

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электрические системы»

М. А. Короткевич

МОНТАЖ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений по образованию в области энергетики
и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2016

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.279-08я73

К68

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра «Электроснабжение» Белорусского государственного аграрного технического университета (зав. кафедрой *В. М. Збродыго*);
магистр технических наук, инженер диспетчерской службы
Республиканского унитарного предприятия «Объединенное
диспетчерское управление» *С. И. Кустов*

Короткевич, М. А.

К68 **Монтаж электрических сетей : учебно-методическое пособие к практическим занятиям для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / М. А. Короткевич. – Минск : БНТУ, 2016. – 68 с.**
ISBN 978-985-550-777-3.

В учебно-методическое пособие включены задачи, решаемые студентами во время аудиторных занятий и охватывающие основные темы учебной программы дисциплины. Приведены необходимые исходные данные и справочные материалы.

Издание будет полезно при выполнении курсового проекта и дипломном проектировании. Может быть использовано студентами родственных специальностей: «Электрические станции» и «Электроснабжение».

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.279-08я73

ISBN 978-985-550-777-3

© Короткевич М. А., 2016

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Составление карты развозки барабанов с проводом	4
Тема 2. Разбивка котлованов для установки одноствоечных и двухствоечных железобетонных и металлических промежуточных и анкерно-угловых опор.....	6
Тема 3. Определение усилий, возникающих в такелажных приспособлениях, при подъеме опоры с помощью падающей стрелы..	12
Тема 4. Выбор целесообразного способа подъема опор воздушных линий электропередачи	17
Тема 5. Выбор целесообразного способа раскатки проводов и грозозащитных тросов.....	21
Тема 6. Определение усилий, действующих на анкерные опоры при монтаже проводов и тросов	23
Тема 7. Определение усилий в проводах и тросах при опускании их с опор	25
Тема 8. Определение усилий тяжения за оболочку и жилы кабеля при их раскатке	26
Тема 9. Построение монтажных кривых для визируемых пролетов	31
Тема 10. Расчет переходов через инженерные сооружения и водные преграды	35
Тема 11. Проектирование заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи	39
Тема 12. Оценка площади отчуждаемой территории для размещения опор воздушной линии электропередачи.....	44
Тема 13. Эффективность замены проводов на воздушных линиях электропередачи.....	49
Тема 14. Определение наведенного напряжения на проводах отключенных воздушных линий электропередачи, находящихся вблизи других действующих линий.....	51
Тема 15. Оценка значения длительно допустимого тока нагрузки для силовых электрических кабелей, проложенных в земле, воздухе, туннелях, воде, блоках	56
Тема 16. Составление программы испытаний железобетонной стойки опоры на прочность и трещиностойкость	60
Тема 17. Оценка возможности замены стального грозозащитного троса на проводящий или со встроенной волоконно-оптической связью.....	64
Список использованной литературы.....	67

Тема 1. СОСТАВЛЕНИЕ КАРТЫ РАЗВОЗКИ БАРАБАНОВ С ПРОВОДОМ

Задача. Составить карту развозки барабанов с проводами на трассу линии для последующего их монтажа в анкерном пролете длиной 5 км. Длина пролета и строительная длина провода на барабане указаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Длина пролета и строительная длина провода на барабане

Номер варианта	Марка провода	Длина пролета l , м	Строительная длина провода на барабане $l_{стр}$, м	Номер варианта	Марка провода	Длина пролета l , м	Строительная длина провода на барабане $l_{стр}$, м
1	АС 70/11	120	3000	14	АС 400/51	380	1500
2	АС 95/16	150	1500	15	АС 120/27	185	2000
3	АС 95/16	140	1500	16	АС 150/34	200	2000
4	АС 120/19	160	1500	17	АС 185/43	210	2000
5	АС 150/24	200	2000	18	АС 240/56	220	2000
6	АС 240/39	210	2000	19	АС 300/66	250	2000
7	АС 300/48	300	2000	20	АС 400/93	280	1500
8	АС 400/64	320	1500	21	АС 185/128	230	4000
9	АС 150/19	250	2000	22	АС 300/204	310	3500
10	АС 185/24	280	2000	23	АС 70/72	190	4000
11	АС 240/32	230	2000	24	АС 95/141	200	4000
12	АС 300/39	350	2000	25	АС 330/27	340	2000
13	АС 330/43	370	2000	26	АС 400/22	350	1500

Методические указания

Определяем количество опор на трассе линии:

$$n_{оп} = \frac{5000}{l} + 1,$$

из них концевых анкерных опор – 2, промежуточных – $(n_{оп} - 2)$.

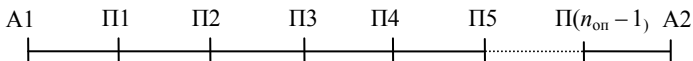
Количество барабанов с проводом для сооружения линии длиной 5 км определим по формуле

$$m_6 = \frac{3 \cdot 5000}{l_{\text{стр}}}$$

Количество барабанов с проводящим грозозащитным тросом АС 70/11

$$m_6^T = \frac{5000}{l_{\text{стр}}}$$

Пронумеруем опоры на трассе линии.



Карта развозки барабанов имеет вид табл. 1.2.

Таблица 1.2

Карта развозки барабанов на трассу линии

Номер провода или троса	Номер опоры и расстояние между опорами										
	А1	350 → $\vec{П1}$	350 → $\vec{П2}$	350 → $\vec{П3}$	350 → $\vec{П4}$	350 → $\vec{П5}$	350 → $\vec{П6}$	350 → $\vec{П7}$	350 → $\vec{П8}$	350 → $\vec{П9}$	350 → $\vec{П10}$
Провод 1	2000 →30					1720 →280					
Провод 2	2000 →30					1720 →280					
Провод 3	2000 →30					1720 →280					
Грозозащитный трос	3000 →30								2770 →230		

Пусть имеем m_6 барабанов с проводами длиной 2000 м и m_6^T барабанов с тросом длиной 3000 м. Первую партию из трех барабанов с проводом и одним барабаном с тросом располагаем для удобства

раскатки дальше анкерной опоры А1 на 30 м вдоль трассы линии. Стрелка у числа 30 указывает, в каком направлении от опоры А1 необходимо расположить барабаны. Стрелка у буквы П (промежуточная опора) указывает направление раскатки проводов и тросов. Длина проводов достаточна для раскатки до опоры П5, а троса – до опоры П8. Поэтому следующую партию барабанов с проводом необходимо завезти дальше опоры П5 на 280 м, а барабан с тросом – дальше опоры П8 на 230 м. Здесь концы проводов с барабанов первой группы должны оказаться около барабанов второй группы. Составленная карта определит работу транспорта по вывозке барабанов на трассу линии.

Тема 2. РАЗБИВКА КОТЛОВАНОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ ОДНОСТОЕЧНЫХ И ДВУХСТОЕЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И АНКЕРНО-УГЛОВЫХ ОПОР

Задача. Известен центр пикета, где будут установлены:

- железобетонная одностоечная или двухстоечная промежуточная опора;
- одностоечная анкерно-угловая железобетонная опора;
- металлическая решетчатая промежуточная и анкерно-угловая опора.

Требуется разбить котлованы для установки указанных опор, если известны следующие данные (см. таблицу).

Исходные данные для разбивки котлованов для установки опор

Номер варианта	Расстояние между центрами стоек двухстоечных опор, м	Размер базы металлической опоры, м	Угол поворота трассы, градус
1	4,0	1,8 × 1,8	15
2	7,0	2,5 × 2,5	20
3	4,0	2,8 × 2,5	25
4	7,0	2,4 × 1,8	30
5	11,6	3,3 × 2,4	35
6	4,0	3,5 × 2,5	40
7	7,0	4,1 × 4,1	45

Номер варианта	Расстояние между центрами стоек двух-стоечных опор, м	Размер базы металлической опоры, м	Угол поворота трассы, градус
8	11,6	4,4 × 4,4	50
9	7,0	5,0 × 5,0	55
10	7,0	4,8 × 4,8	60
11	11,6	6,0 × 6,0	5
12	15,0	5,0 × 4,8	10
13	7,0	4,8 × 3,5	15
14	15,4	6,0 × 5,0	20
15	4,0	2,8 × 2,1	25
16	7,0	5,2 × 4,0	30
17	11,6	2,5 × 2,5	35
18	7,0	4,2 × 4,2	40
19	4,9	2,8 × 2,8	45
20	7,0	4,8 × 4,8	50
21	8,4	7,0 × 6,0	55
22	8,4	6,2 × 5,0	60
23	8,4	5,4 × 5,4	5
24	15,4	6,2 × 6,2	10

Методические указания

Котлованы под установку одностоечных и двухстоечных железобетонных или деревянных опор разрабатывают с помощью бурильных машин глубиной 3 (для стоек длиной 22,6 м) и 3,3 м (для стоек длиной 26 м), на пучинистых грунтах – глубиной 3,5 м. Центрами котлованов для установки одностоечных опор служат центры пикетов, которые устанавливаются до начала строительства в процессе так называемого производственного пикетажа, обеспечивающего перенесение мест установки опор с продольного профиля трассы линии в натуру, т. е. на местность.

Для установки одностоечных железобетонных и деревянных опор с точки зрения разработки котлованов наличие указанных пикетов и закрепленной на местности трассы воздушной линии электропередачи оказывается достаточным. Однако установка в пробуренные

котлованы собранных на земле опор требует закрепления на местности оси, перпендикулярной оси линии, по которой должны располагаться оси траверс опор.

Для этого теодолит устанавливают в центре пикета (рис. 2.1) и рейки – над центром смежных опор. Здесь определяется и закрепляется на местности ось АА трассы линии и оси ББ поперек оси трассы (вешки 2–2 и 3–3).

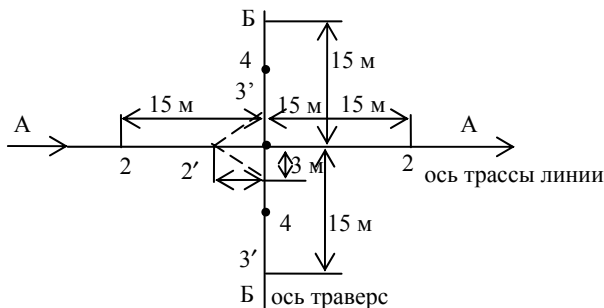


Рис. 2.1. Схемы разбивки котлованов для установки промежуточных одно- и двухстоечных железобетонных и деревянных опор:

1 – пикет центра опоры; *2* – вешки вдоль трассы линии; *3* – вешки поперек трассы линии; *4* – центры котлованов для двухстоечной опоры; АА – ось трассы линии; ББ – ось, перпендикулярная к оси трассы линии

При отсутствии теодолита определение оси траверс можно выполнить с помощью стальной рулетки. Для этого вдоль оси линии (в направлении ближайшего пикета, оснащенного вешкой) откладывается из точки *1* расстояние, равное 4 м (точка *2'*, см. рис. 2.1). В точке *2'* устанавливается колышек. По предполагаемому направлению оси траверс ББ в обе стороны от пикета *1* откладываются расстояния, равные 3 м (точки *3'*), и забиваются временные колышки. Точки *3'* окажутся на оси траверс ББ в том случае, если расстояния *2'–3'* будут равны 5 м.

Разбивка котлованов для установки двухстоечных промежуточных опор начинается с установления и закрепления на местности оси трассы линии и оси, перпендикулярной оси трассы линии, т. е. оси траверс. Далее по оси траверс в обе стороны от центра пикета *1* откла-

дываются расстояния, равные половине расстояния между центрами нижней части стоек двухстоечной опоры и забиваются кольшки 4, являющиеся центрами котлованов для стоек двухстоечной опоры.

В углах поворота трассы линии устанавливаются анкерно-угловые опоры. Особенность установки отмеченных опор состоит в том, что ось траверс располагается по биссектрисе внутреннего угла поворота линии β (рис. 2.2), определяемого как

$$\beta = 180^\circ - \alpha, \text{ градус,}$$

где α – угол поворота трассы линии, градус.

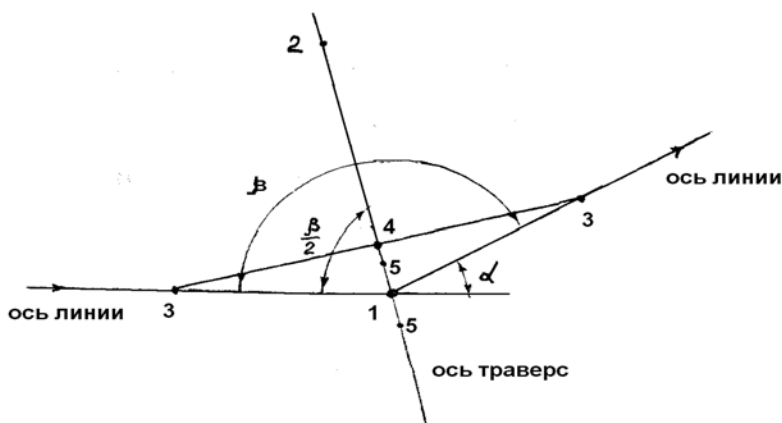


Рис. 2.2. Схема разбивки котлованов для установки анкерно-угловых одно- и двухстоечных железобетонных или деревянных опор:
 α – угол поворота трассы линии; β – внутренний угол поворота трассы линии

Установить направление биссектрисы внутреннего угла поворота трассы линии с помощью теодолита не представляет сложности. Для этого, ориентируясь на установленные вешки вдоль трассы линии до и после ее поворота, из центра пикета 1 измеряют внутренний угол поворота линии β , и далее он делится пополам. Линия, соединяющая точку 2 и центр пикета 1, представляет собой прямую, лежащую на биссектрисе внутреннего угла поворота линии, т. е. ось траверс.

Ось траверс можно построить также с помощью мерной ленты. Для этого от центра пикета 1 в обе стороны вдоль трассы на одина-

ковом расстоянии откладываются линии, например, 10 м (точки 3, см. рис. 2.2). Далее измеряется расстояние 3–3 и делится пополам (точки 4). Прямая, соединяющая точку 4 с центром пикета 1, и будет осью траверс.

Пикет 1 является центром котлована для установки одностоечной анкерно-угловой опоры. Центрами котлованов для установки двухстоечной анкерно-угловой опоры служат точки 5, получаемые в результате нанесения и закрепления колышками на оси траверс в обе стороны от центра пикета 1 на расстоянии, равном половине длины между центрами нижней части стоек двухстоечной опоры.

Решетчатая четырехгранная металлическая опора своей прямоугольной или квадратной базой опирается на четыре подножника, которые необходимо разместить относительно центра опоры, т. е. пикета (рис. 2.3).

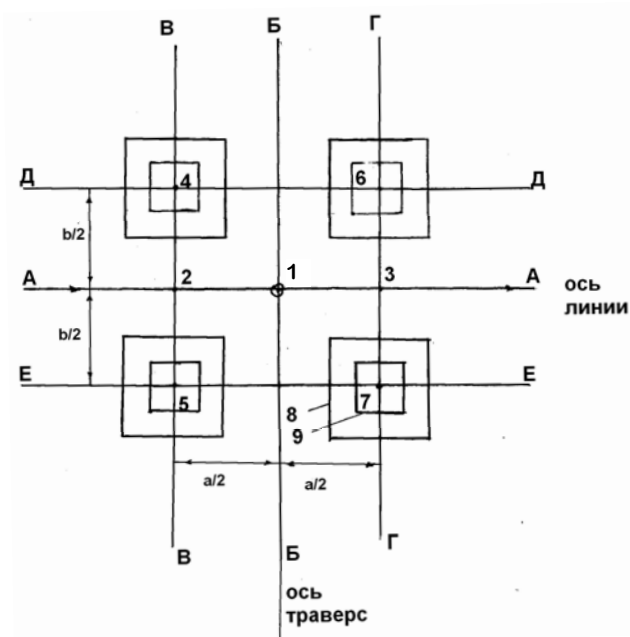


Рис. 2.3. Схема разбивки котлованов для установки подножников под промежуточные металлические опоры:

1 – пикет центра опоры; 4–7 – центры котлованов для установки подножников; 8 – внешний контур котлована; 9 – внутренний контур котлована

Разбивка котлованов под подножки требует большей точности, чем разбивка котлованов для одностоечных или двухстоечных железобетонных опор. Следовательно, данная работа выполняется с помощью теодолита, который вначале устанавливают в центре опоры, т. е. в центре пикета 1 , разбивают и закрепляют на местности ось линии АА вдоль трассы линии и ББ – поперек трассы линии (см. рис. 2.3). На оси АА откладывают от центра опоры по половине проектного расстояния между центрами подножников по оси трассы линии, т. е. $a/2$, и в полученных точках забивают кольшки 2 и 3 . Далее теодолит переносят в точку 2 , закрепляют ось ВВ, перпендикулярную к оси линии и параллельную оси ББ, и по ней в каждую сторону от точки 2 откладывают по половине проектного расстояния между центрами подножников поперек оси линии, т. е. $b/2$. В центрах подножников 4 и 5 забивают кольшки. Теодолит устанавливают в точке 3 , закрепляют ось ГГ, перпендикулярную оси линии и параллельную осям ББ и ВВ, и по ней в каждую сторону от точки 3 откладывают по половине проектного расстояния между центрами подножников, т. е. $b/2$. В центрах подножников забивают кольшки 6 и 7 .

По кольшкам $4-6$ и $5-7$ закрепляют оси ДД и ЕЕ.

Размечают внешние и внутренние размеры котлованов, которые необходимо разрабатывать в точках $4, 5, 6, 7$.

Разбивку котлованов под угловые опоры (рис. 2.4) производят с помощью теодолита и начинают с построения и закрепления оси траверс так, как это показано на рис. 2.3 (линия ББ). После этого перпендикулярно оси траверс строится и закрепляется линия АА. В обе стороны от пикета 1 по линии АА откладываются с помощью мерной стальной ленты расстояния $a/2$, равные половине проектного расстояния между центрами подножников по оси трассы линии (точки 2 и 3). Далее все операции производят так же, как и при разбивке котлованов для установки подножников под промежуточные металлические опоры, а именно, строятся и закрепляются оси ВВ, ГГ, параллельные оси траверс, и оси ДД и ЕЕ, соединяющие центры подножников и расположенные параллельно оси АА.

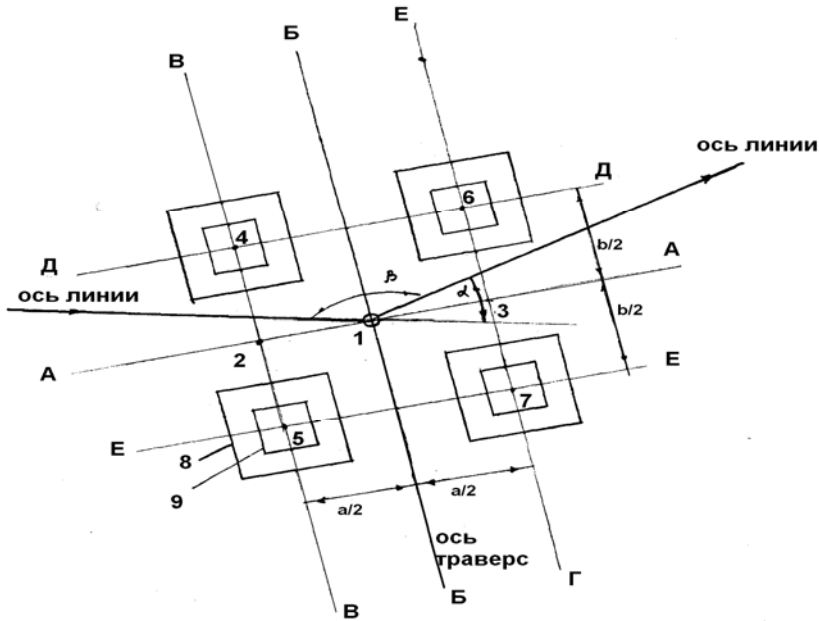


Рис. 2.4. Схема разбивки котлованов для установки подножников под анкерно-угловые металлические опоры:

1 – пикет центра опоры; 4–7 – центры котлованов для установки подножников; 8 – внешний контур котлована; 9 – внутренний контур котлована; α – угол поворота линии; β – внутренний угол поворота линии; ББ – ось траверс; АА – ось, перпендикулярная к оси траверс; a – расстояние между подножниками вдоль оси, перпендикулярной биссектрисе внутреннего угла поворота линии; b – расстояние между подножниками вдоль оси траверс

Тема 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ТАКЕЛАЖНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ, ПРИ ПОДЪЕМЕ ОПОРЫ С ПОМОЩЬЮ ПАДАЮЩЕЙ СТРЕЛЫ

Задача. Определить: усилия, возникающие в подъемном (D) и тяговом (T) тросах; усилия, воспринимаемые падающей стрелой (S) и подножником (горизонтальное усилие H), при подъеме металлической опоры с помощью падающей стрелы (рис. 3.1).

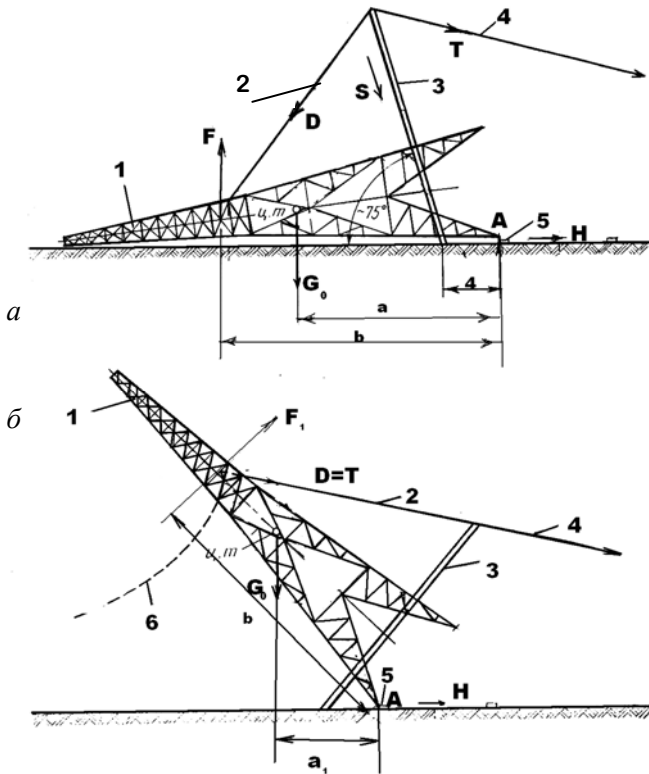


Рис. 3.1. Подъем опоры с помощью падающей стрелы:
a – начальный момент подъема; *б* – положение опоры при выходе стрелы из работы;
 ц. т. – центр тяжести опоры; 1 – опора; 2 – подъемный трос; 3 – падающая стрела;
 4 – тяговый трос; 5 – подножник; 6 – тормозной трос

Масса и размер поднимаемой металлической опоры приведены в таблице.

Масса и длина поднимаемой металлической опоры

Номер варианта	Масса опоры, кг	Длина опоры <i>l</i> , м	Номер варианта	Масса опоры, кг	Длина опоры <i>l</i> , м	Номер варианта	Масса опоры, кг	Длина опоры <i>l</i> , м
1	1 529	19,0	10	3 309	27,0	19	6 307	28,1
2	1 869	21,0	11	3 856	27,0	20	4 603	33,2
3	3 046	14,0	12	5 149	31,0	21	10 275	36,5

Окончание таблицы

Номер варианта	Масса опоры, кг	Длина опоры l , м	Номер варианта	Масса опоры, кг	Длина опоры l , м	Номер варианта	Масса опоры, кг	Длина опоры l , м
4	4 954	17,5	13	8 108	18,5	22	13 159	17,7
5	1 951	23,0	14	3 748	32,0	23	10 644	19,3
6	2 646	23,0	15	4 853	35,5	24	23 016	24,2
7	2 673	25,0	16	6 321	32,0	25	15 723	32,0
8	2 746	26,0	17	8 812	10,5	26	13 592	32,0
9	2 731	27,0	18	14 794	22,0	27	23 412	40,0

Примечания.

1. Расстояние a от центра тяжести опоры до оси вращения (подножника) принять равным 0,33 от длины опоры.

2. Расстояние от места прикрепления подъемного троса к опоре до оси вращения (подножника) принять равным 0,9 от длины опоры.

Методические указания

Для выбора или проверки такелажных средств (тросов и канатов, блоков и полиспастов, шарниров, падающих стрел) необходимо знать усилия, возникающие в них при подъеме опор. Эти усилия непостоянны и изменяются в процессе подъема опоры.

При установке опор падающей стрелой максимальное усилие в тяговом тросе возникает в начальный момент подъема. Затем оно постепенно уменьшается и, когда опора принимает вертикальное положение, исчезает. Аналогично изменяется усилие в падающей стреле и подъемном тросе – «вожжах», соединяющих ее со стволом опоры. Это является достоинством способа установки опор падающей стрелой, так как выявленные в начале подъема неисправности такелажа могут быть легко устранены.

Нагрузки, действующие на шарнир и фундаменты при подъеме опоры, могут увеличиваться и достигать максимальных значений при углах ее наклона 30–50°.

Определить усилия D , T , S (см. рис. 3.1), возникающие в такелажных приспособлениях (подъемном и тяговом тросах, падающей стреле), а также горизонтальные усилия H , действующие на подножник опоры и стремящиеся его сдвинуть, наиболее удобно гра-

фическим методом, рассматривая падающую стрелу как рычаг второго рода (когда все усилия расположены по одну сторону от оси вращения), обеспечивающего меньшее значение подъемной силы по сравнению с собственным весом опоры G_0 .

Требуемое значение вертикальной составляющей подъемной силы F находится из условия равновесия сил, приложенных к опоре (см. рис. 3.1, а):

$$Fb = G_{\text{оп}}a$$

и

$$F = G_{\text{оп}} \frac{a}{b}, \text{ Н,}$$

где a – расстояние от центра тяжести опоры до оси вращения (подножника), м;

b – расстояние от места прикрепления подъемного троса к опоре до оси вращения (подножника), м.

Так как $a < b$, то $F < G_{\text{оп}}$.

Снижения подъемной силы F можно достичь увеличением расстояния b .

Нахождение усилий в такелажных приспособлениях, падающей стреле, подножнике производится следующим образом (рис. 3.2).

Рассмотрим начальный момент подъема опоры (рис. 3.2, а). В этот момент в тросах и падающей стреле возникают максимальные усилия. Требуемое значение подъемной силы F откладываем в масштабе от точки O по ее направлению. Из конца вектора F (точка B) проводим прямую, параллельную подъемному тросу, до пересечения в точке C с горизонтальной прямой, проведенной через точку O .

Векторы \overrightarrow{OC} и \overrightarrow{CB} представляют собой силы H и D , действующие соответственно на фундамент и на подъемный трос. Из точки C проводим прямую CE , параллельную падающей стреле, до пересечения в точке E с прямой, проведенной из точки B , параллельно тяговому тросу.

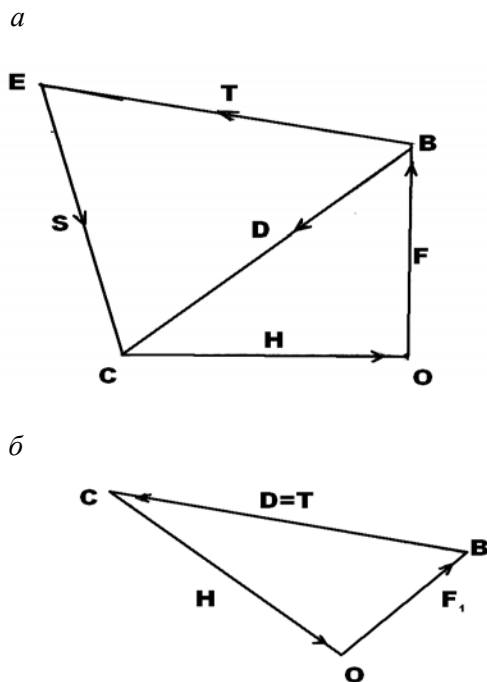


Рис. 3.2. Усилия на такелажные приспособления и падающую стрелу:
a – в начальный момент подъема; *б* – при выходе падающей стрелы из работы

В момент выхода падающей стрелы из работы (см. рис. 3.2, б) усилие на саму стрелу равно нулю. Усилия в подъемном и тяговых тросах находятся следующим образом:

$$F_1 = G_{\text{оп}} \frac{a_1}{b},$$

где a_1 – проекция на горизонтальную ось расстояния от центра тяжести опоры до оси вращения.

Так как $a_1 < a$, то и подъемная сила $F_1 < F$; $a_1 = 0,707a$, т. е. считается, что опора поднята на угол 45° .

Усилие F_1 в масштабе откладываем по ее направлению. Из конца вектора F_1 (точка B) проводим прямую, параллельную подъемному

и тяговому тросам, направление которых в рассматриваемый момент совпадает, до пересечения в точке C с прямой OC , проведенной параллельно положению продольной оси опоры. Векторы \overrightarrow{OC} и \overrightarrow{BC} представляют собой силы H и $T = D$ соответственно, действующие на фундамент и такелажный трос. Из рис. 3.2 следует, что $F_1 < F$, а усилия H и T остаются примерно одинаковыми.

Определенные значения усилий умножаются на коэффициенты динамичности, учитывающие возможные рывки тяговых механизмов, и принимаемые равными: 1,1; 1,2 – при подъеме опоры лебедкой через полиспаст или напрямую соответственно; 1,3; 1,4 – при подъеме опоры тяговым механизмом (трактором или автомашиной) через полиспаст или напрямую соответственно.

Тема 4. ВЫБОР ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО СПОСОБА ПОДЪЕМА ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Задача. На основе метода многоцелевой оптимизации выбрать целесообразный способ подъема металлических опор воздушных линий электропередачи при обеспечении:

минимальных затрат денежных средств на установку опор (цель № 1);

максимальной производительности труда при установке опор (цель № 2);

минимальной вероятности повреждения фундаментов при установке опор (цель № 3).

Рассмотреть варианты подъема опор:

с помощью падающей стрелы;

с помощью крана и двух тракторов;

вертикальным наращиванием из отдельных элементов;

вертикальным наращиванием по отдельным секциям с помощью вертолета.

Основные технико-экономические показатели различных способов установки опор на основе информации [1, с. 199] даны в табл. 4.1. При определении затрат денежных средств учитывалась: часовая тарифная ставка одного работающего в размере 58 000 руб.; работа механизмов в течение одного часа – 174 000 руб., вертолета – 1 920 000 руб./ч. Количество часов работы: электромонтеров – 33,2; 14,64; 40,96; 26,16 ч;

техники – 10,4; 7,36; 6,8; 3,12 – соответственно при монтаже с помощью падающей стрелы; крана и двух тракторов; вертикальным наращиванием из отдельных элементов и отдельных секций с помощью вертолета.

Таблица 4.1

Технико-экономические показатели различных способов установки опор

Наименование целей	Значения показателей при монтаже опор			
	с помощью падающей стрелы	с помощью крана и двух тракторов	вертикальным наращиванием	
			из отдельных элементов	по отдельным секциям с помощью вертолета
Минимум затрат денежных средств на установку одной опоры, млн руб.	3,735/1,0	2,129/0,57	3,559/0,95	61,421/16,44
Максимальная производительность труда при установке одной опоры, чел-ч/опору	26,6/1,0	14,54/0,55	288,0/10,82	54,1/2,03
Минимальная вероятность повреждения фундамента	0,02/1,0	0,02/1,0	0,01/0,5	0,015/0,75

Методические указания

Выбор целесообразного способа подъема опор выполним по значению максимального значения критерия оптимизации

$$E = \sum_{i=1}^3 v_i e_i \rightarrow \max, \quad (4.1)$$

где v_i – оценка важности i -й цели ($i = 1, 2, 3$), при этом $\sum_{i=1}^3 v_i = 1, 0$;

e_i – относительная эффективность i -й цели.

Значения e_i определяются следующим образом:

– для минимизируемых целей

$$e_i = \frac{\min x_i}{x_i}; \quad (4.2)$$

– для максимизируемых целей

$$e_i = \frac{x_i}{\max x_i}, \quad (4.3)$$

где x_i – текущее значение показателя i -й цели;

$\min x_i, \max x_i$ – минимальное и максимальное значения показателя i -й цели.

Оценка важности i -й цели производится следующим образом.

Преподаватель приглашает студентов выступить в качестве экспертов, которые должны присвоить ранг указанным выше целям. Для этого каждому студенту выдается карточка с перечислением целей, которым надо присвоить ранг.

Карточка включает в себя:

минимум стоимости установки опоры;

максимум производительности труда;

минимальную вероятность повреждения фундамента.

Наименьшему значению ранга соответствует наибольшая важность цели. Таким образом, в полученной карточке напротив целей эксперт должен поставить цифры 1, 2 и 3.

Преподаватель на доске записывает результаты экспертных оценок.

Номер эксперта	Ранг цели номер			Сумма оценок
	1	2	3	
1	3	1	2	6
2	2	1	3	6
.
.
.
N	1	2	3	6
Итого	A_1	A_2	A_3	$6N$

Подсчитывается сумма оценок i -й цели, т. е. находят значения A_1, A_2, A_3 .

Далее определяется эквивалентное значение ранга R_i для каждой цели по выражению

$$R_i = 1 + \frac{1}{n} - \frac{A_i}{nN},$$

где n – количество целей;

N – количество экспертов.

При $n = 3$ значение

$$R_i = 1,33 - \frac{A_i}{3N}.$$

Суммарное значение рангов

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Тогда оценка важности i -й цели определится как

$$v_i = \frac{R_i}{R_{\Sigma}}. \quad (4.4)$$

При этом

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1,0.$$

Для оценки показателей e_i набор любых показателей x_i , характерных для одного вида монтажа (см. табл. 4.1), примем за единицу. Пусть это будут показатели, имеющие место при монтаже опор с помощью падающей стрелы. Тогда соответствующие показатели x_i для других способов монтажа будут такими, как указано в табл. 4.1 под чертой.

По формулам (4.2) и (4.3) и табл. 4.1 определяем значения относительной эффективности i -й цели (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Значения относительной эффективности i -й цели

Наименование целей	Значения e_i при монтаже опор			
	с помощью		вертикальным наращиванием	
	падающей стрелы	крана и двух тракторов	отдельных элементов	отдельных сек- ций с помощью вертолета
Минимум за- трат денежных средств на ус- тановку опоры, млн руб.	0,57	1,0	1,05	0,035
Максимальная производитель- ность труда при установке опо- ры, чел.-ч/опору	0,09	0,051	1,0	0,19
Минимальная вероятность повреждения фундамента	0,5	0,5	1,0	0,67

Если бы все цели были одинаково важны, т. е. $v_i = 0,333$, то наиболее целесообразный способ монтажа опор – метод вертикального наращивания из отдельных элементов, имеющий максимальное значение критерия оптимизации.

Для активизации студентов на занятии исходными данными, помещенными в табл. 4.1, преподаватель может варьировать.

Тема 5. ВЫБОР ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО СПОСОБА РАСКАТКИ ПРОВОДОВ И ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ

Задача. С использованием метода многоцелевой оптимизации выбрать:

целесообразный способ раскатки проводов при монтаже воздушных линий электропередачи, обеспечивающий минимум затрат денежных средств на раскатку (цель № 1);

максимальную производительность труда (цель № 2);
 минимальную вероятность повреждения провода при его раскатке (цель № 3).

Из способов раскатки проводов рассмотреть раскатку проводов с помощью:

раскаточных машин;

вертолета;

«под тяжением»;

с козел волочением через раскаточные ролики.

Значения показателей x_i приведены в таблице.

Значения показателей x_i в относительных единицах
 для различных способов раскатки проводов

Наименование целей	Значения показателей при раскатке проводов			
	с помощью		«под тяжением»	с козел волочением через раскаточные ролики
	раскаточных машин	вертолета		
Минимум затрат денежных средств, млн руб.	1,0	3,0–10,0	1,3–1,8	1,1–3,0
Максимальная производительность труда, чел-ч/опору	1,0	1,5–7,0	0,95–0,7	0,9–0,5
Минимальная вероятность повреждения провода	1,0	0,8–0,95	0,8–0,95	1,2–2,0

Методические указания

Предположим, что значения показателей x_i при раскатке проводов с помощью раскаточных машин равны 1,0. Значения показателей для других способов раскатки задаются преподавателем каждому студенту из диапазонов, указанных в таблице.

Выбор целесообразного способа раскатки выполняется по максимальному значению критерия оптимизации E (формула (4.1)).

Для этого вначале устанавливаются ранги целей путем экспертных оценок и значения важности целей по выражению (4.4).

Значения относительной эффективности целей определяются в соответствии с выражениями (4.2) и (4.3).

Делается вывод об эффективности применения того или иного способа раскатки проводов.

Тема 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА АНКЕРНЫЕ ОПОРЫ ПРИ МОНТАЖЕ ПРОВОДОВ И ТРОСОВ

Задача. Определить вертикальные и горизонтальные усилия, действующие на анкерные опоры при монтаже проводов и тросов:

- если провода и тросы в другую сторону не смонтированы;
- провода и тросы в другую сторону смонтированы.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исходные данные к задаче

Номинальное напряжение линии, кВ	Марка провода	Масса 1 м провода, кг	Номинальное напряжение линии, кВ	Марка провода	Масса 1 м провода, кг
35	70/11	0,276	330	2×330/43	2,51
	120/27	0,528		2×400/43	2,522
110	150/24	0,599	330	2×400/93	3,702
	185/24	0,705		2×500/26	3,184
	240/27	0,744		2×300/48	2,372
	240/32	0,921		2×240/56	2,212
220	240/39	0,952	750	5×300/67	6,615
	300/48	1,186		5×400/56	8,200
	330/43	1,255		5×500/27	7,685
	400/51	1,490		5×240/56	5,53
330	2×240/39	1,904	35	95/16	0,385
	2×300/39	2,264		120/19	0,471

Примечания.

1. На линиях напряжением 35; 110; 220 кВ и выше применяется стальной грозозащитный трос соответственно ТК 8 (масса 1 м – 0,3308 кг), ТК 9,1 (масса 1 м – 0,4385 кг), ТК 11 (масса 1 м – 0,6274 кг).

2. Длину пролета для линий напряжением 35; 110; 220; 330; 750 кВ принять соответственно равной 150; 200; 250; 300; 400 м, а количество изоляторов: 4; 8; 16; 25; 42 шт. Масса одного изолятора – 4,8 кг.

Методические указания

Студент выполняет расчет для одного из указанных преподавателем варианта. Схемы монтажа провода на анкерную опору показаны на рис. 6.1.

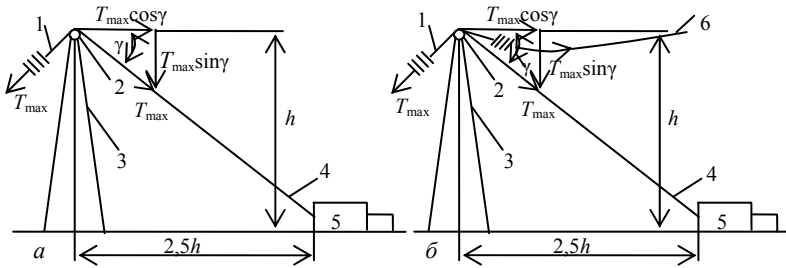


Рис. 6.1. Схемы монтажа провода на анкерную опору:

a – провода в другую сторону не смонтированы; *б* – провода в другую сторону смонтированы; 1 – монтируемый провод; 2 – монтажный блок; 3 – анкерная опора; 4 – тяговый трос; 5 – тяговый механизм; б – смонтированный в другую сторону провод

Определим вертикальные и горизонтальные расчетные нагрузки на анкерную опору при натяжении провода или троса с учетом составляющих от усилий по тяговому тросу. Рассмотрим следующие два случая: провода в другую сторону не смонтированы (см. рис. 6.1, *a*) и смонтированы (см. рис. 6.1, *б*).

Для схемы, приведенной на рис. 6.1, *a*, расчетные вертикальные нагрузки на опору состоят из веса одной гирлянды изоляторов, веса одного полупролета провода, проекции тяжения по тяговому тросу на вертикальную ось, веса монтажника с инструментом, т. е.

$$G^B = G_{\text{и}} + \frac{G_{\text{п}}}{2} + 1,1T_{\text{max}} \sin \gamma + G_{\text{м}},$$

где γ – угол между горизонталью и направлением тягового троса (лежит в пределах 20–30°).

Значение G_M равно 230 кг – для линий напряжением до 330 кВ и 325 кг – для линий напряжением 750 кВ. $T_{\max} = 10,8F$, даН, – для провода и $T_{\max \tau} = 60F_T$ – для троса. Здесь F , F_T – площадь поперечного сечения провода и троса.

Горизонтальная результирующая расчетная нагрузка на опору

$$P^r = 1,1T_{\max} - 1,1T_{\max} \cos \gamma = 1,1T_{\max} (1 - \cos \gamma).$$

При $\gamma = 0$, $P^r = 0$ G^B имеет минимальное значение; при $\gamma = 90^\circ$, $P^r = 1,1T_{\max}$ и G^B имеет максимальное значение; при $\gamma = 180^\circ$ $P^r = 2,2T_{\max}$, т. е. приобретает значение, в два раза превышающее максимальное, а G^B имеет минимальное значение. Максимальные значения P^r и G^B не должны превосходить допустимые.

Для схемы, приведенной на рис. 6.1, б, расчетные вертикальные и горизонтальные нагрузки вычисляются по формулам:

$$G^B = 2G_{\text{и}} + 1,1T_{\max} \sin \gamma + G_M + G_{\text{п}};$$

$$P^r = 1,1(T_{\max} - T_{\max} \cos \gamma - T) = 1,1[T_{\max} (1 - \cos \gamma) - T],$$

где T – тяжение по смонтированному в другую сторону проводу.

При $\gamma = 0^\circ$, $G^B = 2G_{\text{и}} + G_{\text{п}} + G_M$, т. е. имеет минимальное значение, а $P^r = 1,1T$; при $\gamma = 90^\circ$ G^B – максимально, а $P^r = 1,1(T_{\max} - T)$; при $\gamma = 180^\circ$ значение G^B – минимально, а $P^r = 1,1(2T_{\max} - T)$ – максимально.

Тема 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ПРОВОДАХ И ТРОСАХ ПРИ ОПУСКАНИИ ИХ С ОПОР

Задача. Определить напряжение в материале провода площадью поперечного сечения, указанного в табл. 6.1, при опускании его с $n - 1$ промежуточных опор, когда провод не ложится на землю. Количество пролетов n : 2; 3; 4; 5. Длина габаритного пролета равна 200; 300; 400; 450 и 500 м соответственно для линий напряжением: 35; 110; 220; 330 и 750 кВ.

Методические указания

Напряжение σ_1 в проводе, опущенном с 1, 2, ..., $n - 1$ опор, но не лежащим на земле, определяется по формуле [1, с. 292]

$$\sigma_1 = \sqrt[3]{\frac{\gamma_1^2 n^2 l^2}{24\beta}},$$

где γ_1 – удельная механическая нагрузка от собственного веса провода; определяется по формуле

$$\gamma_1 = \frac{G_0}{F},$$

где G_0 – масса одного метра провода, даН (см. табл. 6.1);

F – площадь поперечного сечения алюминиевой и стальной частей провода, мм² (табл. 6.1);

$\beta = \frac{1}{E}$ – коэффициент упругого удлинения провода, мм²/даН;

E – модуль упругости провода; примем равным $8,2 \cdot 10^3$ даН/мм².

Если в анкерном пролете имеется только одна промежуточная опора и снятый с нее провод не ложится на землю, то напряжение в материале провода возрастает почти в два раза (при неучете увеличения длины провода за счет его вытягивания), т. е. $\sigma_1 = 2\sigma_m$, $\sigma_m = 0,4\sigma_{вр}$, $\sigma_{вр} = 27$ даН/мм².

Тема 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ТЯЖЕНИЯ ЗА ОБОЛОЧКУ И ЖИЛЫ КАБЕЛЯ ПРИ ИХ РАСКАТКЕ

Задача. Определить усилия тяжения за алюминиевую оболочку и токопроводящие (медные или алюминиевые) жилы кабеля по условиям предотвращения возможного повреждения алюминиевой оболочки или изоляции кабеля при раскатке кабеля на прямых участках, по наклонной плоскости, затягивании кабеля в блоки, в трубопровод, имеющий поворот на 90° (1,57 радиан). Площадь поперечного сечения жил трехжильных кабелей – от 35 до 240 мм². Толщина алю-

миниевой оболочки кабеля: 1,4; 1,45; 1,50; 1,55; 1,60; 1,65; 1,65; 1,70; 1,75; 1,80; 1,85; 1,90; 1,95; 2,00 мм. Длина кабеля, уместаемого на барабане: 450; 400; 350 м (при площади поперечного сечения жил соответственно до 70 мм²; 95 мм²; 120 мм²; 150 мм² и более). Масса единицы длины кабеля: 2,4; 2,8; 3,3; 3,8; 4,4; 4,9; 5,5; 7,1 кг/м.

Методические указания

В соответствии со СН и П 3.05.06–85 тяжение кабеля со свинцовой и пластмассовой оболочками допускается только за жилы. При этом кабели, бронированные круглой проволокой (типа ЦСК, АСК, маслонаполненные типа МНСК и т. п.), следует тянуть за проволоки брони (допустимое напряжение 7–10 даН/мм²) с помощью специального захвата, обеспечивающего равномерное распределение нагрузки между проволоками брони. Во избежание деформации свинцовой оболочки усилие тяжения не должно превышать 25 кН.

В целях предотвращения повреждения алюминиевой оболочки кабеля при его тяжении с помощью кабельного чулка, максимально допустимое усилие тяжения $T_{\max}^{\text{об}}$, приложенное к алюминиевой оболочке, не должно превышать значений $\sigma_{\text{доп}}^{\text{об}} F_{\text{об}}$.

Здесь $\sigma_{\text{доп}}^{\text{об}}$ – допустимое напряжение на алюминиевую оболочку кабеля, даН/мм²; при значении временного сопротивления $\sigma_{\text{вр}}$ на разрыв алюминиевого провода, равного 16 даН/мм², $\sigma_{\text{доп}}^{\text{об}}$ может быть принято равным 0,2–0,3 $\sigma_{\text{вр}}$ или 3,0–4,8 даН/мм²; $F_{\text{об}}$ – площадь поперечного сечения алюминиевой оболочки кабеля.

Для трехжильного кабеля

$$F_{\text{об}} = \frac{\pi}{4} \left[(d_{\text{ж}} + 2\Delta_{\text{и}}^{\phi}) k_1 + 2\Delta_{\text{и}}^{\text{п}} + 2b_{\text{об}} \right]^2 - F_{\text{каб}}, \text{ мм}^2,$$

где $d_{\text{ж}} = 2\sqrt{F/\pi}$ – диаметр жилы кабеля, мм;

F – площадь поперечного сечения жил кабеля, мм²;

$\Delta_{\text{и}}^{\phi}$ – толщина фазной изоляции, мм; для кабелей напряжением 10 кВ равна 2,75 мм;

k_1 – коэффициент, учитывающий увеличение диаметра трех жил кабеля по сравнению с диаметром одной изолированной жилы; $k_1 = 2,15$;

$\Delta_{\text{и}}^{\text{п}}$ – толщина поясной изоляции, мм; для кабелей напряжением 10 кВ равна 1,25 мм;

$b_{\text{об}}$ – толщина алюминиевой оболочки кабеля, мм; равна 1,4–2,0 мм;

$F_{\text{каб}}$ – площадь поперечного сечения, занимаемого кабелем с фазной и поясной изоляцией, т. е. под оболочкой кабеля:

$$F_{\text{каб}} = \frac{\pi}{4} \left[(d_{\text{ж}} + 2\Delta_{\text{и}}^{\text{ф}}) k_1 + 2\Delta_{\text{и}}^{\text{п}} \right]^2.$$

В целях предотвращения повреждения изоляции кабелей при его тяжении за токопроводящие жилы, максимально допустимое усилие тяжения $T_{\text{max}}^{\text{ж}}$ не должно превышать значений

$$T_{\text{max}}^{\text{ж}} \leq \sigma_{\text{доп}}^{\text{ж}} \sum_{i=1}^n F_i, \quad (8.1)$$

где $\sigma_{\text{доп}}^{\text{ж}}$ – допустимое напряжение, даН/мм²; для кабелей с медными жилами $\sigma_{\text{доп}}^{\text{ж}}$ принимается равным 4,8; для кабелей с алюминиевыми жилами – 3,75 даН/мм²;

$\sum_{i=1}^n F_i$ ($i = 1, \dots, n$) – площадь поперечного сечения всех жил кабеля, мм²;

$i = 1, \dots, n$.

Если одновременно раскатывают j кабелей ($j = 1, \dots, m$), то максимально допустимое тяжение $T_{\text{max}}^{\text{ж}}$ определяется как

$$T_{\text{max}}^{\text{ж}} \leq \sigma_{\text{доп}}^{\text{ж}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{ij},$$

где F_{ij} – площадь поперечного сечения i -й жилы j -го кабеля, мм².

Необходимое усилие тяжения $T_{\text{тяж}}$ (для преодоления силы трения) на кабель, разматываемый с барабана, на прямых участках трассы (при затягивании кабеля в трубопровод или прокладке его в земляных траншеях) определяется по формуле

$$T_{\text{тяж}} = \eta_{\text{тр}} G_{\text{каб}} = \eta_{\text{тр}} G_0 l_{\text{каб}}, \quad (8.2)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; при тяжении кабеля по дну траншеи (по земле) $\eta_{\text{тр}} = 0,6-0,8$; при тяжении кабеля по роликам, когда скольжение по земле исключено и не исключено $\eta_{\text{тр}}$ равно соответственно 0,25 и 0,35; при протяжке кабеля в блоки $\eta_{\text{тр}} = 0,6$; при протяжке в трубопровод одиночного кабеля, имеющего проволочки скольжения, $\eta_{\text{тр}} = 0,15-0,2$; при скольжении кабеля по льду и снегу $\eta_{\text{тр}} = 0,03-0,04$; при скольжении металлических конструкций по стали $\eta = 0,04-0,08$; при качении металлических катков по деревянному настилу $\eta_{\text{тр}} = 0,15-0,25$; при качении по металлической полосе $\eta_{\text{тр}} = 0,02-0,03$;

$G_{\text{каб}}$ – масса кабеля на барабанае, кг;

G_0 – масса единицы длины кабеля, кг/м;

$l_{\text{каб}}$ – длина кабеля, уместаемого на барабанае, м.

При трогании с места усилие тяжения увеличивается в 1,25 раза, т. е.

$$T'_{\text{тяж}} = 1,25T_{\text{тяж}} = 1,25\eta_{\text{тр}} G_0 l_{\text{каб}}.$$

При одновременном затягивании в трубопровод или раскатке нескольких (m) кабелей усилия тяжения $T_{\text{тяж}}$ и $T'_{\text{тяж}}$ должны определяться следующим образом:

$$T_{\text{тяж}} = 1,1m\eta_{\text{тр}} G_0 l_{\text{каб}};$$

$$T'_{\text{тяж}} = 1,1m1,25G_0 l_{\text{каб}} = 1,375mG_0 l_{\text{каб}},$$

где 1,1 – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение коэффициента трения.

При тяжении кабеля вверх по наклонной плоскости усилие тяжения определяется по формуле

$$T_{\text{тяж}} = T_1 + G_0 l_{\text{каб}} (\sin \alpha + \eta_{\text{тр}} \cos \alpha),$$

где T_1 – усилие тяжения кабеля до достижения им наклонной плоскости;

α – угол между горизонтальной плоскостью; принять равным 10–30°.

При тяжении кабеля вниз по наклонной плоскости

$$T_{\text{тяж}} = T_1 - G_0 l_{\text{каб}} (\sin \alpha - \eta_{\text{тр}} \cos \alpha).$$

Отрицательное значение усилия $T_{\text{тяж}}$ означает, что при спуске следует применить тормозную лебедку.

При повороте трубопровода в горизонтальной плоскости по радиусу R и на угол Θ радиан усилие тяжения $T_{\text{тяж}}$ определится по выражению

$$T_{\text{тяж}} = T_1 \text{ch}(\eta_{\text{тр}} \Theta) + \sqrt{T_1^2 + (G_0 R)^2} \text{sh}(\eta_{\text{тр}} \Theta),$$

где T_1 – усилие тяжения по кабелю до изгиба трубопровода;

$\sqrt{T_1^2 + (G_0 R)^2}$ – результирующее усилие, прижимающее кабель к стенке трубопровода по дуге длиной $Rd\Theta$; оно складывается из усилия, прижимающего кабель к трубопроводу под действием нормальной составляющей силы тяжения T_1/R , на дуге $Rd\Theta$, (т. е. $T_{\text{норм}} = \frac{T_1}{R} Rd\Theta$) и силы тяжести на длине дуги $Rd\Theta$, т. е. $G_0 Rd\Theta$, сдвинутой относительно нормальной составляющей силы тяжения на угол 90°.

Упрощенно приращение усилия $\Delta T = T_{\text{тяж}} - T_1$ в результате поворота трубопровода на Θ радиан можно определить следующим образом:

$$\Delta T = (e^{\eta_{\text{тр}} \Theta} - 1)(T_1 + G_0 R).$$

Если на трассе линии имеется несколько поворотов, то при расчете последовательно вычисляется возрастание усилия тяжения после протягивания кабеля через каждый поворот и через каждый прямолинейный участок.

В блоки прокладываются небронированные кабели. Зная максимально допустимое усилие тяжения за жилы кабеля (выражение (8.1)), можно определить предельную длину кабеля (выражение (8.2)) по условию предельно допустимого тяжения:

$$l_{\text{каб}} \leq \frac{T_{\text{max}}^{\text{ж}} \eta_{\text{тр}}}{G_0}.$$

Тема 9. ПОСТРОЕНИЕ МОНТАЖНЫХ КРИВЫХ ДЛЯ ВИЗИРУЕМЫХ ПРОЛЕТОВ

Задача. Построить монтажные кривые для визируемых пролетов длиной $l_{\text{виз}}$: 120; 150; 170; 180; 200; 210; 220; 240; 250; 260; 270; 280; 290; 300; 310; 320; 340; 350; 360; 370; 400; 410; 420; 440; 450 м. Площадь поперечного сечения проводов F : 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 330; 400; 500 мм² при соответствующей массе: 0,2; 0,28; 0,38; 0,47; 0,55; 0,73; 0,95; 1,1; 1,15; 1,49; 1,59 кг/м.

Методические указания

Монтажные кривые представляют собой зависимость тяжения $T = \sigma F$ по проводу и его стрелы провеса $f = \frac{\gamma'_6 l_{\text{виз}}^2}{8\sigma}$ от температуры t окружающей среды для данного визируемого пролета длиной $l_{\text{виз}}$. Значение напряжения σ в материале провода определяется по основному уравнению состояния провода в пролете:

$$\sigma - \frac{(\gamma'_6)^2 l_{\text{виз}}^2}{24\sigma^2 \beta} = \sigma_m - \frac{\gamma_m^2 l_{\text{виз}}^2}{24\sigma_m^2 \beta} - \frac{\alpha}{\beta} (t - t_m), \quad (9.1)$$

где σ – напряжение в материале провода, получаемое в результате приложения к нему осевого монтажного усилия T , даН/мм²;

$\gamma'_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + (\gamma'_4)^2}$ – удельная механическая нагрузка от действия собственного веса провода γ_1 и ветра со скоростью, характерной для

условий монтажного режима, т. е. 10 м/с (γ'_4), что соответствует скоростному напору ветра, равному 6,25 даН/мм²;

$$\beta = \frac{1}{E} - \text{коэффициент упругого удлинения провода, даН/мм}^2;$$

E – модуль упругости провода; принять равным $8,2 \cdot 10^3$ даН/мм²; значение зависит от материала провода (алюминий, сталь, сталеалюминий, медь), соотношения между площадями поперечного сечения алюминиевой и стальной частей;

α – температурный коэффициент линейного удлинения провода; принять равным $19 \cdot 10^{-6}$ 1/°С;

σ_m – допустимое напряжение в материале провода в одном из режимов: наибольшей нагрузки (тогда $\sigma_m = \sigma_r$; $\gamma_m = \gamma_r$; $t_m = -5$ °С), среднегодовых условий (тогда $\sigma_m = \sigma_s$; $\gamma_m = \gamma_1$; $t_m = t_s$) или минимальной температуры (тогда, $\sigma_m = \sigma_r = \sigma_-$; $\gamma_m = \gamma_1$; $t_m = t_-$);

σ_r , σ_s , σ_- , – допустимое напряжение в материале провода в режиме наибольшей нагрузки, среднегодовых условий и минимальной температуры; принять соответственно равными $\sigma_r = \sigma_- = 10,8$ даН/мм², $\sigma_s = 8,1$ даН/мм²;

t_s , t_- – среднегодовая и наименьшая температура окружающей среды; принять равными +5 и –40 °С;

γ_r – удельная наибольшая механическая нагрузка от действия собственного веса провода, гололеда, ветра, даН/мм².

В свою очередь значение γ_1 , γ'_4 , $\gamma_r = \gamma_7$ находятся по выражениям

$$\gamma_1 = \frac{G_0}{F_a + F_c} = \frac{G_0}{F},$$

где γ_1 – удельная механическая нагрузка от действия собственного веса провода, даН/м·мм²;

G_0 – вес одного метра провода, даН;

F – площадь поперечного сечения провода (для сталеалюминиевого провода представляет собой сумму площадей поперечного сечения алюминиевой F_a и стальной F_c частей), мм².

$$\gamma_4 = \frac{6,25\alpha_1 c_x dk_l \cdot 10^{-3}}{F} \sin^2 \varphi = \frac{6,25\alpha_1 c_x dk_l \cdot 10^{-3}}{F},$$

где α_1 – коэффициент, учитывающий неравномерность скорости ветра по длине пролета; принять равным 1,0;

c_x – аэродинамический коэффициент, равен 1,1 и 1,2 соответственно для проводов, не покрытых гололедом, диаметром более 20 мм и до 20 мм;

d – диаметр провода, мм;

k_l – коэффициент, учитывающий длину пролета; принять $k_l = 1,0$;

φ – угол между направлением ветра и осью линии, градус; обычно принимают $\varphi = 90^\circ$.

Если определяется максимальное отклонение гирлянды изоляторов от вертикального положения, то значение удельной нагрузки γ_m находится при максимальном скоростном напоре ветра, т. е. $q = 40$ даН/м²:

$$\gamma_4 = \alpha_1 c_x q d k_l \cdot 10^{-3} \frac{1}{F}.$$

Здесь $\alpha_1 = 0,7$.

Значение

$$\gamma_7 = \sqrt{(\gamma_1 + \gamma_2)^2 + \gamma_5^2} = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2},$$

где $\gamma_2 = 0,00283b(d + b)l / F$ – удельная нагрузка от действия гололеда на провода, даН/м·мм²;

b – толщина стенки гололеда, мм;

$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2$.

Давление ветра на провода, покрытые гололедом:

$$\gamma_5 = \frac{\alpha_1 c_x 0,25q(d + 2b)k_l \cdot 10^{-3}}{F} \sin \varphi,$$

где $c_x = 1,2$;

q – нормативный скоростной напор ветра, характерный для данной местности, даН/м².

С учетом значений $\alpha_1 = 1,0$, c_x и $\varphi = 90^\circ$ удельная нагрузка γ_5 определится по формуле

$$\gamma_5 = \frac{0,3q(d + 2b)k_l \cdot 10^{-3}}{F}.$$

Для определения требуемых значений σ_m , γ_m , t_m вычисляются значения трех критических пролетов:

$$l_{1\text{кр}} = \frac{2\sigma_3}{\gamma_1} \sqrt{\frac{6[\beta(\sigma_3 - \sigma_r) + \alpha(t_3 - t_-)]}{1 - \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_r}\right)^2}},$$

$$l_{2\text{кр}} = \frac{2\sigma_r}{\gamma_1} \sqrt{\frac{6\alpha(-5 - t_-)}{\left(\frac{\gamma_7}{\gamma_1}\right)^2 - 1}},$$

$$l_{3\text{кр}} = \frac{2\sigma_r}{\gamma_1} \sqrt{\frac{6[\beta(\sigma_r - \sigma_3) + \alpha(-5 - t_3)]}{\left(\frac{\gamma_7}{\gamma_1}\right) - \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_3}\right)^2}}.$$

Если $l_{1\text{кр}} < l_{2\text{кр}} < l_{3\text{кр}}$, то при $l_{\text{виз}} < l_{1\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим минимальных температур, т. е. $\sigma_m = \sigma_-$, $\gamma_m = \gamma_-$, $t_m = t_-$. При $l_{1\text{кр}} < l_{\text{виз}} < l_{3\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим среднегодовых условий, т. е. $\sigma_m = \sigma_3$, $\gamma_m = \gamma_1$, $t_m = t_3$. При $l_{\text{виз}} > l_{3\text{кр}}$ в качестве m -х условий принимается режим наибольших нагрузок, т. е. $\sigma_m = \sigma_r$, $\gamma_m = \gamma_7$, $t_m = -5^\circ\text{C}$.

Если $l_{1\text{кр}} > l_{2\text{кр}} > l_{3\text{кр}}$, то при $l_{\text{виз}} < l_{2\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим минимальных температур, т. е. $\sigma_m = \sigma_-$, $\gamma_m = \gamma_1$, $t_m = t_-$. При $l_{\text{виз}} > l_{2\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим наибольших нагрузок, т. е. $\sigma_m = \sigma_r$, $\gamma_m = \gamma_7$, $t_m = -5^\circ\text{C}$.

Если $l_{1\text{кр}} = J_m$, $l_{2\text{кр}} < l_{3\text{кр}}$, то при $l_{\text{виз}} < l_{3\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим среднегодовых условий, т. е. $\sigma_m = \sigma_3$,

$\gamma_m = \gamma_1, t_m = t_3$. При $l_{\text{виз}} > l_{3\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим наибольших нагрузок, т. е. $\sigma_m = \sigma_3, \gamma_m = \gamma_1, t_m = -5^\circ\text{C}$.

Если $l_{3\text{кр}} = J_m, l_{1\text{кр}} < l_{2\text{кр}}$, то при $l_{\text{виз}} < l_{1\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим минимальных температур, т. е. $\sigma_m = \sigma_{-}, \gamma_m = \gamma_1, t_m = t_{-}$. При $l_{\text{виз}} > l_{1\text{кр}}$ в качестве исходных m -х условий принимается режим среднегодовых условий, т. е. $\sigma_m = \sigma_3, \gamma_m = \gamma_1, t_m = t_3$.

Если $l_{3\text{кр}} = J_m, l_{3\text{кр}} = J_m$, то при любой длине визируемого пролета в качестве m -х условий принимается режим среднегодовых условий, т. е. $\sigma_m = \sigma_3, \gamma_m = \gamma_1, t_m = t_3$.

Неполное кубическое уравнение (9.1) решается относительно σ при вариации температуры t от наименьшей до максимальной, характерных для данной местности. По полученным значениям σ находят тяжение по проводу и стрелу провеса провода и строят так называемые монтажные кривые.

С увеличением температуры монтажное тяжение по проводу снижается, а стрела провеса возрастает.

Наибольшая стрела провеса провода в процессе эксплуатации линии наступает или при наибольшей температуре воздуха, или при гололеде без ветра. Нагрев проводов солнечной радиацией или электрическим током при этом не учитываются.

Тема 10. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДОВ ЧЕРЕЗ ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И ВОДНЫЕ ПРЕГРАДЫ

Задача. Определить расстояние между нижними проводами пересекающей воздушной линии (ВЛ) электропередачи и инженерным сооружением, водной преградой или землей (в населенной местности) в нормальном и аварийном режимах. Номинальное напряжение пересекающей линии: 35; 110; 220; 330, 750 кВ. Пересекаемые сооружения: воздушные линии электропередачи более низкого напряжения; автомобильные дороги, железные дороги; троллейбусные и трамвайные линии.

Длина пролета линии: 150; 220; 300; 350; 450 м соответственно для номинальных напряжений: 35; 110; 220; 330, 750 кВ.

Допустимые расстояния $h_{\text{доп}}$ приведены в таблице.

Допустимые расстояния от проводов пересекающей линии
до инженерных сооружений

Наименование пересечений воздушной линии	Допустимые расстояния от проводов пересекающей линии, м		
	номинальное напряжение пересекающей линии		
	35–110	220	330
ВЛ напряжением 35–110 кВ между собой и с линиями более низкого напряжения	3,0	–	–
ВЛ напряжением 220 кВ между собой и с линиями более низкого напряжения	4,0	4,0	–
ВЛ напряжением 330 кВ между собой и с линиями более низкого напряжения	5,0	5,0	5,5
ВЛ с проводами линии связи	3,0/1,0	4,0/2,0	5,0/2,5
ВЛ с железными дорогами	7,5/6,0	8,5/6,5	9,0/7,0
ВЛ с автомобильными дорогами	7,0/5,0	8,0/5,5	8,5/6,0
ВЛ с троллейбусными линиями	11,0/1,0	12,0/2,0	13,0/2,5
ВЛ с трамвайными линиями	9,9/1,0	10,5/2,0	11,5/2,5
ВЛ с наземными и подзем- ными трубопроводами, ка- натными дорогами	4,0/2,0	5,0/3,0	6,0/4,0
Расстояние до земли в на- селенной местности	7,0/4,5	8,0/5,5	8,0/6,0
ВЛ с судоходными реками	6,0/3,0	7,0/4,0	7,5/4,5
ВЛ с несудоходными реками	6,0	7,0	7,5

Примечание: числитель – в нормальном режиме, знаменатель – в аварийном режиме.

Высоту пересекаемых сооружений h_c принять равными: ВЛ 0,38 кВ – 7,5–7,8 м; ВЛ 10 кВ – 9,0–9,5 м; ВЛ 35 кВ – 18 м; ВЛ 110 кВ – 19–27,5 м;

ВЛ 220 кВ – 20–40 м; ВЛ 330 кВ – 26,5–43,0 м; ВЛ 750 кВ – 38,0–40,1 м; линии связи – 7,0 м; автомобильные и железные дороги, судоходные реки – 2 м; троллейбусные и трамвайные линии – соответственно 7 и 6 м; надземные трубопроводы – 3 м; канатная дорога – 6 м.

Высоту подвеса нижнего провода $h_{\text{под}}$ пересекающей линии принять равной: ВЛ 35 кВ – 14 м; ВЛ 110 кВ – 16 м; ВЛ 220 кВ – 20 м; ВЛ 330 кВ – 25 м; ВЛ 750 кВ – 38,0 м.

Площадь поперечного сечения сталеалюминиевых проводов: 70; 185; 300; 2×400 ; 5×300 мм² соответственно для линий напряжением: 35; 110; 220; 330; 750 кВ.

Методические указания

Предположим, что опоры пересекающей воздушной линии, ограничивающие пролет пересечения, расположены на одинаковой высоте. Тогда расстояние от нижнего провода пересекающей линии h до верха инженерного сооружения определяется по формуле

$$h = h_{\text{под}} - h_c - y \geq h_{\text{доп}}, \quad (10.1)$$

где y – провес провода пересекающей линии над пересекаемым инженерным сооружением.

Значение y находится как

$$y = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma},$$

где γ – удельная механическая нагрузка, при которой имеет место наибольшая стрела провеса; примем, что (см. тему 9)

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_3;$$

$$\gamma_1 = \frac{G_0}{F}; \quad \gamma_2 = 0,00283b(d+b)\frac{1}{F},$$

где $b = 15$ мм – толщина стенки гололеда;

l – длина пролета, м;

x – расстояние от места пересечения до опоры пересекаемой линии; лежит в пределах $l/2 > x > 7$ м;

$\sigma = 10,8$ даН/мм² – наибольшее напряжение в материале сталеалюминиевого провода при гололедной нагрузке.

Если условие (10.1) не выполняется, то необходимо или уменьшить расстояние x или снизить высоту инженерного сооружения, т. е. переустроить место пересечения.

Проверка соответствия схемы пересечения условию аварийного режима производится по формуле

$$h^{ab} = h_{\text{под}} - h_c - y' \geq h_{\text{доп}}^{ab},$$

где y' – провес провода пересекающей линии в месте пересечения с инженерным сооружением при обрыве в соседнем пролете в условиях среднегодовой температуры; определяется как

$$y' = \frac{\gamma_1 x(l-x)}{2\sigma_{ab}},$$

где $\sigma_{ab} = 3,2$ даН/мм² – напряжение в материале провода в пролете пересечения в аварийном режиме (равно $0,4 \sigma_3$);

$$\sigma_3 = 8,1 \text{ даН/мм}^2.$$

Если опоры расположены на неодинаковой высоте, то значение y вычисляется по формуле

$$y = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma} + x \text{tg} \left(\frac{\Delta h}{l} \right),$$

где $\Delta h = 2-5$ м – разность высот точек подвеса провода на смежных опорах.

В аварийном режиме

$$y' = \frac{\gamma_1 x(l-x)}{2\sigma_{ab}} + x \text{tg} \left(\frac{\Delta h}{l} \right).$$

Тема 11. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Задача. Определить сопротивление вертикальных электродов и горизонтальных лучей, а также количество требуемых вертикальных электродов для сооружения заземляющего устройства опоры воздушной линии электропередачи.

Определить значение тока однофазного короткого замыкания, при котором обеспечивается допустимое напряжение прикосновения, и наметить мероприятия, способствующие увеличению значения указанного тока короткого замыкания.

Эквивалентное удельное сопротивление грунта: 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1500; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000; 4500; 5000; 1600; 1700; 1800; 1900; 2100; 2200; 2400; 2600; 2800 Ом·м; длина вертикального электрода l_v : 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20 м; внешний диаметр электрода: 10; 12; 14; 16; 18; 20 мм; ширина полки уголка: 20; 30; 40 мм; длина луча горизонтального заземлителя: 5; 10; 15; 20 м; число лучей: 1; 2; 3; 4. Допустимое сопротивление заземления опор: 10; 15; 20; 30 Ом при удельном сопротивлении грунта: до 100; 100–500; 500–1000; 1000–5000 Ом·м соответственно.

Расстояние между вертикальными электродами в сетке $a = 1,0–5,0l_v$.

Длина стороны квадратной сетки заземлителя, занимающего площадь F , т. е. $\sqrt{F} = 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140; 150$ м.

Суммарная длина горизонтальных лучей сетки $L_c = (4–40)\sqrt{F}$.

Методические указания

Проектирование заземляющего устройства ведется путем последовательных приближений.

Вначале определяется сопротивление естественных заземлителей. Если сопротивление достаточно, то других заземлителей не требуется. В противном случае с учетом значений сопротивления заземляющего устройства (4 Ом – сеть напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью; 10 Ом – сеть напряжением 6–35 кВ с изолированной, заземленной через резистор и компенсированной нейтра-

лями; 0,5 Ом – сеть напряжением 110 кВ и выше с эффективно заземленной нейтралью; 10–30 Ом – опоры линий электропередачи) необходимо определить результирующее (требуемое) сопротивление искусственного заземлителя. При совмещении заземляющих устройств различных напряжений (например, на подстанциях) или назначений принимается меньшее сопротивление.

При проектировании заземляющего устройства считаются известными: диаметр стальных вертикальных стержней (не менее 10 мм), их длина (3 м и более), размер или площадь поперечного сечения круглой или полосовой стали, соединяющей между собой вертикальные стержни (не менее 48 мм², что соответствует размеру полосы 12 × 4 мм или 10 мм – круглой стали), а также конфигурация заземлителя – горизонтальные лучи – для опор воздушных линий электропередачи или прямоугольник (для подстанций).

Сопротивление одного вертикального трубчатого или стержневого электрода $R_{\text{в}}$, верхний конец которого находится ниже уровня земли на расстояние h_3 , определяется по формуле

$$R_{\text{в}} = \frac{0,366\rho_3}{l_{\text{в}}} \left(\lg \frac{2l_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} + \lg \frac{4h_3 + l_{\text{в}}}{4h_3 - l_{\text{в}}} \right) =$$

$$= \frac{0,366\rho_3}{l_{\text{в}}} \left(\lg \frac{2l_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h_3 + 3l_{\text{в}}}{4h_3 + l_{\text{в}}} \right), \text{ Ом,}$$

где ρ_3 – эквивалентное удельное сопротивление грунта (или удельное сопротивление однородной земли), Ом·м;

$l_{\text{в}}$ – длина вертикального электрода, м;

$d_{\text{в}}$ – внешний диаметр электрода (для электрода из уголкового стали $d_{\text{в}} = 0,95b$), м;

b – ширина полки уголка, м;

h_3 – глубина заложения вертикального электрода или расстояние от поверхности земли до середины электрода ($h_3 = h_3 + \frac{l_{\text{в}}}{2}$);

h_3 – расстояние от поверхности земли до верха вертикального электрода; принимается равным 0,7–0,8 м.

В ориентировочных расчетах сопротивление $R_{\text{в}}$ вертикального электрода в однородной земле можно определить по формуле

$$R_B \cong \frac{\rho}{l_B}, \text{ Ом,}$$

где ρ – удельное сопротивление земли, Ом·м.

Для пучка из n стальных параллельно соединенных труб

$$R_B^{\text{пуч}} = \frac{R_B}{\eta n},$$

где η – коэффициент использования заземления; равен 0,62–0,58; 0,75–0,7; 0,8–0,72 соответственно при отношении расстояния между трубами к их длине, равной 1,0; 2,0; 3,0.

Сопротивление вертикального электрода, опускаемого в скважину, находится по формуле

$$R_B^{\text{СКВ}} = \frac{\rho_3}{2\pi l_B} \ln \frac{4l_B}{d_B} = \frac{0,366\rho_3}{l_B} \lg \frac{4l_B}{d_B}.$$

Сопротивление R_L горизонтального заземлителя или луча, прокладываемого из круглого проводника на глубине не менее 0,5 м, а на пахотной земле – не менее 1,0 м, определяется по выражению

$$\begin{aligned} R_L &= \frac{\rho_3}{2\pi l_L} \left(\ln \frac{2l_L}{d_L} + \ln \frac{l_L}{2h_3} \right) = \\ &= \frac{0,366\rho_3}{l_L} \left(\lg \frac{2l_L}{d_L} + \lg \frac{l_L}{2h_3} \right) = \frac{0,366\rho_3}{l_L} \lg \frac{l_L^2}{d_L h_3}, \end{aligned}$$

где l_L – длина горизонтального заземлителя (луча), м;

d_L – внешний диаметр проводника заземлителя (луча), м;

h_3 – глубина заложения горизонтального заземлителя, м.

Сопротивление R_L горизонтального заземлителя или луча из полосовой стали

$$R_L = \frac{0,366\rho_3}{l_L} \lg \frac{2l_L^2}{b_L h_3},$$

где b_L – ширина полосы, м.

При $b_{\text{л}} = 2d_{\text{л}}$ сопротивление $R_{\text{л}}$ горизонтального луча из полосовой и круглой стали имеет одинаковое значение.

В ориентировочных расчетах сопротивление горизонтального электрода из полосовой стали может быть определено как

$$R_{\text{л}} = \frac{2\rho}{l_{\text{л}}}.$$

Если лучевые заземлители укладываются в землю в виде расходящихся под равными углами от центра опоры лучей, то сопротивление растеканию такой системы лучевых заземлителей $R_{\text{с.л}}$ подсчитывается по формуле

$$R_{\text{с.л}} = \frac{R_{\text{л}}}{n_{\text{л}}\eta'_{\text{л}}},$$

где $R_{\text{л}}$ – сопротивление одного луча;

$n_{\text{л}}$ – число лучей;

$\eta'_{\text{л}}$ – коэффициент использования лучевого заземлителя в системе нескольких лучей; принимается равным 0,8 или 0,7 – при количестве лучей три и четыре и диаметре проводника луча 10 мм.

Сопротивление системы «горизонтальный луч–вертикальный электрод»

$$R_{\text{л-в}} = \frac{R_{\text{л}}R_{\text{в}}}{(R_{\text{л}} + R_{\text{в}})\eta'_{\text{в}}}.$$

С учетом сопротивления горизонтального заземлителя $R_{\text{л}}$ или $R_{\text{с.л}}$ уточненное значение необходимого числа вертикальных электродов $n'_{\text{в}}$ определится как

$$n'_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в}}}{\frac{R_{\text{л}}R_{\text{рез}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{рез}}}\eta'_{\text{в}}},$$

где значение $\eta'_{\text{в}} = 0,6-0,8$ [1, с.127]; полученные результаты округляют до ближайшего большего значения.

При проектировании сложных заземлителей, монтируемых на подстанциях и состоящих из горизонтальной сетки и вертикальных электродов, действительная площадь F , занимаемая заземлителем, заменяется квадратом такой же площади со стороной \sqrt{F} . В качестве известных значений принимаются: общая длина горизонтальных проводников $L_{\text{г}}$, глубина их заложения h_3 , число $n_{\text{в}}$ и длина $l_{\text{в}}$ вертикальных электродов.

Наибольшее возможное расчетное напряжение прикосновения на территории, занятой заземлителем, определяется по формуле

$$U_{\text{прик}} = I_3 R_3 k_{\text{прик}} = U_3 \alpha_{\text{пр}} \beta \leq U_{\text{прик}}^{\text{доп}},$$

где I_3 – ток однофазного замыкания на землю, А;

R_3 – сопротивление заземлителя, Ом;

$k_{\text{пр}}$ – коэффициент напряжения прикосновения, равный отношению напряжения на теле человека $U_{\text{прик}}$ к напряжению на заземлителе ($k_{\text{прик}} < 1,0$ и может принимать значения 0,2 и ниже);

U_3 – напряжение на заземлителе, В;

$\alpha_{\text{пр}}$ – коэффициент напряжения прикосновения, зависящий от конструкции заземлителя и напряжения между двумя точками, которых может одновременно коснуться человек;

$\beta = 1000 / (1000 + 1,5\rho_1)$ – коэффициент, представляющий собой отношение сопротивления тела человека (1000 Ом) к сумме сопротивлений тела человека и сопротивлению растеканию тока с ног человека;

ρ_1 – удельное сопротивление верхнего слоя земли, Ом·м;

$U_{\text{прик}}^{\text{доп}}$ – допустимое напряжение прикосновения; зависит от времени срабатывания релейной защиты, В.

Значение коэффициента $\alpha_{\text{прик}}$ определяется по формуле

$$\alpha_{\text{прик}} = \frac{c}{\left(\frac{l_{\text{в}} L_{\text{г}}}{a \sqrt{F}} \right)^{0,45}},$$

где $c = 0,50$ при $\rho_1 / \rho_2 = 1,0$.

Здесь предполагается, что длина вертикальных электродов l_v лежит в пределах 5–20 м; отношение $\frac{l_v}{a} = 1-5$; $\frac{L_c}{\sqrt{F}} = 4-30$; $\sqrt{F} = 20-150$ м,

длина стороны квадратной сетки заземлителя, глубина заложения сетки 0,5–0,8 м; L_c – суммарная длина горизонтальных лучей сетки.

Если исходить из допустимого значения напряжения прикосновения, равного 50–65 В (т. е. $U_{\text{прик}} = U_{\text{прик}}^{\text{доп}}$), при времени срабатывания релейной защиты равном 0,1–3,0 с, то ток однофазного замыкания не должен превышать значения

$$I_3 \leq \frac{U_{\text{прик}}^{\text{доп}}}{R_3 \alpha_{\text{прик}} \beta}, \text{ А.} \quad (11.1)$$

Если фактическое значение тока замыкания превышает значение, полученное по формуле (11.1), то следует увеличить длину горизонтальных электродов путем расширения площади заземлителя, выполнить сетку более густой (снижается $\alpha_{\text{прик}}$), приближающейся к сложной плите, или повысить удельное сопротивление верхнего слоя грунта ρ_1 (и тем самым снизить β) за счет подсыпки территории подстанции слоем гравия с удельным сопротивлением 6000–8000 Ом·м.

Тема 12. ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ ОТЧУЖДАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОПОР ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Задача. Определить площадь участка земли, изымаемого в постоянное пользование, для размещения железобетонных и металлических опор воздушной линии электропередачи на непахотных и пахотных землях.

Диаметр на уровне земли железобетонных опор: 560; 800; 616,6; 617,7.

Железобетонные опоры с оттяжками:

расстояния ОС: 8,0; 9,8; 6,1; 5,1; 7,5; 9,0; 10,0; 12,5 м;

ОД: 5,0; 6,2; 6,1; 5,1; 7,5; 9,0; 10,0; 12,5 м.

Железобетонные опоры П-образные: расстояние между центрами стоек: 5,32; 5,86; 5,96; 11,6; 6,0; 8,4; 15,4; 16,0; 15,0 м.

Ширина базы металлических опор: 1,5; 1,8; 2,06; 2,19; 3,9; 4,2 м (линии напряжением 35 кВ); 2,4; 2,5; 2,75; 2,8; 3,3; 3,5; 4,7; 4,8 м (линии напряжением 110 кВ); 4,1; 4,42; 4,5; 4,8; 5,0; 5,2; 5,4 м (линии напряжением 220 кВ); 4,82; 5,17; 5,42; 5,32; 5,75; 6,24; 6,85; 9,55 м (линии напряжением 330 кВ); 6,3 м (линии напряжением 750 кВ) – две стойки свободностоящей опоры, расстояние между центрами стоек 17 м;

Металлические опоры с оттяжками:

расстояния ОС: 15,0; 17,4; 11,8; 16,0; 6,6; 16,6; 19 м;

ОД: 6,6; 8,0; 16,6; 19 м.

Сравнить площади территорий, отчуждаемых для одноствоечных и порталных железобетонных опор, одноствоечных металлических и одноствоечных металлических с оттяжками, порталной металлической свободностоящей и с оттяжками.

Методические указания

Площадь участка земли под опору, изымаемого в постоянное пользование, определяется по формуле

$$F = \pi \left(\frac{d}{2} + b \right)^2, \text{ м}^2, \quad (12.1)$$

где d – размер основания опоры у поверхности земли (для конических и цилиндрических опор равен радиусу стойки у поверхности земли; для вибрированных стоек равен наиболее широкой грани стойки), м;

b – ширина полосы земли в каждую сторону от основания опоры; для линий напряжением до 10 кВ $b = 1,0$ м; для линий напряжением 35 кВ и выше $b = 2,0$ м (рис. 12.1).

Для опор на оттяжках (рис. 12.2) периметр основания опоры проходит через точку крепления оттяжек к анкерным плитам (точки A, B, C).

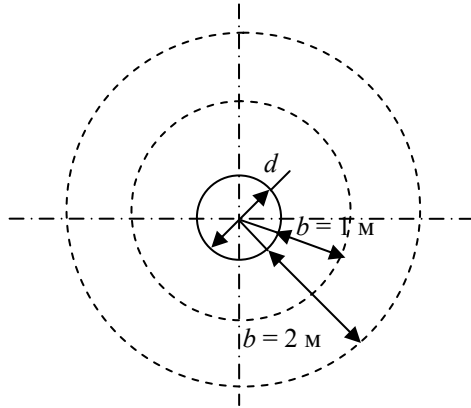


Рис. 12.1. Соотношение диаметра d основания железобетонной опоры ($d < 0,8$ м) и ширины отчуждаемой полосы земли b

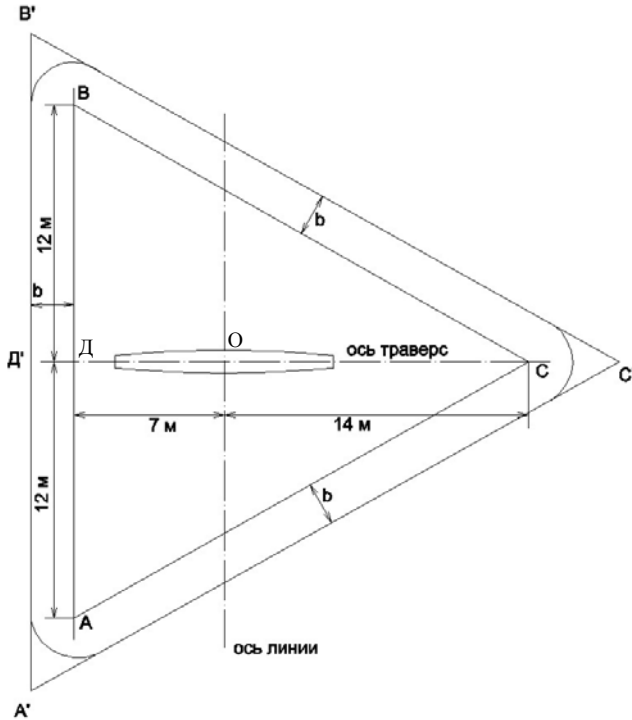


Рис. 12.2. План расположения оттяжек металлической опоры линии электропередачи напряжением 220 кВ (A, B, C – места расположения оттяжек)

Тогда площадь отчуждаемого участка земли (площадь треугольника $A'B'C'$) приближенно может быть вычислена как

$$F = 2 \cdot \frac{1}{2} (D'C') \cdot A'D' = (7 + 14 + 2b) \cdot 12 = (21 + 2b) \cdot 12 \approx 252 + 24b.$$

Для П-образных опор (рис. 12.3) площадь участка, отчуждаемого под опору, можно оценить по выражению

$$F = \pi \left(\frac{d}{2} + b \right)^2 \cdot \frac{2}{2} + (d + c)(d + 2b) = \pi \left(\frac{d}{2} + b \right)^2 + (d + c)(d + 2b), \text{ м}^2,$$

где c – расстояние между стойками опоры, м.

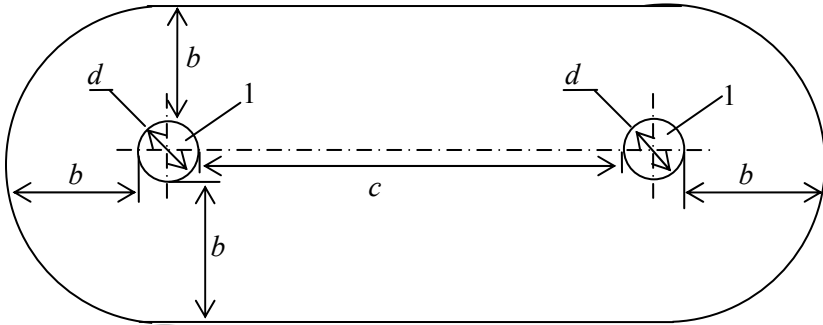


Рис. 12.3. Площадка земли, отчуждаемой под установку П-образной опоры:
 l – стойки опоры

Площадь участка под опоры, устанавливаемые на пахотных землях, принимается как среднее значение площадки необрабатываемой земли у опор при движении сельскохозяйственных машин вдоль линии, поперек линии и под углом 45° к оси линии, т. е.

$$F = \frac{1}{3} (F_1 + F_2 + F_3),$$

где F_1, F_2, F_3 – необрабатываемые площади земли соответственно при движении механизмов вдоль линии, поперек линии и под углом 45° к оси линии.

При расчете площади для проезда механизмов возле конических, цилиндрических либо вибрированных стоек опор можно считать, что $F_1 = F_2 = F_3 = F$.

Значение F определяется по выражению (12.1) при $b = b_1$:

$$F = \pi \left(\frac{d}{2} + b_1 \right)^2,$$

где b_1 – минимальное допустимое расстояние для проезда механизма мимо стойки опоры, м (может достигать 5 м).

Если база металлической опоры представляет собой прямоугольник с длинами широкой и узкой граней, равными соответственно a_1 и a_2 , то значения F_1 , F_2 и F_3 будут равны между собой (рис. 12.4) и вычисляться по формуле

$$F = F_{\text{фунд}} + 2F' + 4F'' + 2F''' = a_1 a_2 + 2a_1 b_1 + 4 \frac{\pi b_1^2 \alpha}{360} + 2b_1 a_2,$$

где $F_{\text{фунд}}$ – площадь, занимаемая фундаментом опоры;

$\alpha = 90^\circ$ – центральный угол сектора;

a_1, a_2 – длины сторон фундамента, м.

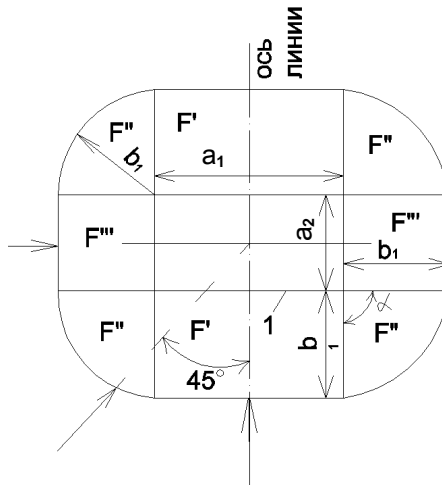


Рис. 12.4. Площадка земли, отчуждаемая для проезда сельскохозяйственных машин при обработке почвы:

l – ствол или база опоры; \rightarrow направление движения машин

Тема 13. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕНЫ ПРОВОДОВ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Задача. Определить увеличение пропускной способности линии электропередачи напряжением 10 или 35 кВ при замене сталеалюминиевых проводов площадью поперечного сечения F на сталеалюминиевые провода площадью поперечного сечения F_1 (при этом $F_1 > F$) при ограничениях по длительно допустимому току по нагреву и допустимой потере напряжения.

Значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ принять равным 0,9.

Диапазон рассматриваемых сечений проводов, значения их удельных сопротивлений и длительно допустимых токов по нагреву приведены в таблице.

Исходные данные для решения задачи

Площадь поперечного сечения сталеалюминиевых проводов, мм ²	Длительно допустимый ток по нагреву, А	Активное сопротивление 1 км провода, Ом/км	Индуктивное сопротивление 1 км провода, Ом/км, линий напряжением	
			10 кВ	35 кВ
25	135	1,38	0,398	0,431
35	175	0,91	0,385	0,417
50	210	0,63	0,374	0,406
70	265	0,45	0,364	0,396
95	330	0,33	0,353	0,395
120	390	0,27	0,347	0,379
150	450	0,21	0,340	0,372

Первоначальное и максимальное значения площади поперечного сечения проводов F_1 принять равными 25 и 70 мм² – для линий напряжением 10 кВ и 35 и 150 мм² – для линий напряжением 35 кВ.

Допустимая потеря напряжения по линиям 10 кВ – 3–8 %; по линиям 35 кВ – 2–5 %.

Методические указания

При замене проводов на линиях напряжением до 10 кВ площадью поперечного сечения F на провода площадью поперечного се-

чения F_1 , при этом $F_1 > F$, пропускная способность P линии возрастает за счет увеличения длительно допустимого тока по нагреву и изменения потерь мощности в линии, т. е.

$$\delta P = P\left(\frac{I_{д1}}{I_{д}} - 1\right) + \Delta P\left(1 - \frac{I_{д1}^2}{I_{д}^2} \cdot \frac{F}{F_1}\right), \quad (13.1)$$

где δP – изменение пропускной способности линии;

$I_{д1}, I_{д}$ – длительно допустимый ток на провода линии площадью поперечного сечения F_1 и F ;

$P, \Delta P$ – пропускная способность и потери мощности в линии с проводами площадью поперечного сечения F .

Поскольку $I_{д1} > I_{д}$, то второе слагаемое в формуле (13.1) может иметь отрицательное значение, т. е. при пропускании длительно допустимого тока потери мощности в линии с новыми проводами будут большими, чем с проводами площадью поперечного сечения F .

Значение

$$\frac{I_{доп1}^2}{I_{доп}^2} \cdot \frac{F}{F_1} \leq 1,0,$$

когда

$$I_{д1} \leq I_{д} \sqrt{\frac{F_1}{F}}. \quad (13.2)$$

$$P = \sqrt{3} U_{н} I_{доп} \cos \varphi,$$

где $U_{н}$ – номинальное напряжение, кВ.

Если пропускная способность линии ограничена допустимой потерей напряжения, то изменение пропускной способности δP определится по формуле

$$\delta P = P\left(\frac{P_1}{P} - 1\right) + \Delta P\left(1 - \frac{I_{1д}^2}{I_{д}^2} \cdot \frac{F}{F_1}\right), \quad (13.3)$$

где P_1 – пропускная способность линии при ее ограничении по допустимой потере напряжения.

Отношение

$$\frac{P_1}{P} = a = \frac{r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi}{r_{01} \cos \varphi + x_{01} \sin \varphi},$$

где r_0, x_0 – активное и индуктивное сопротивление единицы длины линии;

φ – угол между вектором напряжения и тока.

Поскольку $r_0 > r_{01}$, то $a > 1$. Второй член выражения (13.3) будет иметь положительное значение при $\frac{I_1^2}{I_d^2} \cdot \frac{F}{F_1} \leq 1,0$ или $I_1 \leq I_d \cdot \sqrt{\frac{F_1}{F}}$, что соответствует выражению (13.2).

$$P = \frac{\Delta U}{100} \frac{U_n^2}{(r_0 + jx_0)l} \cos \varphi,$$

где ΔU – допустимая потеря напряжения, %.

Тема 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОВОДАХ ОТКЛЮЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, НАХОДЯЩИХСЯ ВБЛИЗИ ДРУГИХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЛИНИЙ

Задача. Определить напряжение, наведенное электромагнитным путем, на отключенном проводе линии, находящемся в зоне влияния других действующих линий напряжением: 110; 220; 330; 750 кВ на длине, равной 20–50 км. Расстояние от отключенного провода до крайнего провода действующей линии: 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100 м (при напряжении 110 кВ); 110; 120; 130; 140; 150 м (при напряжении 220 кВ); 160; 170; 180; 190; 200 м (при напряжениях 330 и 750 кВ).

Расстояние между крайним и средним, средним и другим крайним проводами: 2,1; 4,2 м (для линий напряжением 110 кВ); 2,6; 7,0 м (для линий напряжением 220 кВ); 3,5; 14,1 м (для линий напряжением 330 кВ); 18,8; 18,8 м (для линий напряжением 750 кВ).

Ток нагрузки по проводам действующих линий электропередачи равен 240; 400; 600 и 1600 А соответственно для линий напряжением: 110, 220, 330 и 750 кВ.

Допустимое значение наведенного потенциала на отключенном проводе 25 В.

Определить распределение напряжения вдоль провода отключенной линии и сравнить его с допустимым для случаев:

- когда отключенный провод не соединен с землей;
- если оба конца отключенного провода заземлены через сопротивление, равное нулю;
- если один конец отключенного провода заземлен через сопротивление, равное нулю, а второй конец разомкнут; оценить изменение потенциалов при смещении точки заземления от начала к концу;
- если начало и конец линии заземлены через заземлители сопротивлениями $R_1 = 0,5; 4; 10; 30$ Ом; $R_2 = 4; 0,5; 30; 10$ Ом; оценить падение напряжения на заземлителях; удельные активное и индуктивное сопротивления линий принять равными 0,2 и 0,4 Ом/км;
- если отключенный провод заземлен не только на концах через сопротивления R_1 и R_2 , но и на месте производства работ на расстоянии l_1 от начала, равном 0,1–0,4, длины линии через сопротивление $R_3 = 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000$ Ом;
- оценить потенциал отключенного провода в месте производства работ;
- если отключенный провод заземлен только на месте производства работ через сопротивление, равное нулю; оценить значение напряжения по концам линии и на месте производства работ;
- если отключенный и заземленный на концевых подстанциях провод обрывается; оценить напряжение на оборванных концах.

Методические указания

На изолированном от земли проводе, идущем параллельно трехфазной воздушной линии электропередачи, находящейся под рабочим напряжением, наводится напряжение по отношению к земле, зависящее от рабочего напряжения влияющей линии, поперечных геометрических размеров и взаимного расположения проводов рассматриваемых линий, т. е. наведенное напряжение определяется емкостными связями системы проводов.

Значение $U_{2\Sigma}^{(3)}$ наведенного электростатического напряжения постоянно по длине воздушной линии, и необходимость в его определении возникает тогда, когда подверженная влиянию воздушная линия электропередачи не заземлена или заземлена через достаточно большое сопротивление, достигающее сотен Ом.

Поскольку заземление отключенной для выполнения работ линии обязательно (в соответствии с техническими мероприятиями, обеспечивающими безопасность работ), то наведенный электростатический потенциал с отключенного провода таким образом снимается. У выведенной в ремонт и заземленной по концам через малые активные сопротивления линии электростатическими связями можно пренебречь.

Наведенная ЭДС на проводе воздушной линии электропередачи, подверженной электромагнитному влиянию, находится по формуле

$$E = j0,145l_{сб} \sum_{i=1}^3 I_i \lg \frac{D_3}{D_{i2}}, \text{ В/км,}$$

где $l_{сб}$ – длина участка сближения действующей и отключенной линии;

I_i – сила тока в проводе i -й фазы линии, A ($i = 1, 2, 3$);

D_3 – эквивалентная глубина прохождения обратного тока в земле; для равнинной территории Республики Беларусь $D_3 = 1000$ м;

D_{i2} – расстояние между проводом i -й фазы линии и отключенным проводом.

Для симметричной трехфазной системы

$$\begin{aligned} \underline{E} &= j0,145I_1 \left(\lg \frac{D_3}{D_{12}} + a^2 \lg \frac{D_3}{D_{22}} + a \lg \frac{D_3}{D_{32}} \right) = \\ &= -j0,145I_1 (\lg D_{12} + a^2 \lg D_{22} + a \lg D_{32}), \end{aligned}$$

где a^2 , a – операторы;

$$I_2 = a^2 I_1; I_3 = a I_1.$$

Модуль ЭДС, наведенной на отключенном проводе, определяется по формуле [1, с. 320]

$$E = 0,145I_1 \sqrt{\frac{3}{4} \left(\lg \frac{D_{32}}{D_{22}} \right)^2 + \left[\lg D_{12} - \frac{1}{2} \lg (D_{22} D_{32}) \right]^2},$$

где D_{12} , D_{22} , D_{32} – расстояния от проводов фаз 1; 2; 3 влияющей линии до провода отключенной линии.

Полная ЭДС, наведенная на проводе линии длиной l :

$$E_{\text{полн}} = El, \text{ В.}$$

Если в одном коридоре проходит несколько линий ($j = 1, \dots, m$), то суммарная наведенная ЭДС

$$E_{\Sigma} = j0,145 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^3 l_{\text{сб}j} I_{ij} \lg \frac{D_3}{D_{ij2}},$$

где I_{ij} – сила тока в проводе i -й фазы j -й линии;

$l_{\text{сб}j}$ – длина участка сближения i -й линии с отключенной.

1. Если отключенный провод не соединен с землей, т. е. изолирован, то в этом случае потенциал провода обусловлен только электростатической составляющей, а от действия продольной ЭДС потенциал провода изменяется по длине участка сближения l по закону

$$\varphi_x = \frac{E}{2} - \frac{E}{l} x,$$

где x – расстояние до какой-то точки на участке сближения.

2. Если оба конца провода заземлены через сопротивление, равное нулю, то потенциал провода по отношению к земле в любой точке будет равен нулю, т. е. действующая ЭДС уравновешивается падением напряжения на сопротивлении провода.

3. Если один конец провода заземлен через сопротивление, равное нулю, а второй конец разомкнут, то потенциал на втором конце провода будет равен действующей ЭДС. При смещении точки заземления по линии от начала к концу потенциалы в начале U_1 и конце U_2 будут изменяться в соответствии с выражениями:

$$U_1 = E \frac{l_1}{l}; \quad U_2 = E - U_1 = E \left(1 - \frac{l_1}{l}\right),$$

где $l = l_1 + l_2$;

l_1 – расстояние от начала линии до точки наложения заземления;

l_2 – расстояние от точки наложения заземления до конца линии.

4. Если начало и конец линии заземлены через заземлители сопротивлением R_1 и R_2 , при этом $R_1 \neq R_2$, $R_1 \neq 0$, $R_2 \neq 0$, то проходящий в контуре ток

$$I = \frac{E}{\sqrt{(r_0 l + R_1 + R_2)^2 + (x_0 l)^2}}.$$

Падение напряжения на заземлителях R_1 и R_2

$$U_1 = IR_1 \text{ и } U_2 = IR_2.$$

5. В случае заземления провода в третьей точке – еще и на месте производства работ (через сопротивление R_3)

$$E_1 = E_0 l_1; \quad E_2 = E_0 l_2; \quad l_1 + l_2 = l,$$

где E_0 – удельное значение наведенной электромагнитным путем ЭДС.

При заземлении отключенной линии, находящейся на длине l в зоне влияния действующей линии, на конечных подстанциях и на месте производства работ, расстояние до точки нулевого потенциала определяется по выражению

$$x_0 = \frac{R_1 \left(l + l_1 \frac{R_2}{R_3} \right)}{R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}}.$$

Потенциал отключенного провода относительно земли в месте производства работ $U_{\text{мр}}$ определится по выражению

$$U_{\text{мр}} = \left(\frac{l}{2} - l_1 \right) E \leq U_{\text{доп}},$$

где E – удельное значение наведенной ЭДС; равно 33–50 В/км для линий 750 кВ.

Напомним, что допустимое значение напряжения прикосновения в нормальном режиме равно 25 В, в аварийном – 500; 250; 100; 50 В

при продолжительности воздействия тока короткого замыкания соответственно 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 с.

6. При заземлении отключенного провода, находящегося в зоне электромагнитного влияния других линий, только в одном месте – на месте производства работ через сопротивление, равное нулю, без заземления его по концам линии – точка нулевого потенциала совпадает с местом установки заземления, а наибольшее значение наведенного напряжения имеет место по концам линии.

7. При обрыве и падении на землю провода линии, находящейся в зоне влияния другой линии, на концах оборванного провода, заземленного на концевых подстанциях, будут напряжения:

$$U_1 = E_0 l_1;$$

$$U_2 = E_0 l_2;$$

$$U_1 + U_2 = E;$$

$$l = l_1 + l_2,$$

где E_0 – В/км;

l_1 – расстояние от начала линии до места обрыва;

l_2 – расстояние от конца линии до места обрыва.

Тема 15. ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО ТОКА НАГРУЗКИ ДЛЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ЗЕМЛЕ, ВОЗДУХЕ, ТУННЕЛЯХ, ВОДЕ, БЛОКАХ

Задача. Определить длительно допустимое значение тока нагрузки для трехжильных и одножильных силовых электрических кабелей напряжением 10 кВ площадью поперечного сечения медных и алюминиевых жил: 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 мм² при их прокладке в земле, воздухе, туннелях, воде, блоках.

Допустимая температура нагрева жилы $\Theta_{ж}$ = 70 и 90 °С соответственно для кабелей с бумажно-масляной и полиэтиленовой изоляцией; температура окружающей среды Θ_0 = 15, 25, 35, 10 °С соответственно земли, воздуха, туннелей, воды.

Методические указания

Длительно допустимое значение тока нагрузки $I_{\text{доп}}$ определяется по формулам [2, с. 488]:

– трехжильные кабели

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{(\Theta_{\text{ж}} - \Theta_0)10^3}{3R_{\text{ж}}(S_{\text{из}} + S_{\text{п}} + S_0)}};$$

– одножильные кабели

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{(\Theta_{\text{ж}} - \Theta_0)10^3}{R_{\text{ж}}[S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{экр}})(S_{\text{п}} + S_0)]}};$$

где $R_{\text{ж}}$ – сопротивление жилы переменному току:

– для алюминия: 0,59; 0,42; 0,31; 0,245; 0,196; 0,159; 0,125 Ом/км;

– для меди: 0,39; 0,28; 0,20; 0,158; 0,123; 0,100; 0,077; Ом/км соответственно для жил площадью поперечного сечения: 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 мм²;

$S_{\text{из}}$, $S_{\text{п}}$, S_0 – термическое сопротивление изоляции, защитных покровов, окружающей среды;

$y_{\text{экр}}$ – коэффициент, учитывающий потери мощности в экране кабеля.

Термическое сопротивление изоляции вычисляется по формуле

$$S_{\text{из}} = 0,366\sigma_{\text{из}} \lg \frac{R}{r},$$

где $\sigma_{\text{из}}$ – удельное термическое сопротивление изоляции; для бумажно-масляной изоляции равно 5,5–7,0 °С·м/Вт, для полиэтиленовой изоляции – 3,0–4,0 °С·м/Вт;

R – радиус кабеля по изоляции, мм;

r – радиус жилы: 3,99; 4,7; 5,35; 6,17; 6,9; 7,67; 8,74 мм соответственно для жил площадью поперечного сечения: 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 мм².

Радиус трехжильного кабеля по изоляции можно определить как

$$R = 2,15r + \Delta_{\text{из}},$$

где $\Delta_{\text{из}} = 4$ мм – толщина изоляции;
для одножильного кабеля

$$R = r + \Delta_{\text{из}}.$$

Термическое сопротивление защитного покрова

$$S_{\text{п}} = 0,366\sigma_{\text{п}} \lg \frac{R_{2\text{п}}}{R_{1\text{п}}}, \quad (15.1)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ – удельное термическое сопротивление защитного покрова;
равно 3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ – для покрова из кабельной пряжи и ленточной брони;

$\sigma_{\text{п}} = 5,0$ – $6,0$ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ – для покрова из кабельной пряжи, т. е. для небронированных кабелей;

$\sigma_{\text{п}} = 4,0$ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ – для полиэтиленовой изоляции;

$R_{2\text{п}}, R_{1\text{п}}$ – внешний и внутренний радиусы защитного покрова.

Для трехжильного кабеля значение

$$R_{1\text{п}} = R + \Delta_{\text{об}},$$

где $\Delta_{\text{об}}$ – толщина свинцовой или алюминиевой оболочки, равная $1,1$ – $2,0$ мм.

Для одножильного кабеля $R_{1\text{п}} = R$.

Значение для трехжильного кабеля

$$R_{2\text{п}} = R_{1\text{п}} + \Delta_{\text{под}} + \Delta_{\text{бр}} + \Delta_{\text{нар}},$$

для одножильного кабеля

$$R_{2\text{п}} = R_{1\text{п}} + \Delta_{\text{экp}} + \Delta_{\text{нар}},$$

где $\Delta_{\text{под}}$ – толщина подушки, равна $1,5$ – $3,2$ мм;

$\Delta_{\text{бр}}$ – толщина стальной брони, равна $1,0$ – $1,6$ мм;

$\Delta_{\text{нар}}$ – толщина наружного покрова, равна 2,0–3,1 мм;

$\Delta_{\text{экp}}$ – толщина проволок экрана, равна 1,5–2,0 мм.

Термическое сопротивление грунта

$$S_o = 0,366k\sigma_o \lg \frac{4h}{d_k}, \quad (15.2)$$

где $\sigma_o = 0,5\text{--}1,8 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$ – удельное термическое сопротивление грунта;

k – коэффициент, учитывающий количество кабелей, проложенных в одной траншее; $k = 0,85$, если в траншее проложено три кабеля;

h – глубина заложения кабеля; принимается равной 0,7 м;

d_k – внешний диаметр кабеля: 0,043; 0,047; 0,05; 0,0538; 0,0567; 0,0597; 0,0659 м соответственно для кабелей с площадью поперечного сечения: 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 мм².

Термическое сопротивление воздуха определяется по формуле

$$S_o = 0,318 \frac{1}{d_k \alpha},$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием.

Значение α находится как

$$\alpha = 4,54 \sqrt{\frac{200}{d_{k(\text{мм})}}} + \varepsilon_{\text{п}} d_{k(\text{мм})} \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \Theta_{\text{п}},$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – коэффициент излучения поверхности кабеля; равен 0,8 – при наличии защитных покрытий; 0,5–0,6 – для стальной брони; 0,2–0,3 – для алюминиевой оболочки;

$5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана;

$$\Theta = (\Theta_o + 273)^3 \left(4 + \frac{120}{\Theta_o + 273} \right);$$

Θ_o – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Термическое сопротивление воды можно принять равным $0,3 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$.

При прокладке кабеля в блоках

$$S_0 = S_{\text{бет}} + S_{\text{зем}},$$

где $S_{\text{бет}} = (0,1-0,2) \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$ – термическое сопротивление бетонного блока;

$S_{\text{зем}}$ – термическое сопротивление грунта (определяется по формуле (15.2)).

Термическое сопротивление защитного покрова небронированных трехжильных кабелей, прокладываемых в блоках, определяется по выражению (15.1) при $\sigma_{\text{п}} = 5,0-6,0 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$ и $R_{2\text{п}} = R_{1\text{п}} + \Delta_{\text{нар}}$.

Значение

$$y_{\text{экр}} = \frac{R_{\text{экр}}}{R_{\text{ж}}} \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{экр}}^2}{\omega^2 M^2}},$$

где $R_{\text{экр}} = \rho_{\text{экр}} \frac{1}{F_{\text{экр}}}$ – сопротивление единицы длины экрана;

$\rho_{\text{экр}} = 0,0188 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление медного экрана;

$F_{\text{экр}}$ – площадь поперечного сечения экрана: 16; 25; 35 мм²;

$\omega = 314 \text{ 1/с}$ – угловая частота;

$M = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{S}{r_{\text{экр}}}$ – коэффициент взаимоиנדукции, приходящий-

ся на единицу длины кабеля, Гн;

S – расстояние между осями кабелей;

$r_{\text{экр}}$ – средний радиус экрана.

Произведение $\omega^2 M^2 \approx 0,1 \cdot 10^{-7}, \text{ Ом}^2$.

Тема 16. СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СТОЙКИ ОПОРЫ НА ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Задача. Составить программу испытаний на прочность, прогиб (жесткость) и трещиностойкость конической железобетонной стойки опоры линий электропередачи:

тип стойки СК 22; предельный изгибающий момент, т. е. несущая способность стойки: 26 480; 27 020; 32 600; 32 950; 21 530; 21 210; 52 510; 50 220; 33 460; 36 850; 26 700; 33 930; 21 230 даН·м;

тип стойки СК 26; несущая способность или предельный изгибающий момент стойки: 46 670; 47 120; 47 470; 46 670; 55 090; 54 190; 43 110; 41 700; 46 770; 41 450; 46 670 даН·м.

Наружный диаметр стойки в комле $D_2 = 650$ мм; наружный диаметр стойки в вершине $D_1 = 500$ мм.

Арматура стойки – напрягаемая канатная. Средний радиус расположения напрягаемой арматуры $r_{\text{напр}} = 303$ мм.

Методические указания

Контрольная разрушающая нагрузка определяется по формуле

$$P_{\text{контр}} = \frac{Mk_{\text{без}}}{h}, \quad (16.1)$$

где M – несущая способность стойки, даН·м;

$k_{\text{без}}$ – коэффициент безопасности, равный 1,3–1,4 для первого случая разрушения, т. е. при достижении продольной растянутой арматурой предела текучести, и 1,0 – при определении контрольной нагрузки по ширине раскрытия трещин в бетоне;

h – расстояние от места приложения нагрузки до точки опирания стойки, м; $h = H - 2000$ мм.

Схема опирания и загрузки стоек при испытаниях на прочность, жесткость и трещиностойкость приведена на рис. 16.1.

Нагружение стоек производят ступенчато – возрастающими нагрузками. Нагрузка первой ступени равна 25 % от расчетной. На каждой ступени обеспечивается выдержка не менее 10 мин, а при контрольных нагрузках – не менее 30 мин.

Считается, что стойки удовлетворяют требованиям по прочности, если фактически разрушающая нагрузка составляет не менее 95 % от контрольной разрушающей нагрузки.

Жесткость стоек оценивается по их фактическому прогибу под контрольной нагрузкой после 30 мин ее приложения. Максималь-

ный фактический прогиб не должен превышать контрольный более чем на 15 %.

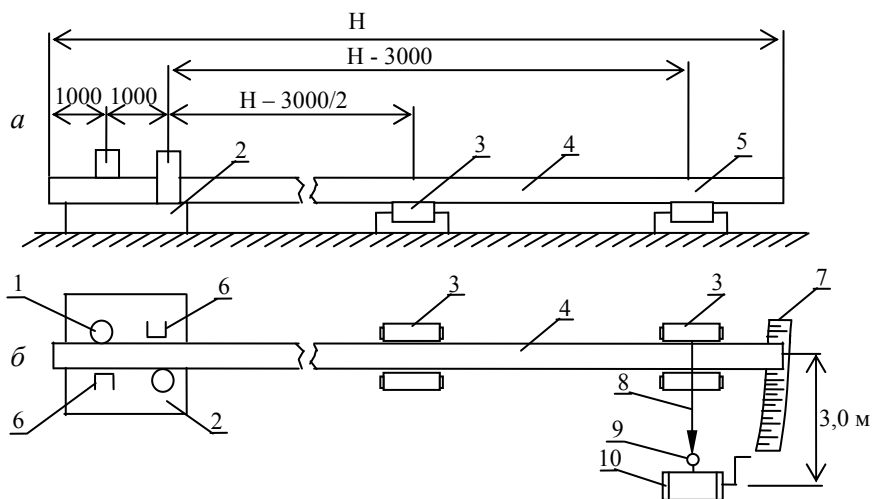


Рис. 16.1. Схема испытания железобетонной стойки на прочность, жесткость и трещиностойкость:

- a* – вид сбоку; *б* – вид сверху; 1 – упор; 2 – бетонная площадка;
 3 – подвижная опора; 4 – испытываемая стойка; 5 – место приложения нагрузки; 6 – фиксатор; 7 – рейка с делениями; 8 – трос; 9 – динамометр;
 10 – лебедка; *H* – высота опоры (22 000 или 26 000 мм)

Контрольное значение ширины раскрытия трещин при действии контрольной нагрузки не должно превышать 0,1 мм при продольной арматуре с пределом текучести 1000 Н/мм² и 0,15 мм – при продольной арматуре с пределом текучести 800 Н/мм².

Стойки считаются выдержавшими испытания, если при действии прикладываемой нагрузки максимальная ширина трещин не превышает контрольную более, чем на 15 %, т. е. 0,115 и 0,17 мм – соответственно для стоек с пределом текучести арматуры 1000 и 800 Н/мм².

Программа испытаний железобетонной стойки оформляется в виде таблицы.

Программа испытаний железобетонной стойки на прочность,
жесткость и трещиностойкость

Ступени нагрузки	Значения нагрузки, даН, при испытаниях на			Выдержка времени, мин
	прочность	жесткость	трещиностойкость	
25	+			10
50	+			10
75	+			10
$P_{\text{контр}} = M/h$	+		+	30
95	+			30
100	+	+		30
110	+			

Здесь + – заполняются значения нагрузок, равные $\frac{a_1 \%}{100} P_{\text{контр}}$;

a_1 – ступень нагрузки;

$P_{\text{контр}}$ – по выражению (16.1) при $k_{\text{без}} = 1,3-1,4$;

$h = H - 2$ м.

Трещины измеряют после выдержки контрольной нагрузкой, равной $P_{\text{контр}} = M/h$ в течение 30 мин на приопорном участке, т. е. в пределах площадки 2 (см. рис. 16.1), а ширину раскрытия трещин определяют как среднее значение на длине стойки, равной 1 м.

Контрольное значение прогиба f стойки опоры при приложении к ее вершине нагрузки $P_{\text{контр}}$ может быть также определено по выражению [3, с. 306]

$$f = \frac{P_{\text{контр}} h^3}{3B_1},$$

где B_1 – жесткость стойки опоры:

$$B_1 = 0,85 E_0 J_{\text{прив}}^{\text{п}}, \text{ Н}\cdot\text{мм}^2,$$

где E_6 – модуль упругости бетона, равен $40 \cdot 10^3$ Н/мм²;

$J_{\text{прив}}^{\text{п}}$ – приведенный полярный момент инерции площади сечения, найденный с учетом влияния продольной арматуры, мм⁴:

$$J_{\text{прив}}^{\text{пол}} = \frac{\pi}{64}(D_2^4 - D_1^4) + \left(\frac{E_{\text{напр}}}{0,81E_6} - 1\right)F_{\text{напр}}r_{\text{напр}}^2, \text{ мм}^4,$$

где $E_{\text{напр}}$ – модуль упругости напрягаемой арматуры; равен $200 \cdot 10^3$ Н/мм²;

$F_{\text{напр}}$ – площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры, мм²; принять диаметр канатов 15 мм и их количество, равное 6;

$r_{\text{напр}}$ – радиус заложения напрягаемых стержней в сечении стойки опоры; равен 303 мм.

Стойки считаются выдержавшими испытания: а) по прочности, если значение нагрузки было не менее $0,95P_{\text{контр}}$; б) по жесткости, если значение прогиба не превышало расчетное более чем на 15 %; в) по трещиностойкости, если ширина раскрытия трещин на участке 1 м не превысила 15 % нормативной.

Тема 17. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ СТАЛЬНОГО ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА НА ПРОВОДЯЩИЙ ИЛИ СО ВСТРОЕННОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

Задача 1. Линии электропередачи напряжением: 110; 220; 330 кВ на железобетонных опорах, оснащенные стальным грозозащитным тросом ТК9.1 или ТК11, находились в эксплуатации 30 лет. Высокая повреждаемость троса, исчерпание нормативного срока службы, а также необходимость организации по тросу линий связи требуют ответа на вопрос о возможности выполнения замены имеющегося троса на проводящий или трос из алюмоведа со встроенной волоконно-оптической связью с точки зрения непревышения предельного изгибающего момента $M_{\text{пр}}$ (или несущей способности стойки).

Предельный изгибающий момент равен:

для стоек СК22: 26 480; 27 020; 32 600; 32 950; 21 530; 21 210; 52 510; 50 270; 33 460; 36 850; 26 700; 33 930; 21 230 даН·м;

для стоек СК26: 46 670; 47 120; 47 470; 46 670; 55 090; 54 190; 43 110; 41 700; 46 770; 41 750; 46 670 даН·м.

Методические указания

1. Считается, что ежегодное снижение предельного изгибающего момента составляет 0,5 %. Следовательно, через 30 лет несущая способность стойки снизилась на $0,5 \cdot 30 = 15$ %.

Остаточное значение предельного изгибающего момента

$$M_{\text{пр}}^{\text{ост}} = 0,85M_{\text{пр}}.$$

Если железобетонные стойки оснащены стержневой арматурой, то изгибающий момент, действующий на стойку опоры в расчетном сечении 1–1 относительно уровня земли, не должен превышать [2, с. 317] значения

$$M_{1-1} \leq 0,8M_{\text{пр}}^{\text{ост}} \quad \text{или} \quad M_{1-1} \leq 0,68M_{\text{пр}}. \quad (17.1)$$

По формуле (17.1) определим максимальное значение M_{1-1} .

2. Оценим значения моментов относительно сечения 1–1 от воздействия на опору внешних нагрузок: собственного веса проводов, троса, изоляторов, гололеда на проводах и тросах, веса монтажника, а также воздействия ветра на трос, провода, опору.

В [2, с. 204–207] показано, что доля $\alpha_{\text{т}}$ изгибающего момента (в моменте M_{1-1}), создаваемого стальным грозозащитным тросом, равна 0,22 для одностоечных одноцепных опор линий напряжением 110; 220 кВ и двухстоечных одноцепных опор линий напряжением 330 кВ. При замене троса на проводящий или со встроенным волоконно-оптическим кабелем значение момента от воздействия на трос нагрузок увеличивается в 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 раза.

Значение изгибающего момента относительно расчетного сечения 1–1 до замены грозозащитного троса

$$M_{1-1} = M_{\text{т}} + M_{\text{п.о}} = \alpha_{\text{т}}M_{1-1} + (1 - \alpha_{\text{т}})M_{1-1},$$

где $M_{\text{т}}$ – момент сил, создаваемых воздействием внешних нагрузок на грозозащитный трос;

$M_{п.о}$ – момент сил, создаваемых воздействием внешних нагрузок на провода и опоры.

После замены грозозащитного троса на проводящий значение M_T увеличивается в k раз, а значение $M_{п.о}$ остается неизменным, т. е. можно записать

$$M_{1-1}^{зам} = kM_T + M_{п.о} = \alpha_T kM_{1-1} + (1 - \alpha_T)M_{1-1}.$$

Отношение

$$\frac{M_{1-1}^{зам}}{M_{1-1}} = \alpha_T k + (1 - \alpha_T) = (1 + \alpha_T(k - 1)).$$

Следовательно,

$$M_{1-1}^{зам} = (1 + \alpha_T(k - 1))M_{1-1} \leq 0,68M_{пр}.$$

Значение изгибающего момента M_{1-1} , по которому выбран тип железобетонной стойки: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 $M_{пр}$.

Вывод. Если тип железобетонной стойки выбран по условию $M_{1-1} = k_1 M_{пр}$, то при $\alpha_T = 0,22$; $k = (1,2-3,0)$ замена стального троса на про-водящий может (или не может) быть осуществлена. Здесь $k_1 = 0,1; 0,2; \dots; 0,8$.

Задача 2. Определить длину вставки или вырезки провода для регулирования стрелы провеса провода в анкерном пролете.

Длина приведенного пролета в анкерном участке $l_{прив}$: 150; 200; 220; 250; 300; 350 м; количество n пролетов в анкерном участке: 5; 7; 10; 12; 15; 18. Существующая стрела провеса $f_c = 5; 6; 7; 8; 10$ м; требуемое значение стрелы провеса $f_{треб} = 4; 5; 6; 8$ м.

Как осуществить регулировку стрелы провеса?

Методические указания

Длина c_f вставки или вырезки провода для регулирования стрелы провеса определяется по формуле

$$c_f = \frac{8n}{3l_{прив}} (f_{треб}^2 - f_c^2).$$

Обозначения входящих в данную формулу величин приведены в условии задачи.

Если c_f имеет положительное значение, то следует выполнить вставку провода, если отрицательное – то вырезку.

Перед тем, как решить вопрос о вставке, необходимо рассмотреть возможность увеличения количества изоляторов в натяжной гирлянде изоляторов на анкерной опоре (строительную длину одного изолятора принять равной 0,14 м) или использовать промежуточное звено в цепи натяжной гирлянды изоляторов (длина промежуточного звена 100–300 мм).

Длина провода, необходимая для монтажа вставки, должна быть выбрана из условия допустимости одного соединения в пролете.

Для выполнения вырезки участка провода может быть достаточным просто разрезать провод и установить в этом месте овальный соединитель, т. е. концы провода площадью поперечного сечения до 185 мм² соединить внахлестку с помощью овального соединителя. Длина овальных соединителей: 330; 400; 450; 750; 900; 1000 мм соответственно для сталеалюминиевых проводов площадью поперечного сечения: 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185 мм².

Список использованной литературы

1. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей : учебное пособие / М. А. Короткевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 511 с.
2. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть : учебное пособие / М. А. Короткевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2010. – 572 с.
3. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний : ТКП 339–2011. – Минск : Мин-во энергетики Респ. Беларусь, 2011. – 594 с.

Учебное издание

КОРОТКЕВИЧ Михаил Андреевич

МОНТАЖ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»

Редактор *Т. В. Грищенкова*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 21.06.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,09. Тираж 100. Заказ 87.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.