МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Гнучкі нитки та просторові ферми як повітряна лінія електропередач

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проекту(роботи)
з технічної механіки

Затверджено Методичною радою НТУУ «КПІ»

Київ
«Політехніка»
2013

Гнучкі нитки та просторові ферми як повітряна лінія електропередач :Метод. Вказівки до курсового проекту (роботи) з технічної механіки / Уклад. В.О. Петрик. – К.:ІВЦ "Видавництво «Політехніка»",2002. – 60с.

Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»

(Протокол № 10 від 20.06.2002 р.)

Навчальне видання

Гнучкі нитки та просторові ферми

як повітряна лінія електропередач

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проекту(роботи)

з технічної механіки

Укладач Петрик Владислав Олександрович

Відповідальний редактор М.І. Бобир, д-р техн.. наук,проф.

Рецензент Б.І.Ковальчук, д-р техн..наук,проф..

Редактор С.І. Крамаренко

Технічний редактор О.В. Дивуля

Комп'ютерна верстка М.Є.Пігурнов

Темплан 2002 р.,поз II/60

Підп. до друку 06.09.2002. Формат 60x84 $^1/_{16}$. Піпір офс. Спосіб друку-ризографія.

Ум. друк. арк. 3,72. Обл.-вид. арк. 5,8. Зам. №332. Наклад 450 пр.

Інформаційно-видавничий центр "Видавництво «Політехніка»" НТУУ «КПІ»

Свідоцтво про держреєстрацію ДК №211 від 09.10.2000

03056,Київ-56,вул..Політехнічна,14,корп. 15.

Передмова

Методичні вказівки призначено для студентів електроенергетичної спеціальності, які вивчають технічну механіку і виконують за цим розділом курсовий проект або роботу

У цьому посібнику розглянуто гнучкі нитки, які практично відповідають повітряним лініям електропередач,коротко викладено основи розрахунку проводів повітряних ліній електропередач для різних режимів їхньої експлуатації. Описано однорівневу та різнорівневу підвіски проводу,методи визначення провисання проводу під дією цих навантажень. У роботі наведено числовий приклад механічного розрахунку проводу повітряної лінії електропередачі, а також розглянуто розрахунок опор у стрижнях, у вигляді розрахунку просторової ферми, визначено зусилля у стрижнях, а також перевірено на зріз і розтяг елементи кріплення опор до фундаменту.

У методичних вказівках подано завдання до курсового проекту(роботи) розрахованого на 150-200 варіантів. Викладено основні питання, які студент має висвітлити у своїй роботі. Деякі з них потребують від виконавця самостійного вирішення, що сприяє набуттю студентом навиків,умінь і знань.
У роботі збережено наскрізну нумерацію формул для подальшого зручного користування ними.

Завдання на курсову роботу (проект)

Розрахувати повітряну лінію (ПЛ) електропередачі, закріплену на опорах, що являють собою просторові ферми для таких вихідних даних.

1.Напруга в проводі

Варіант	1	2	3	4	5	6	7
Напруга,кВ	До 1	До 50	35…100	150	220	330	500

2.Характеристика місцевості(дод.4)

Варіант	1	2	3	4
Місцевість	Населена	Ненаселена	Важкодоступна	Схили гір,скелі,стрімчаки

3.Використовуваний провід(табл.. 6 і 7)

Варіант	1	2	3	4
Марка проводу	АС	А	АСО	АСУ

4.Температра установлення проводу(монтажу,підвішування)

Варіант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Температура,℃	t^0_{min}	-10	**+10**	**+15**	t^0_{max}

5.Різнорівнева підвіска проводу з перепадом висот

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Перепад висот,*h,м*	5,0	0	8,0	0	10,0	0	15,0	0	20,0	0

6.Температура Утворення ожеледі

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура $t_{ож}$, ℃	2,0	3,0	3,5	4,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5

7.Швидкісний напір(табл.1 і 7)

Варіант	1	2	3	4	5	6
Напір Q, кг/$м^2$	20	27	40	55	76	8

8.Максимальна температура

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
t_{max} + ℃	20	25	30	35	40	40	30	25

9.Мінімальна температура

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
t_{min} − ℃	20	25	30	35	40	40	40	35

10.Кількість проводів у фазі

Варіант	1	2	3	4	5	6
Кількість проводів *N*	2	2	3	3	4	4
Напруга, кВ	20	35…100	150	220	330	500

11.Відстань між опорами,м

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l_1	100	120	140	150	160	180	200	150	120	110

Товщина стінки ожеледі

Варіант	1	2	3	4	5	6
Товщина с, мм	5	9	50	34	15	60
Варіант	7	8	9	10	11	12
Товщина с, мм	20	42	24	46	38	30

Не наведені вихідні дані взяти в методичних вказівках відповідно до рекомендацій.

У курсовому проекті(роботі) студент має виконати такі завдання:

1. Дати аналіз стану проводу повітряної лінії електропередачі в режимах експлуатації: I,IIа,IIб,III і за максимальних температур
2. Визначити вихідний механізм режим і порівняти його з іншими режимами.
3. Визначити напруження σ і стрілу провисання проводу *f* для різних режимів експлуатації.
4. Побудувати монтажний графік і проаналізувати умови монтажу.
5. Побудувати криву провисання нитки.
6. Визначити положення екстремальної точки провисання.
7. Знайти площину провисання проводу з урахуванням вітрового навантаження
8. Визначити висоту опори.
9. Визначити зусилля в стрижнях просторової ферми.
10. Визначити реакції в опорах ферми і підібрати діаметри болтів для закріплення опори на фундаменті з розрахунку на зріз та розтяг.

    Вихідні напрями зусиль на ферму задає викладач.

Гнучкі нитки

Цілком гнучкою ниткою вважають таку, що стримує тільки розтяг. У ідеальної гнучкої нитки жорсткість на крутіння, згин, зсув і стиск дорівнює нулю. Це означає, що гнучка нитка може сприймати зусилля тільки на розтяг, при цьому розтяжні зусилля спрямовані по дотичній до поздовжньої осі нитки.

На практиці існує багато систем, які розглядають як гнучкі нитки. Це повітряні лінії електропередачі, проводи електрифікованих залізниць, трамвайних і тролейбусних маршрутів, ланцюги висячих мостів та канатного шляху і т.д.

Надалі у цих методичних вказівках гнучку нитку будемо розглядати як провід, використаний у повітряній лінії електропередачі.

Розрахувати повітряну лінію електропередачі - означає забезпечити умови міцності проводу $\sigma \leq [\sigma]$, тобто внутрішні значення напруження, що виникають у проводі під дією зовнішніх навантажень, не повинні перевищувати допустимі значення.

Головними зовнішніми причинами зміни напруження в проводі є температура зовнішнього середовища і діючі на провід навантаження. Ці параметри спричинюють різну за розмірами деформацію.

Деформація і напруження взаємозалежні, їх зумовлюють зовнішні сили. Зміна умов експлуатації - це зміна зовнішніх сил, а отже, зміна деформації і напруження.

Завдання вказівок - навчити, як визначити зовнішні і внутрішні силові фактори - напруження, деформацію; виявити, як будуть змінюватися ці параметри за зміни умов експлуатації.

Для цього розглянемо різні аспекти цієї задачі:

1) *статичний*, що дозволить визначити деякі силові параметри і форму кривої провисання нитки під дією зовнішніх навантажень*;*

2) *геометричний,* що дає можливість розглянути деформацію від впливу різних навантажень*;*

3) *фізичний,* де потрібно визначити деформацію від температурних впливів, а також об'єднати обидва види деформацій і одержати рівняння спільної деформації.

Отримати діюче значення напруження і пов'язану з ним стрілу провисання, а також установити зв'язок між цими параметрами за зміни умов експлуатації можна за рівнянням стану нитки (проводу).

Гнучку нитку будемо розглядати як одно дротові і багатодротові проводи, скручені з алюмінієвих і сталевих дротів для надання механічної міцності та високої електропровідності. Кількість проводів у фазі може бути: N=1; N=3 і N=4(рис.1)

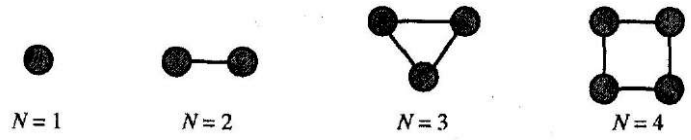


Рис. 1

Зовнішні навантаження на провід

Проводи повітряних ліній сприймають дію механічних навантажень, спрямованих по вертикалі (вага проводу та ожеледь) і по горизонталі (тиск вітру), у результаті чого в металі проводів виникають напруження розтягу. На розмір останніх впливає також і температура навколишнього повітря, що змушує враховувати її в розрахунках.

Вважають, що всі навантаження в прогоні між двома опорами рівномірно розподілені за довжиною проводу і є статичними, а окремі пориви вітру, що створюють динамічний характер навантаження, не враховують, хоча вони й можливі.

У розрахунки механічної стійкості проводів вводять поняття питомих навантажень *у.* Це інтенсивність погонного навантаження *д,* віднесена до площі поперечного перерізу проводу (нитки), тобто навантаження, що діє на 1 м проводу і припадає на 1 мм^2 площі поперечного перетину:

$$\gamma = \frac{q}{F} \qquad (1)$$

де q - погонне навантаження на ділянці нитки (проводу) довжиною 1м; Н/м; Н/мм; кг/мм; F- теоретична площа поперечного перерізу проводу, мм^2.

Якщо провід багатодротовий, тобто містить алюміній Fa і сталь Fc, то

$$F = \text{Fa} + \text{Fc}. \qquad (2)$$

Виведемо формули для визначення питомих навантажень проводів.

Навантаження від власної ваги

Покажемо навантаження від власної ваги графічно.

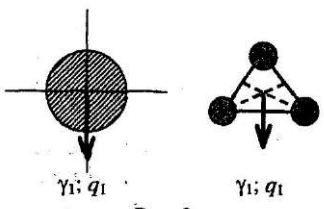


Рис. 2

Питоме навантаження проводу від ваги проводу γ_1 кг/м · мм^2 (рис. 2) можна обчислити за формулою

$$\gamma_1 = \frac{G_0}{F} \text{ або } q_1 = \gamma_1 F \qquad (3)$$

де G_0- вага одного метра проводу, кг (табл. 5 і 6); F — розрахунковий дійсний переріз усього проводу, мм^2, q_1 - вага одиниці довжини проводу.

Навантаження від ожеледі

Вважають, що всі види обледеніння проводу мають циліндричну форму. Лід з об'ємною вагою $q_0 = 0{,}9 \cdot 10^{-3}$ кг/см^3 Стінка льоду рівномірна, товщиною *c* (рис. 3).

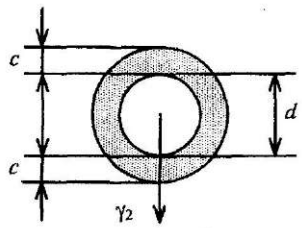


Рис. 3

Питоме навантаження від ваги льоду γ_2, кг/м · мм2 визначають за формулами:

$$\gamma_2 = \frac{G}{F} \text{ або } q_2 = \gamma_2 \qquad (4)$$

де G - вага порожнистого циліндра ожеледі, кг ($G = q$, якщо розглядається вага одиниці довжини); *F* - поперечний переріз проводу, мм^2.

Об'єм ожеледі на проводі довжиною 1 м *V,* мм^3 :

$$V = \left(\pi \frac{10^3}{4}\right) 1\lfloor (d + 2\,\mathrm{c})^2 - d^2 \rfloor = \pi \mathrm{c}\,(d + \mathrm{c}) 10^3. \qquad (5)$$

Вага ожеледі на проводі *G*, кг:

$$\mathrm{G} = \mathrm{V}\mathrm{q}_0 = \pi \mathrm{c}(\mathrm{d} + \mathrm{c})\mathrm{q}_0 = 0{,}00283\ \mathrm{c}\ (\mathrm{d} + \mathrm{c}) \qquad (6)$$

Звідси

$$\gamma_2 = \frac{G}{F} = 0{,}00283 \frac{c(d+c)}{F} \qquad (7)$$

Навантаження від ваги проводу й ожеледі

Ці навантаження діють в одній вертикальній площині і тому сумуються арифметично (рис. 4):

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2 \qquad (8)$$

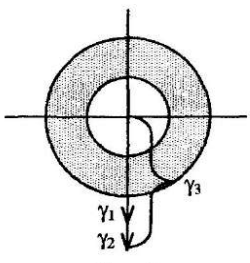


Рис. 4

Розмірність навантаження у кілограмах узгоджена з довідковою літературою.

Навантаження від тиску вітру

Тиск вітру, спрямованого горизонтально, зображено на рис. 5, 7.

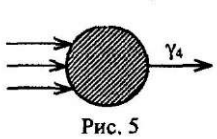


Рис. 5

Такий тиск вітру *P,* кг визначають за формулою

$$P = \alpha C_x Q S$$

де α - коефіцієнт, що враховує нерівномірність швидкості вітру по довжині прогону; C_x - аеродинамічний коефіцієнт; $Q = \frac{V^2}{16}$ - швидкісний напір вітру, кг/м^2 *(V*- швидкість вітру, м/с); S- площа діаметрального перерізу проводу, м^2.

Коефіцієнт α залежить від швидкості вітру (рис. 6) або швидкісного напору Q (табл.1)

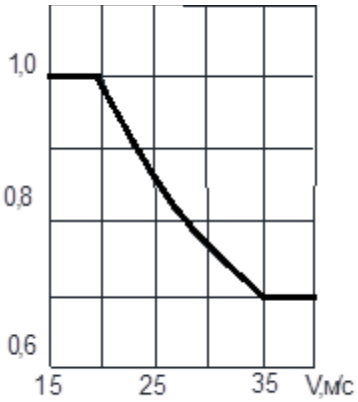


Рис. 6

Таблиця 1

Швидкісний напір вітру,Q, кг/м^2	*Коефіцієнт α*
До 27,0	*1*
40	*0,85*
55,0	*0,75*
76,0 і більше	*0,7*

Аеродинамічний коефіцієнт *C* при *d*≥ 20 мм дорівнює 1,1, при *d*< 20 мм він становить 1,2 для всіх проводів, покритих ожеледдю.

Тиск вітру *P,* кг/м на 1 м довжини проводу діаметром *d,* мм можна розрахувати за формулою

$$P = \alpha\, C_x Q \frac{d}{10^3}, \qquad (10)$$

а питоме навантаження від вітру на провід без ожеледі y_4, кг/м·мм^2- за формулою

$$y_4 = \frac{\alpha\, C_x Q d}{F 10^3}. \qquad (11)$$

За наявності ожеледі поверхня проводу, на який давить вітер, збільшується. Питоме навантаження y_5, кг/м·мм^2 при цьому становитиме:

$$y_5 = \frac{\alpha C_x Q(d+2c)}{10^3 F} \qquad (12)$$

У цій формулі Q беруть відповідно до табл. 1.

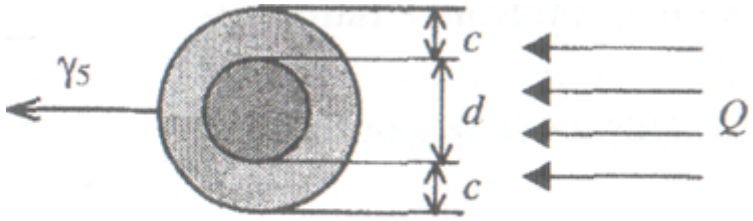


Рис.7

Сумарні навантаження

Для розрахунку результуючих навантажень на провід, що випливають із умов експлуатації, треба знайти геометричну суму діючих на нього вертикальних і горизонтальних навантажень.

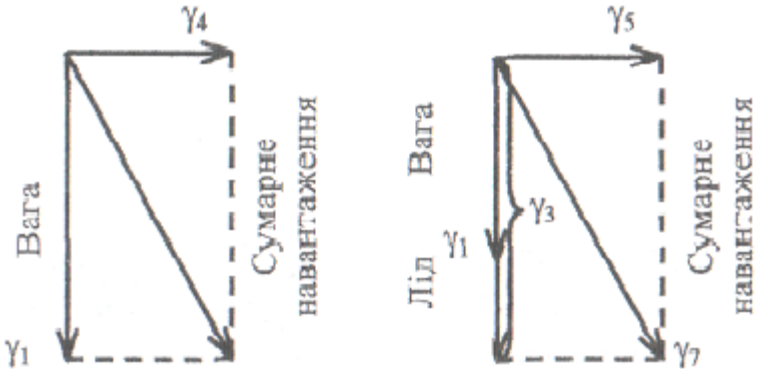


Рис. 8

Так, сумарне питоме навантаження на провід від його власної ваги і тиску вітру на провід y_6, кг/м·мм^2 (рис. 8, *а)*

$$y_6 = \sqrt{{y_1}^2 + {y_4}^2}.$$

Сумарне питоме навантаження на провід від ваги проводу, ваги льоду і тиску вітру y_7, кг/м·мм^2(рис. 8, б) становить:

$$y_7 = \sqrt{{y_3}^2 + {y_5}^2}.$$

Точки підвісу проводу можуть знаходитися на одному рівні (рис. 9) і на різних рівнях (рис. 10).

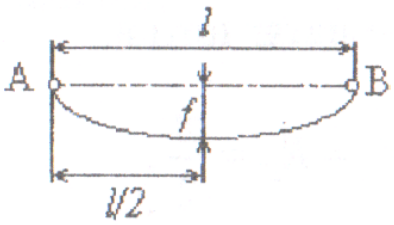


Рис. 9

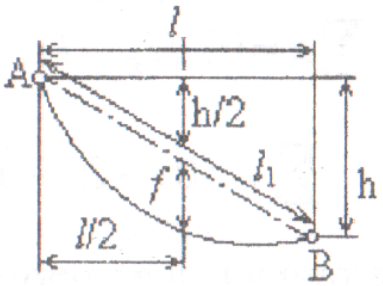


Рис. 10

Позначення, наведені на рисунках, означають:

l_1- відстань між опорами; l - прогін - горизонтальна проекція l_1; h - різниця рівнів точок підвісу нитки; f - провисания нитки, посередині прогону для однорівневої підвіски, стріла провисания.

З урахуванням навантажень, що діють на провід, розрахункові схеми можна подати так, як це показано на рис. 11, де *а* - однорівнева підвіска; *б* - різнорівнева.

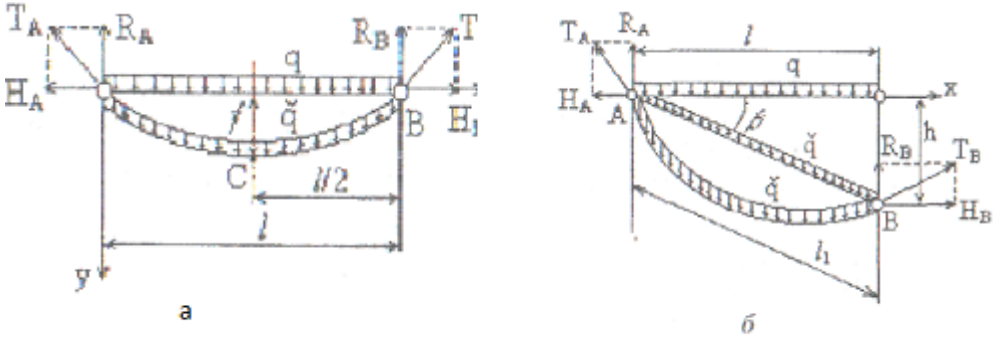


Рис. 11

На практиці довжина нитки по кривій *AB* мало відрізняється від довжини по прямій *AB,* (приблизно 10%). У зв'язку з цим, розглядаючи задачі з достатнім ступенем точності, вважають, що навантаження $\breve{q}$ розподілене по прямій АВ.

Для зручності обчислень навантаження $\breve{q}$ замінюють статично еквівалентним навантаженням q, розподіленим по горизонталі однаково вздовж прогону l, дотримуючись при цьому умови

$$ql = \breve{q}l_1, \tag{15}$$

Тобто

$$q = \breve{q}\frac{l_1}{l} = \breve{q}\frac{1}{cos\beta}. \tag{16}$$

Статичний аспект задачі. Схема одноріневої підвіски

Розглянемо рівновагу проводу за одноріневої підвіски (рис. 11, а):

$$\sum x = 0;\ H_B - H_A = 0; H = H_B = H_A \longrightarrow \text{натяг нитки.} \quad (17)$$

$$\sum y = 0;\ -R_A - R_B + ql = 0, R_A = R_B = \frac{ql}{2}. \quad (18)$$

Вважаючи точку *C* шарніром, запишемо рівняння

$$\sum_{\text{справа}} M_c = 0;\ H_B f + q\frac{l}{2}\cdot\frac{l}{4} - R_B\frac{l}{2} = 0. \quad (19)$$

Звідки

$$H_B = \frac{ql^2}{8f}. \quad (20)$$

З урахуванням питомого навантаження

$$f = \frac{yl^2}{8\sigma}, \quad (21)$$

де $\sigma = \frac{H}{F}$ - напруження, зумовлене силою натягу нитки *H*. Тоді повна реакція T_B у точці закріплення

$$T_B = \sqrt{{R_B}^2 + {H_B}^2} = \sqrt{\left(\frac{ql}{2}\right)^2 + \left(\frac{ql^2}{8f}\right)^2} = \frac{ql^2}{8f}\sqrt{1 + 16\left(\frac{f}{l}\right)^2} \quad (22)$$

Насправді розмір *f/l*< 0,05, тому з похибкою приблизно 2 % можна вважати, що

$$T = H = H_A = H_B = \frac{ql^2}{8f} \quad (23)$$

На практиці розтяжне зусилля *T* називають тяжінням проводу.

Схема різноріневої підвіски

Розглянемо рівновагу нитки згідно з рис. 11,6.

$$\sum x = 0;\ -H_A - H_B = 0; \quad (24)$$

$$\sum y = 0;\ -R_A - R_B + ql = 0, \quad (25)$$

$$\sum\ M_c = 0; -H_A h + R_A l - \frac{ql^2}{2} = 0 \quad (26)$$

Із цих рівнянь:

$$H_A = H_B = H; \quad (27)$$

$$R_A = \frac{ql}{2} + H\frac{h}{l}; \tag{28}$$

$$R_B = \frac{ql}{2} - H\frac{h}{l}. \tag{29}$$

Три рівняння містять чотири невідомі H_A, H_B, R_A, R_B. Задача статично невизначена. Для розв'язання невизначеності розглянемо рівновагу частини нитки (рис. 12):

$$\sum x_i = 0;\ T_x(x) - H_A = 0; \tag{30}$$

$$\sum y = 0;\ T_y(x) + qx - R_A = 0. \tag{31}$$

Із цих рівнянь

$$H_A = H = T_x(x) \tag{32}$$

де H_A - горизонтальний натяг нитки.

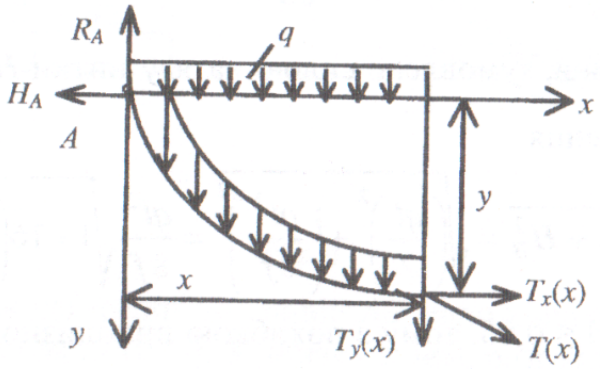


Рис. 12

$$T(x) = \sqrt{T_x(x)^2 + T_y(x)^2} = \sqrt{H^2 + \left[\left[H\frac{h}{l} + q\left(\frac{l}{2} - x\right)^2\right]\right.}. \tag{33}$$

Максимальне зусилля в точці А ($x = 0$)

$$T_{max} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{ql}{2} + H\frac{h}{l}\right)^2}. \tag{34}$$

Враховуючи те, що в дужках підкорінний вираз значно менший від H^2 , то з достатньою для практики точтністю вважають $T=H$.

Крива провисання

Оскільки нитка цілком гнучка, то в усіх її перерізах згинальний момент дорівнює нулю (рис. 12):

$$M(x) = R_A x - H_y - \frac{qx^2}{2} = 0. \quad (35)$$

Звідки з урахуванням (28)

$$y = \left(\frac{ql}{2H} + \frac{h}{l}\right)x - \frac{qx^2}{2H} = 0. \quad (36)$$

Вираз (36) називають рівнянням кривої провисання нитки. Гнучка нитка (провід) згідно з рівнянням (36) під впливом поперечного рівномірно розподіленого навантаження набуває форми параболи. Нижня її точка провисання має екстремальне значення *y,* тобто похідна в ній дорівнює нулю:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{ql}{2H} + \frac{h}{l} - \frac{qx}{H} = 0. \quad (37)$$

Звідси знайдемо значення *x,* що визначає розташування найнижчої точки. Це дає можливість визначити значення наближення проводу до землі враховуючи вимоги техніки безпеки:

$$x = a = \frac{l}{2} + \frac{Hh}{ql} \quad (38)$$

Для визначення значення максимального провисання проводу необхідно значення *x* підставити в рівняння кривої провисання проводу (36), тоді

$$y_{max} = f' = \frac{ql^2}{8H} + \frac{Hh^2}{2ql^2} + \frac{h}{2} \quad (39)$$

Виділимо три характерні випадки розташування нижньої точки провисання нитки.

1. Екстремальна точка знаходиться в межах прогону, тобто $a < l$ (рис. 13) за умови $H < \frac{ql^2}{2h}$

2. Екстремальна точка - поза прогоном, тобто $a > l$ (рис. 14), за умови $H > \frac{ql^2}{2h}$

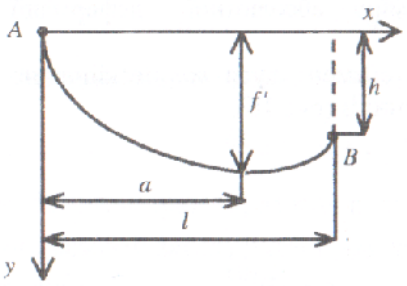


Рис. 13

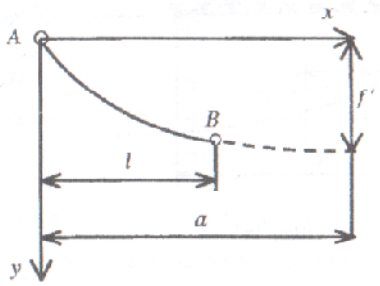


Рис. 14

3. Екстремальна точка знаходиться в місці закріплення нижньої точки, у цьому випадку - у точці *B* (рис. 15), за умови

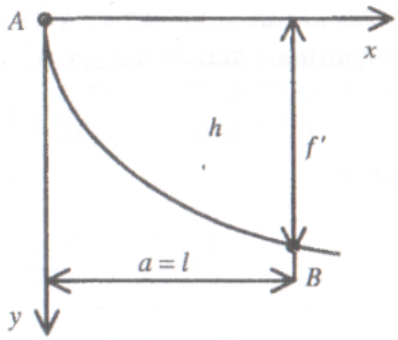


Рис. 15

$$H = \frac{ql^2}{2h}$$

Маємо можливість установити зв'язок для різнорівневої підвіски між натягом H і\ провисаниями f і f'

Для середини прогону $x = \frac{l}{2}$, $y = \frac{h}{2} + f$. Якщо ці значення підставити в рівняння кривої провисания нитки (36), то

$$H = \frac{ql^2}{8f}, \text{ або } f = \frac{ql^2}{8H}. \quad (40)$$

Якщо виражати Н через f', то необхідно вираз (39) для $y_{max} = f'$ розв'язати як квадратне рівняння. При цьому

$$H = \frac{ql^2}{h^2}\left[\left(f' - \frac{h}{2}\right) \pm \sqrt{f'(f' - \text{h})}\right] \quad (41)$$

Знак «плюс» вибирають, якщо $a > l$.

Змінюючи значення Н, можна переміщувати екстремальну точку, що на практиці дає можливість враховувати рельеф землі під найнижчою точкою лінії електропередачі.

Геометричний аспект задачі

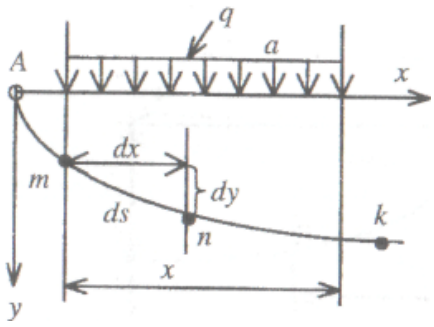


Рис. 16

Визначимо довжину проводу до підвішування L , довжину підвішеного проводу S, а отже, розмір абсолютної деформації ΔS = S-L.

Виділимо елемент дуги mn нескінченно малої довжини ds (рис. 16).

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} dx \qquad (42)$$

Розкладаючи цей вираз у ряд за формулою бінома Ньютона і, обмежившись першими двома членами розкладання

$$(a+b)^n = a^n + na^{n-1}b + \ldots, \qquad (43)$$

одержимо

$$ds = \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right] dx. \qquad (44)$$

Зробивши необхідні постановки і, проінтегрувавши цей вираз по всій довжині, одержимо довжину підвішеного проводу S :

$$S = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2} + \frac{h^2}{2l}. \qquad (45)$$

Якщо врахувати, що $H = \frac{ql^2}{8f}$, то

$$S = l + \frac{8}{3}\frac{f^2}{l} + \frac{h^2}{2l}. \qquad (46)$$

Знаючи, що довжина проводу до підвішування - L, абсолютна деформація

$$\Delta S = S - L = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2} + \frac{h^2}{2l} - L. \qquad (47)$$

Фізичний аспект задачі

Таку саму деформацію ΔS провід матиме від розтяжного зусилля і від зміни

температури:

а)від дії навантаження H. Скористаємося законом Гука для абсолютних подовжень

$$\Delta S_H = \frac{Hl_1}{EF} = \frac{Hl}{EF\cos\beta}; \tag{48}$$

б) від температурного подовження

$$\Delta S_{t^\circ} = \alpha l_1 \left(t^\circ_p - t^\circ_{підв}\right) = \frac{\alpha l}{\cos\beta}\left(t^\circ_p - t^\circ_{підв}\right), \tag{49}$$

де t°_p - температура, за якої розраховують нитку (температура для конкретного режиму експлуатації проводу);$t^\circ_{підв}$ - температура, за якої підвішують провід.

Два доданки і визначать сумарну зміну вихідної довжини нитки:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_{t^\circ} = \frac{Hl}{EF\cos\beta} + \frac{\alpha l}{\cos\beta}\left(t^\circ_p - t^\circ_{підв}\right). \tag{50}$$

Значення ΔS, визначені під час розгляду геометричного і фізичного аспектів задачі, виражають одну і ту саму величину - подовження підвішеної нитки. Прирівняємо праві частини формул (47) і (50):

$$L = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2} - \frac{h^2}{2l} - \frac{Hl}{EF\cos\beta} - \frac{\alpha l}{\cos\beta}\left(t^\circ_p - t^\circ_{підв}\right). \tag{51}$$

Одержимо рівняння спільної деформації.

Розглядаючи багатодротовий провід, у рівняння спільної деформації замість модуля пружності E необхідно підставляти еквівалентний модуль пружності

$$E_{екв} = \frac{E_c(1+km)}{(1+k)}, \tag{52}$$

де$k = \frac{F_a}{F_c}$ - відношення площ алюмінію і сталі; $m = \frac{E_a}{E_c}$ - відношення модулів пружності алюмінію і сталі.

Замість α візьмемо $\alpha_{екв}$ - коефіцієнт лінійного розширення проводу від температурного впливу:

$$\alpha_{екв} = \alpha_c \frac{1 + nmk}{1 + km}, \tag{53}$$

де$n = \frac{\alpha_a}{\alpha_c}$- відношення згаданих коефіцієнтів алюмінію і сталі.

На практиці значення Lперевищує значення довжини прогону l не більше, ніж на 0,1 %. Отже, у рівнянні спільної деформації Lможна замінити на l. Тоді рівняння набуде вигляду

$$\frac{q^2 l^3}{24H^2} + \frac{h^2}{2l} - \frac{Hl}{EF\cos\beta} - \frac{\alpha l}{\cos\beta}\left(t^\circ_p - t^\circ_{підв}\right) = 0. \tag{54}$$

Із цього рівняння визначаютьH, потім $T_{\max}$. Ці параметри дають можливість визначити напруження в нитці (проводі) і порівняти з допустимим значенням.

$$\sigma = \frac{T_{max}}{F} \approx \frac{H}{F} \leq [\sigma]. \tag{55}$$

З урахуванням формули$H = \frac{ql^2}{8f}$

$$\sigma = \frac{ql^2}{8fF} \leq [\sigma], або\ \sigma = \frac{\gamma l^2}{8f} \leq [\sigma]. \tag{56}$$

Однорівнева схема

Для цієї схеми $\cos\beta = 1$; $h = 0$; $R_A = R_B = \frac{ql}{2}$і$f' = f$.

Тоді рівняння спільної деформації (51) для багатодротового проводу набуде вигляду

$$L = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2} - \frac{Hl}{EF} - \alpha l\left(t^\circ_p - t^\circ_{підв}\right); \tag{57}$$

$$E = E_{екв};\ \alpha = \alpha_{екв}. \tag{58}$$

Рівняння стану проводу

У процесі експлуатації на провід можуть впливати різні навантаження q і

температури t. При цьому напруження σ і стріла провисання проводу f змінюються залежно від навантаження і зміни температури, наприклад:

1)якщо навантаження q зростає, то збільшується стріла провисанняf, провід витягується, напруження зростає і навпаки;

2)якщо температура підвищується, то матеріал проводу розширюється, стріла провисання збільшується, у результаті чого напруження в проводі зменшується, і навпаки.

Завдання полягає в тому, щоб знайти загальну залежність, що показує, як змінюються напруження і стріла провисання за зміни зовнішнього навантаження і температури.

Розглянемо два стани проводу за його однорівневої підвіски.

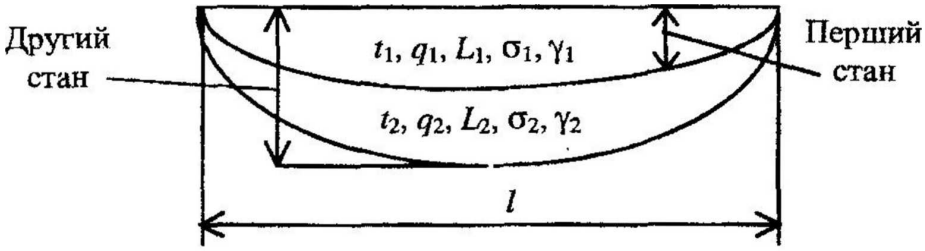


Рис. 17

Нехай у першому стані температура t_1, погонне навантаження q_1, стріла провисанняf_1 тоді натяг

$$H_1 = \frac{q_1 l^2}{8 f_1},$$

а напруження в нитці$\sigma_1 = \frac{H_1}{F}$.

У другому стані за зміни температури до t_2, а навантаження до q_2 стріла провисання будеf_2, натяг$H_2 = \frac{q_2 l^2}{8 f_2}$, а напруження $\sigma_2 = \frac{H_2}{F}$.

Запишемо два вирази для довжини ниткиL у момент підвішування через параметри обох станів:

$$L = l + \frac{{q_1}^2 l^3}{24 {H_1}^2} - \frac{H_1 l}{EF} - \alpha l (t^\circ_1 - t^\circ_{підв}); \qquad (59)$$

$$L = l + \frac{{q_2}^2 l^3}{24{H_2}^2} - \frac{H_2 l}{EF} - \alpha l(t^\circ_2 - t^\circ_{підв}). \quad (60)$$

Прирівняємо праві частини

$$l + \frac{{q_1}^2 l^3}{24{H_1}^2} - \frac{H_1 l}{EF} - \alpha l(t^\circ_1 - t^\circ_{підв}) = l + \frac{{q_2}^2 l^3}{24{H_2}^2} - \frac{H_2 l}{EF} - \alpha l(t^\circ_2 - t^\circ_{підв}). \quad (61)$$

Якщо використовувати питоме навантаження, де $\frac{q_1}{F} = \gamma_1; \frac{q_2}{F} = \gamma_2,$ і врахувати, що $\frac{H_1}{F} = \sigma_1;\ \frac{H_2}{F} = \sigma_2\ ,$ то

$$\sigma_2 - \frac{{\gamma_2}^2 l^2 E}{24{\sigma_2}^2} = \sigma_1 - \frac{{\gamma_1}^2 l^2 E}{24{\sigma_1}^2} + \alpha E(t^\circ_1 - t^\circ_2). \quad (62)$$

)

Це є рівняння стану нитки, яке ще називають рівнянням зв'язку. Воно дозволяє встановити,як змінюється напруження в нитці за зміни навантаження і температури. Перепишемо рівняння в такому вигляді:

$${\sigma_2}^3 - \left[\sigma_1 - \frac{{\gamma_1}^2 l^2 E}{24{\sigma_1}^2} + \alpha E(t^\circ_1 - t^\circ_2)\right]{\sigma_2}^2 - \frac{{\gamma_2}^2 l^2 E}{24} = 0. \quad (63)$$

Якщо напруження виразити через стріли провисання

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 l^2}{8f_1};\ \sigma_2 = \frac{\gamma_2 l^2}{8f_2}$$

то рівняння (63) матиме вигляд

$${f_2}^3 - \left[{f_1}^2 + \frac{3}{8}\alpha l^2(t^\circ_1 - t^\circ_2) - \frac{3}{64}\frac{\gamma_1 l^4}{E f_1}\right]f_2 - \frac{3}{64}\frac{\gamma_2 l^4}{E} = 0. \quad (64)$$

За різнорівневої підвіски у цій формулі беруть відповідне значення L і враховують $\cos\beta$,

тобто

$$\sigma_2 - \frac{{\gamma_2}^2 l^2 E\cos\beta}{24{\sigma_2}^2} = \sigma_1 - \frac{{\gamma_1}^2 l^2 E\cos\beta}{24{\sigma_1}^2} + \alpha E(t^\circ_1 - t^\circ_2). \quad (65)$$

Якщо напруження виразити через стріли провисання, то одержимо

$${f_2}^3 - \left[{f_1}^2 + \frac{3}{8}\alpha l^2\frac{(t^\circ_1 - t^\circ_2)}{\cos\beta} - \frac{3}{64}\frac{\gamma_1 l^4}{E f_1\cos\beta}\right]f_2 - \frac{3}{64}\frac{\gamma_2 l^4}{E\cos\beta} = 0. \quad (66)$$

Усі ці рівняння за напруженнями і стрілами провисання являють собою кубічні рівняння вигляду

$$x^3 \pm ax \pm b = 0. \qquad (67)$$

Методи розв'язання таких рівнянь наведено у дод. 5 – 9.

Режими роботи проводу

Під режимом роботи будемо розуміти стан проводу, напруження в проводі, стрілу провисання за наявності зовнішніх впливів: вітру, температури, ожеледі.

Встановимо такі умови експлуатації проводу, або режими:

I. Режим мінімальних температур (?тщ), вітру й ожеледі немає.

IIа. Режим найбільшого швидкісного напору (Утах), температура мінус 5 °С, ожеледі немає.

IIб. Режим найбільшої ожеледі, швидкість вітру V = 0,5 $_{max}$ (д - 0,25 я$_{тах}$), температура утворення ожеледі = -5 °С.

III. Режим середньорічних температур (середньоексплуатаційних температур), ожеледі й вітру немає.

Ці режими характеризують визначені дані, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Режим	**Розрахун-ковий режим**	**Розрахункові умови**			**Розрахунковепито менавантаження кг/кг*мм^2**	**Допустименапру ження, кг/мм^2**
		***V*, м/с**	***c*, мм**	***t*, °С**		
I	t_{min}	0	0	t_{min}	$\gamma_1 = q_п/F$	$[\sigma]_I = 0{,}37\sigma_{МЦ}$
IIа	q_{max} γ_{max}	V_{max}	0	-5	$\gamma_6 = \sqrt{(\gamma_1{}^2 + \gamma_4{}^2)}$	$[\sigma]_{II} = 0{,}42\sigma_{МЦ}$
IIб		0,5V_{max}але не > 15 м/с	C_{max}	$t_{ож}$ = -5	$\gamma_7 = \sqrt{(\gamma_5{}^2 + \gamma_3{}^2)}$	
III	$t_{сер}$	0	0	$t_{сер}$	$\gamma = q_П/F$	$[\sigma]_{III} = 0{,}25\sigma_{МЦ}$

У електроенергетичній промисловості використовують такі марки проводів:

А - алюмінієві; АС - сталеалюмінієві; АСО - сталеалюмінієвий полегшеної конструкції, співвідношення площ алюмінію і сталі становить 8; АСУ - сталеалюмінієвий посиленої конструкції, співвідношення площ 4,3.

Цифра після літерного позначення проводу показує розмір площі алюмінієвої частини проводу Fa, мм^2, наприклад, для марки АСО-400Fa = 400 мм^2.

Допустимі напруження для зазначених марок проводів наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Марка проводу	**Номінальний переріз проводу, мм^2**	**Допустиме напруження, кг/мм^2**			**Границя міцності $\sigma_{МЦ}$, кг/мм^2**
		$[\sigma]_{I} = 0,37\sigma_{МЦ}$	$[\sigma]_{II} = 0,42\sigma_{МЦ}$	$[\sigma]_{III} = 0,25\sigma_{МЦ}$	
		t_{min}	γ_{max}	$t_{сер}$	
А	16…300	5,70	6,50	3,90	15,5
АС	20…400	10,75	12,20	7,25	29,0
АСО	150…700	10,00	11,35	6,75	27,0
АСУ	120…400	11,47	13,00	7,75	31,0

Поняття про критичний прогін

Розраховуючи провід на міцність, важливо встановити, за якого з розглянутих режимів напруження в проводі досягне допустимих значень. Цей режим називають вихідним.

Для знаходження вихідного режиму необхідно визначити критичні прогони.

З’ясуємо, як впливають зміни температури і навантаження на напруження в короткому і довгому проводі.

Скористаємося рівнянням стану, або зв’язку (62).

Розглянемо «малі» прогони. Теоретично зменшимо прогін до границі, тобто візьмемо $l = 0$. Підставимо це значення в рівняння зв'язку (62), тоді

$$\sigma_2 = \sigma_1 - \alpha E(t°_2 - t°_1). \qquad (68)$$

Із формули (68) видно, що за «малих» прогонів напруження в проводі залежить від зміни температури.

У випадку «великих» прогонів візьмемо $l = \infty$. Тоді формула (62) матиме вигляд

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \qquad (69)$$

тобто за «великих» прогонів температурний член рівняння (62) зникає і напруження залежать від зміни навантажень.

Очевидно, що між «малими» і «великими» прогонами існує такий прогін, у якому напруження досягає допустимих значень.

Цей прогін називають критичним $l_{кр}$. При $l<l_{кр}$ визначальною є зміна температури;при $l>l_{кр}$ - зміна навантаження на провід.

Порівнюючи два режими, під критичним прогоном будемо розуміти такийпрогін $l_{кр}$, за якого напружений стан проводу в обох режимах буде взаємонебезпечним, тобто напруження в проводі будуть дорівнювати допустимим для кожного з порівнюваних режимів.

Нехай для двох будь-яких режимів з однаковими прогонами

1-й режим	γ_1	$t°_1$	$\sigma_1 = [\sigma]_{I}$	$l_1 = l_2 = l_{кр}$
2-й режим	γ_2	$t°_2$	$\sigma_2 = [\sigma]_{II}$	

У цьому випадку рівняння зв'язку обох режимів буде мати вигляд

$$[\sigma]_{I} - \frac{{\gamma_1}^2 {l_{кр}}^2 E}{24{[\sigma]_{I}}^2} = [\sigma]_{II} - \frac{{\gamma_2}^2 {l_{кр}}^2 E}{24{[\sigma]_{II}}^2} - \alpha E(t°_1 - t°_2), \qquad (70)$$

звідки

$$l_{кр} = \frac{[\sigma]_{II}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{[\sigma]_{II} - [\sigma]_{I} + \alpha E(t°_2 - t°_1)}{\frac{E}{24}\left[\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{[\sigma]_{II}}{[\sigma]_{I}}\right)^2\right]}}. \qquad (71)$$

У цій формулі індекси позначають будь-які два порівнювані режими.

Якщо порівнювати попарно подані розрахункові режими (табл. 2), то, наприклад, перший критичний прогін, $l_{кр1}$ - це прогін длярежимів I($t°_{min}$) і III ($t°_{сер}$), для яких $\sigma_1 = [\sigma]_I$, $\sigma_3 = [\sigma]_{III}$, або

I режим	$t°_{min}$	$\gamma_1;\ q_1$	$\sigma_I = [\sigma]_I$	$l_I = l_{III} = l_{кр1} = ?$
III режим	$t°_{сер}$	$\gamma_1;\ q_1$	$\sigma_{III} = [\sigma]_{III}$	

Скористаємося формулою (71)

$$l_{кр1} = \frac{[\sigma]_{III}}{\gamma_1}\sqrt{\frac{[\sigma]_{III} - [\sigma]_I + \alpha E(t°_{сер} - t°_{min})}{\frac{E}{24}\left[1 - \left(\frac{[\sigma]_{III}}{[\sigma]_I}\right)^2\right]}}. \quad (72)$$

Якщо порівнювати два режими I і II, то з табл, 2 видно, що навантаження в режимах IIа, IIб мають

найбільше значення, отже, розглядаючи випадки із ожеледдю або без неї, потрібно взяти γ_{max} або q_{max}. Уцих режимах$\sigma_{II} = [\sigma]_{II}$, $\sigma_I = [\sigma]_I$і$l_{кр2}$, тобто

I режим	$t°_{min}$	γ_1	$\sigma_I = [\sigma]_I$	$l_I = l_{II} = l_{кр2} = ?$
II режим	$t°_{ож}$	γ_{max}	$\sigma_{II} = [\sigma]_{II}$	

Скористаємося формулою (71)

$$l_{кр2} = \frac{[\sigma]_{II}}{\gamma_1}\sqrt{\frac{[\sigma]_{II} - [\sigma]_I + \alpha E(t°_{ож} - t°_{min})}{\frac{E}{24}\left[\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{[\sigma]_{II}}{[\sigma]_I}\right)^2\right]}}. \quad (73)$$

Порівняємо режим III ($t°_{сер}$) і режим II (γ_{max}). У даному випадку

III режим	$t°_{сер}$	γ_1	$\sigma_{III} = [\sigma]_{III}$	$l_{III} = l_{II} = l_{кр3} = ?$
II режим	$t°_{ож}$	γ_{max}	$\sigma_{II} = [\sigma]_{II}$	

Скористаємося формулою (71)

$$l_{\text{крз}} = \frac{[\sigma]_{\text{II}}}{\gamma_1}\sqrt{\frac{[\sigma]_{\text{II}} - [\sigma]_{\text{III}} + \alpha E\left(t°_{\text{ож}} - t°_{\text{сер}}\right)}{\frac{E}{24}\left[\left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{[\sigma]_{\text{II}}}{[\sigma]_{\text{III}}}\right)^2\right]}}. \quad (74)$$

В усі вирази визначення $l_{\text{кр}}$, температуру t підставляють із відповідним знаком.

Вихідний режим

Вихідний режим визначають, порівнюючи значення заданого прогону $\boldsymbol{l}$ із розміром$l_{\text{кр}}$. При цьому необхідно враховувати особливості «малого» і «великого» прогонів:

- якщо $\boldsymbol{l<}l_{\text{кр}}$- «малі» прогони, де напруження в проводі залежить здебільшого від температури, що характеризує режим I, то вихідним буде режим I($\boldsymbol{t°_{\min}}$);
- якщо $l>l_{\text{кр}}$- «великі» прогони, де напруження визначають навантаженням $\boldsymbol{\gamma}$ або $\boldsymbol{q}$,то вихідним буде режим II ($\boldsymbol{\gamma_{\max}}$).

У режиміIII - режимі середньорічних температур без ожеледі й вітру максимального навантаження немає. Крім цього, варто враховувати, що температура, близька до

$\boldsymbol{t°}_{сер}$, спостерігається найбільш тривалий час при експлуатації повітряних ліній і можливість руйнації проводу від утомних явищ при вібрації найвища. Основним навантаженням буде власна вага проводу, як у режимі I, і тому бажано довжину проводу l брати більше $l_{\text{кр1}}$, щоб захистити повітряну лінію від явищ за низьких температур.

З іншого боку, прогони l, більші$l_{\text{кр3}}$, можуть зумовити неприпустимі напруження від власної ваги, тому у випадку $l_{\text{кр1}}<l<l_{\text{кр3}}$ вихідним буде режим III ($t°_{сер}$).

Якщо $l_{\text{кр1}}<l_{\text{кр2}}<l_{\text{кр3}}$, то це має сенс тільки для $l_{\text{кр2}}$, з яким і слід порівнювати довжину прогону l, причому:

а)якщо$l<l_{\text{кр2}}$- вихідний режим I ($\boldsymbol{t°_{\min}}$);

б)якщо $l>l_{\text{кр2}}$- вихідний режим II ($\boldsymbol{\gamma_{\max}}$).

Підвішування проводу (нитки)

Підвішування проводу здійснюють у безвітряні дні, коли немає ожеледі, але за будь-якої температури.

При цьому навантаженням на провід є власна вага, тобто

$$\gamma_{\text{підв}} = \gamma_{\text{П}} = \gamma_1, t^\circ = t^\circ{}_{\text{П}}.$$

Підвішуючи провід, необхідно забезпечити таке провисання проводу а отже, і таке напруження $\sigma_{підв}$, щоб у найгірших умовах експлуатації повітряної лінії виконувалася умова міцності проводу, тобто$\sigma_{підв} \leq [\sigma]$.

Отже, найгіршими умовами експлуатації є умови вихідного режиму, тому, порівнюючи через рівняння зв'язку два стани проводу: вихідного режиму і режиму підвішування (монтажу), визначимо необхідне значення напруження при підвішуванні.

Якщо взяти

Вихідний режим	$t^\circ_{вих}$	$\gamma_{вих}$	$\sigma_{вих} \leq [\sigma]_{вих}$
Режим підвішування	$t^\circ_{підв}$	$\gamma_1 = \gamma_n$	$\sigma_{підв=?}$

Тоді рівняння зв'язку виглядатиме так:

$$\sigma_{підв} - \frac{\gamma 1^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma^2_{підв}} = \sigma_{вих} - \frac{\gamma 1^2 \cdot l^2 * E}{24 \cdot \sigma^2_{вих}} - \alpha \cdot E(t^0_{підв} - t^0_{вих}) \quad (75)$$

При цьому задають декількома (4 - 5)

значеннями температури монтажу проводу в межах від t°_{min} до t°_{max}і розв'язують рівняння (75). Будують монтажні графіки $f_{підв} = f(t^\circ_{підв})$,тобтозалежність монтажного провисання проводу від температури або $H_{підв} = f(t^\circ_{підв})$ або $\sigma_{підв} = f(t^\circ_{підв})$ (рис. 18). Ці значення визначають за формулами:

$$f_{підв} = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{підв}} \quad (76)$$

$$H_{підв} = F \cdot \sigma_{підв} \quad (77)$$

Результати заносять у табл.4.

$t^{\circ}_{\text{підв}}$,градуси	$\sigma_{\text{підв}}$ кг/мм^2	$H_{\text{підв}}$,кг	$f_{\text{підв}}$,м
t°_{min}			
t°_{1}			
t°_{2}			
t°_{max}			

За результатами будують графіки монтажу

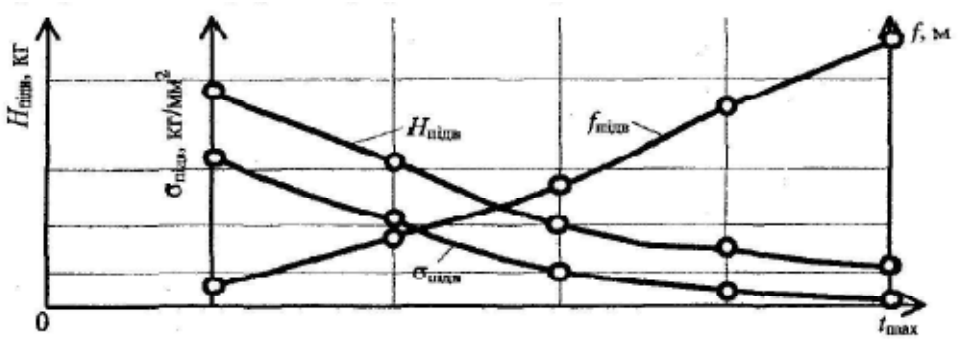


Рис. 18

Виконуючи монтаж проводу, для вимірювання параметра $\sigma_{підв}$ використовують мірні рейки, геодезичні прилади.

Для досягнення Стшдв використовують натяжні пристрої через динамометр, визначаючи $H_{підв}$, відповідну$f_{підв}$, $\sigma_{підв}$ для даної $t^{\circ}_{підв}$

Опори повітряної лінії електропередачі

Металеві опори повітряної лінії являють собою просторові ґратчасті конструкції, складені з плоских ферм, сполучених між собою просторовими зв'язками.

У цій курсовій роботі для спрощення завдання за опору візьмемо просторову ферму у формі куба або близькій до неї розміром приблизно 3 х 3 х 3 м, а необхідну висоту опори будемо набирати з декількох нашарувань таких ферм.

Вигляд ферми зовні подано на рис. 19, а власне опору - на рис. 20.

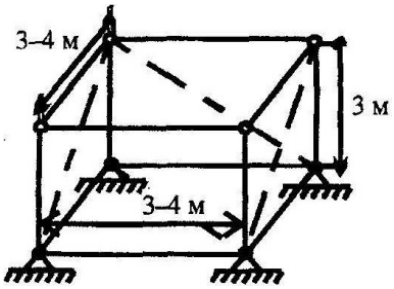


Рис.(19)

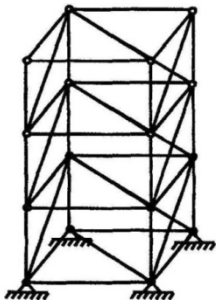


Рис.(20)

Висоту опори $H_{оп}$ визначимо приблизно як параметр, що складається із мінімально допустимої відстані h_3 від поверхні землі до проводу в точці найбільшого провисання, що залежить від напруги в проводі і значення максимального провисання проводу у вертикальній площиніf_{max} (дод. 4).

Значення f_{max} , тобто максимальна стріла провисання проводу, досягається тільки за безвітряності та якщо провід знаходиться у вертикальній площині, що проходить через точки його кріплення.

Це може статися:

а) за високої температури навколишнього середовища, тобто t_{max} і $\gamma_1 = \gamma_{\text{п}}$. Тоді f_{1max}можна визначити за графіком монтажу (підвісу) проводу (рис. 18);

б) за ожеледі і температури від 0 до мінус 10 °С, коли провід сприймає найбільше вертикальне навантаження, тобто $\gamma_3 = \gamma_n + \gamma_{ож}$Тут варто скористатися рівнянням зв'язку (62) між вихідним режимом і режимом сльоти без вітру.

Режим f_{2max}	$t^{\circ}_{ож}$	γ_3	$\sigma_{ож}$ =?
Вихіний режим	$t^{\circ}_{вих}$	$\gamma_{вих}$	$\sigma_{ож} = [\sigma_{ож}]$

Рівняння (62) можна записати так:

$$\sigma_{\text{підв}} - \frac{\gamma_3{}^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma^2_{\text{підв}}} = \sigma_{\text{вих}} - \frac{\gamma_{\text{вих}}{}^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma^2_{\text{вих}}} - \alpha \cdot E(t^0_{\text{підв}} - t^0_{\text{вих}}) \qquad (78)$$

За цією формулою визначають напруження в проводі при ожеледі $\sigma_{ож}$. Користуючись виразом (21), одержимо

$$f_{2max} = \frac{\gamma_3 * l^2}{8 * \sigma_{\text{підв}}} \qquad (79)$$

За максимальне значення провисання беруть найбільше значення з f_{1max}та f_{2max}

Якщо відоме значення $\sigma_{ож}$, то для визначення режиму з максимальним провисанням f_{max}можна використовувати наявність критичної температури. Температуру, за якої стріла провисання проводу, зумовлена тільки його вагою f_1, дорівнює стрілі провисання проводу в умовах ожеледі без вітру f_2, називають критичною температурою.

Цю формулу можна одержати, розглядаючи два стани проводу за умови $f_1 = f_3$

Режим $t^{\circ}_{кр}$	γ_1	$t^{\circ}_{кр}$=?	$f_1 = f_3 = f_{max}$
Режим $t^{\circ}_{ож}$	γ_3	$t^{\circ}_{ож}$	

За виразом (21) для кожного стану запишемо:

$$f_{кр} = \frac{\gamma_3 * l^2}{8 * \sigma_{кр}} \tag{80}$$

$$f_{ож} = \frac{\gamma_3 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{ож}} \tag{81}$$

Прирівнявши праві частини, дістанемо

$$\sigma_{кр} = \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \cdot \sigma_{ож} \tag{82}$$

Рівняння зв'язку для цих станів набуде

$$\sigma_{\text{кр}} - \frac{{\gamma_1}^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{\text{кр}}^2} = \sigma_{\text{ож}} - \frac{{\gamma_1}^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{\text{ож}}^2} - \alpha \cdot E(t_{\text{кр}}^0 - t_{\text{ож}}^0) \tag{83}$$

Якщо в цей вираз підставити формулу для $\sigma_{\text{кр}}$ (82)і розв'язати відносно $t_{\text{кр}}^0$одержимо формулу для визначення критичної температури

$$t_{кр}^0 = t_{ож}^0 + \frac{\sigma_{ож}}{\alpha E}\left[1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3}\right] \tag{84}$$

Щоб визначити або перевірити (за умови використання для визначення f_{max}за методом порівняння режимів) у якому випадку має місце максимальна стріла

провисання, порівнюють значення вищої температури даної місцевості зі значенням критичної температури.

Якщо $t^{\circ}_{кр} < t^{\circ}_{ож}$то f_{max} буде за вищої температури.

Якщо $t^{\circ}_{кр} > t^{\circ}_{ож}$, то максимальна стріла провисанняf_{max} буде за умови ожеледі без вітру.

Ферми як опори для повітряної лінії електропередачі

Фермою називають геометрично незмінну шарнірно-стрижневу конструкцію.

Якщо осі стрижнів ферми лежать в одній площині, то її називають **плоскою.** Точки, у яких перехрещуються осі стрижнів, називають вузлами ферми, а ті вузли, якими ферма спирається на опору (рис. 21), називають опорними вузлами.

Рис. 21

Шарнірне з'єднання у вигляді трикутника показано на рис. 22, ***а*** - геометрично незмінна система, тобто ферма, а шарнірне з'єднання у вигляді чотирикутника - на рис. 22, б - геометрично змінна система.

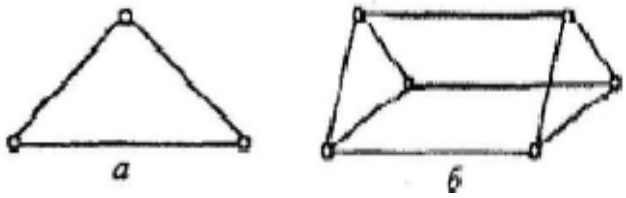


Рис.22

Утворити геометрично незмінну систему з кількістю стрижнів С (більше трьох) можна так:

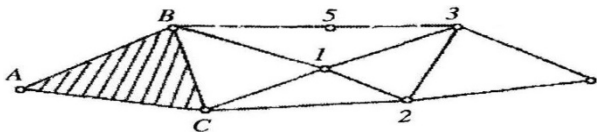


Рис.23

До головного трикутника *ЛВС* послідовно приєднуємо вузли, утворені **двома** стрижнями, **осі яких не лежать на одній прямій.**

Послідовність утворення вузлів на рис. 23 показано цифрами. Це найпростіша форма. Вузли, утворені на одній прямій, мають миттєву змінність.

Якщо *У* - загальна кількість вузлів, то для утворення інших (Y - 3) (крім *А, В, С)* необхідно по 2 стрижні, тобто 2(Y - 3).

Загальна кількість стрижнів (з урахуванням *АВ, ВС, С А)* буде

$$C= 3 + 2(7- 3) = \boldsymbol{2У}— 3. \qquad (85)$$

Це необхідна умова для одержання ферми. Перенесемо цю методику утворення плоскої ферми до утворення просторової ферми. Геометрично незмінні найпростіші просторові ферми можуть бути утворені таким способом.

До вихідного трикутника *АВС* (рис. 24) послідовно приєднують вузли, утворені **трьома** стрижнями, **осі яких не лежать в одній площині.** Це найпростіша просторова ферма.

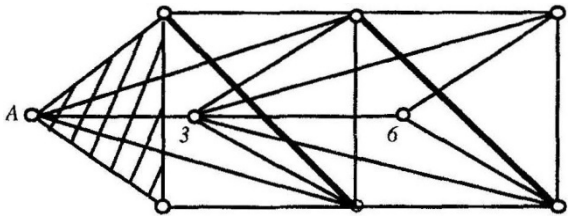


Рис.24

За способом утворення вузлів У визначимо кількість стрижнів *С,* Для утворення перших трьох вузлів потрібно 3 стрижні, для утворення інших *(Y*- 3) вузлів потрібно 3(7- 3) стрижнів. Разом необхідно

$$[3(Y-3) + 3] = (3Y-6) \qquad (86)$$

стрижнів. Умовою геометрично незмінної вільної (тобто незакріпленої) просторової ферми буде

$$C=3Y-6. \qquad (87)$$

Для одержати нерухомості просторової ферми необхідні ще 6 стрижнів, тому загальна кількість стрижнів, враховуючи опори, для геометрично незмінної і нерухомої ферми дорівнюватиме

$$C_Ф = C+6 = 3Y. \quad (88)$$

Розглянуті вгаце конструкції ферм у стрижнях мають сприймати тільки осьові зусилля, що зумовлюють деформації розтягу або стиску. Це конструкції, у яких зовсім немає згину як найнеприйнятншіого виду деформації, за якого значна частина матеріалу конструкції на згинання майже не використовується.

Для утворення конструкції, що сприймає тільки осьові зусилля, необхідно дотримуватися таких умов:

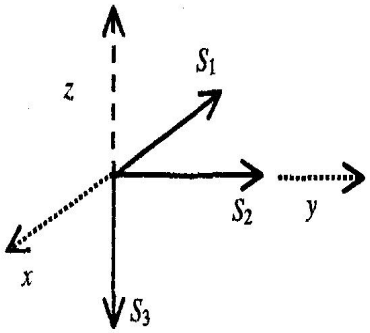
1) з'єднання кінців окремих стрижнів має бути шарнірним, що допускає вільне обертання (без тертя) кожного стрижня відносно центра шарніра; осі стрижнів мають проходити через центр шарніра;
2) зовнішні сили повинні бути прикладені тільки у вузлах;
3) стрижні мають бути прямолінійні, інакше в них виникнуть згинальні моменти. На практиці ідеальність шарнірів досягти неможливо, тому що ці конструкції працюють в атмосферному середовищі, де дощ, сніг призводять до виникнення іржі, тертя в шарнірах. Тому в реальних конструкціях стрижні нерухомо з'єднують (заклепки, зварювання). Це є причиною появи додаткових зусиль, не спрямованих уздовж осей стрижнів. Проте ці додаткові зусилля незначні, і там, де це можливо, ними нехтують.

Одним із головних етапів у проектуванні ферм є визначення зусиль у стрижнях. Існує декілька способів визначення зусиль у стрижнях:

1) спосіб вирізання вузлів;
2) графічне розв'язання задачі побудовою діаграми Максвелла - Кремони;
3) спосіб перетинів.

Найпростішим і найпоширенішим є спосіб вирізання вузлів, що буде розглянутий нижче. У процесі визначення зусиль може виявитися, що в окремих стрижнях завантаженої ферми зусилля дорівнюють нулю. Такі стрижні називають нульовими.

Розглянемо леми, користуючись якими можна визначити нульові стрижні, невиконуючи розрахувавсь.

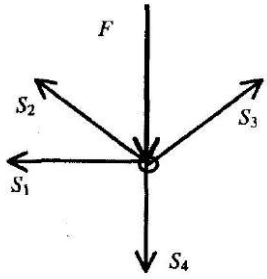


Лема 1

Якщо в ненавантаженому вузлі ферми перехрещуються три стрижні, що не лежать в одній площині, то зусилля в кожному з цих стрижнів дорівнюють нулю:

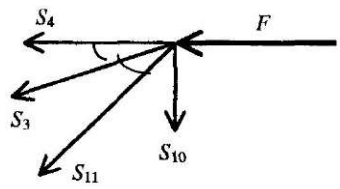
$$\sum x = 0, S_1 = 0; \sum y = 0, S_2 = 0; \sum z = 0, S_3 = 0$$

Лема 2



Якщо в навантаженому вузлі ферми лінія дії зовнішньої сили *F* збігається з віссю одного стрижня, то зусилля в цьому стрижні дорівнює за модулем зовнішній силі: $S_4 = -F$

Лема 3



Якщо в деякому вузлі ферми всі зовнішні сили і всі стрижні, крім одного, лежать в одній площині, то зусилля в стрижні, що не лежить у цій площині, дорівнює нулю.

Якщо $S_3 = 0$, зусилля S_4, F і S_{11} крім Sn, лежать в одній площині. Отже, $S_{11} = 0$

Розглянемо визначення зусиль у стрижнях ферми за способом вирізання вузлів. Сутність цього способу полягає в тому, що умовно вирізують вузли ферми, прикладають до них зовнішні сили і реакції стрижнів *S, i* записують рівняння рівноваги сил, прикладених до аналізованого вузла. Вважається, що всі стрижні розтягнуті, тобто реакції стрижнів Si спрямовують від вузлів. Якщо в результаті обчислень одержують відповідь зі знаком мінус, то відповідний стрижень стиснутий. Знайдені реакції стрижнів дорівнюють за модулем внутрішнім зусиллям у стрижнях.

Послідовність розгляду вузлів залежить від числа невідомих сил, прикладених до вузла, яке не повинно перевищувати числа рівнянь рівноваги сил. Для просторової ферми - три рівняння рівноваги, а отже, необхідно вибирати такі розрахункові вузли, у яких не більше трьох невідомих.

Розглянемо приклад визначення зусиль у стрижнях просторової ферми.

Визначити зусилля в стрижнях просторової ферми, поданої на рис. 25, а також реакції в опорах A_1, B_1, C_1, D_1 якщо на вузол С ферми діє горизонтальна сила *F* = 20 кН , спрямована уздовж стрижня *CD.* Розміри показано на рис. 25. За реакціями в опорах підібрати розміри болтів за міцністю на зріз і розтяг. Матеріал болта Сталь 30, $[\tau]$ = 90 МПа, [σ] = 180 МПа. Для визначення зусиль у стрижнях *1-12* ферми скористаємося способом вирізання вузлів. Будемо послідовно вирізувати вузли *A, B,* C, *D* (рис. 26), дотримуючись викладених вимог. Покажемо загальну картину розв'язуваної задачі.

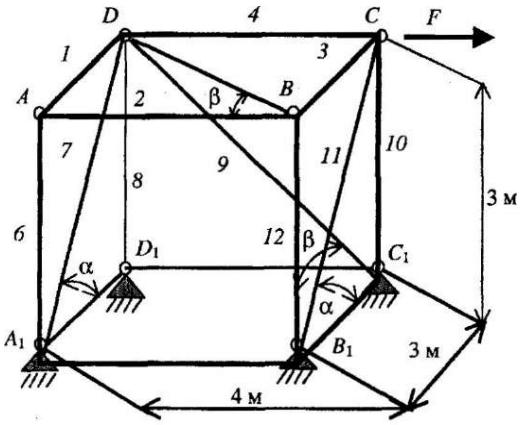

D
4
C
F
1
3
A
2
β
B
7
9
11
10
8
3 м
6
12
β
D1
C1
α
α
A1
B1
3 м
4 м

Рис. 25

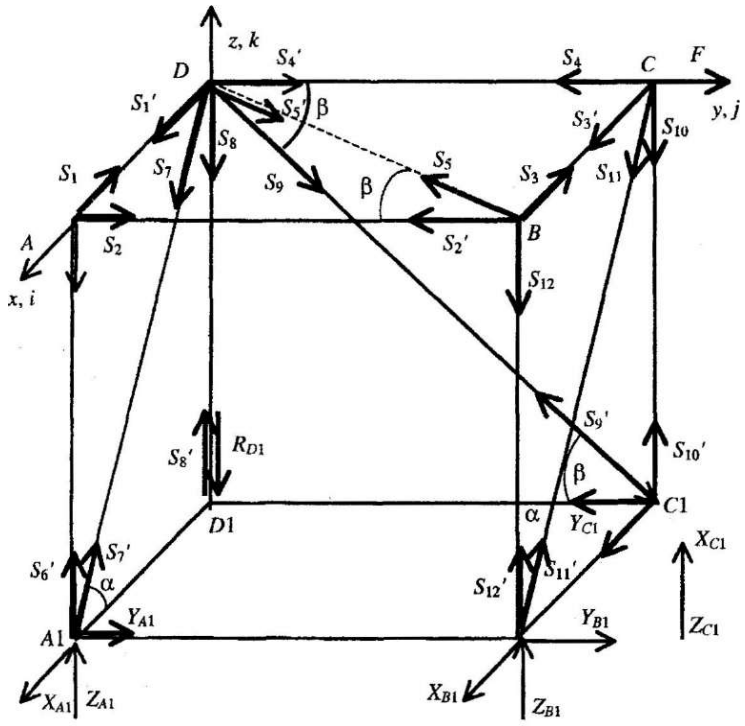
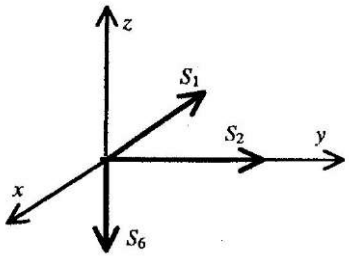

z, k
D
S4'
S4
C
F
y, j
S1'
S5'
β
S3'
S10
S8
S1
S7
S9
β
S5
S3
S11
A
S2
S2'
B
S12
x, i
S9'
S8'
RD1
S10'
β
C1
D1
α
YC1
XC1
S6'
S7'
α
S12'
S11'
A1
YA1
YB1
ZC1
XA1
ZA1
XB1
ZB1

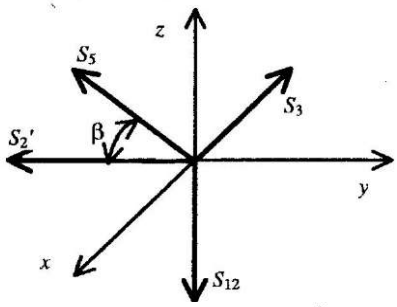
Рис. 26

Вузол А



Відповідно до леми 1 S] = 0; $S_2 = 0$; $5_6 = 0$, отже, 5,' = 0, Si' = 0,5_6' =0.

Вузол В



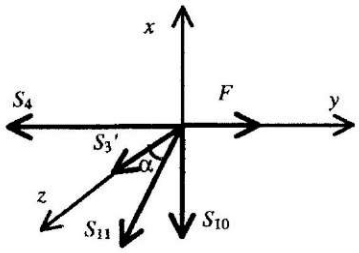
∑X = 0; -S_3 -S_5 sinβ = 0; S_3=0;

∑Y = 0; - S_2' - S_5 cos β = 0; S_5 = 0;

∑Z = 0;- S_{12} = 0; S_{12} = 0;

Отже, S_3' = 0; S_5' = 0; S_{12}' = 0.

Вузол С

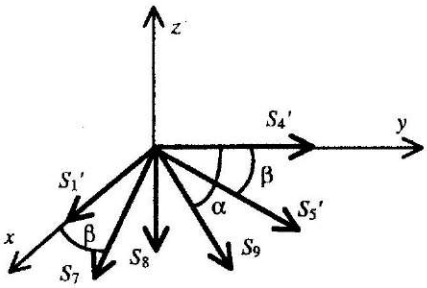


Використаємо лему 3. Усі сили і стрижні, крім S_{11}, , лежать в одній площині, отже, S_{11} = 0, якщо S_3' = 0. Відповідно до леми 2 зусилля в стрижні 4, тобто S_4 = F = 20 кН.

В інших стрижнях ∑Z = 0;

- S_{10}- S_{11} cos{90° - α} = 0, оскільки S_{11}=0, S_{10}= 0.

Вузол D



На вузлі C $S_4' = -S_4$. Невідомих сил у вузлі три:S_8, S_7, S_9.

∑X = 0; S_7 cos α+$S_1' + S_5' cos\{90 - \beta\}$=0 Оскільки $S_5' = 0$; S_1'= 0; то S_7' = 0. ∑y = 0; S_9' cos β+ S_5'cosβ + S_4' = 0; S_9 cos β = -S_4'

Оскільки $AD = DD_1$,то α = 45°, cos α = sin α = 0,707;

cosβ= $\frac{AB}{DB}=\frac{4}{5} = 0{,}8$

З рівняння ∑y = 0; $S_9 = -\frac{S_4}{cos\beta}$ = - (20:0,8) = 25 кН; S_9 = -25kH, тобто стрижень 9 стиснутий.

∑z = 0; - S_8 - S_7 cos(90 -α)-S_g cos(90 - β) = 0;

$S_8 = -S_9 \sin\beta = 25 \cdot 0{,}6 = 15$ кН; $S_8 = 15$ кН.

Визначимо реакції в опорах. Для цього невідому за значенням і напрямом реакцію подамо трьома складовими, спрямованими вздовж осей координат (рис. 26).

Ці складові визначимо із рівнянь рівноваги сил, прикладених до стоякових вузлів.

Вузол A_1

$\sum x = 0$; $x_{A1} - S_7' \cos\alpha = 0$; $x_{A1} = 0$;

$\sum y = 0$; $y_{A1} = 0$;

$\sum z = 0$; $z_{A1} + S_6' + S_7' \sin\alpha = 0$; $z_{A1} = 0$.

Тобто опора A_1 не навантажена, $R_{A1} = 0$.

Опора B_1

Навантаження на опору B_1 таке саме, як і на опору A_1 отже, опора B_1 не навантажена, R_{B1} - 0.

Опора C_1

$\sum \boldsymbol{x} = 0$; $x_{C1} = 0$;

$\sum y = 0$; $y_{C1} - S_9' \cos\beta = 0$; $y_{C1} = 25 \cdot 0{,}8 = 20$ кН.

З урахуванням знака S_9' $y_{C1} = -20$ кН.

$\sum z = 0$; $z_{C1} + S_9' \sin\beta = 0$; $z_{C1} = -25 - 0{,}6 = -15$ кН. З урахуванням знака $S_9' z_{C1} = 15$ кН.

Вузол D,

На вузол D діє одна сила S_8', спрямована вздовж осі z, отже, $\sum z = 0$; $S_8' + R_{D1} = 0$; $R_{D1} = -15$ кН.

Висновок: в опорі D_1 реакція R_{D1} спрямована вниз. Визначимо модуль і напрям реакції R_{C1}

$$R_{C1} = \sqrt{\sqrt{y_{C1}^2} + z_{C1}^2} = -\sqrt{(-20)^2 + 15^2} = 25 \text{ кН};$$

$\cos(R_{C1},j) = y_{C1}/R_{C1} = -(20/25) = -0{,}8$, $< (R_{C1},j) = 143°8'$;

cos $(R_{C1},k) = z_{C1}/R_{C1}$ = 15/25 = 0,6, $<(R_{Cl}\ k)$ = 53°8'.

Перевіривши на зріз болт у стояках, підберемо його діаметр.

Опора C_1

$$d \geq \sqrt{\frac{4R_{C1p}}{\pi[\tau]}} \geq \sqrt{\frac{4y_{C1}}{\pi[\tau]}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 20 \cdot 10^3}{\pi 90}} \geq 16{,}8 \text{ мм.}$$

Чи витримає болт розтяжне зусилля?

Опора C_1

$$d \geq \sqrt{\frac{4z_{C1}}{\pi[\sigma]_p}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 15 \cdot 10^3}{\pi 180}} \geq 10{,}3 \text{ мм.}$$

Опора D_1

$$d \geq \sqrt{\frac{4R_{D1}}{\pi[\sigma]_p}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 15 \cdot 10^3}{\pi 180}} \geq 10{,}3 \text{ мм}$$

Розтяжне зусилля в стояках C_1 і D_1 розрахункове значення болта витримає. За довідковою літературою діаметр болта - 20 мм.

Приклад

Здійснити механічний розрахунок проводу АС-120 для повітряної лінії електропередачі напругою 35 кВ, з кліматичними умовами, що повторюються один раз у 5 років. Режими експлуатації:

I. Мінімальна температура t°_{min} = - 40 °С.

IIа. Максимальне навантаження, режим найбільшого швидкісного напору

V_{max}= 30 м/с, t = - 5 °С, ожеледі немає.

IIб. Режим найбільшої ожеледі, швидкість вітру V=0,5 V_{max} , температура утворення ожеледі $t^{\circ}_{ож}$ = - 5 °С.

III.Режим середньорічних температур, ожеледі і вітру немає, $t^{\circ}_{сер}$= - 5 °С.

IV.Режим максимальних температур t°_{max} = + 40 °С. Відстань між однорівневими опорами l = 120 м. Швидкісний напір Q = *56* кг/мм^2,товщина стінки льоду на проводах с = 15 мм.

Для проводу АС за табл. 3 границя міцності $\sigma_{МЦ}$ = *29* кг/мм^2.

Модуль пружності E = 6,3·10^3 кг/мм

Температурний коефіцієнт лінійного розширення α = $23 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$

Знаходимо за табл. 5 для проводу АС-120

$$F= Fa+Fc = 115 + 22 = 137 \text{ мм}^2;$$

$$d= 15,2 \text{ мм}.$$

Вага одного метра проводу G_0 = 0,492 кг/м.

Питоме навантаження від власної ваги проводу дістанемо за формулою(3)

$$\gamma_1 = \frac{G_0}{F} = 0,492 : 137 = 3,59 \cdot 10^3 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{мм}^2)$$

Питоме навантаження від ожеледі (7)

$\gamma_2 = G/F = 0,00283[c(c + d)/F] = 0,00283[15(15 + 15,2)/137] = 9,35 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·мм^2).

Питоме навантаження від ожеледі і власної ваги (8)

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2 = 3,59 \cdot 10^{-3} + 9,35 \cdot 10^{-3} = 12,94 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{мм}^2)$$

Питоме навантаження від тиску вітру на провід без ожеледі.

За табл. 1 ітри швидкісному напорі Q = 56 кг/м^2, α = 0,78. Для d = 15,2 мм аеродинамічний коефіцієнт C_x = 1,2. Тоді за формулою (11)

$$\gamma_4 = \frac{0,78 \cdot 1,2 \cdot 56 \cdot 15,2}{137 \cdot 10^{-3}} \text{кг}/(\text{м·мм }). \text{ кг}/(\text{м·мм }).$$

Питоме навантаження від тиску вітру на провід, покритий ожеледдю (12). Швидкісний напір у цьому випадку відповідно до табл. 7 Q = 14 кг/м^2 *(*Q = $0,25Q_{max}$ = 0,25·56 = 14 кг/м^2)

Тоді за табл. 1 α = 1, C_x= 1,2.

$$\gamma_5 = \frac{1,0 \cdot 1,2 \cdot 14(15,2+30)}{137 \cdot 10^3} = 5,54 \cdot 10^3 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{мм })$$

Сумарне питоме навантаження на провід від його власної ваги і тиску вітру, якщо немає ожеледі (рис. 8, а), дорівнює за формулою (14)

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_4^2} = \sqrt{[(3{,}59 \cdot 10^{-3})^2 + (5{,}8 \cdot 10^{-3})^2]} = 6{,}8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$$

марне питоме навантаження на провід від його власної ваги і тиску вітру за наявності сльоти (рис. 8, б) дорівнює за формулою (14)

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2} = \sqrt{[(12{,}94 \cdot 10^{-3})^2 + (5{,}54 \cdot 10^{-3})^2]} = 14{,}1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$$

.

Визначимо вихідний режим, тобто режим, за якого напруження максимальне. Це можливо за низької температури t°_{min} = - 40 °С або за максимального навантаження $\gamma_{\max} = \gamma_7$

Порівняємо два режими:

Режим I	t°_{min}	γ_1	$\sigma_{\text{I}} = [\sigma]_{\text{I}}$
Режим II	$t^{\circ}_{\text{ож}}$	$\gamma_{\max} = \gamma_7$	$\sigma_{\text{II}} = [\sigma]_{\text{II}}$

Визначимо $l_{\text{кр}}$ за формулою (73). Випишемо необхідні дані:

t_{min}= - 40 °С; $[\sigma]_{\text{II}}$= 12,2 кг/мм^2 (табл. 3);

$t_{\text{ож}}$ = - 5 °С; $[\sigma]_{\text{I}}$ = 10,75 кг/мм^2 (табл. 3);

$$\gamma_1 = 3{,}59 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}; \alpha = 23 \cdot 10^{-6}\ 1/\text{град};$$

$$\gamma_{max} = \gamma_7 = 13{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}; \text{E} = 6{,}3 \cdot 10^3\ \text{кг/мм}^2$$

Тоді

$$l_{\text{кр}} = \frac{12{,}2}{3{,}59 \cdot 10^2} \sqrt{\frac{12{,}2 - 10{,}75 + 23 \cdot 10^{-3} \cdot 6{,}3 \cdot 10^3\,(-5 - (-40))}{\frac{6{,}3 \cdot 10^3}{24}\left[\left(\frac{14{,}1 \cdot 10^{-3}}{3{,}59 \cdot 10^{-3}}\right)^2 - \left(\frac{[\sigma]_{\text{II}}}{[\sigma]_{\text{I}}}\right)^2\right]}} = 142{,}5\ \text{м}$$

$l_{\text{кр}} = 142{,}5$ м

Режим I	t_{min}	γ_1	$\sigma_{\text{I}} = [\sigma]_{\text{I}}$
Режим II	$t_{\text{сер}}$	γ_1	$\sigma_{\text{III}} = [\sigma]_{\text{III}}$

Висновок: $l_{\text{кр}} > l$ =120 м, отже, вихідним є режим I, тобто режим мінімальної температури t_{min}= - 40 °С.

Порівняємо інші режими:

Скористаємося формулою (72). Вихідні дані:

$[\sigma]_{\text{I}}$ = 10,75 кг/мм^2 (табл. 3); $t^{\circ}_{\text{сер}}$ = - 5 °С;

$[\sigma]_{\text{III}}$= 7,25 кг/мм^2 (табл. 3); t°_{min}= - 40 °С;

$\gamma_3 = \gamma_1$=3,59 · 10^{-3}кг/(м · мм^2).

Тоді

$$l_{\text{кр}} = \frac{7{,}25}{3{,}59 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{7{,}25 - 10{,}75 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}3 \cdot 10^{3}\,(-5-(-40))}{\frac{6{,}3 \cdot 10^{3}}{24}\left[1 - \left(\frac{7{,}25}{10{,}75}\right)^2\right]}} = 201{,}5\,м$$

Порівняємо режими:

Режим III	$\boldsymbol{\gamma_1}$	$\boldsymbol{t^{\circ}_{\text{сер}}}$	$\boldsymbol{\sigma_{\text{III}} = [\sigma]_{\text{III}}}$
Режим II	$\boldsymbol{\gamma_{\max} = \gamma_7}$	$\boldsymbol{t^{\circ}_{\text{ож}}}$	$\boldsymbol{\sigma_{\text{II}} = [\sigma]_{\text{II}}}$

Вихідні дані:

$[\sigma]_{\text{III}}$= 7,25 кг/мм^2 ;$[\sigma]_{\text{II}}$= 12,2 кг/мм^2;

$t^{\circ}_{\text{сер}}$= - 5 °С;$t^{\circ}_{\text{ож}} = 5$ °С

$$l_{\text{кр}} = \frac{12{,}2}{3{,}59 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{12{,}2 - 7{,}25 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}3 \cdot 10^{3}\,(-5-(-5))}{\frac{6{,}3 \cdot 10^{3}}{24}\left[\left(\frac{14{,}1 \cdot 10^{-3}}{3{,}59 \cdot 10^{-3}}\right)^2 - \left(\frac{7{,}25}{10{,}75}\right)^2\right]}} = 201{,}5\,м$$

В одержаній нерівності $l_{\text{кр1}} > l_{\text{кр2}} > l_{\text{кр3}}$ сенс має $l_{\text{кр2}}$, з яким будемо порівнювати l: $l_{\text{кр2}} > l$

Ще раз підкреслимо, що найнебезпечнішим режимом буде низька температура. Визначимо стрілу провисання проводу за різних умов експлуатації.

Скористаємося формулою (56), за якою $f = \frac{\gamma}{8\sigma}$ для кожного з аналізованих випадків, але з власними навантаженням у і напруженням а. Навантаження вже визначено. Обчислимо напруження ст для аналізованих режимів, скориставшися рівнянням стану нитки (62).

1. Для вихідного режиму, тобто режиму низької температури

$$\sigma = [\sigma]_{\text{I}} = 10{,}75 \frac{кг}{мм^2}$$

$$\gamma_1 = 3{,}59 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{мм^2}$$

Провисання проводу дорівнюватиме

$f_{-40} = \frac{\gamma_1 l^2}{8[\sigma]_{\text{I}}} = \frac{3{,}59 \cdot 10^{-3} \cdot 120^2}{8 \cdot 10{,}75} = 0{,}6$ м.

Кожного разу шукане напруження визначатимемо, порівнюючи з режимом, за якого критичний прогін буде тобто з режимом низької температури. Отже, у лівій частині рівнянім (62) буде шукане напруження і питоме навантаження для даного режиму, а в правій - усі значення для вихідного режиму (у цьому випадку - режим мінімальної температури) і температура для шуканого напруження.

2. Знайдемо напруження ст за температури t_{max}= +40 °С, тобто σ_{+40}

Вихідні дані : ліва частина рівняння (62); напруження σ_{+40}; питоме навантаження при t = +40 °С від власної ваги, тобто γ_1 ; права частина рівняння (62).

Вихідний стан за мінімальної температури, тобто режим I за нього:

$\gamma_1 = \gamma_{\text{I}}$; $[\sigma]_{\text{I}}$ = 10,75 кг/мм^2; t_{max} = +40 °С; $t_{вих}$= -40 °С;

α = 23$\cdot 10^{-6}$1/град;

Е= 6,3-10^3 кг/мм^2;

$\gamma_{-40} = \gamma_1 = 3{,}59 \cdot 10^{-3}$ кг/м $\cdot$ мм^2

Тоді рівняння (62) набуде вигляду

$$\sigma_{+40} - \frac{3{,}59 \cdot 10^{-3} \cdot 120^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24\sigma_{+40}^2} =$$

$$= 10{,}75 \frac{(3{,}59 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 120^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24 \cdot 10{,}75^2} - 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}3 \cdot 10^3 \, [40 - (-40)];$$

$$\sigma_{+40} - \frac{48{,}7}{{\sigma_{+40}}^2} = 10{,}75 - 0{,}42 - 11{,}59;$$

$$\sigma_{+40} - \frac{48{,}7}{{\sigma_{+40}}^2} = -1{,}26$$

$${\sigma_{+40}}^3 - 1{,}26{\sigma_{+40}}^2 - 48{,}7 = 0$$

Розв'язуючи це рівняння (дод. 6), знаходимо σ_{+40}= 3,27 кг/мм^2. Стріла провисання

$$f_{+40} = \frac{3{,}59 \cdot 10^{-3} \cdot 120^2}{8 \cdot 3{,}27} = 1{,}98 \text{ м.}$$

3. Визначимо напруження в проводі за умови ожеледі без вітру. Вихідні дані: шукане напруження σ_3 ; питоме навантаження $\gamma_3 = 12{,}94 \cdot 10^{-3}$ кг/м · мм^2, температура льоду $t_{ож}$=5 °С.

Порівнюючи знову з вихідним станом, отримаємо рівняння зв'язку

$$\sigma_3 - \frac{120^2 (12{,}94 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24\sigma_3^2} =$$

$$= 10{,}75 \frac{(3{,}59 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 120^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24 \cdot 10{,}75^2} - 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}3 \cdot 10^3 \, [(-5) - (-40)];$$

$$\sigma_3 - \frac{632{,}9}{{\sigma_3}^2} = 10{,}75 - 0{,}42 - 5{,}07;$$

Звідки

$$\sigma_3 - \frac{632{,}9}{{\sigma_3}^2} = 5{,}26 \text{ або } \sigma_3 - 5{,}26{\sigma_3}^2 - 632{,}9 = 0$$

. Розв'язуючи це рівняння (дод. 9), отримаємо σ_3 = 10,74 кг/мм^2.

Стріла провисання

$$f_3 = \frac{12{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 120^2}{8 \cdot 10{,}74} = 2{,}17 м$$

4.Знайдемо напруження в проводі за максимального навантаження, тобто за наявності ожеледі з вітром.

Вихідні дані: вихідне напруження σ_7; питоме навантаження

$\gamma_7 = 13{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг/м· мм^2 ; температура ожеледі t =-5^{o}C.

Рівняння зв'язку

$$\sigma_7 = \frac{120^2 (14{,}1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24(\sigma_7)^2} =$$

$$= \frac{(3{,}59 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 120^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24 \cdot 10{,}75^2} - 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}3 \cdot 10^3 [(-5) - (-40)];$$

$$\sigma_7 = \frac{751{,}5}{(\sigma_7)^2} = 5{,}26;$$

$$(\sigma_7)^3 - 5{,}26(\sigma_7)^2 - 751{,}5 = 0$$

Розв'язуючи це рівняння , одержимо $\sigma_7 = 11{,}65$ кг/мм^2 .

Стріла провисання

$$f_7 = \frac{13{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 120^2}{8 \cdot 11{,}65} = 2{,}08.$$

5. Визначимо напруження в проводі за середньорічної (експлуатаційної) температури t =-5^{o}C, ожеледі і вітру немає.

Вихідні дані: вихідне напруження - $\sigma_{експл}$; питоме навантаження - власна вага проводу $\gamma_1 = 3{,}59 \cdot 10^{-3}$ кг/м· мм^2; середньорічна температура t =-5^{o}C.

Рівняння зв'язку

$$\sigma_{експл} = \frac{120^2 (359 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24(\sigma_{експл})^2} =$$

$$= 10{,}75 - \frac{(3{,}59 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 120^2 \cdot 6{,}3 \cdot 10^3}{24 \cdot 10{,}75^2} - 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}3 \cdot 10^3 [(-5) - (-40)];$$

Далі див. п 1.

$$\sigma_{експл} - \frac{48{,}7}{(\sigma_{експл})^2} = 10{,}75 - 0425{,}07;$$

$$(\sigma_{експл})^3 - 5{,}26(\sigma_{експл})^2 - 48{,}7 = 0;$$

Далі див. попереднє розв'язання.

При розв'язанні $\sigma_{експл}$ = 6,45 кг/мм^2 (дод.7).

Відповідно до табл.3 припустиме напруження для середньорічних температур для проводу АС-120 кг/мм^2 $[\sigma]_{III} = 7{,}25$ кг/мм^2 $> \sigma_{експл}$ =6,45 кг/мм^2

Умови міцності виконуються.

Порівнюючи провисання проводів за такими показниками:

а) мінімальною температурою f_{-40}=0,6 м;

б)максимальною температурою f_{+40}=1,98 м;

в) ожеледдю f_3 =2,17 м;

г) зледенінням з вітром f_7=2,08 м f_7 = 2,08м,

видно, що за ожеледді без вітру максимальне провисання проводу f_3=2,17 м.

Залежно вд цього значення і відстані від проводу повітряної лінії до поверхні земле(дод. 4) визначають висоту опори.

Продовження

Характеристики сталеалюмінієвих проводів марки АС за ГОСТ 839-59

Номінальний переріз, мм^2	Число і діаметр дротів проводу, мм		Площа перерізу проводу, мм^2			Розрахунковий діаметр проводу, мм	Розрахункова вага 1 км проводу, кг	Відношення перерізу алюмінію і сталі	Модуль пружності проводу, кг/мм^2	Коефіцієнт температурного розширення проводу, 10^{-6} 1/град
	алюмінієвих	сталевих	алюмінієвої частини	сталевої частини	проводу в цілому					
1. З однодротовим сталевим сердечником										
10	6x1,6	1x1,2	10,1	1,13	11,23	4,4	0,036	8,95	7680	20,1
16	6x1,8	1x1,8	15,3	2,50	17,80	5,4	0,062	6,12	8260	19,2
25	6x2,2	1x2,2	22,8	3,80	26,60	6,6	0,092	6,00	8260	19,2
35	6x2,8	1x2,8	36,9	6,20	43,10	8,4	0,150	5,95	8260	19,2
50	6x3,2	1x3,2	48,3	8,00	56,30	9,6	0,196	6,04	8260	19,2
70	6x3,8	1x3,8	68,0	11,30	79,30	11,4	0,275	6,02	8260	19,2
95	6x4,5	1x4,5	95,4	15,90	111,3	13,5	0,386	6,00	8260	19,2
2. З багатодротовим сталевим сердечником										
120	28x2,29	7x2,0	115	22,0	137,0	15,2	0,492	5,23	8500	18,8
150	28x2,59	7x2,2	148	26,6	174,6	17,0	0,617	5,57	8400	19,00
185	28x2,87	7x2,5	181	34,4	215,4	19,0	0,771	5,27	8480	18,8
240	28x3,29	7x2,8	238	43,1	281,1	21,6	0,997	5.53	8400	18,9
300	28x3,66	7x3,2	295	56,3	351,3	24,2	1,257	5,24	8500	18,8
400	28x4,24	19x2,2	395	72,2	467,2	28,0	1,660	5,47	8420	18,9

Характеристика повітряних і кабельних ліній

***Таблиця 5*. Конструкційні і розрахункові дані голих мідних, алюмінієвих і сталеалюмінієвих проводів**

Мідні проводи (М)				Алюмінієві проводи (А)				Сталеалюмінієві проводи(АС)				
Номінальний переріз, мм^2	Розрахунковий переріз, мм^2	Розрахунковий діаметр мм	Вага проводу, кг\км	Номінальний переріз, мм^2	Розрахунковий переріз, мм^2	Розрахунковий діаметр мм	Вага проводу, кг\км	Номінальний переріз, мм^2	Розрахунковий переріз , мм^2		Розрахунковий діаметр мм	Вага проводу, кг\км
									Алюмінієвої частини	Сталевої частини		
4	3,93	2,2	35	16	15,9	5,1	44	25	22,8	3,8	6,6	92
6	5,85	2,7	52	25	24,7	6,4	68	35	36,9	6,2	8,4	150
10	9,79	3,5	87	35	34,4	7,5	95	50	48,3	8,0	9,6	196
16	15,5	5,0	140	50	49,5	9,0	136	70	68,0	11,3	11,4	275
25	24,5	6,3	221	70	69,3	10,7	191	95	95,4	15,9	13,5	386
35	34,1	7,5	323	95	93,3	12,4	257	120	115	22,0	15,2	492
50	48,5	8,9	439	120	117	14,0	322	150	148	26,6	17,0	617
70	68,3	10,7	618	150	148	15,8	407	195	181	34,4	19,0	771
95	92,5	12,5	837	185	183	17,5	503	240	238	43,1	21,6	997
120	117	14,0	1058	240	239	20,0	656	300	295	56,3	24,2	1257
150	148	15,8	1338	300	298	22,4	817	400	395	72,2	28,0	1660

***Таблиця 6*. Конструкційні і розрахункові дані сталеалюмінієвих проводів полегшеної(АСО) і зміцненої(АСУ) конструкці**

Номінальний переріз, мм^2	Розрахунковий переріз, мм^2		Розрахунковий діаметр проводу мм	Вага проводу, кг\км	Розрахунковий переріз, мм^2		Розрахунковий діаметр проводу мм	Вага проводу, кг\км
	Алюмінієвої частини	Сталевої частини			Алюмінієвої частини	Сталевої частини		
120	-	-	-	-	116	26,6	15,5	530
150	148	17,8	16,6	559	147	34,4	17,5	678
185	181	22,0	18,4	687	185	43,1	19,6	850
240	243	31,7	21,6	937	241	56,3	22,4	1111
300	291	37,2	23,5	1098	297	72,2	25,2	1390
400	392	49,5	27,2	1501	400	93,3	29,0	1840
500	482	59,7	30,2	1836	-	-	-	-
600	578	72,2	33,1	2206	-	-	-	-
700	712	93,3	27,1	2756	-	-	-	-

***Таблиця 7*. Розрахункові кліматичні умови і рекомендовані сполучення їх для визначення механічної міцності повітряних ліній напругою вище 1000 В**

Режим роботи повітряних ліній	Температура, °С	Швидкісний напір вітру Q, кг/м^2	Товщина стінки ожеледі, мм
Нормальний	Вища	0	0
	-5	0	Найбільша
	Нижча	0	0
	Середньорічна	0	0
	-5	Q_{max}	0
	-5	0,25 Q_{max} , але не менша 14 кг/м^2	Найбільша

ДОДАТКИ

Додаток 1

Матеріал	ГОСТ	Діаметр, мм	Об'ємна вага, кг/мм^2	Тимчасовий опір, кг/мм^2	Границя текучості, кг/мм^2	Модуль пружності, кг/мм^2	Коефіцієнт температурного розширення, 1/град
Алюміній	6132-63	0,1...3,0	2,7	16	11	6330	$23 \cdot 10^{-6}$
		3,01...5		15			
Алдрей	-	-	2,7	31	22	6700	$23 \cdot 10^{-6}$
Сталь у багатодротових проводах	5800-51	1,8...2,0	7,85	70	50	20000	$12 \cdot 10^{-6}$
				65	40		
Сталь у однодротових проводах	8053-56	3,0...5,0	7,85	55	20	20000	$12 \cdot 10^{-6}$
Сталь у сердечниках комбінованих проводів і тросах	9850-60 3062-69 3063-66	-	7,85	120	85	20000	$12 \cdot 10^{-6}$
Бронза	ТУК ОММ 505.128-55	1,84...3,08	8,9	54	35	13000	$18 \cdot 10^{-6}$
Мідь твердотягнена	2112-62	До 3,99	8,9	39	28	13000	$17 \cdot 10^{-6}$
		4...5,99		37			

Фізико-механічні характеристики дротів

Додаток 2

Номінальний переріз, мм^2	Число і діаметр дротів,мм	Площа перерізу проводу, мм^2	Розрахований діаметр проводу, мм	Розрахована вага проводу, кг/мм	Нормальна будівельна довжина проводу, мм
16	7x1,70	15,9	5,1	0,044	4500
25	7x2,12	24,7	6,4	0,068	4000
35	7x2,50	34,4	7,5	0,095	4000
50	7x3,00	49,5	9,0	0,136	3500
70	7x3,55	69,3	10,7	0,191	2500
95	7x4,12	93,3	12,4	0,257	2050
120	19x2,80	117	14,0	0,322	1500
150	19x3,15	148	15,8	0,407	1250
185	19x3,50	183	17,5	0,503	1000
240	19x4,00	239	20,0	0,656	1000
300	37x3,20	298	22,4	0,817	1000
400	37x3,69	396	25,8	1,087	800
500	37x4,15	501	29,1	1,376	600
600	61x3,55	604	32,0	1,658	500

Примітки 1. Сталевий сердечник сталебронзових проводів може бути виконаний із тимчасовим опором 150 кг/мм^2

2. Відповідно до ПУЄ-65 тимчасовий опір алюмінієвих дротів діаметром більше 2,5 мм дорівнює 15 кг/мм^2

Продовження

Характеристики сталеалюмінієвих проводів марки АС за ГОСТ 839-59

Номінальний переріз, мм^2	Число і діаметр дротів проводу, мм		Площа перерізу проводу, мм^2			Розрахунковий діаметр проводу, мм	Розрахункова вага проводу, кг/м	Відношення перерізу алюмінію і сталі	Модуль пружності проводу, кг/мм^2	Коефіцієнт температурного розширення проводу, 10^{-6}1/град
	алюмінієвих	сталевих	алюмінієвої частини	сталевої частини	проводу в цілому					
1. З однодротовим сталевим сердечником										
10	6x1,6	1x1,2	10,1	1,13	11,23	4,4	0,036	8,95	7680	20,1
16	6x1,8	1x1,8	15,3	2,50	17,80	5,4	0,062	6,12	8260	19,2
25	6x2,2	1x2,2	22,8	3,80	26,60	6,6	0,092	6,00	8260	19,2
35	6x2,8	1x2,8	36,9	6,20	43,10	8,4	0,150	5,95	8260	19,2
50	6x3,2	1x3,2	48,3	8,00	56,30	9,6	0,196	6,04	8260	19,2
70	6x3,8	1x3,8	68,0	11,30	79,30	11,4	0,275	6,02	8260	19,2
95	6x4,5	1x4,5	95,4	15,90	111,3	13,5	0,386	6,00	8260	19,2
2. З багатодротовим сталевим сердечником										
120	28x2,29	7x2,0	115	22,0	137,0	15,2	0,492	5,23	8500	18,8
150	28x2,59	7x2,2	148	26,6	174,6	17,0	0,617	5,57	8400	19,00
185	28x2,87	7x2,5	181	34,4	215,4	19,0	0,771	5,27	8480	18,8
240	28x3,29	7x2,8	238	43,1	281,1	21,6	0,997	5.53	8400	18,9
300	28x3,66	7x3,2	295	56,3	351,3	24,2	1,257	5,24	8500	18,8
400	28x4,24	19x2,2	395	72,2	467,2	28,0	1,660	5,47	8420	18,9

Гіперболічні синуси

Додаток 3

Арг	0,00	Арг	0,00	Арг	0,00	Арг	0,00
0,0	0,0000	2,6	6,6947	5,2	90,6334	7,8	1220,3008
0,1	0,1002	2,7	7,4063	5,3	100,1659	7,9	1348,6410
0,2	0,2013	2,8	8,1919	5,4	110,7009	8,0	1490,4788
0,3	0,3045	2,9	9,0596	5,5	122,3439	8,1	1647,2339
0,4	0,4108	3,0	10,0179	5,6	135,2114	8,2	1820,4750
0,5	0,5211	3,1	11,0765	5,7	149,4320	8,3	2011,9361
0,6	0,6367	3,2	12,2459	5,8	165,1483	8,4	2223,5333
0,7	0,7586	3,3	13,5379	5,9	182,5174	8,5	2457,3843
0,8	0,8881	3,4	14,9654	6,0	201,7132	8,6	2715,8297
0,9	1,0265	3,5	16,5426	6,1	222,9278	8,7	3001,4560
1,0	1,1752	3,6	18,2855	6,2	246,3735	8,8	3317,1219
1,1	1,3356	3,7	20,2113	6,3	272,2850	8,9	3665,9867
1,2	1,5095	3,8	22,3394	6,4	300,9217	9,0	4051,5419
1,3	1,6984	3,9	24,6911	6,5	332,5701	9,1	4477,6463
1,4	1,9043	4,0	27,2899	6,6	367,5469	9,2	4948,5645
1,5	2,1293	4,1	30,1619	6,7	406,2029	9,3	5469,0096
1,6	2,3756	4,2	33,3357	6,8	448,9231	9,4	6044,1903
1,7	2,6456	4,3	36,8431	6,9	496,1369	9,5	6679,8634
1,8	2,9422	4,4	40,7193	7,0	548,3161	9,6	7382,3907
1,9	3,2682	4,5	45,0030	7,1	605,9831	9,7	8158,8036
2,0	3,6269	4,6	49,7371	7,2	669,7150	9,8	9016,8724
2,1	4,0219	4,7	54,9690	7,3	740,1496	9,9	9965,1852
2,2	4,4571	4,8	60,7511	7,4	817,9919	10,0	11013,233
2,3	4,9370	4,9	67,1413	7,5	904,0209		
2,4	5,4662	5,0	74,2034	7,6	999,0977		
2,5	6,0502	5,1	82,0079	7,7	1104,1738		

Продовження

Гіперболічні косинуси

Арг	0,00	Арг	0,00	Арг	0,00	Арг	0,00
0,0	1,0000	2,6	6,7690	5,2	90,6389	7,8	1220,3012
0,1	1,0050	2,7	7,4735	5,3	100,1709	7,9	1348,6414
0,2	1,0200	2,8	8,2527	5,4	110,7055	8,0	1490,4792
0,3	1,0450	2,9	9,1146	5,5	122,3480	8,1	1647,2342
0,4	1,0810	3,0	10,0677	5,6	135,2151	8,2	1820,4753
0,5	1,1280	3,1	11,1215	5,7	149,4354	8,3	2011,9363
0,6	1,1860	3,2	12,2866	5,8	165,1513	8,4	2223,5335
0,7	1,2550	3,3	13,5748	5,9	182,5201	8,5	2457,3845
0,8	1,3370	3,4	14,9987	6,0	201,7156	8,6	2715,8299
0,9	1,4330	3,5	16,3128	6,1	222,9300	8,7	3001,4562
1,0	1,5430	3,6	18,3128	6,2	246,3755	8,8	3317,1221
1,1	1,6880	3,7	20,2360	6,3	272,2869	8,9	3665,9868
1,2	1,8107	3,8	22,3618	6,4	300,9233	9,0	4051,5420
1,3	1,9710	3,9	24,7113	6,5	332,5710	9,1	4477,6464
1,4	2,1510	4,0	27,3082	6,6	367,5483	9,2	4948,5646
1,5	2,3520	4,1	30,1784	6,7	406,2035	9,3	5469,0097
1,6	2,5775	4,2	33,3507	6,8	448,9242	9,4	6044,1904
1,7	2,8283	4,3	36,8567	6,9	496,1379	9,5	6676,8635
1,8	3,1075	4,4	40,7316	7,0	548,3170	9,6	7382,3918
1,9	3,4177	4,5	45,0141	7,1	605,9839	9,7	8158,8030
2,0	3,6269	4,6	49,7472	7,2	669,7158	9,8	9016,8725
2,1	4,1443	4,7	54,9781	7,3	740,1503	9,9	9965,1852
2,2	4,5679	4,8	60,7593	7,4	817,9925	10,0	11013,233
2,3	5,0372	4,9	67,1486	7,5	904,0215		
2,4	5,5569	5,0	74,2099	7,6	999,0982		
2,5	6,1323	5,1	82,1040	7,7	1104,1742		

Додаток 4

Найменші допустимі відстані від проводів повітряних ліній до поверхні землі h_3,м

Умови роботи повітряної лінії	Характеристика місцевості	Напруга, кВ						
		До 1	До 20	35... 100	150	220	330	500
Нормальний режим	Населена місцевість	6	7	7	7,5	8	8	8
	Ненаселена місцевість	5	6	6	6,5	7	7,5	8
	Важкодоступна	4	5	5	5,5	6	6,5	7
	Недоступні схили гір, скелі, стрімча-	2	3	3	3,5	4	4,5	5

Додаток 5

Порядок розв'язання рівняння вигляду $x^3 + ax^2 + c = 0$.

Вважаємо, що

$$x = (y - \frac{a}{3})$$

Визначаємо

$$x^3 \rightarrow (y - \frac{a}{3})^3 = y^3 - 3(\frac{a}{3})y^2 + 3y(\frac{a}{3})^2 - (\frac{a}{3})^3$$

Визначаємо

$$x^2 \rightarrow (y - \frac{a}{3})^2 = y^2 - 2y(\frac{a}{3}) + (\frac{a}{3})^2$$

Підставляючи у вихідне рівняння, одержуємо

$$x^3 \pm 3px \pm 2q = 0,$$

де $p > 0$; $q > 0$.

Розв'яжемо рівняння за допомогою кругових і гіперболічних функцій.

Випадок1: $x^3 + 3px \pm 2q = 0, p > 0; q > 0$. Визначають допоміжний параметрφ із sh φ =ql(p =$\sqrt{p}$) (дод. 3), тоді корені x_2 і x_3 будуть уявні, $x_1 = \pm 2\sqrt{p}sh(\varphi/3)$.

Випадок 2: $x^3 - 3px \pm 2q = 0$, $p > 0$; $q > 0$; $p^3 < q^2$. Визначають кут φ із ch φ = $ql(p\sqrt{p})$ (дод. 3), тоді кореніх$_2$і x_3 будуть уявні, $x_1 = \pm 2\sqrt{p}ch(\varphi/3)$.

Випадок 3: $x^3 - 3px \pm 2q = 0$, $p > 0$; $q > 0$; $p3 > q2$. Визначають кут φ із $\cos\varphi = \frac{q}{p\sqrt{p}}$, тоді $x_1 = \pm 2\sqrt{p}\cos(\varphi/3)$; x_2 —$\pm 2\sqrt{p}\cos(60° - \varphi/3)$; $x_3 = \pm 2\sqrt{p}\cos(60° + \varphi/3)$.

Випадок 4 (проміжний випадок між 2 і 3):

$x^3 - 3px \pm 2q = 0, p > 0$, $q > 0$; $p^3 = q^2$', $x_1 = \pm 2\sqrt{p}$; $x_2 = x_3 = \pm\sqrt{p}$

Додаток 6

Розв'язання рівняння $\sigma^3_{+40} + 1{,}26\sigma^2_{+40} - 48{,}7 = 0$

Візьмемо $\sigma_{+40} = (x^2 - \frac{1{,}26^2}{3^2})$, або $\sigma^3_{+40} = x^2 - 0{,}42^2$

$$\sigma^3_{+40} \rightarrow x^3 - \frac{3*1{,}26}{3}x^2 + 3(\frac{1{,}26}{3})^2 \; x - (\frac{1{,}26}{3})^3.$$

$$\sigma^2_{+40} \rightarrow x^2 - \frac{2*1{,}26}{3}x + (\frac{1{,}26}{3})^2$$

Підставляємо у вихідне рівняння:

$$x^3 - 1{,}26x^2 + 0{,}53x - 0{,}074 + 1{,}26x^2 - 1{,}058x + 0{,}22 - 48{,}7 = 0;$$

$$x^3 - 0{,}53x - 48{,}4 = 0 \text{ або } x^3 - 3*0{,}18x - 2*24{,}2 = 0;$$

$$p = 0{,}18 \rightarrow p^3 = 0{,}0058 \; ; \; q^2 > p^3.$$

За випадком 2 (дод. 5) $q = 24{,}2 \rightarrow q^2 = 585{,}6$.

Знаходимо допоміжну функцію

$$\text{ch}\varphi = \frac{q}{p\sqrt{\text{p}}} = \frac{24.2}{0.18*0.4242} = = \frac{24.2}{0.07636} = 316.9;$$

$$\varphi = 6{,}45; \; \frac{\varphi}{3} = 2{,}15; \; \text{ch}\left(\frac{\varphi}{3}\right) = 4{,}35$$

$$x_1 = \pm 2\sqrt{\text{p}}\,\text{ch}\left(\frac{\varphi}{3}\right) = \pm 0{,}8484*4{,}35 = 3{,}69;$$

x_2 і x_3 – без змісту.

$$\sigma_{+40} = x - 0{,}42 = 3{,}69 - 0{,}42 = 3{,}27$$

$$\sigma_{+40} = 3{,}27 \text{ кг/мм}^2.$$

Додаток 7

Розв'язання рівняння $\sigma_{\text{ексил}} - 5{,}26\sigma_{\text{ексил}} - 48{,}7 = 0$.

Нехай $\sigma = (x + \frac{5{,}26}{3})^2$. Після ряду перетворень (див. попереднє розв'язання)

$$x^3 + 9{,}2x + 5{,}39 - 18{,}445x - 16{,}17 - 48{,}7 = 0,$$

$$x^3 - 9{,}2x - 59{,}48 = 0, \text{ або } x^3 - 3*3{,}07x - 2*29{,}74 = 0,$$

якщо $\left.\begin{array}{l} p = 3{,}07 \\ \partial = 29{,}74 \end{array}\right|$ $q^2 > p^3$. Далі використаємо випадок 2.

Допоміжний параметр

$$\text{ch}\varphi = \frac{q}{p\sqrt{\text{p}}} = \frac{29{,}74}{5{,}379} \; 5{,}5289;$$

$$x = \pm 2\sqrt{\text{p}}\,\text{ch}\left(\frac{\varphi}{3}\right) = \pm 3{,}5*1{,}3374 = 4{,}7 \text{ , звідки } \varphi = 2{,}38; \; \frac{\varphi}{3} = 0{,}79.$$

Тоді

$$\sigma = 4{,}7 + 1{,}75 = 6{,}45;$$

$$\sigma = 6{,}45 \text{ кг/мм}^2.$$

Додаток 8

Розв'язання рівняння σ -5,26σ - 751,5 = 0.

Візьмемо σ = ($x + \frac{5,26}{3}$) (див. Попереднє розв'язання).

Після декількох перетворень маємо:

$$x^3 + 9,2x + 5,39 - 18,445x - 16,17 - 688,9 = 0;$$

$$x^3 + 9,2x - 762,3 = 0.$$

Тоді $\begin{vmatrix} p=3,07 \\ q=381,1 \end{vmatrix}$ $q^2 > p^3$. Далі використаємо випадок 2.

Допоміжний параметр ch φ = $\frac{q}{p\sqrt{p}} = \frac{381,1}{5,379} = 70,84$. Звідки φ = 4,95;

$\frac{\varphi}{3} = 1,65$. $x = \pm 2\sqrt{p}\ ch(\frac{\varphi}{3}) = 3,5 * 2,7029 = 9,46.$

Тоді σ = 9,46 + 1,75 = 11,21; $\sigma_7 = 11,21$ кг/мм^2.

Додаток 9

Розв`язання рівняння $\sigma^3 + 5,26\sigma^2 - 632,9 = 0$

Нехай $\sigma = (x + \frac{5,26}{3})$, або σ = ($x$ + 1,75).

$$\sigma^3 \to \left(x + \frac{5,26}{3}\right) = x^3 + \frac{3 \cdot 5,26}{3}x^2 + \frac{3 \cdot 5,26}{3^2}x + (\frac{5,26}{3})^3$$

$$\sigma^2 \to (x + \frac{5,26}{3})^2 = x^3 + \frac{3 \cdot 5,26}{3}x + (\frac{5,26}{3})^2$$

Підставляємо в рівняння

$$x^3 + 5,26x^2 + 9,2x + 5,39 - 5,26x^2 - \frac{2 \cdot 5,26}{3}x - \frac{5,26^3}{3^2} - 632,9 = 0$$

$$x^3 + 9,2x + 5,39 - 18,445x - 16,17 - 632,9 = 0$$

$x^3 + 9,2x - 643,7 = 0$.Підставимо у вигляді $x^3 + 3px - 2q = 0$

$\begin{vmatrix} p = 3,07 \\ q = 321,85 \end{vmatrix}$ $q^2 > p^3$. Далі використаємо випадок 2.

Допоміжний параметр

$ch\,\varphi = \frac{q}{p\sqrt{p}} = \frac{321{,}85}{3{,}07\sqrt{3{,}07}} = \frac{321{,}85}{5{,}379} = 59{,}8$; $ch\varphi = 59{,}8$. Звідки $\frac{\varphi}{3} = 1{,}6$; $\varphi = 4{,}8$

$x = \pm 2\sqrt{p}ch\left(\frac{\varphi}{3}\right) = \pm 3{,}5 \cdot 2{,}5686 = 8{,}99.$

Тоді $\sigma = 8{,}99 + 1{,}75 = 10{,}74$; $\sigma = 10{,}74$ кг/мм^2

Варіанти завдань

Варіант І

	U,кВ	Місце-вість	Провід	*ty*°	*h*	*тож*°	*Q*	*tmax*°	*tmin*°	l_1	l_2
1	2	3	1	5	4	10	6	1	3	9	12
2	4	2	2	4	5	9	5	1	3	8	12
3	6	1	3	2	7	8	1	2	4	7	11
4	1	4	1	3	6	7	2	2	4	6	11
5	3	4	2	1	5	6	4	3	5	5	10
6	5	3	3	1	6	5	3	3	5	4	10
7	7	2	4	3	8	4	1	4	6	3	10
8	2	1	4	3	9	3	5	4	6	1	9
9	4	1	3	5	10	2	6	5	7	2	9
10	6	2	1	5	10	1	2	5	7	3	9
11	1	3	2	4	9	2	5	6	8	4	8
12	3	4	2	5	8	3	6	6	8	5	7
13	7	2	3	1	6	4	6	7	2	10	8
14	5	1	4	3	7	5	2	7	2	6	7
15	5	3	2	1	4	6	2	8	3	9	7
16	7	4	1	2	6	7	3	8	3	7	8
17	7	2	3	4	1	8	6	7	4	8	6
18	6	1	4	5	2	9	5	7	4	8	5
19	6	3	4	2	7	10	4	6	5	7	4
20	4	4	3	1	8	3	3	6	5	1	6
21	4	3	2	1	9	1	2	5	6	5	5
22	2	1	3	4	10	5	1	5	6	3	4
23	2	4	3	5	6	7	1	4	6	10	4
24	3	2	1	4	9	9	2	4	5	10	5
25	3	2	4	5	8	2	2	3	5	9	6
26	1	4	3	2	7	4	3	3	5	7	3
27	1	4	2	3	6	6	3	2	4	8	2
28	2	3	1	5	4	8	4	2	4	5	1
29	3	2	4	5	7	10	4	1	4	5	9
30	4	1	3	4	8	9	5	1	3	4	9
31	7	1	2	3	4	8	5	4	3	2	8
32	6	3	4	5	7	7	6	3	3	1	7
33	5	3	4	1	2	6	6	5	2	7	7
34	4	2	3	1	10	5	6	8	2	6	5
35	3	2	1	4	9	4	5	6	2	4	5
36	2	4	1	3	8	3	5	7	6	5	4
37	1	4	2	5	7	2	4	4	6	3	3
38	7	1	3	2	6	1	4	5	6	2	10

Варіант II

	U, кВ	Місце-вість	Провід	t_y°	h	$t_{ож}$°	Q	t_{max}°	t_{min}°	l_1	l_2
1	1	4	2	3	10	1	6	1	4	8	12
2	2	3	3	4	9	2	5	2	3	7	11
3	3	2	1	5	8	3	4	3	2	6	10
4	4	1	4	2	7	4	3	4	1	5	9
5	5	2	2	1	6	5	2	5	1	4	8
6	6	3	3	2	5	6	1	6	2	3	7
7	7	4	4	3	4	7	1	7	3	2	6
8	6	3	1	4	3	8	2	8	4	1	5
9	5	2	1	5	2	9	3	8	5	9	4
10	4	2	4	3	1	10	4	7	6	10	3
11	3	2	2	4	1	10	5	6	7	9	2
12	2	3	3	5	2	9	6	5	8	8	1
13	1	4	4	1	3	8	6	4	5	7	2
14	7	3	2	2	4	7	5	3	4	6	3
15	1	2	1	3	5	6	4	2	3	5	4
16	2	1	3	4	6	5	3	1	2	4	5
17	3	2	4	5	7	4	2	1	7	3	6
18	4	3	1	5	8	3	1	2	1	2	7
19	5	4	2	4	9	2	6	3	5	1	8
20	6	4	3	1	10	1	4	4	4	2	8
21	7	3	3	2	9	2	1	5	3	3	9
22	7	3	2	4	8	3	2	6	2	4	9
23	6	2	1	3	7	4	3	7	1	5	10
24	5	4	2	5	6	5	5	8	2	6	11
25	4	3	4	1	5	6	4	8	3	7	12

Варіант ІІІ

	U, кВ	Місце-вість	Провід	t_y°	h	$t_{ож}$°	Q	t_{max}°	t_{min}°	l_1	l_2
1	7	2	2	1	2	10	1	8	1	1	10
2	4	4	4	5	3	9	2	7	1	2	10
3	3	3	3	3	4	5	3	6	2	3	10
4	2	1	1	4	5	7	4	5	2	4	9
5	6	4	4	2	6	6	5	4	3	5	9
6	5	1	1	1	7	5	6	3	3	6	9
7	1	2	2	4	8	4	6	2	4	7	8
8	3	3	3	5	9	3	5	1	4	8	8
9	4	4	4	4	10	2	4	1	5	9	8
10	5	3	3	5	9	1	3	2	5	10	7
11	6	2	2	4	8	6	2	2	6	11	7
12	7	1	1	3	7	5	1	3	6	12	7
13	8	1	1	2	5	4	1	3	7	12	6
14	8	2	2	1	4	3	2	4	7	11	6
15	7	4	4	5	2	1	3	4	8	11	6
16	2	3	3	4	1	2	4	5	8	10	5
17	3	1	1	3	3	1	5	5	4	10	5
18	5	4	4	2	2	2	6	6	4	9	4
19	4	3	3	1	5	3	4	6	4	9	4
20	1	2	2	5	6	10	2	7	3	8	3
21	3	1	1	4	7	9	3	7	3	8	3
22	4	4	4	3	8	8	5	8	3	7	2
23	5	3	3	2	9	7	6	8	2	7	2
24	6	1	1	5	10	6	4	9	2	6	1
25	7	2	2	4	1	5	2	9	2	6	1

Варіант IV

	U,кВ	Місце-вість	Провід	$t_у$°		$t_{ож}$°	h	t_{max}°	t_{min}°	l_1	l_2
1	4	3	1	5	7	3	2	3	2	7	4
2	5	3	1	4	8	2	5	6	1	8	10
3	6	3	1	3	9	5	4	3	8	4	9
4	7	2	2	2	10	1	3	4	3	5	3
5	7	2	2	1	9	3	2	8	5	6	5
6	6	2	2	5	8	5	6	3	4	4	11
7	6	1	3	5	7	9	2	2	3	9	12
8	5	1	3	4	6	10	2	5	8	7	8
9	5	1	3	4	5	8	5	7	7	9	6
10	4	4	4	3	4	8	4	5	6	3	7
11	4	4	1	3	3	2	3	6	5	2	8
12	3	4	2	2	2	3	2	4	4	1	9
13	3	2	4	2	1	10	1	4	3	10	10
14	2	3	4	1	10	9	2	5	2	6	11
15	2	4	1	2	9	8	5	6	2	10	9
16	1	3	1	3	8	7	5	8	1	4	12
17	1	2	2	4	7	4	2	2	6	7	8
18	2	1	2	5	6	8	2	3	8	3	7
19	3	2	4	2	5	3	4	7	1	1	6
20	4	3	3	2	4	5	1	5	6	5	5
21	5	4	2	3	3	6	3	4	2	7	4
22	6	3	1	4	2	9	3	2	2	7	3
23	7	2	2	5	1	8	6	8	8	8	9
24	6	1	3	2	4	7	5	3	8	8	12

Варіант V

	U,кВ	Місце-вість	Провід	t_y°	h	$t_{ож}$°	Q	t_{max}°	t_{min}°	l_1	l_2
1	3	4	4	1	10	1	6	4	1	2	5
2	2	3	3	2	9	2	6	5	2	1	6
3	1	2	2	3	8	3	5	6	3	4	7
4	7	1	1	4	7	4	5	7	4	2	8
5	6	1	1	5	6	5	4	8	5	3	9
6	5	2	2	5	5	6	4	3	6	1	10
7	4	3	3	4	4	7	3	2	7	5	11
8	4	1	1	4	3	8	3	1	8	2	12
9	5	4	4	3	2	9	2	8	8	6	12
10	6	1	1	3	1	10	2	7	8	4	11
11	7	2	2	1	10	9	1	6	6	3	11
12	1	3	3	1	10	8	1	5	6	7	10
13	2	4	4	2	9	7	2	4	5	1	10
14	3	1	1	2	9	6	2	3	5	10	9
15	4	2	2	5	8	5	3	2	4	6	9
16	7	4	4	5	8	4	3	1	4	9	8
17	6	3	3	4	7	2	4	3	2	10	7
18	5	3	3	4	7	2	4	3	2	10	7
19	5	2	2	3	6	1	5	4	3	7	7
20	6	1	1	3	6	2	5	5	2	4	6
21	6	4	4	2	5	3	6	6	1	7	5
22	1	4	4	1	5	4	6	7	2	3	4
23	1	3	3	2	4	5	6	8	7	9	3
24	2	2	2	1	4	6	3	5	7	10	2

Список літератури

1. *Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. и др.* Сопротивление материалов. – К.: Вищашк., 1986. – 776 с.

2. *Тимофеев Н. М.* Механическая часть воздушной линии электропередачи. – Л.: Энергии, 1974. – 54 с.

3. *Боровиков В. А., Косарев В. К. Ходот Г. А.* Электрические сети и системы. – Л.: Энергия, 1988. – 431 с.

4. *Бошнякович А. Д.* Механический расчет проводов и тросов линий в электропередачи. – М.- Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 254 с.

5. *Анапольская Л. Е.* Режим скоростей ветра на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 238 с.

6. *Бошнякович А. Д.* механический расчет проводов и тросов линий в электропередачи. – Л.: Энергия, 1971.- 295 с.

7. *Бучинский В. Е.* Атлас обледенения проводов. - Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 23 с.

8. *Заморский А. Д.* Иней, изморозь, гололед. - Л.: Госэнергоиздат,1951. – 378 с.

Зміст

Передмова 3
Завдання на курсову роботу (проект) 3
Гнучкі нитки 5
Зовнішні навантаження на провід 7
Навантаження від власної ваги 7
Навантаження від ожеледі 8
Навантаження від ваги проводу й ожеледі 8
Навантаження від тиску вітру 9
Сумарні навантаження 10
Статичний аспект задачі. Схема однорівневої підвіски 12
Схема різнорівневої підвіски 12
Крива провисання 13
Геометричний аспект задачі 16
Фізичний аспект задачі 16
Однорівнева схема 18
Рівняння стану проводу 18
Режими роботи проводу 21
Поняття про критичний прогін 22
Вихідний режим 25
Підвішування проводу (нитки) 26
Опори повітряної лінії електропередачі 27
Ферми як опори для повітряної лінії електропередачі 30
Приклад 38
Характеристика повітряних і кабельних ліній 47
Додаток 2 47
Додаток 3 49
Додаток 4 51
Додаток 5 52
Додаток 6 52
Додаток 7 53
Додаток 8 54
Додаток 9 54
Варіанти завдань 56
Варіант I 56
Варіант II 57
Варіант III 58
Варіант IV 59
Варіант V 60
Список літератури 61