

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники сопровождается непрерывным повышением уровня потребления электрической энергии и совершенствованием применяемого оборудования. Электрическая энергия значительно облегчает и совершенствует труд человека и в то же время является источником потенциальной опасности, которая может привести к тяжёлым последствиям.

Электрический ток, проходя через организм человека, оказывает биологическое, электрохимическое, тепловое и механическое действие.

Многообразие действия электрического тока приводят к различным электротравмам, которые сводятся к двум видам:

- местные электротравмы, при которых возникает местное (локальное) повреждение организма;
- общие электротравмы (электрический удар), когда из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем поражается весь организм (или создаётся угроза поражению).

Электробезопасность – это система организационных, технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного действия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Организационные мероприятия включают в себя обучение персонала способам и правилам защиты от поражающего действия электрического тока. Так как не обученный человек, в случае попадания его под действие электрического тока, оказывается, как правило, в более тяжёлых условиях, чем опытный электротехник. Это связано с тем, что квалифицированный работник сможет правильно оценить степень возникшей опасности и применить рациональные приёмы освобождения себя от действия электрического тока.

Требования к техническим мерам защиты регламентируются нормативными документами:

- правилами устройства электроустановок (ПУЭ);
- комплексов стандартов ГОСТ Р 50571 (МЭК – 364).

Контрольная работа по дисциплине "Электробезопасность" включает в себя решение задач и ответы на теоретические вопросы. При выполнении контрольной работы студент должен подробно ответить на три теоретических вопроса и решить 5 задач. Номер варианта для решения задач устанавливается по последней цифре зачётной книжки студента, а варианты теоретических вопросов приведены в табл. 1.1.

При выполнении контрольной работы ответы на вопросы излагаются в реферативной форме, приводятся пояснительные чертежи, расчётные формулы, схемы и тому подобное. Обязательно указывается ссылка на использованную литературу.

В начале работы записывается номер варианта, затем вопрос и, далее, ответ на него. В конце работы приводится список использованной литературы, ставится подпись и дата выполнения работы.

Работу разрешается выполнять с использованием средств вычислительной техники. Рекомендуемый размер шрифта 14.

1. ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

1.1 Теоретические вопросы

1. Порядок осмотра и оперативного обслуживания электроустановок.
2. Порядок и условия производства работ в действующих электроустановках.
3. Ответственные за безопасность проведения работ, их права и обязанности.
4. Порядок организации работ по наряду. Работы по одному наряду на нескольких рабочих местах, присоединениях, подстанциях.
5. Организация работ по распоряжению.
6. Состав бригады. Подготовка рабочего места и первичный допуск бригады к работе по наряду и распоряжению.
7. Надзор при проведении работ, изменения в составе бригады. Оформление перерывов в работе и повторный допуск к работе.
8. Окончание работы, сдача – приёмка рабочего места. Заккрытие наряда, распоряжения.
9. Технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ со снятием напряжения. Отключения. Проверка отсутствия напряжения.
10. Группы по электробезопасности электротехнического персонала и условия их присвоения. Удостоверение о проверке знаний норм и правил работы в электроустановках.
11. Местные электротравмы. Характеристика местных электрических травм (электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и электроофтальмия).
12. Электрический удар. Характеристика электрических ударов. Прекращение сердечной деятельности, прекращение дыхания, электрический шок.
13. Характер воздействия на человека токов различного значения. Характеристика ощутимого тока, неотпускающего тока, фибрилляционного тока.
14. Влияние пути тока на исход поражения электрическим током.
15. Влияние частоты и рода тока на исход поражения электрическим током.
16. Критерии безопасности электрического тока. Напряжение прикосновения.
17. Условия окружающей среды, влияющие на исход поражения человека электрическим током (атмосферные условия, углекислый газ, электрическое поле, магнитное поле).

18. Освобождение человека от действия электрического тока. Определение состояния пострадавшего. Оказание первой медицинской помощи.

19. Электромагнитные поля и излучения. Воздействие электромагнитных полей и электростатического поля на человека.

20. Способы защиты от электромагнитных полей и излучений.

21. Системы заземления электрических сетей. Электрическая цепь с системой заземления TN, TT, IT.

22. Классификация помещений и территорий по электробезопасности.

23. Маркировка и условное обозначение характеристик электротехнических устройств (электроустановок).

24. Основные требования к применению защиты персонала от поражения электрическим током. Характеристика электрического разделения сетей, изолирующих площадок, малого напряжения, двойной изоляции и выравнивания потенциалов.

25. Основные требования к применению защиты персонала от поражения электрическим током. Требования к ограждениям и барьерам. Оптимизация защиты в распределительных сетях.

26. Требования к устройству и применению заземлителей.

27. Требования к устройству и применению заземляющих и защитных проводников.

28. Заземление и системы уравнивания электрических потенциалов в электроустановках, содержащих оборудование обработки информации.

29. Электроустановки и их части, подлежащие защитному заземлению и защитному занулению.

30. Виды заземляющих устройств и требования, предъявляемые к ним.

Таблица 1.1

Варианты заданий

Последняя цифра в зачётной книжке студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номер вопроса	1,11, 21	2,12, 22	3,13 23	4,14 24	5,15 25	6,16 26	7,17 27	8,18 28	9,19 29	10,20 30

1.2 Задачи

1.2.1 Оценка опасности прикосновения к однофазной двухпроводной, изолированной от земли сети

Рассмотрим одну из простейших сетей – однофазную однопроводную, изолированную от земли, у которой ёмкость проводов относительно земли можно принять равной нулю. Такой может быть, например воздушная сеть до 1000 В небольшой протяжённости.

Необходимо оценить опасность прикосновения человека к одному из проводов этой сети, то есть определить напряжение прикосновения $U_{пр}$, под которым окажется человек и ток I_h , проходящий через человека.

При нормальном режиме работы сети напряжение прикосновения (рис. 1.2.1, а) можно рассчитать по формуле [1/:

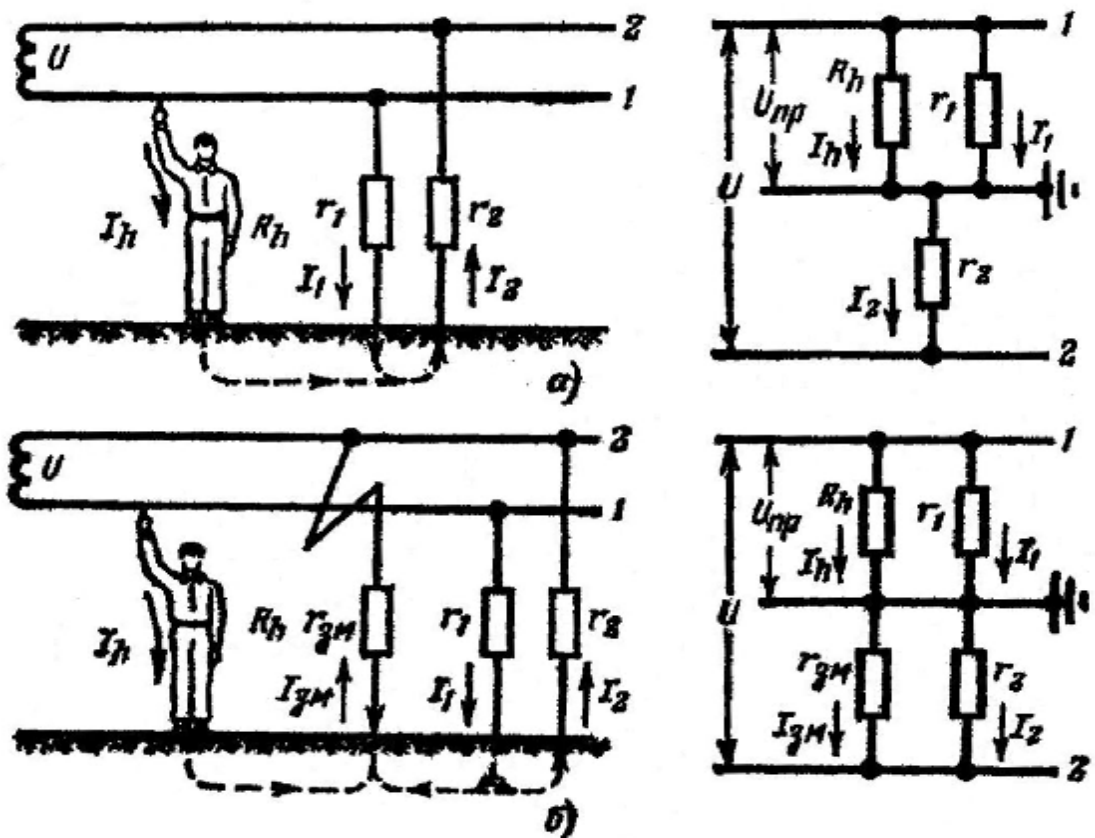


Рис. 1.2.1 Прикосновение человека к проводу однофазной двухпроводной сети.

а – при нормальном режиме работы сети; б – при аварийном режиме; 1,2 – номера проводов.

$$U_{пр} = U \times [R_h / (2 \times R_h + r)], \quad (1.2.1)$$

где, $U_{\text{пр}}$ – напряжение прикосновения, В; U – напряжение сети, В;
 R_h – электрическое сопротивление тела человека, Ом;
 r – сопротивление изоляции линии относительно земли, Ом.

Формула (1.2.1) справедлива, если считать, что $r_1 = r_2 = r$ (рис. 1.2.1, а). Если $r_1 \neq r_2$, то $U_{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле /1/:

$$U_{\text{пр}} = U \times [r_1 R_h / (r_1 r_2 + r_1 R_h + r_2 R_h)], \quad (1.2.2)$$

Ток, проходящий через тело человека, рассчитывается по формуле /1/:

$$I_h = U_{\text{пр}} / R_h = U \times [r_1 / (r_1 r_2 + r_1 R_h + r_2 R_h)], \quad (1.2.3)$$

где, I_h – ток, проходящий через тело человека, А;
 r_1, r_2 – сопротивление изоляции линии относительно земли, Ом.

Пример 1.2.1. Человек прикоснулся к проводу однофазной двухпроводной линии, изолированной от земли (рис. 1.2.1,а). Дано $R_h = 1000$ Ом; $r_1 = r_2 = r$. Определить $U_{\text{пр}}$ при $r = 10$ кОм, $U = 220$ В, $f = 50$ Гц. Сделать выводы.

Решение. По (1.2.1) находим:

$$U_{\text{пр}} = 220 \times [1000 / (2 \times 1000 + 10000)] = 18,3 \text{ В.}$$

По табл. 1.2.1 /2/ находим, что наибольшее допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В.

Вывод: Расчётное значение $U_{\text{пр}}$ превышает допустимое. Необходимо увеличить сопротивление изоляции r .

Таблица 1.2.1

Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{\text{пр}}$ и поражающие токи $I_{\text{ч}}$ при нормальном режиме работы ЭУ

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значения	
	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	$I_{\text{ч}}, \text{мА}$
Переменный ток 50 Гц	2	0,3
Переменный ток 400 Гц	3	0,4
Постоянный ток	8	1,0

Примечание. Настоящие нормы установлены исходя из реакции ощущения и соответствуют продолжительности воздействия тока на человека не более 10 мин. в сутки.

Пример 1.2.2. Определить I_h при прикосновении человека к проводу 1 (рис. 1.2.1,а). Дано $R_h = 1000 \text{ Ом}$, $r_1 = 40 \text{ кОм}$, $r_2 = 10 \text{ кОм}$, $U = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$. Сделать выводы.

Решение. По 1.2.3 находим:

$$I_h = 220 \times [40 / (40 \times 10 + 40 \times 1 + 10 \times 1)] = 19,5 \text{ мА}$$

Вывод: Расчётное значение I_h превышает допустимое. Необходимо увеличить сопротивление изоляции проводов относительно земли.

При аварийном режиме, когда один из проводов сети, например 2, замкнут на землю через сопротивление $r_{3м}$ (рис. 1.2.1, б), напряжение прикосновения и ток через человека, прикоснувшегося к исправному проводу, определяются полученными выражениями (1.2.2) и (1.2.3), в которых r_2 должно быть заменено на $r_э$ - эквивалентное сопротивление параллельно включённых сопротивлений r_2 и $r_{3м}$. Эквивалентное сопротивление рассчитывается по формуле /1/:

$$r_э = (r_2 r_{3м}) / (r_2 + r_{3м}), \quad (1.2.4)$$

Так как $r_{3м}$ обычно мало по сравнению с r_1 , r_2 и R_h , то $r_{3м}$ может быть принято равным нулю, тогда $U_{пр} \approx U$, а $I_h \approx U / R_h$.

Пример 1.2.3. Определить $U_{пр}$ при прикосновении человека к проводу согласно (рис. 1.2.1, б). Данные сети приведены в примере 1.2.1. Сопротивление замыкания провода на землю $r_{3м} = 25 \text{ Ом}$. Сделать выводы.

Решение: При $r_1 = r_2 = 10 \text{ кОм}$ и $r_э = (10^4 \times 25) / (10^4 + 25) = 24,9 \text{ Ом}$. $U_{пр}$ из выражения (1.2.2):

$$U_{пр} = 220 \times [10^4 \times 10^3 / (10^4 \times 24,9 + 10^4 \times 10^3 + 24,9 \times 10^3)] = 219,3 \text{ В}$$

Вывод: При замыкании провода на землю, человек, прикоснувшийся к исправному проводу, оказывается под напряжением, равным почти полному напряжению линии независимо от сопротивления изоляции проводов. При аварийном режиме защитная роль изоляции проводов практически полностью утрачена. Опасность поражения человека током значительно выше, чем в случае прикосновения к тому же проводу сети в период её нормальной работы.

Задание 1: Рассчитать $U_{пр}$, I_h при нормальной работе сети и $U_{пр}$ при аварийной работе сети.

Исходные данные табл. 1.2.2.

Таблица 1.2.2

Исходные данные для оценки опасности прикосновения к однофазной двухпроводной, изолированной от земли сети

Последняя цифра в зачётной книжке студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
f , Гц	50	400	0	50	400	0	50	400	0	50
U , В	220	380	500	220	380	500	220	380	500	380
R_h , кОм	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9
r , кОм	10	20	40	60	80	40	60	80	20	10
r_1 , кОм	80	60	40	20	10	5	10	20	40	60
r_2 , кОм	60	40	10	5	1	3	30	15	7	5
r_{3M} , Ом	50	30	25	50	30	25	70	60	35	30

1.2.2 Оценка опасности прикосновения к оборванному и лежащему на земле проводу

Известно [1], $U_{пр}$ это напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек, то есть это падение напряжение в сопротивлении тела человека:

$$U_{пр} = I_h \times R_h, \quad (1.2.5)$$

В области защитных занулений, заземления и так далее, одна из этих точек имеет потенциал заземлителя φ_3 , В, а вторая - потенциал основания в том месте, где стоит человек, $\varphi_{ос}$, В. Напряжение прикосновения в этом случае будет:

$$U_{пр} = \varphi_3 - \varphi_{ос}, \quad (1.2.6)$$

или

$$U_{пр} = \varphi_3 \times \alpha_1, \quad (1.2.7)$$

где, α_1 – коэффициент прикосновения.

Ток, стекающий в землю через человека, стоящего на земле, полу и другом основании, преодолевает сопротивление не только тела человека, но и тех участков основания на которых стоит человек.

Сопротивление основания на котором стоит человек называется сопротивлением растекания основания или сопротивление растекания ног человека. То есть разность потенциалов (1.2.6), оказывается приложенной не только к сопротивлению тела человека, но и к последовательно соединённому с ним сопротивлению основания на котором стоит человек (рис. 1.2.2), то есть:

$$\varphi_3 \times \alpha_1 = I_h \times (R_h + R_{oc}), \quad (1.2.8)$$

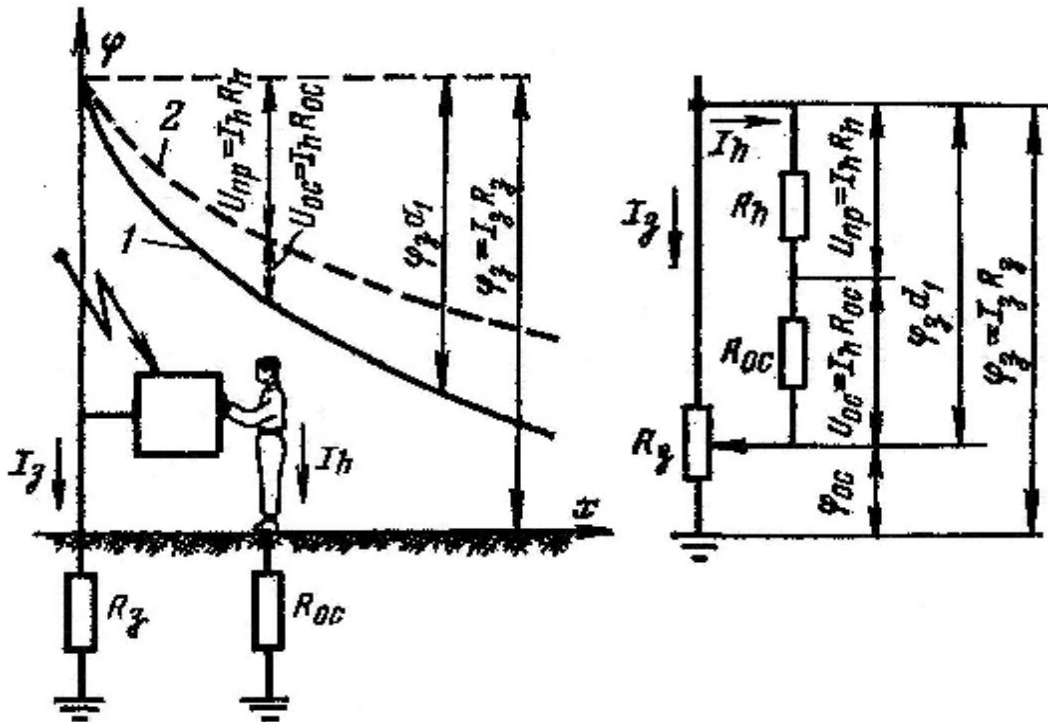


Рис.1.2.2 К определению напряжения прикосновения с учётом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек.

1 – потенциальная кривая; 2 – кривая, характеризующая изменение $U_{пр}$ с изменением расстояния от заземлителя.

Заменяв в (1.2.8) I_h его значением из (1.2.5) получаем:

$$\varphi_3 \times \alpha_1 = (U_{пр} / R_h) \times (R_h + R_{oc}), \quad (1.2.9)$$

Из выражения (1.2.9) получаем напряжение прикосновения с учётом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания:

$$U_{пр} = (\varphi_3 \times \alpha_1) \times [R_h / (R_h + R_{oc})], \quad (1.2.10)$$

или

$$U_{\text{пр}} = \varphi_3 \times \alpha_1 \times \alpha_2, \quad (1.2.11)$$

где, α_2 – коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек, $\alpha_2 = 1 / [1 / (R_{\text{ос}} + R_{\text{h}})]$.

С учётом площади подошвы ног человека и сопротивления одиночного заземлителя растеканию тока в однородном грунте значение α_2 рассчитывается /1/:

$$\alpha_2 = 1 / [1 / (1,5 \times \rho + R_{\text{h}})], \quad (1.2.12)$$

где, ρ – удельное сопротивление грунта, Ом $\times$ м.

Пример 1.2.4. Человек коснулся оборванного и лежащего на земле провода воздушной линии, находящейся под напряжением (рис. 1.2.3).

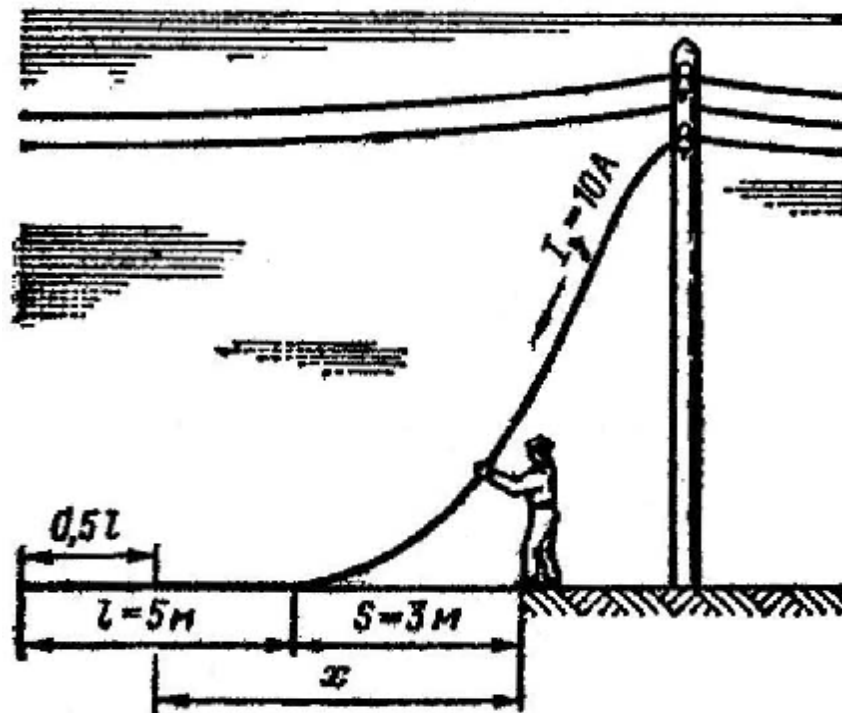


Рис. 1.2.3 К примеру 1.2.4

Определить $U_{\text{пр}}$, если длина участка провода, лежащего на земле $l = 5$ м; расстояние от человека до этого участка $S = 3$ м; диаметр провода $2r = 1$ см; ток замыкания на землю $I_3 = 10$ А; удельное сопротивление грунта $\rho = 10^2$ Ом $\times$ м; сопротивление тела человека $R_{\text{h}} = 10^3$ Ом.

Решение: Рассматривая провод, лежащий на земле, как протяжённый заземлитель круглого сечения, определим потенциал провода по формуле /1/:

$$\varphi_3 = (I_3 \times \rho) / (\pi \times l) \times \ln (l / r), \quad (1.2.13)$$

Подставляя значения в формулу (1.2.13) получим:

$$\varphi_3 = (10 \times 10^2) / (3,14 \times 5) \ln (5 / 0,05) = 440 \text{ В.}$$

Потенциал на поверхности земли в том месте, где стоит человек рассчитаем по формуле /1/:

$$\varphi_3 = (I_3 \times \rho) / (2\pi \times l) \times \ln [(2x + l) / (2x - l)], \quad (1.2.14)$$

Подставляя значения в формулу (1.2.14) получим:

$$\varphi_{oc} = (10 \times 10^2) / (6,28 \times 5) \times \ln \{ [2 \times (2,5 + 3) + 5] / [2 \times (2,5 + 3) - 5] \} = 30 \text{ В.}$$

Коэффициент напряжения прикосновения по формуле (1.2.12):

$$\alpha_2 = 1 / [1 + (1,5 \times 10^2) / 10^3] = 0.87$$

Искомое напряжение прикосновения:

$$U_{пр} = (440 - 30) \times 0,87 = 360 \text{ В}$$

Задание 2: Рассчитать $U_{пр}$, человека к оборванному и лежащему на земле проводу.

Исходные данные табл. 1.2.3.

Таблица 1.2.3

Исходные данные для расчёта $U_{пр}$ человека к оборванному и лежащему на земле проводу

Последняя цифра в зачётной книжке студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
l , м	1	2	3	4	5	1,5	2,5	3,5	0,5	1,2
S , м	0,5	1,3	2,7	3	4	1	2,3	3	0,2	0,5
I_3 , А	10	15	5	7	12	9	11	13	4	8
ρ , Ом $\times$ м	800	500	300	200	150	100	60	50	30	20
R_h , КОм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1

1.2.3 Оценка опасности прикосновения к незаземлённому проводу, подверженному электромагнитному влиянию

Опасность прикосновения к проводу, на котором наводится продольная э.д.с., оценивается током I_h , проходящим через тело человека, или напряжением прикосновения $U_{пр} = I_h \times R_h$.

Прикосновение к незаземлённому проводу рассматривается как заземление его через сопротивление тела человека R_h , Ом. При этом учитывается, что провод имеет ещё две связи с землёй: через емкостные сопротивления $x_{сн}$ и $x_{ск}$, равные друг другу и включённые на его концах (рис. 1.2.4).

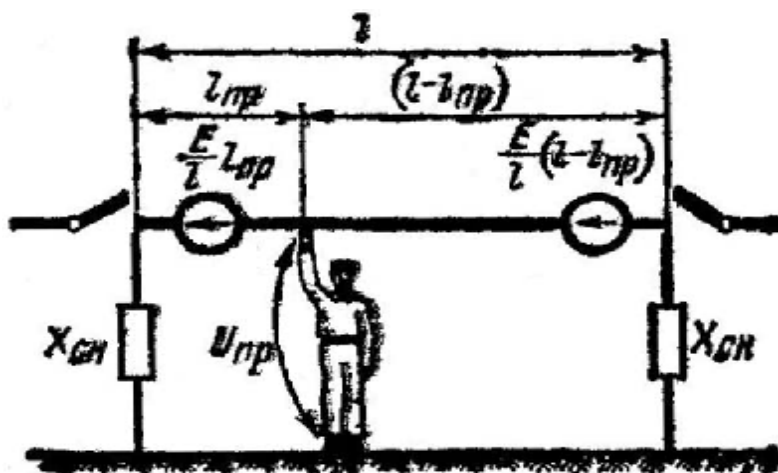


Рис.1.2.4 Прикосновение человека к незаземлённому проводу, подверженному электромагнитному влиянию

Пример 1.2.5. Человек прикасается к отключённому и незаземлённому проводу ВЛ – 110 кВ длиной 100 км, на котором наводится продольная э.д.с. $E = 30\,000$ В.

Определить: $U_{пр}$ и I_h для случаев прикосновения к началу провода и к точке (l_p), отстоящей от начала на 40 км, а также $I_{без}$.

Дано: ёмкость провода относительно земли $C_{bo} = 7,2 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; $R_h = 1000$ Ом; $U_{пр. доп.} = 40$ В.

Решение: Определяем емкостное сопротивление по формуле /1/:

$$x_{сн} = x_{ск} = 2 / (\omega \times C_{bo} \times l), \quad (1.2.15)$$

где, ω – 314 рад/с (при частоте переменного тока 50 Гц).

Подставляя значения в формулу (1.2.15) получим:

$$x_{сн} = (2 \times 10^9) / (314 \times 7,2 \times 100) = 8850 \text{ Ом.}$$

Далее определяем $U_{пр}$ по формуле /1/:

$$U_{\text{пр}} = (E / l) \times (l - 2 \times l_{\text{пр}}) \times (R_h / \sqrt{4 \times R_h^2 + x_{\text{сн}}^2}), \quad (1.2.16)$$

Проходящий через человека ток рассчитывается по формуле /1/:

$$I_h = (E / l) \times [(l - 2 \times l) / \sqrt{4 \times R_h^2 + x_{\text{сн}}^2}], \quad (1.2.17)$$

Для случая $l_{\text{пр}} = 0$ км

$$U_{\text{пр}} = (30\,000 / 100) \times 100 \times (1000 / \sqrt{4 \times 1000^2 + 8850^2}) = 3250 \text{ В};$$

$$I_h = 3250 / 1000 = 3,25 \text{ А};$$

Для случая $l_{\text{пр}} = 40$ км

$$U_{\text{пр}} = (30\,000 / 100) \times (100 - 2 \times 40) \times (1000 / \sqrt{4 \times 1000^2 + 8850^2}) = 650 \text{ В};$$

$$I_h = 650 / 1000 = 0,65 \text{ А};$$

Вывод: Для рассмотренных случаев прикосновение недопустимо.

Определяем зону, где прикосновение безопасно. Для незаземлённого провода эта зона лежит по обе стороны от его середины (рис. 1.2.5). Это расстояние рассчитывается по формуле /1/:

$$l_{\text{без}} = l \times (U_{\text{пр. доп.}} / E) \times (\sqrt{4 \times R_h^2 + x_{\text{сн}}^2} / R_h), \quad (1.2.17)$$

Подставляя значения в формулу (1.2.17) получаем:

$$l_{\text{без}} = 100 \times (40 / 30\,000) \times (\sqrt{4 \times 1000^2 + 8850^2} / 1000) = 1,2 \text{ км}.$$

Таким образом, прикоснуться к проводу безопасно в пределах 0,6 км от его середины как в одну, так и в другую сторону (рис.1.2.5).

Задание 3: Рассчитать $U_{\text{пр}}$ и I_h для случаев прикосновения к началу провода и к точке, отстоящей от начала на (по вариантам) км, а также $l_{\text{без}}$.

Для всех вариантов $R_h = 1000 \text{ Ом}$; $U_{\text{пр. доп.}} = 40 \text{ В}$.

Исходные данные табл. 1.2.4.

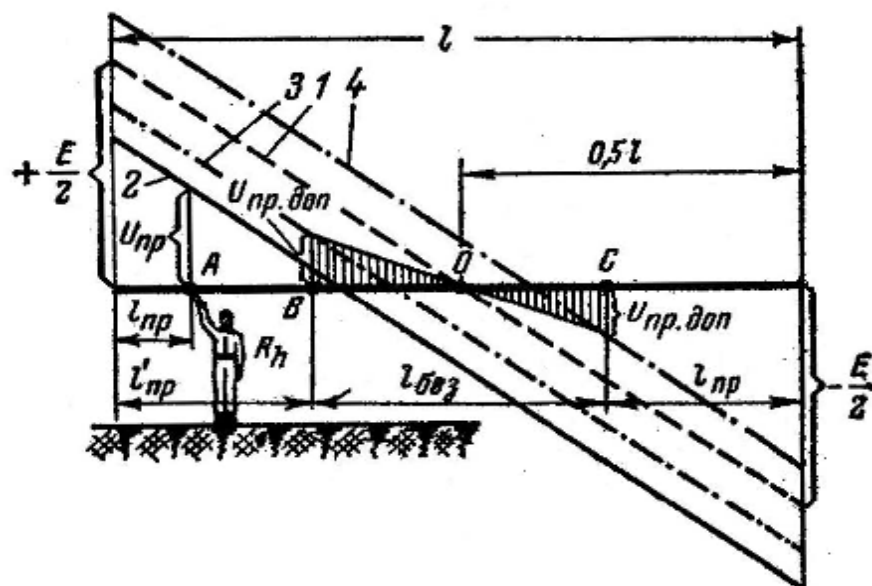


Рис. 1.2.5 Потенциальная характеристика незаземлённого провода к которому прикасается человек

1 – до прикосновения человека к проводу; 2 – после прикосновения человека к проводу в точке А (общий случай); 3 и 4 – после прикосновения к точкам В и С, являющимися границами безопасной зоны.

Таблица 1.2.4

Исходные данные для оценки опасности прикосновения к незаземлённому проводу, подверженному электромагнитному влиянию

Последняя цифра в зачётной книжке студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
l , км	150	100	50	30	70	150	100	50	30	70
l_p , км	10	20	30	5	40	100	30	10	5	20
$E \cdot 10^3$, В	30	27	12	10	15	40	35	13	10	25
$C_{bo} \cdot 10^{-9}$, Ф/км	7,2	1,1	6,2	7,0	1,5	2,7	3,1	2,0	6,8	5,3

1.2.4 Оценка опасности прикосновения к заземлённому в одной точке проводу, подверженному электромагнитному влиянию

Прикосновение к проводу, заземлённому в одной точке А через сопротивление R_3 можно рассматривать как повторное заземление его

в точке прикосновения B через сопротивление тела человека R_h (рис. 1.2.6).

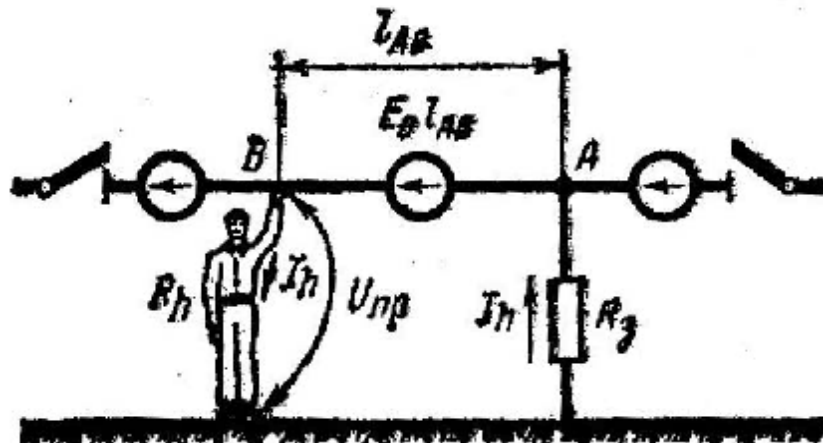


Рис. 1.2.6 Прикосновение человека к проводу, заземлённому в одной точке

Ток, проходящий через человека равен, как это видно из рис. 1.2.6:

$$I_h = (E_0 \times l_{AB}) \times (R_h + R_3), \quad (1.2.18)$$

где, l_{AB} – длина провода между точками заземления и прикосновения, км.

Напряжение прикосновения будет равно /1/:

$$U_{пр} = I_h \times R_h = (E_0 \times l_{AB}) \times [R_h / (R_h + R_3)], \quad (1.2.19)$$

Зона безопасного прикосновения это расстояние от точки заземления провода A до точки, где напряжение прикосновения не превышает $U_{пр. доп.}$. Зона безопасного прикосновения рассчитывается по формуле /1/:

$$l_{без} = (U_{пр. доп.} / E_0) \times [(R_h + R_3) / R_h], \quad (1.2.20)$$

Эта зона расположена по одну сторону от точки заземления. Если провод продолжается за точкой A , то и там будет такая же зона (рис.1.2 7).

Если $R_3 \ll R_h$, то уравнения (1.2.18) – (1.2.20) значительно упрощаются/1/:

$$I_h = (E_0 \times l_{AB}) / R_h;$$

$$U_{пр} = (E_0 \times l_{AB});$$

$$I_{\text{без}} = U_{\text{пр. доп.}} / E_0.$$

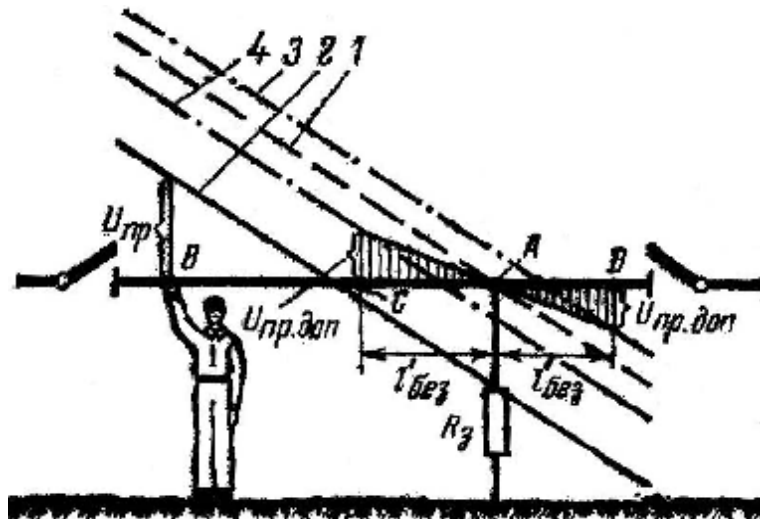


Рис. 1.2.7 Потенциальные характеристики провода заземлённого в одной точке A , до прикосновения к нему человека и после.

1 – до прикосновения человека к проводу; 2 – после прикосновения человека к проводу в точке B (общий случай); 3 и 4 – после прикосновения к точкам C и D , являющимися границами безопасной зоны.

Пример 1.2.6. Человек прикасается к отключённому и заземлённому в одном месте проводу линии 110 кВ, на котором наводится продольная э.д.с. $E_0 = 300 \text{ В/км}$.

Определить $U_{\text{пр}}$, I_h , и $I_{\text{без}}$, если расстояние l_{AB} составляет 100 и 10 км; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $R_h = 1000 \text{ Ом}$; $U_{\text{пр. доп.}} = 40 \text{ В}$.

Решение: Учитывая, что $R_3 \ll R_h$ используются упрощённые формулы.

При $l_{AB} = 100 \text{ км}$ получим:

$$U_{\text{пр}} = 300 \times 100 = 30\,000 \text{ В};$$

$$I_h = 30\,000 / 1000 = 30 \text{ А}.$$

При $l_{AB} = 10 \text{ км}$ получим:

$$U_{\text{пр}} = 300 \times 10 = 3000 \text{ В};$$

$$I_h = 3000 / 1000 = 3 \text{ А}.$$

Для безопасной зоны найдём:

$$I_{\text{без}} = 40 / 300 = 0,133 \text{ км}$$

Такая же зона находится и за точкой заземления.

Задание 4: Рассчитать $U_{\text{пр}}$ и I_h к точке (по вариантам) км, а также $I_{\text{без}}$, если $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $R_h = 1000 \text{ Ом}$; $U_{\text{пр. доп.}} = 40 \text{ В}$.
Исходные данные приведены в табл. 1.2.5.

Таблица 1.2.5

Исходные данные для оценки опасности прикосновения к заземлённому проводу, подверженному электромагнитному влиянию

Последняя цифра в зачётной книжке студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$l_1, \text{ км}$	150	100	50	30	70	150	100	50	30	70
$l_2, \text{ км}$	10	20	30	5	40	100	30	10	5	20
$E \cdot 10, \text{ В/км}$	30	27	12	10	15	40	35	13	10	25

1.2.5 Определение напряжённости электрического поля

В различных точках пространства вблизи электроустановок промышленной частоты напряжённость электрического поля имеет разные значения. Она зависит от разных факторов: номинального напряжения электроустановки, расстояния между точкой, в которой определяется напряжённость поля и токоведущими частями, высоты размещения над землёй токоведущих частей так далее.

Напряжённость может быть измерена с помощью специальных приборов, в некоторых случаях, например, вблизи воздушных линий электропередач, определена расчётом.

В качестве примера определим напряжённость электрического поля, создаваемого трёхфазной воздушной линией электропередачи с горизонтальным расположением проводов.

Пример 1.2.7. Определить напряжённость электрического поля на высоте $h = 2 \text{ м}$ от земли на разных расстояниях от оси линии 500 кВ в середине промежуточного пролёта. Линия имеет горизонтальное расположение проводов с расстоянием между ними $d = 10,5 \text{ м}$. Фазы расщеплённые, состоящие из трёх проводов АСО – 500 с радиусом $r_0 = 1,51 \text{ см}$ с шагом расщепления (расстояния между ними) $a = 40 \text{ см}$. Высота подвеса проводов на опоре $H_n = 22 \text{ м}$, габарит линии $H_0 = 8,65 \text{ м}$, средняя высота подвеса проводов над землёй $H_{\text{ср}} = 13,1 \text{ м}$. Грозозащитные тросы изолированы от опор, то есть влияние их на электрическое поле проводов не учитывается (рис. 1.2.8).

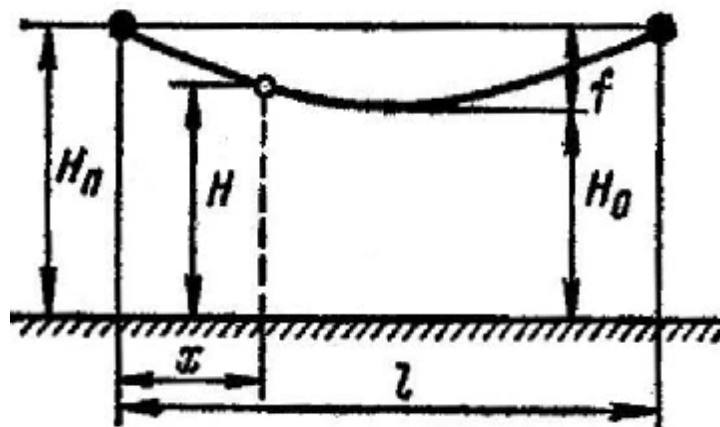


Рис.1.2.8 К определению высоты размещения провода над землёй H на разных расстояниях от опоры x .

Высота размещения провода над землёй H принимается равной фактической высоте размещения участка (точки) провода, ближайшей к точке P (рис. 1.2.9), поскольку на формирование поля в этой точке основное влияние оказывает ближайший участок провода.

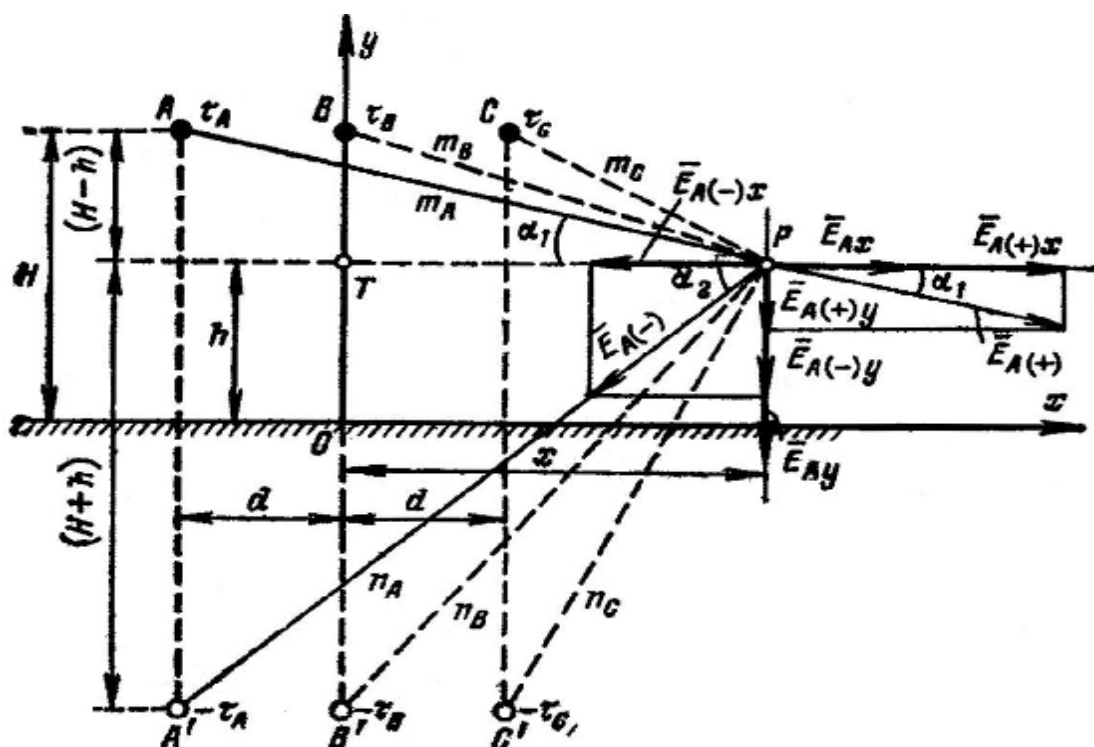


Рис. 1.2.9 К вычислению напряжённости электрического поля вблизи воздушной линии электропередачи в точке P . A, B, C – фазы (провода) линии; A', B', C' – зеркальные изображения фаз; m_A, m_B, m_C – кратчайшие расстояния от точки P до фаз линии; n_A, n_B, n_C – кратчайшие расстояния от точки P до зеркальных изображений фаз.

Высота H определяется из следующего выражения /1/:

$$H = H_n - [(4 \times f \times x) / l] \times [1 - (x / l)], \quad (1.2.21)$$

где, H_n - высота подвеса провода на опоре, м; $f = (H_n - H_0)$ – стрела провеса провода; H_0 – габарит линии (наименьшее расстояние от провода до земли), м; x – расстояние по горизонтали от опоры до расчётной точки провода, м; l – длина пролёта линии, м.

Предварительно определяется ёмкость фазы относительно земли по формуле /1/:

$$C = (2 \times \pi \times \epsilon_0) / \ln[(2 \times H_{cp} \times d) / (r \times \sqrt[3]{(4 \times H_{cp}^2 + d^2) \times \sqrt{H_{cp}^2 + d^2}})], \quad (1.2.22)$$

где, H_{cp} – средняя высота подвеса проводов над поверхностью земли, м; $[H_{cp} = 1/3 \times (H_n + 2 \times H_0)]$.

При расщеплённых фазах, состоящих каждая из n проводов радиусом r_0 с расстоянием между ними a вместо r надо подставлять в (1.2.22) эквивалентный радиус $r_{эКВ}$, который рассчитывается по формуле /1/:

$$r_{эКВ} = P \times \sqrt[n]{r_0 \times a^{n-1}}, \quad (1.2.23)$$

где, P – поправочный коэффициент. При $n = 2$ и $n = 3$, коэффициент $P = 1$, а при $n = 4$ $P = 1,09$.

Подставляя значения в формулу (1.2.22) получаем:

$$\begin{aligned} C &= (6,28 \times 8,85 \cdot 10^{-12}) / \\ &/ \ln[(2 \times 13,1 \times 10,5) / (\sqrt[3]{0,0151 \times 0,4^2} \times \sqrt[3]{(4 \times 13,2^2 + 10,5^2) \times \sqrt{13,1^2 + 10,5^2}})] = \\ &= 12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.} \end{aligned}$$

Затем находим напряжённость поля в расчётных точках по формуле /1/:

$$E = C \times U_{\phi} \times \sqrt{(2 \times k_1 - k_3 - k_5)^2 + 3(k_3 - k_5)^2 + (2 \times k_2 - k_4 - k_6)^2 + 3(k_4 - k_6)^2}, \quad (1.2.24)$$

Коэффициенты k имеют следующие значения:

$$k_1 = (x + d) / m_A^2 - (x + d) / n_A^2; \quad k_2 = (H - h) / m_A^2 + (H + h) / n_A^2;$$

$$k_3 = x / m_B^2 - x / n_B^2; \quad k_4 = (H - h) / m_B^2 + (H + h) / n_B^2;$$

$$k_5 = (x - d) / m_c^2 - (x - d) / n_c^2; \quad k_6 = (H - h) / m_c^2 + (H + h) / n_c^2.$$

Отрезки m и n являются гипотенузами соответствующих прямоугольных треугольников (рис. 1.2.9) и определяются следующими уравнениями [1]:

$$m_A = \sqrt{(x + d)^2 + (H - h)^2};$$

$$n_A = \sqrt{(x + d)^2 + (H + h)^2};$$

$$m_B = \sqrt{x^2 + (H - h)^2};$$

$$n_B = \sqrt{x^2 + (H + h)^2};$$

$$m_C = \sqrt{(x - d)^2 + (H - h)^2};$$

$$n_C = \sqrt{(x - d)^2 + (H + h)^2}.$$

Так как напряжённость поля требуется определить в середине пролёта, высоту H принимаем равной габариту линии, то есть 8,65 м.

Вначале определяем напряжённость в точке T , находящейся под средней фазой на высоте 2 м от земли (рис. 1.2.10), для этой точки $x = 0$ (см. рис 2.1.9, а отрезки m и n равны).

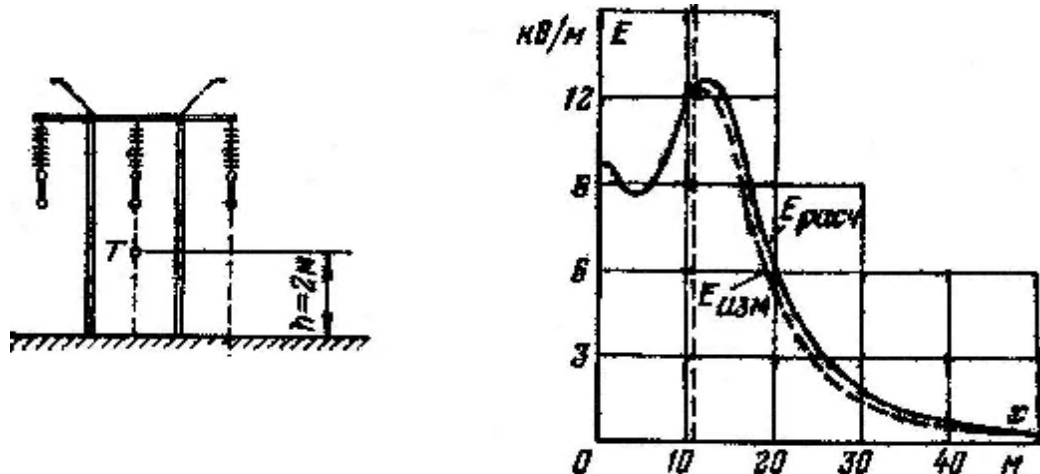


Рис.1.2.10 К вычислению напряжённости электрического поля на разных расстояниях от оси линии 500 кВ (на высоте 2 м от земли)

$$m_A = m_C = \sqrt{(8,65 - 2)^2 + 10,5^2} = \sqrt{131,9} \text{ м};$$

$$n_A = n_C = \sqrt{(8,65 + 2)^2 + 10,5^2} = \sqrt{223,6} \text{ м};$$

$$m_B = 8,65 - 2 = 6,65 \text{ м};$$

$$n_B = 8,65 + 2 = 10,65 \text{ м}.$$

Коэффициенты k для точки T будут:

$$k_1 = 10,5 / 131,9 - 10,5 / 223,6 = 3,28 \cdot 10^{-2};$$

$$k_2 = 6,65 / 131,9 + 10,65 / 223,6 = 9,8 \cdot 10^{-2};$$

$$k_3 = 0;$$

$$k_4 = 6,65 / 6,65^2 + 10,65 / 10,65^2 = 24,42 \cdot 10^{-2};$$

$$k_5 = - 10,5 / 131,9 - (-10,65 / 223,6) = - 3,28 \cdot 10^{-2};$$

$$k_6 = 6,65 / 131,9 + 10,65 / 223,6 = 9,8 \cdot 10^{-2}.$$

Подставляя численные значения величин в выражение (1.2.24) получим значение напряжённости электрического поля в точке T :

$$\begin{aligned} E &= (12 \cdot 10^{-12} \times 500 \cdot 10^3) / (4 \times \pi \times 8,85 \cdot 10^{-12} \times \sqrt{3}) \times \\ &\times \sqrt{10^{-4} [(2 \times 3,28 + 3,28)^2 + 3 \times 3,28^2 + (2 \times 9,8 - 24,42 - 9,8)^2 + 3 \times (24,42 - 9,8)^2]} = \\ &= 9700 \text{ В/м} = 9,7 \text{ кВ/м}. \end{aligned}$$

Аналогично определяется напряжённость поля в других точках (при разных значениях x). Результаты расчёта изображаются в виде кривой $E_{\text{расч.}}$ на рис. 1.2.10. Там же построена кривая $E_{\text{изм.}}$, построенная по данным измерений на линии 500 кВ.

Задание 5: Определить напряжённость электрического поля на высоте h м от земли на разных расстояниях от оси линии 500 кВ. Линия имеет горизонтальное расположение проводов с расстоянием между ними $d = 10,5$ м. Фазы расщеплённые, состоящие из трёх проводов АСО – 500 с радиусом $r_0 = 1,51$ см с шагом расщепления (расстояния между ними) $a = 40$ см. Высота подвеса проводов на опоре $H_n = 22$ м, габарит линии $H_0 = 8,65$ м, средняя высота подвеса проводов над землёй $H_{\text{ср}} = 13,1$ м. Грозозащитные тросы изолированы от опор, то есть влияние их на электрическое поле проводов не учитывается (рис. 1.2.8).

Сделать выводы.

Исходные данные приведены в табл. 1.2.6.

Таблица 1.2.6

Исходные данные для оценки опасности действия электрического поля

Последняя цифра в зачётной книжке студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
h , м	1,5	1,7	1,0	1,8	1,9	2,0	1,5	1,7	1,9	2,0
x , м	0	5	10	15	0	5	10	15	2,5	3,0

Справка: **3.4.2.1.** Предельно допустимый уровень напряженности ЭП на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м.

3.4.2.2. При напряженностях в интервале больше 5 до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания в ЭП T (час) рассчитывается по формуле:

$$T = (50 / E) - 2, \text{ где}$$

E - напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м;

T - допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч /3 – 4/.