}} / q_{\text{н}} + \gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{к}}) / L^2}{T_{\text{в}} + K + 10,6l_{\text{ср}}KT_{\text{в}} / (g_k L^2)}, \quad (5.5)$$

где  $L$  – длина пролета, м;

$h_{и}$  – длина изоляционного узла (гирлянды изоляторов): на участках постоянного тока  $h_{и} = 0,56$  м (два изолятора); на участках переменного тока –  $0,73$  м (три изолятора); при использовании изолированных консолей –  $0,16$  м;

$\gamma$  – прогиб опоры от ветра на уровне несущего троса, м;

$l_{ср}$  – длина струны в середине пролета, при заданной конструктивной высоте цепной подвески  $h_0$ , м;

$T_{в}$  – натяжение несущего троса в режиме ветра (принять  $0,8 T_{доп}$ ), Н.

$$l_{ср} = h_0 - 0,115gL^2 / T_0, \text{ м.} \quad (5.6)$$

Конструктивная высота подвески  $h_0$  при двух контактных проводах принимается  $2$  м, при одном –  $1,8$  м.

Отрицательное значение  $l_{ср}$  означает, что в средней части пролета он опускается ниже контактного провода. Для корректного решения необходимо сократить пролет.

### 5.3. Пример решения

Максимальная допустимая длина пролета  $L_{max}$  на прямом участке пути определяется по формуле (5.1),  $B_{пр}$  по формуле (5.2). Эквивалентную нагрузку  $p_э$  при первом расчете принимаем равной нулю.

$$B_{пр} = 0,5 - 0,010 + \sqrt{(0,5 - 0,010)^2 - 0,3^2} = 0,877 \text{ м,}$$

$$L_{max} = 2\sqrt{\frac{8,3 \cdot 10^3 \cdot 0,877}{4,197 - 0}} = 83,29 \text{ м.}$$

Зная длину допустимую длину пролета в первом приближении, мы можем определить соответствующую эквивалентную нагрузку  $p_э$  по формуле (5.5) с

учетом того, что  $T_b = 0,8 \cdot T_{дп} = 12560 \text{ Н}$ . Для этого предварительно найдем  $l_{cp}$  по формуле (5.6)

$$l_{cp} = 1,8 - \frac{0,115 \cdot 14,39 \cdot 83,29^2}{12602,85} = 0,889 \text{ м},$$

$$p_3 = \frac{4,197 \cdot 12560 - 4,09 \cdot 8,3 \cdot 10^3 - 8 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 12560 \left( \frac{0,73 \cdot 4,09}{14,96} + 0,01 - 0,015 \right)}{12560 + 8,3 \cdot 10^3 + \frac{10,6 \cdot 0,889 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 12560}{7,42 \cdot 8,29^2}} = -0,116 \text{ Н/м}.$$

Подставив полученное значение  $p_3$  в формулу (5.1), получим уточненное значение максимально допустимой длины пролета

$$L'_{max} = 2 \sqrt{\frac{8,3 \cdot 10^3 \cdot 0,877}{4,197 - (-0,116)}} = 82,16 \text{ м}.$$

Полученные значения  $L_{max}$  и  $L'_{max}$  различаются менее чем на два метра, поэтому можно принять за допустимую длину пролета по условию ветроустойчивости последнее значение 82,16 м. Но длина пролета по условиям качественного токосъема не должна превышать 70 м, поэтому принимаем максимально допустимую длину пролета на данном участке – 70 м.

На кривом участке пути максимальная допустимая длина пролета  $L_{max}$  определяется по формуле (5.3). Предварительно найдем  $B_{кр}$  по формуле (5.4)

$$B_{кр} = 0,45 - 0,01 + 0,45 = 0,89 \text{ м}.$$

Найдем допустимую длину пролета на кривой радиусом  $R_1 = 500 \text{ м}$

$$L_{\max R1} = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 0,89}{4,197 - 0 + \frac{8,3 \cdot 10^3}{500}}} = 53,31 \text{ м,}$$

$$p_3 = \frac{4,197 \cdot 12560 - 4,09 \cdot 8,3 \cdot 10^3 - 8 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 12560 \cdot \left( \frac{0,73 \cdot 4,09}{14,96} + 0,01 - 0,015 \right)}{12560 + 8,3 \cdot 10^3 + \frac{10,6 \cdot 0,889 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 12560}{7,42 \cdot 53,31^2}} = -0,571 \text{ Н/м,}$$

$$L'_{\max R1} = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 0,89}{4,197 - (-0,571) + \frac{8,3 \cdot 10^3}{500}}} = 52,59 \text{ м.}$$

Так как  $|L_{\max R1} - L'_{\max R1}| < 2$  м, принимаем допустимую длину пролета 52 м.

Найдем допустимую длину пролета на кривой радиусом  $R_2 = 800$  м

$$L_{\max R2} = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 0,89}{4,197 - 0 + \frac{8,3 \cdot 10^3}{800}}} = 63,68 \text{ м,}$$

$$p_3 = \frac{4,197 \cdot 12560 - 4,09 \cdot 8,3 \cdot 10^3 - 8 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 12560 \cdot \left( \frac{0,73 \cdot 4,09}{14,96} + 0,01 - 0,015 \right)}{12560 + 8,3 \cdot 10^3 + \frac{10,6 \cdot 0,889 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 12560}{7,42 \cdot 63,68^2}} = -0,399 \text{ Н/м,}$$

$$L'_{\max R2} = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 0,89}{4,197 - (-0,399) + \frac{8,3 \cdot 10^3}{800}}} = 62,83 \text{ м.}$$

Так как  $|L_{\max R2} - L'_{\max R2}| < 2$  м, принимаем допустимую длину пролета 62 м.

## **6. Механический расчет анкерного участка полукомпенсированной цепной подвески**

*Компенсированная цепная подвеска* – цепная подвеска, в которой несущий трос и контактный провод анкеруется через устройства автоматической компенсации температурных удлинений проводов.

*Полукомпенсированная цепная подвеска* – цепная подвеска, в которой контактный провод анкеруется через устройство автоматической компенсации температурных удлинений провода, несущий же трос анкеруется непосредственно на анкерную опору.

*Температура беспровесного положения контактного провода* – температура окружающего воздуха, при которой контактный провод цепной контактной подвески в точках крепления поддерживающих струн находится по всей длине пролета на одной высоте от уровня головки рельса.

**Условие задачи:** необходимо рассчитать и построить монтажные кривые и монтажные таблицы для заданного анкерного участка. Исходные данные для расчетов те же, что и в предыдущих задачах.

### **6.1. Эквивалентный пролет**

Длину эквивалентного пролета находят по формуле (3.1).

### **6.2. Критический пролет**

Длина критического пролета для цепной подвески находится по формуле

$$L_{\text{кр}} = z_{\text{max}} \sqrt{\frac{24\alpha_{\text{H}}(t_{\text{r}} - t_{\text{min}})}{w_{\text{r}}^2 - w_{\text{tmin}}^2}}, \quad (6.1)$$

где  $z_{\max}$  – максимальное приведенное натяжение цепной контактной подвески, Н;

$w_{\Gamma}$  и  $w_{\min}$  – приведенные линейные нагрузки на подвеску, при гололеде с ветром и при минимальной температуре соответственно, Н/м;

$\alpha_{\text{н}}$  – температурный коэффициент линейного расширения материала несущего троса,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Приведенное натяжение цепной контактной подвески в режиме «х» определяется по формуле

$$z_x = T_x + \varphi_x K. \quad (6.2)$$

Приведенное натяжение цепной контактной подвески в режиме «х» определяется по формуле

$$w_x = q_x [1 + g \varphi_x K / (g_x T_x)], \quad (6.3)$$

где  $q_x$  и  $g_x$  – соответственно, результирующая и вертикальная нагрузки на несущий трос в режиме «х», Н/м;

$\varphi_x$  – конструктивный коэффициент цепной контактной подвески, определяется по формуле (6.4).

$$\varphi_x = \lambda / [1 + (1 - \lambda) K / T_x]. \quad (6.4)$$

$$\lambda = (L - 2c)^2 / L^2, \quad (6.5)$$

где  $c$  – расстояние от оси опоры до первой простой струны ( $c = 8 \dots 10$  м).

$L$  можно принять равной  $L_0$ .

### 6.3. Температура беспровесного положения контактного провода

Температуру беспровесного положения контактного провода  $t_0$  принимают кратной  $5^\circ\text{C}$ , при скоростях движения до  $120\text{ км/ч}$

$$t_0 = t_{\text{cp}} - t', \quad (6.6)$$

где  $t_{\text{cp}}$  – среднегодовая температура климатического района,  $^\circ\text{C}$ ;

$t'$  – коррекция на отжатие контактного провода токоприемником в середине пролета, при одиночном контактном проводе  $t' = 20 \dots 25$ , при двойном –  $15 \dots 20^\circ\text{C}$ .

### 6.4. Натяжение несущего троса при беспровесном положении контактного провода

Натяжение несущего троса при беспровесном положении контактного провода определяется при условии, когда  $\varphi = 0$  (для рессорных подвесок), по формуле

$$t_0 = A_1 + B_0 / T_0^2 - T_0 / (\alpha_n E_n S_n), \quad (6.7)$$

где  $A_1 = t_1 - q_1^2 L_9^2 / (24 \alpha_n T_{\text{max}}^2) + T_{\text{max}} / (\alpha_n E_n S_n)$ ;

$$B_0 = q_0^2 L_9^2 / 24 \alpha_n.$$

Здесь величины с индексом «1» относятся к режиму максимального натяжения несущего троса, а с индексом «0» – к режиму беспровесного положения контактного провода. Индекс «n» относится к материалу несущего троса.

Задаваясь несколькими значениями  $T_0$  начиная с  $T_0 = 0,8T_{\text{доп}}$ , и воспользовавшись линейной интерполяцией, определяют значение натяжения, которое точно соответствует ранее выбранной температуре  $t_0$ .

### 6.5. Натяжение нагруженного несущего троса при изменении температуры

Натяжение нагруженного несущего троса при изменении температуры определяется для упрощенных расчетов по аналогичному (6.7) выражению

$$t_x = A_0 + B_x / T_x^2 - T_x / (\alpha_n E_n S_n), \quad (6.8)$$

где  $B_x = q_x^2 L_3^2 / (24\alpha_n)$ ;

$A_0$  – то же, что и выше.

Величина  $q_x$  – результирующая нагрузка на несущий трос, которая в данном случае принимается равной  $g_0$ . По этой кривой составляется монтажная таблица.

### 6.6. Стрела провеса несущего троса $F_{xi}$ в пролете $l_i$

Стрела пролета несущего троса определяется из выражения

$$F_{xi} = w_{xi} l_i^2 / (8z_{xi}), \quad (6.9)$$

где  $w_{xi} = q_x (1 + g\varphi_{xi} K / g_x T_0)$ , см. (6.3).

При отсутствии дополнительных нагрузок  $q = g_x = g$ , поэтому приведенная нагрузка в рассматриваемом случае

$$w_{xi} = g(1 + \varphi_{xi} K / T_0);$$

$$z_{xi} = T_x + \phi_{xi} K, \text{ см. (6.2);}$$

$$\phi_{xi} = \lambda / [1 + (1 - \lambda_i) K / T_x], \text{ см. (6.4);}$$

$$\lambda_i = (l_i - 2c_i)^2 / l_i^2, \text{ см. (6.5).}$$

### 6.7. Стрела провеса контактного провода

Стрела провеса контактного определяется по формуле

$$f_{xi} = \phi_{xi} (F_{xi} - F_{0i}), \quad (6.10)$$

где  $F_{0i} = gl_i^2 / (8T_0)$ . (6.11)

По результатам расчетов строят зависимости  $F_{xi}(t_x)$ ,  $f_{xi}(t_x)$  и составляют монтажные таблицы для этих значений.

### 6.8. Пример решения

Определим длину эквивалентного пролета

$$L_3 = \sqrt{\frac{70^3 \cdot 5 + 65^3 \cdot 5 + 60^3 \cdot 8 + 50^3 \cdot 4}{70 \cdot 5 + 65 \cdot 5 + 60 \cdot 8 + 50 \cdot 4}} = 62,64 \text{ м.}$$

Выберем максимально допустимое натяжения несущего троса и номинальное натяжения контактного провода по табл. А.11:  $T_{\max} = 15,7 \cdot 10^3 \text{ Н}$ ,  $K = 8,3 \cdot 10^3 \text{ Н}$ .

Для определения длины критического пролета найдем:

а) конструкционный коэффициент цепной подвески  $\phi$

$$\lambda = \frac{(62,64 - 2 \cdot 10)^2}{62,64^2} = 0,463 \text{ м,}$$

$$\text{тогда } \varphi = \frac{0,463}{1 + (1 - 0,463) \cdot 8,3 \cdot 10^3 / 15,7 \cdot 10^3} = 0,361;$$

б) максимальное приведенное натяжение подвески

$$z_{\max} = 15,7 \cdot 10^3 + 0,361 \cdot 8,3 \cdot 10^3 = 18696,3 \text{ Н;}$$

в) приведенную линейную нагрузку на подвеску при минимальной температуре.

$$w_{\min t} = 14,39 \left( 1 + \frac{0,361 \cdot 8,3 \cdot 10^3}{12560} \right) = 17,82 \text{ Н/м,}$$

где  $T_0 = 0,8 \cdot 15,7 \cdot 10^3 = 12560 \text{ Н}$  – натяжение несущего троса при беспровесном положении контактного провода.

$g = g_n + g_k + 1 = 5,97 + 7,42 + 1 = 14,39 \text{ Н/м}$  – вертикальная нагрузка на несущий трос от веса подвески без гололеда;

г) приведенную линейную нагрузку на подвеску при гололеде и ветре

$$w_r = q_{nr} \left( 1 + \frac{g\varphi K}{g_r T_0} \right),$$

где  $q_{nr} = 26,42 \text{ Н/м}$  – результирующая нагрузка на несущий трос в режиме «гололед с ветром»;

$$g_r = g_{гн} + g_{гк} = 9,16 + 3,37 = 12,53 \text{ Н/м},$$

тогда

$$w_r = 26,42 \cdot \left( 1 + \frac{14,39 \cdot 0,361 \cdot 8,3 \cdot 10^3}{12,53 \cdot 12560} \right) = 29,79 \text{ Н/м}.$$

Подставим полученные значения в формулу (6.1) для нахождения критического пролета

$$L_{кр} = 18696,3 \sqrt{\frac{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6} (-5 - (-25))}{33,66^2 - 17,82^2}} = 62,58 \text{ Н/м}.$$

$L_s > L_{кр}$  ( $62,64 > 62,58$  м), следовательно, расчетный режим – «гололед с ветром».

Температура беспровесного положения одного контактного провода  $t_0$  (формула 6.6)

$$t_0 = \frac{-25 + 43}{2} - 20,25 = -5 \text{ °С}.$$

Определим натяжения несущего троса при беспровесном положении контактного провода по формуле (6.7),

$$\text{где } A_1 = -5 - \frac{26,42^2 \cdot 62,64^2}{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6} (15,7 \cdot 10^3)^2} + \frac{15,7 \cdot 10^3}{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 171,7 \cdot 10^9 \cdot 72,2 \cdot 10^{-6}} = 55,412 \text{ °С},$$

$$B_0 = \frac{14,39^2 \cdot 62,64^2}{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6}} = 2545,44 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{H}^2.$$

Пусть  $T_0=12602,85$  Н, тогда

$$t_0 = 55,412 + \frac{2545,44 \cdot 10^6}{12602,85^2} - \frac{12602,85}{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 171,7 \cdot 10^9 \cdot 72,2 \cdot 10^{-6}} = -5,00 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Натяжение несущего троса при изменении температуры определяется по формуле (6.8),

$$\text{где } A_0 = -5 - \frac{14,39^2 \cdot 62,64^2}{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 12602,85^2} + \frac{12602,85}{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 171,17 \cdot 10^9 \cdot 72,2 \cdot 10^6} = 55,412 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$B_x = \frac{14,39^2 \cdot 62,64^2}{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6}} = 2545,44 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{H}^2.$$

Пусть  $T_x=15098,95$  Н,

тогда

$$t_x = 55,412 + \frac{2545,44 \cdot 10^6}{15098,95^2} - \frac{15098,95}{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 171,7 \cdot 10^9 \cdot 72,2 \cdot 10^{-6}} = -25,00 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Изменяя  $T_x$  и выполняя аналогичные вычисления, получим зависимость натяжения несущего троса от температуры (см. табл. 6.1 и рис. 6.1).

Зависимость  $T_x(t_x)$ 

$t_x, ^\circ\text{C}$	-25	-15	-5	5	15	25	35	45
$T_x, \text{H}$	15098,95	13809,91	12602,85	11490,47	10482,46	9499,80	8793,28	8105,18

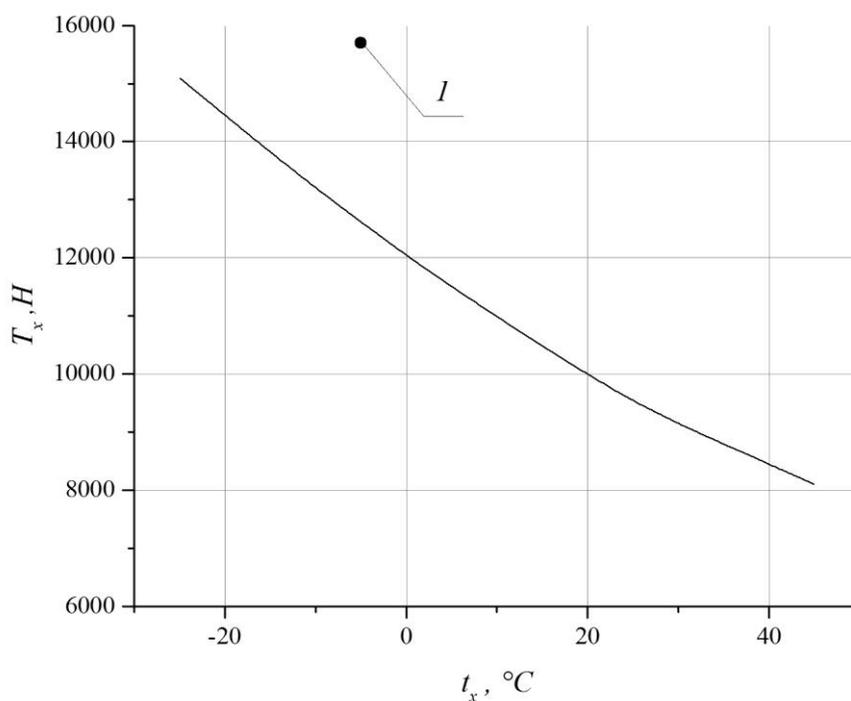


Рис. 6.1. Зависимость натяжения несущего троса от температуры:  $I$  – натяжение в режиме гололеда с ветром

Вычислим точку гололеда  $T_{\Gamma}$ , при этом  $t_x$  должно быть равно  $-5^{\circ}\text{C}$ .

$$B_x = \frac{26,42^2 \cdot 62,64^2}{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6}} = 8580,37 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{H}^2.$$

Пусть  $T_x = 15700 \text{ H}$ ,

тогда

$$t_x = 55,412 + \frac{8580,37 \cdot 10^6}{15700,00^2} - \frac{15700,00}{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 171,7 \cdot 10^9 \cdot 72,2 \cdot 10^{-6}} = -5,0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вычислим точку ветра  $T_B$ , при этом  $t_x$  должно быть равно  $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$$B_x = \frac{14,96^2 \cdot 62,64^2}{24 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6}} = 2751,08 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{H}^2.$$

Пусть  $T_x = 11652,41 \text{ H}$ ,

тогда

$$t_x = 55,412 + \frac{2751,08 \cdot 10^6}{11652,41^2} - \frac{11652,41}{13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 171,7 \cdot 10^9 \cdot 72,2 \cdot 10^{-6}} = -5,0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Стрелы провеса несущего троса  $F_{xi}$  в пролете  $L_i$  определяются по формуле (6.9). Приведем пример расчета при  $t_x = -25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_x = 15098,95 \text{ H}$ .

Конструктивные коэффициенты цепной подвески  $\varphi_i$  для всех длин пролетов найдем по формуле (6.4)

$$\lambda_1 = \frac{(70-20)^2}{70^2} = 0,51, \quad \lambda_2 = \frac{(65-20)^2}{65^2} = 0,479,$$

$$\lambda_3 = \frac{(60-20)^2}{60^2} = 0,44, \quad \lambda_4 = \frac{(50-20)^2}{50^2} = 0,36,$$

$$\varphi_{x1} = \frac{0,51}{1 + (1-0,51) \cdot 8,3 \cdot 10^3 / 15098,95} = 0,4,$$

$$\varphi_{x2} = \frac{0,479}{1 + (1 - 0,479) \cdot 8,3 \cdot 10^3 / 15098,95} = 0,37,$$

$$\varphi_{x3} = \frac{0,44}{1 + (1 - 0,44) \cdot 8,3 \cdot 10^3 / 15098,95} = 0,34,$$

$$\varphi_{x4} = \frac{0,36}{1 + (1 - 0,36) \cdot 8,3 \cdot 10^3 / 15098,95} = 0,266.$$

Максимальное приведенное натяжение подвески  $z_{xi}$  находим по формуле (6.2)

$$z_{x1} = 15098,95 + 0,4 \cdot 8,3 \cdot 10^3 = 18435,3 \text{ Н},$$

$$z_{x2} = 15098,95 + 0,37 \cdot 8,3 \cdot 10^3 = 18491,77 \text{ Н},$$

$$z_{x3} = 15098,95 + 0,34 \cdot 8,3 \cdot 10^3 = 17924,33 \text{ Н},$$

$$z_{x4} = 15098,95 + 0,266 \cdot 8,3 \cdot 10^3 = 17309,32 \text{ Н},$$

$$w_{x1} = 14,39 \left( 1 + \frac{0,4 \cdot 8,3 \cdot 10^3}{12602,85} \right) = 18,19 \text{ Н/м},$$

$$w_{x2} = 14,39 \left( 1 + \frac{0,37 \cdot 8,3 \cdot 10^3}{12602,85} \right) = 17,92 \text{ Н/м},$$

$$w_{x3} = 14,39 \left( 1 + \frac{0,34 \cdot 8,3 \cdot 10^3}{12602,85} \right) = 17,61 \text{ Н/м},$$

$$w_{x4} = 14,39 \left( 1 + \frac{0,266 \cdot 8,3 \cdot 10^3}{12602,85} \right) = 16,91 \text{ Н/м},$$

$$F_{x1} = \frac{18,19 \cdot 70^2}{8 \cdot 18435,3} = 0,6 \text{ м}, \quad F_{x2} = \frac{17,92 \cdot 65^2}{8 \cdot 18191,77} = 0,52 \text{ м},$$

$$F_{x3} = \frac{17,61 \cdot 60^2}{8 \cdot 17924,33} = 0,44 \text{ м}, \quad F_{x4} = \frac{16,91 \cdot 50^2}{8 \cdot 17309,32} = 0,3 \text{ м}.$$

Выполняя аналогичные вычисления, определим стрелы провеса несущего троса на всем диапазоне температур данного климатического района, результаты сведем в табл. 6.2 и построим соответствующие зависимости на рис. 6.2.

Таблица 6.2

Стрелы провеса несущего троса

$t_x, \text{ }^\circ\text{C}$	$F_{x1}, \text{ м}$ ( $L_1 = 70\text{м}$ )	$F_{x2}, \text{ м}$ ( $L_2 = 65\text{м}$ )	$F_{x3}, \text{ м}$ ( $L_3 = 60\text{м}$ )	$F_{x4}, \text{ м}$ ( $L_4 = 50\text{м}$ )
- 25	0,619	0,529	0,45	0,311
- 15	0,656	0,565	0,481	0,333
- 5	0,700	0,604	0,514	0,357
5	0,747	0,644	0,550	0,382
15	0,796	0,687	0,586	0,409
25	0,850	0,735	0,628	0,439
35	0,895	0,774	0,662	0,464
45	0,944	0,817	0,699	0,491

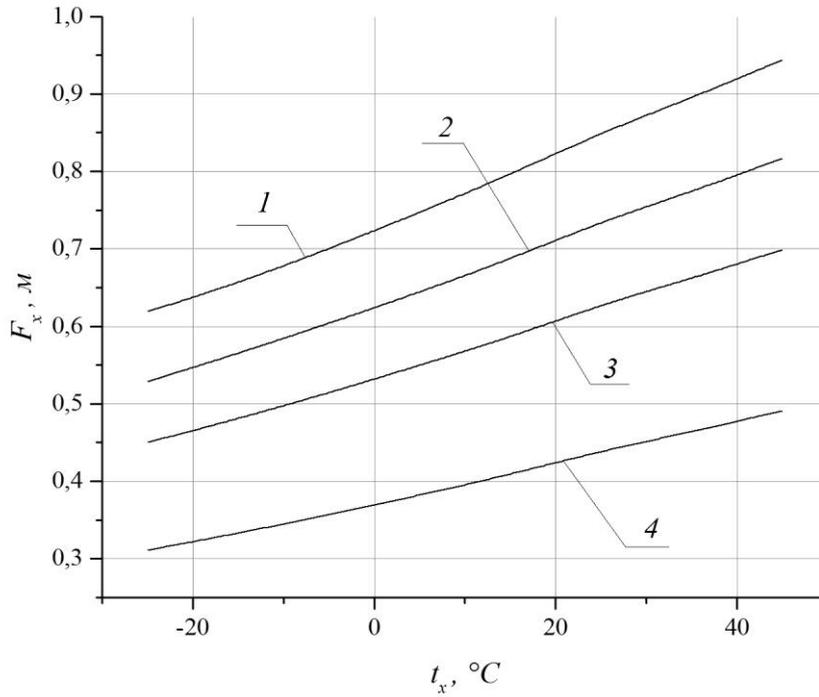


Рис. 6.2. Стрелы провеса несущего троса: 1 – длина пролета 70 м; 2 – длина пролета 65 м; 3 – длина пролета 60 м; 4 – длина пролета 50 м

Стрелы провеса контактного провода определим по формулам (6.10) и (6.11)

$$F_{01} = \frac{14,39 \cdot 70^2}{8 \cdot 12602,85} = 0,699 \text{ м}, \quad F_{02} = \frac{14,39 \cdot 65^2}{8 \cdot 12602,85} = 0,603 \text{ м},$$

$$F_{03} = \frac{14,39 \cdot 60^2}{8 \cdot 12602,85} = 0,514 \text{ м}, \quad F_{04} = \frac{14,39 \cdot 50^2}{8 \cdot 12602,85} = 0,357 \text{ м},$$

$$f_{x1} = 0,642 \cdot (0,619 - 0,699) = -0,051 \text{ м},$$

$$f_{x2} = 0,619 \cdot (0,529 - 0,603) = -0,046 \text{ м},$$

$$f_{x3} = 0,594 \cdot (0,45 - 0,514) = -0,038 \text{ м,}$$

$$f_{x4} = 0,534 \cdot (0,311 - 0,357) = -0,025 \text{ м.}$$

Результаты расчетов для всего диапазона температур сведем в табл. 6.3 и изобразим в виде графиков на рис. 6.3.

*Таблица 6.3*

Стрелы провеса контактного провода

$T_x, \text{°C}$	$f_{x1, \text{м}}$	$f_{x2, \text{м}}$	$f_{x3, \text{м}}$	$f_{x4, \text{м}}$
-25	-0,051	-0,046	-0,038	-0,025
-15	-0,028	-0,024	-0,020	-0,013
-5	0	0	0	0
5	0,027	0,023	0,019	0,012
15	0,055	0,048	0,040	0,025
25	0,085	0,074	0,062	0,039
35	0,109	0,095	0,079	0,050
45	0,134	0,118	0,097	0,062

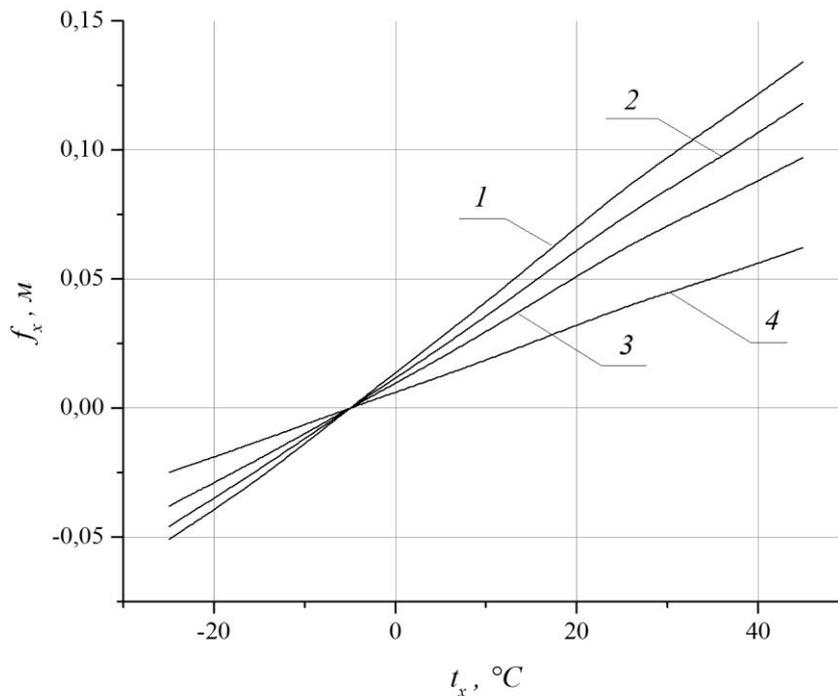


Рис. 6.3. Стрелы провеса контактного провода: 1 – длина пролета 70 м; 2 – длина пролета 65 м; 3 – длина пролета 60 м; 4 – длина пролета 50 м

## 7. Подбор типовой жесткой поперечины

**Условие задачи:** необходимо подобрать типовую жесткую поперечину по заданной схеме расположения путей.

### 7.1. Преобразование схемы расположения путей в расчетную нагрузочную схему

Схема расположения путей, перекрываемых жесткой поперечиной, приведена на рис. 7.1.

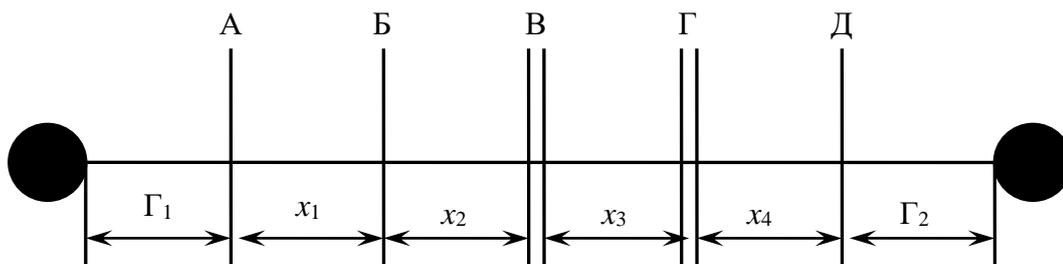


Рис. 7.1. Схема расположения путей:  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – габариты установки соответственно левой и правой опоры, м;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – междупутные расстояния, м; А, Б, Д – второстепенные станционные пути; В, Г – главные пути

Преобразуем схему расположения путей в расчетную нагрузочную схему (рис. 7.2).

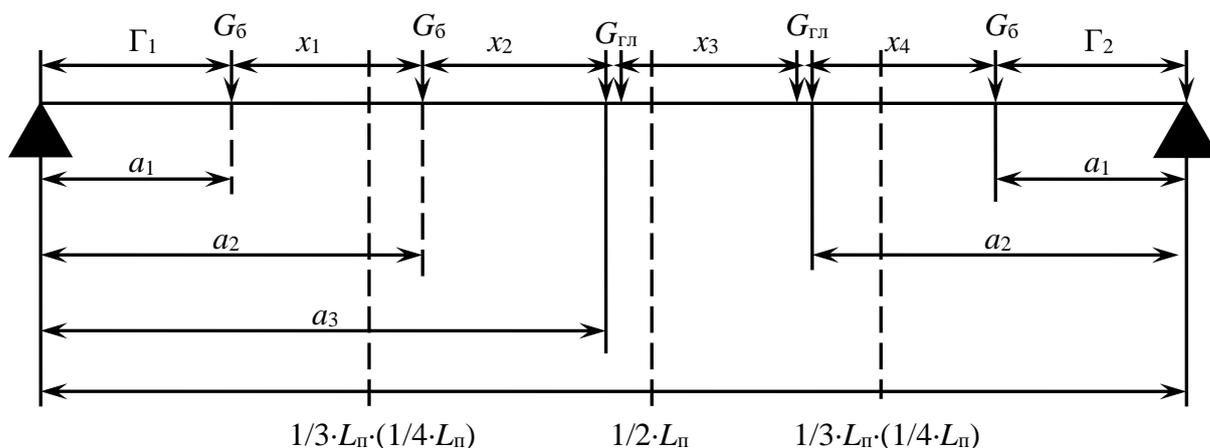


Рис. 7.2. Нагрузочная схема для расчета жесткой поперечины:  $a_j, a_i$  – плечи нагрузок до левой ( $i$ ) и правой ( $j$ ) опоры, м;  $G_6$  – вертикальная нагрузка на жесткую поперечину от бокового пути, Н;  $G_{гл}$  – вертикальная нагрузка на жесткую поперечину от главного пути, Н;  $L_{п}$  – длина жесткой поперечины, м

## 7.2. Вертикальные нагрузки от веса подвесок

Вертикальная нагрузка на жесткую поперечину по каждому типу путей рассчитывается в режиме без дополнительных нагрузок и в режиме гололеда.

Нагрузка от собственного веса подвески, расположенной слева ( $i$ ) и справа ( $j$ ) от расчетного сечения, считая от опор

$$G_i = g_i L_{\text{cp}} + G_{\text{T}}.$$

где  $L_{\text{cp}} = (L_1 + L_2)/2$  – средняя длина пролетов контактной подвески, прилегающих слева и справа к поперечине, м;

$G_{\text{T}}$  – нагрузка от веса конструкций в точке подвеса, Н.

Нагрузка  $G_{\text{T}}$  принимается равной 1270 Н для консольной стойки промежуточных опор, для переходных 2450 Н. От фиксаторной стойки при переменном токе 1030 Н у промежуточных опор и 2060 Н у переходных. На постоянном токе от фиксаторной стойки следует принимать соответственно 980 Н и 2110 Н. От фиксирующих тросов при переменном токе 410 Н у промежуточных опор и 830 Н у переходных опор. При постоянном токе соответственно 390 и 780 Н.

Нагрузка от веса гололеда на подвеске, расположенной слева ( $i$ ) и справа ( $j$ ) от расчетного сечения

$$G_{\text{r}}^i = g_{\text{r}} L_{\text{cp}},$$

где  $g_{\text{r}}$  – нагрузка от веса гололеда на контактной подвеске, Н/м.

### 7.3. Предварительный подбор поперечины

Необходимая длина жесткой поперечины находится по формуле, м

$$L'_{\text{п}} = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \sum_{i=1}^{n-1} x_i,$$

где  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – габариты установки опор, м;

$x_i$  – междупутные расстояния, м;

$n$  – количество путей.

Выбираем необходимый тип поперечины: П, ОП, ПС, ОПС, чтобы  $L'_n \leq L_n$ , где  $L_n$  – нормативная длина поперечины (табл. 8.4 и 8.5 [6]). Несущая способность поперечины для дальнейшего расчета принимается наименьшей. Количество блоков  $N_6$ .

Выбор нормативных нагрузок от веса одного метра поперечины и веса гололеда на ней  $g_n$  и  $g_{нг}$  принимаем по табл. 8.8. [6].

#### **7.4. Нагрузка на жесткую поперечину от ветра максимальной интенсивности**

Нагрузки на поперечину от ветра максимальной интенсивности  $P_p$  и от ветра при гололеде  $P_{pg}$  находятся по формулам

$$P_p = \gamma \cdot V_{max},$$

$$P_{pg} = \gamma \cdot (0.5 \cdot V_{max})^2,$$

$$V_{max} = k_v \cdot V_n,$$

где  $V_{max}$  – максимальная расчетная скорость ветра для данного района м/с;

$\gamma$  – коэффициент, определяемый в табл. 8.8. [6] в зависимости от типа жесткой поперечины.

#### **7.5. Изгибающие моменты, действующие на жесткую поперечину, от веса подвесок и гололеда**

Действующие изгибающие моменты от веса подвесок и гололеда

определяются в трех точках: в середине пролета жесткой поперечины (для проверки средних блоков); слева и справа на длине  $\frac{1}{3}L_n$  при трехблочных поперечинах или на расстояние  $\frac{1}{4}L_n$  при четырехблочных поперечинах от опор для проверки крайних блоков.

Изгибающие моменты от веса подвесок  $M(G)$  и от гололеда на подвесках  $M(G_r)$  определяем по формулам

$$M(G) = \left[ \alpha \sum_{i=1}^n G_i a_i + \beta \sum_{j=1}^m G_j a_j \right] 10^{-2},$$

$$M(G_r) = \left[ \alpha \sum_{i=1}^n G_{ri} a_i + \beta \sum_{j=1}^m G_{rj} a_j \right] 10^{-2},$$

где  $n, m$  – число нагрузок, расположенных слева и справа от расчетного сечения (нагрузку, попадающую в сечение, учитывают только один раз);

$G_i, G_j$  – нагрузки от веса подвесок, расположенных слева ( $i$ ) и справа ( $j$ ) от расчетного сечения, Н;

$G_{ri}, G_{rj}$  – то же от веса гололеда на проводах, Н;

$a_i, a_j$  – плечи нагрузок до левой ( $i$ ) и правой ( $j$ ) опоры, м;

$\alpha, \beta$  – коэффициенты плеч нагрузок, принимаемые в соответствии с табл. 7.1.

Для дальнейшего расчета принимают наибольшее из полученных значений моментов  $M(G)_{\max}$  и  $M(G_r)_{\max}$ . Если проверяемая жесткая поперечина с фиксирующим тросом, принимаем  $M_{\text{фс}} = 0$  – изгибающий момент от фиксаторных стоек и поворотных консолей.

Таблица коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ 

Коэффициент	В середине пролета	1/3 пролета		1/4 пролета	
		слева	справа	слева	справа
$\alpha$	0,5	0,67	0,33	0,75	0,25
$\beta$	0,5	0,33	0,67	0,25	0,75

### 7.6. Расчет изгибающих моментов от всех внешних сил

Расчет выполняется в трех режимах:

– два нормальных режима: гололед с ветром, при этом принимают скорость ветра  $0,5V_{\text{ном}}$  и режим ветра максимальной интенсивности;

– один аварийный режим – обрыв одного провода при гололеде без ветра.

Для нормальных режимов определяются расчетные моменты для верхнего пояса –  $M_{\text{вп}}^{\text{р}}$ .

Для аварийного режима рассчитывают нормативные моменты для нижнего пояса фермы  $M_{\text{нп}}^{\text{н}}$ .

Изгибающие моменты от внешних сил для середины пролета в аварийном режиме

$$M_{\text{нп}}^{\text{н}} = \left[ 0,125 \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot (g_{\text{п}} + g_{\text{пр}}) + 184 \cdot L_{\text{п}} \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + M(G) + M(G_{\text{r}});$$

в нормальном режиме при гололеде с ветром

$$M_{\text{вп}}^{\text{р}} = \left[ 0,125 \cdot L_{\text{п}} \cdot (g_{\text{п}} + g_{\text{пр}}) + 0,132 \cdot P_{\text{пр}} \cdot S_{\text{в}} \cdot L_{\text{п}} \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot M(G) + M(G_{\text{r}});$$

в нормальном режиме максимального ветра

$$M_{\text{нп}}^{\text{н}} = \left[ 0,138 \cdot L^2 \cdot g_{\text{п}} + 0,147 \cdot P_{\text{п}} \cdot S_{\text{в}} \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot M(G).$$

Изгибающие моменты от внешних сил на расстоянии  $\frac{1}{3}L_{\text{п}}$  от конца жесткой поперечины (трехблочные поперечины) в аварийном режиме

$$M_{\text{нп}}^{\text{н}} = \left[ 0,111 \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot (g_{\text{п}} + g_{\text{пр}}) + 164 \cdot L_{\text{п}} \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + IM(G) + M(G_{\text{г}});$$

в нормальном режиме гололеда с ветром

$$M_{\text{вп}}^{\text{п}} = \left[ 0,111 \cdot L_{\text{п}} \cdot (1,1 \cdot g_{\text{п}} + 1,17 \cdot g_{\text{пр}}) + 0,118 \cdot P_{\text{пр}} \cdot S_{\text{в}} \cdot L_{\text{п}} \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot M(G) + M(G_{\text{г}});$$

в нормальном режиме максимального ветра

$$M_{\text{нп}}^{\text{н}} = \left[ 0,122 \cdot L^2 \cdot g_{\text{п}} + 0,13 \cdot P_{\text{п}} \cdot S_{\text{в}} \cdot L_{\text{п}} \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot M(G).$$

Изгибающие моменты от внешних сил на расстоянии  $\frac{1}{4}L_{\text{п}}$  от конца жесткой поперечины (четырёхблочные поперечины) в аварийном режиме

$$M_{\text{нп}}^{\text{н}} = \left[ 0,0938 \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot (g_{\text{п}} + g_{\text{пр}}) + 138 \cdot L_{\text{п}} \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + M(G) + M(G_{\text{г}});$$

в нормальном режиме гололеда с ветром

$$M_{\text{вп}}^p = \left[ 0,0938 \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot (1,1 \cdot g_p + 1,17 \cdot g_{\text{рг}}) + 0,118 \cdot P_{\text{рг}} \cdot S_{\text{в}} \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot M(G) + 1,17 \cdot M(G_r);$$

в нормальном режиме ветра максимальной интенсивности

$$M_{\text{вп}}^p = \left[ 0,103 \cdot L^2 \cdot g_p + 0,119 \cdot P_p \cdot S_{\text{в}} \cdot L_{\text{п}}^2 \cdot \frac{h}{b} \right] \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot M(G),$$

где  $L_{\text{п}}$  – расчетная длина поперечины, м;

$S_{\text{в}}$  – коэффициент, учитывающий распределение давления ветра между нижним и верхним поясами поперечны, вследствие различной жесткости поясов (принимать по табл. 8.6 [6]).

$h$  и  $b$  – соответственно расчетные высота и ширина поперечины (отношение  $h/b$  для поперечин длиной до 29,1 м включительно равно 1,56, а для более длинных поперечин 1,62), м.

Для проверки жестких поперечин с устройствами освещения необходимо учитывать увеличение нагрузок  $g_p$ ,  $g_{\text{рг}}$ ,  $P_p$ ,  $P_{\text{рг}}$  (табл. 8.8 [6]).

Соответствующие максимальные изгибающие моменты от внешних сил сравнивают с условными допускаемыми моментами для средних и крайних блоков, приведенными в табл. 8.6 [6].

Если условные допускаемые моменты больше расчетных, то принятая к проверке жесткая поперечина удовлетворяет заданным условиям.

Если условия не выполняются, то из табл. 8.4 и 8.5 [6] выбирается поперечина с большей несущей способностью и расчет повторяется.

Описанная выше методика может быть использована для проверочных расчетов при изменении нагрузок на жесткую поперечину.

## **8. Определение динамических характеристик контактной подвески**

*Коэффициент отражения волны* – характеризует степень отражения поперечных механических волн, возникающих при движении токоприемника в контактной подвеске, от сосредоточенных масс (зажимов, фиксаторов) и от струн цепной контактной подвески. Коэффициент численно равен отношению амплитуд набегающей и отраженной волн.

**Условие задачи:** для заданных исходных данных требуется определить максимально допустимую скорость движения ЭПС по критерию качества токосъема и динамические параметры контактной подвески.

### **8.1. Расчет скорости распространения механической волны в контактной подвеске**

При движении токоприемник, воздействуя на контактный провод, создает механические волны, которые распространяются от него в обоих направлениях со скоростью  $c$ . Приближение скорости движения токоприемника к скорости распространения волн сопровождается явлением резонанса (токоприемник «догоняет» волну), при котором отжатие контактного провода неограниченно возрастает (в математически идеализированной постановке задачи).

Скорость распространения волны накладывает ограничение на возможную скорость движения ЭПС. Конструктивные параметры контактной подвески (прежде всего распределенная масса и натяжение КП) должны быть выбраны таким образом, чтобы скорость распространения волны намного превышала заданную максимальную скорость движения. Скорость движения ЭПС не должна быть больше 0,5–0,7 от скорости распространения волны в контактном проводе.

Скорость распространения поперечной волны вдоль контактного провода

$$c = \sqrt{\frac{K}{m_k}}, \quad (8.1)$$

где  $m_k$  – погонная масса контактного провода, кг/м.

## 8.2. Расчет коэффициента отражения

Волны, создаваемые движущимся токоприемником и распространяющиеся по контактному проводу, частично отражаются от сосредоточенных масс на контактном проводе (зажимов, фиксаторов) и от струн цепной контактной подвески. При этом образуются вторичные волны, распространяющиеся в противоположном направлении, которые изменяют динамические усилия между токоприемником и контактной подвеской. Это приводит к ухудшению качества токосъема.

Коэффициент отражения

$$r = \frac{\sqrt{Tm_n}}{\sqrt{Tm_n} + \sqrt{Km_k}}, \quad (8.2)$$

где  $m_n$  – погонная масса несущего троса, кг/м.

## 8.3. Расчет коэффициента Доплера

Относительно движущегося со скоростью  $v$  токоприемника волны в направлении его движения распространяются со скоростью  $c - v$ , а отраженные волны «приходят» со скоростью  $c + v$ . Коэффициентом Доплера  $\alpha$  называется отношение

$$\alpha = \frac{c - v}{c + v}. \quad (8.3)$$

#### 8.4. Расчет коэффициента усиления

Волны, создаваемые движущимся токоприемником в направлении его движения, распространяются по контактному проводу и отражаются от струн цепной контактной подвески с коэффициентом отражения  $r$ , а потом снова встречаются с движущимся токоприемником и еще раз отражаются от него, получая при этом от движущегося токоприемника дополнительную энергию. Далее эти волны снова отражаются от струн, снова «бегут обратно» к токоприемнику, и этот процесс многократно повторяется. Если токоприемник сообщает этим волнам достаточную энергию, которая превышает их «потери» при отражении от струн, в этом процессе происходит усиление амплитуды волн. Коэффициент

$$X = \frac{r}{\alpha} \quad (8.4)$$

называется коэффициентом усиления. Если он меньше единицы, в описанном процессе многократного отражения волн, их амплитуда затухает. Если он больше единицы, в этом процессе происходит усиление амплитуд, при этом токосъем затрудняется.

Граничная скорость, при которой начинает происходить усиление амплитуд волн

$$v_{\alpha} = c_k \frac{1 - \alpha_{\text{доп}}}{1 + \alpha_{\text{доп}}}. \quad (8.5)$$

Для скоростных подвесок эта скорость лежит ниже конструктивной скорости.

## 8.5. Определение собственных частот контактной подвески и резонансных скоростей

Цепная контактная подвеска представляет собой колебательную систему с множеством степеней свободы, обладающая множеством частот собственных колебаний. В цепных контактных подвесках с одинаковыми пролетами между опорами существуют симметричные и несимметричные виды колебаний. В первом случае две зеркально расположенные точки контактного провода колеблются в одинаковой фазе, во втором случае в противофазе. При симметричных видах колебаний в оси симметрии находится экстремум колебаний, при асимметричных – узел колебаний. В цепной контактной подвески с четным количеством пролетов между опорами ось симметрии находится в точке подвеса.

При асимметричном колебании длина волны основного колебания равна удвоенному расстоянию между опорами. Исходя из этого, рассчитывается их частота, если колебания рассматривать как стоячие волны

$$f_{к1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{(T + K)}{m_n + m_k}}, \quad (8.6)$$

где  $l$  – длина пролета, м.

При симметричном колебании учитывается также участок до первой струны в пролете

$$f_{к2} = \frac{1}{2l + l_c} \sqrt{\frac{(T + K)}{m_n + m_k}}, \quad (8.7)$$

где  $l_c$  – длина струнового пролета, м.

На основании частотных характеристик подвески определяют так называемую резонансную (или критическую) скорость, которая имеет место

при равенстве частот собственных и вынужденных колебаний контактной подвески и определяется формулой

$$v_{рез} = lf_{к1(2)}. \quad (8.8)$$

Для скоростных подвесок эта скорость обычно лежит ниже конструктивной скорости. Необходимо чтобы резонансная скорость не совпадала с теми скоростями, при которых планируется эксплуатация контактной подвески.

## 8.6. Пример расчета

Исходные данные

Контактная подвеска компенсированная М95+МФ85:  $K = 8300$  Н,  $T = 14200$  Н,  $m_k = 0,755$  кг/м,  $m_n = 0,85$  кг/м. Максимальное отношение скорости ЭПС к скорости волны в КП задано 0,51, максимальное значение коэффициента усиления  $X_{доп} = 1,89$ . Длину пролета  $l$  принять равной рассчитанной в соответствующей задаче для прямого участка пути. Пусть в данном случае  $l = 65$  м. Длину межструнового пролета можно принять для всех вариантов  $l_c = 7$  м.

Определим скорость распространения волны в контактном проводе и несущем тросе (формула 8.1)

$$c_k = \sqrt{\frac{8300}{0,755}} = 104,8 \text{ м/с},$$

$$c_n = \sqrt{\frac{14200}{0,85}} = 129,3 \text{ м/с}.$$

Коэффициент отражения (формула 8.2)

$$r = \frac{\sqrt{14200 \cdot 0,85}}{\sqrt{14200 \cdot 0,85} + \sqrt{8300 \cdot 0,755}} = 0,581.$$

Исходя из заданного соотношения максимально допустимой скорости движения ЭПС и скорости распространения волны в контактном проводе найдем допустимую скорость движения ЭПС

$$\frac{v_{\text{доп1}}}{c_k} = 0,51 \Rightarrow v_{\text{доп1}} = c_k \cdot 0,51 = 104,8 \cdot 0,51 = 53,47 \text{ м/с.}$$

Максимальное значение коэффициента усиления задано 1,89. Исходя из формулы (8.4) определим соответствующее максимально допустимое значение коэффициента Доплера

$$X = \frac{r}{\alpha} \Rightarrow \alpha_{\text{доп}} = \frac{r}{X} = \frac{0,581}{1,89} = 0,308.$$

Исходя из формулы (8.5), зная значение допустимое значение  $\alpha_{\text{доп}}$  можно определить соответствующую скорость ЭПС

$$v_{\text{доп2}} = 104,8 \cdot \frac{1 - 0,308}{1 + 0,308} = 55,53 \text{ м/с.}$$

Сравнивая  $v_{\text{доп1}}$  и  $v_{\text{доп2}}$  можно сказать, что ограничивающим фактором в данном случае является скорость распространения волны и окончательно

$$v_{\text{доп}} = \min(v_{\text{доп1}}, v_{\text{доп2}}) = 53,47 \text{ м/с.}$$

Далее при окончательно выбранной максимально допустимой скорости ЭПС  $v_{\text{доп}}$  необходимо определить коэффициент Доплера и коэффициент усиления

$$\alpha = \frac{104,8 - 53,47}{104,8 + 53,47} = 0,325,$$

$$X = \frac{0,581}{0,325} = 1,79.$$

Так как ограничивающим фактором в данном случае является скорость распространения волны в КП, то параметры  $\alpha$  и  $X$  при допустимой скорости ЭПС получаются меньше допустимых  $\alpha_{\text{доп}}$  и  $X_{\text{доп}}$ . Если же ограничивающим фактором будет коэффициент усиления, то  $\alpha = \alpha_{\text{доп}}$  и  $X = X_{\text{доп}}$ .

Определим резонансные частоты и соответствующие им скорости ЭПС по формулам (8.6 – 8.8)

$$f_{\text{к1}} = \frac{1}{2 \cdot 65} \sqrt{\frac{(14200 + 8300)}{0,85 + 0,755}} = 0,91 \text{ Гц},$$

$$f_{\text{к2}} = \frac{1}{2 \cdot 65 + 7} \sqrt{\frac{(14200 + 8300)}{0,85 + 0,755}} = 0,86 \text{ Гц},$$

$$v_{\text{рез1}} = 65 \cdot 0,91 = 59,2 \text{ м/с},$$

$$v_{\text{рез2}} = 65 \cdot 0,86 = 56,2 \text{ м/с}.$$

Данные скорости меньше допустимой скорости ЭПС. Следовательно, опасность попадания в резонанс токоприемника с подвеской мала.

## Библиографический список

1. Ефимов А. В. Контактные сети и ЛЭП : учеб.-метод. пособие / А.В. Ефимов, А. Г. Галкин, А. А. Ковалев. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – 88 с.
2. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – М. : Маршрут, 2003. – 416 с.
3. Нормы проектирования контактной сети СТН ЦЭ. Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М. : Трансиздат, 2001. – 176 с.
4. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог ЦЭ-868. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 2002. – 184 с.
5. Устройство и техническое обслуживание контактной сети : учеб. пособие / В. Е. Чекулаев и др.; под ред. А.А. Федорова. – М. : ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 436 с.
6. Фрайфельд А. В. Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М. : Транспорт, 1991. – 335 с.

## Приложение А

*Таблица А.1*

### Размеры и удельная масса контактных проводов

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Размеры проводов, мм				Расчетная масса 1км провода, кг
	фасонных		фасонных овальных		
	А (ширина)	Н (высота)	А (ширина)	Н (высота)	
85	11,76	10,80			755
100	12,81	11,80	14,92	10,50	890
120	13,90	12,90			1068
150	15,50	14,50	18,86	12,50	1335

*Таблица А.2*

### Физические характеристики контактных проводов

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление проводов, МПа, не менее		Относительное удлинение проводов, %, не менее		Радиус губок при испытании на перегиб
	медных	низколегированных	медных	низколегированных	
85	367,5	377,3	3,5	3,0	16
100	362,6	377,3	4,0	3,5	16
120	370,0		4,0		
150	352,8	362,6	4,0	3,5	20

Таблица А.3

## Размеры и физические характеристики несущих тросов М95; М120

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Число и диаметр проволок, мм	Расчетные данные проводов марки М				Строительная длина, км, не менее
		Сечение, мм <sup>2</sup> ; диаметр, мм	Электрическое сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	Разрушающая нагрузка, кН	Масса 1 км, кг	
95	19×2,51	94,0; 12,6	0,191	39,85	850	1,2
120	19×2,80	117,0; 14,0	0,154	44,46	1058	1,0

Таблица А.4

## Размеры и физические характеристики биметаллических несущих тросов

## ПБСМ50; ПБСМ70; ПБСМ95

Номинальное сечение провода, мм <sup>2</sup>	Число и номинальный диаметр проволок, мм	Расчетные данные проводов			Электрическое сопротивление постоянному току при 20°С, Ом/км, не более, проводов		Разрушающая нагрузка при растяжении, кН, не менее
		Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Масса 1 км, кг	ПБСМ1	ПБСМ2	
1	2	3	4	5	6	7	8
25	7×2,2	6,6	25,8	220	1,752	2,388	17,08
1	2	3	4	5	6	7	8
35	7×2,5	7,5	33,4	285	1,382	1,842	22,12
50	7×3,0	9,0	48,3	412	0,955	1,273	31,98
70	19×2,2	11,0	69,9	598	0,660	0,880	48,07
95	19×2,5	12,5	90,6	774	0,509	0,679	60,32
120	19×2,8	14,0	114,0	973	0,405	0,539	75,49

Таблица А.5

Размеры и физические характеристики комбинированных проводов  
АС120; АС150; АС185

Марка провода и номинальное сечение (алюминий/сталь), мм <sup>2</sup>	Число проволок и их диаметр, мм		Диаметр провода, мм	Электрическое сопротивление, Ом/км	Масса 1км, кг
	стальных	алюминиевых			
АС-35/6,2	1×2,8	6×2,8	8,4	0,773	149
АС-50/8,0	1×3,2	6×3,2	9,6	0,592	194
АС-70/11	1×3,8	6×3,8	11,4	0,428	274
АС-70/72	19×2,2	18×2,2	15,4	0,420	755
АС-95/16	1×4,5	6×4,5	13,5	0,299	384
АС-95/15	7×1,65	26×2,12	13,5	0,34	370
АС-95/141	37×2,2	24×2,2	19,8	0,316	1357
АС-120/19	7×1,85	26×2,4	15,2	0,245	471

Таблица А.6

Размеры и физические характеристики некомбинированного провода А

Марка провода и номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Число проволок и их диаметр, мм	Фактическое сечение провода, мм <sup>2</sup>	Диаметр провода, мм	Электрическое сопротивление, Ом/км	Масса 1км, кг
А-16	7×1,70	15,9	5,1	1,800	43
А-25	7×2,13	24,9	6,4	1,140	68
А-35	7×2,50	34,3	7,5	0,830	94
А-50	7×3,00	49,5	9,0	0,576	135
А-70	7×3,55	69,2	10,7	0,412	189
А-95	7×4,10	92,4	12,3	0,308	252
А-120	19×2,80	117,0	14,0	0,246	321

A-150	19×3,15	148,0	15,8	0,194	406
A-185	19×3,50	183,0	17,5	0,157	502

Таблица А.7

Нормативные скорости ветра, м/с

Ветровые районы	Повторяемость 1 раз в 5 лет	Повторяемость 1 раз в 10 лет
I	21	25
II	24	25
III	27	29
IV	30	32
V	33	36
VI	37	40
VII	40	45

Примечание. Поправочный ветровой коэффициент, учитывающий местные условия принимаем равным  $k_B = 1,0$ .

Таблица А.8

Нормативная толщина стенки гололеда на высоте 10 м, мм

Гололедные районы	Повторяемость 1 раз в 5 лет	Повторяемость 1 раз в 10 лет
I	не менее 3	5
II	5	10
III	10	15
IV	15	20
V	не менее 20	25

## Годовые температуры

Климатический район	Температура воздуха, °С				Абсолютный максимум температуры поверхности почвы
	абсолютный минимум	низшая (1 раз за 10 лет)	абсолютный максимум	высшая (1 раз за 10 лет)	
1	2	3	4	5	6
Очень холодный Ia	-64 (-71)	-60 (-67)	+38 (+33)	+36 (+33)	+58 (+50)
Холодный Ib	-52 (-54)	-47 (-46)	+40 (+27)	+38 (+24)	+60 (+34)
Умеренно холодный Pa	-44	-38	+37	+35	+57
Умеренно холодный влажный Pav	-31	-28	+37	+34	+56
1	2	3	4	5	6
Умеренно теплый Pб	-30	-24	+38	+36	+69
Умеренно теплый влажный Pбв	-35	-28	+36	+32	+56
Теплый влажный П	-15 (-8)	-10 (-5)	+39 (+40)	+37 (+33)	+64 (+64)
Жаркий сухой IVa	-30 (-26)	-25 (-22)	+45 (+46)	+43 (+45)	+72 (+76)
Жаркий умеренно влажный IVав	-13	-8	+36	+33	+70
Очень жаркий сухой	-26 (-25)	-20 (-21)	+47 (+50)	+46 (+49)	+79 (+79)

Таблица А.10

Аэродинамический коэффициент  $C_x$ 

Провода и их характеристики	Коэффициент $C_x$
Одиночные провода и тросы диаметром 20 мм и более	1,10
Одиночные провода и тросы диаметром менее 20 мм, а также провода и тросы, покрытые гололедом	1,20
То же, с учетом зажимов и струн	1,25
Контактные провода (с учетом зажимов и струн):	
МФ-150	1,15
МФ-85, МФ-100	1,25
МФО-100	1,30
Двойные контактные провода 2МФ-100 в выемках, на нулевых местах и насыпях до 5 м при расстоянии между проводами:	
100 мм	1,55
40 мм	1,85
То же на насыпях высотой более 5 м:	
100 мм	1,85
40 мм	2,15

Таблица А.11

## Допустимые и номинальные натяжение проводов контактной сети

Назначение и условное обозначение провода	Натяжение, кН	
	допустимое	номинальное
Несущий трос		
1	2	3
М-120	19,6	17,6

Окончание табл. А.11

1	2	3
М-95	15,7	14,2
ПБСМ-95	19,6	17,6
ПБСМ-70	15,7	14,2
Контактный провод		
МФ-150	17,7	14,7
МФ-100	11,8	9,8
МФ-85	10,0	8,3
БрФ-100	14,7	12,8
Усиливающие и питающие провода		
А-185	9,0	-
А-150	7,5	-
Линии продольного электроснабжения		
АС-70/11	5,5	-
АС-50/8,0	4,0	-
АС-35/6,2	2,8	-

Таблица А.12

Физико-механические характеристики проводов

Конструкция, материал, марка и площадь сечения	Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Температурный коэффициент линейного расширения, °С <sup>-1</sup>	Модуль упругости, ГПа	Временное сопротивление разрыву проволоки, ГПа, не менее
1	2	3	4	5
Многопроволочные провода:				
медные М	8900	17·10 <sup>-6</sup>	127,5	0,39
алюминиевые А	2750	23·10 <sup>-6</sup>	61,8	0,16
биметаллические ПБСМ	2830	13,3·10 <sup>-6</sup>	171,7	0,74
стальные (канаты)	8000	12·10 <sup>-6</sup>	196,2	1,18

Окончание табл. А.12

1	2	3	4	5
сталеалюминовые АС с площадью сечения:				
16-95 мм <sup>2</sup>	3470	19,2·10 <sup>-6</sup>	80,9	
120 мм <sup>2</sup> и более	3560	18,9·10 <sup>-6</sup>	83,0	
Однопроволочные провода:				
стальные ПСО	7850	12·10 <sup>-6</sup>	196,2	0,54
биметаллические БСМ	8230	13,3·10 <sup>-6</sup>	171,7	0,64
контактные провода медные МФ и бронзовые БрФ	8900	17·10 <sup>-6</sup>	127,5	

*Учебное издание*

**Паранин Александр Викторович**

**Ефимов Денис Александрович**

**КОНТАКТНЫЕ СЕТИ И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Практикум

для студентов специальности направления подготовки

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

(профиль «Электроснабжение») всех форм обучения