

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ,

ПОНИМАНИЕ ПРОЦЕССА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Под термином *заземление* подразумевается электрическое подключение какой-либо цепи или оборудования к земле. Заземление используется для установки и поддержания потенциала подключенной цепи или оборудования максимально близким к потенциалу земли. Цепь заземления образована проводником, зажимом, с помощью которого проводник подключен к электроду, электродом и грунтом вокруг электрода.

Заземление широко используется с целью электрической защиты. Например, в осветительной аппаратуре заземление используется для замыкания на землю тока пробоя, чтобы защитить персонал и компоненты оборудования от воздействия высокого напряжения.

Низкое сопротивление цепи заземления обеспечивает стекание тока пробоя на землю и быстрое срабатывание защитных реле. В результате постороннее напряжение как можно быстрее устраняется, чтобы не подвергать его воздействию персонал и оборудование.

Чтобы наилучшим образом фиксировать опорный потенциал аппаратуры в целях ее защиты от статического электричества и ограничить напряжения на корпусе оборудования для защиты персонала, идеальное сопротивление цепи заземления должно быть равно нулю. Из дальнейшего описания станет ясно, что на практике этого добиться невозможно.

Достаточно низкие, но не предельные, значения сопротивления заданы в последних стандартах безопасности NEC®, OSHA и др.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА

На рис.1 показан заземляющий штырь. Его сопротивление определяется следующими компонентами:

- (А) сопротивление металла штыря и сопротивление контакта проводника со штырем;
- (Б) сопротивление контакта штыря с грунтом;
- (В) сопротивление поверхности земли протекающему току, иначе говоря, сопротивление земли, которое часто является самым важным из перечисленных слагаемых.

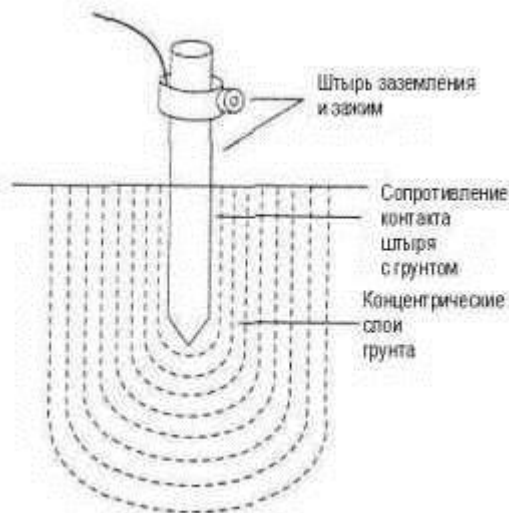


Рис. 1

Подробнее:

(А) Обычно заземляющий штырь делается из хорошо проводящего металла (полностью медный штырь или с медным покрытием) и клеммой соответствующего качества, поэтому сопротивлением штыря и его контакта с проводником можно пренебречь.

(Б) Национальное бюро стандартизации показало, что сопротивлением контакта электрода с грунтом можно пренебречь, если электрод плотно вбит и на его поверхности нет краски, масла и подобных веществ.

(В) Остался последний компонент – сопротивление поверхности грунта. Можно представить, что электрод окружен концентрическими слоями грунта одинаковой толщины. Ближний к электроду слой имеет наименьшую поверхность, но наибольшее сопротивление. По мере удаления от электрода поверхность слоя увеличивается, а его сопротивление уменьшается. В конечном счете, вклад сопротивления удаленных слоев в сопротивление поверхности грунта становится незначительным. Область, за пределами которой сопротивлением слоев земли можно пренебречь, называется областью эффективного сопротивления. Ее размер зависит от глубины погружения электрода в грунт.

Теоретически сопротивление земли можно определить общей формулой: $R = \rho L / A$ (Сопротивление = Удельное сопротивление \times Длина / Площадь)

Эта формула объясняет, почему уменьшается сопротивление концентрических слоев по мере их удаления от электрода:

$R = \text{Удельное сопротивление грунта} \times \text{Толщина слоя} / \text{Площадь}$

При вычислении сопротивления земли удельное сопротивление грунта считают неизменным, хотя это редко встречается в практике. Формулы сопротивления земли для систем электродов очень сложны и при этом зачастую позволяют вычислять сопротивление лишь приблизительно. Наиболее часто используется формула сопротивления заземления для случая одного электрода, полученная профессором Дуайтом (H. R. Dwight) из Массачусетского технологического института:

$$R = \rho / 2 \pi L \times ((\ln 4L) - 1) / r$$

R = , где

R – сопротивление заземления штыря в омах,
L – глубина заземления электрода,
r – радиус электрода,
ρ - среднее удельное сопротивление грунта в Ом·см.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДА И ГЛУБИНЫ ЕГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ



Рис. 2

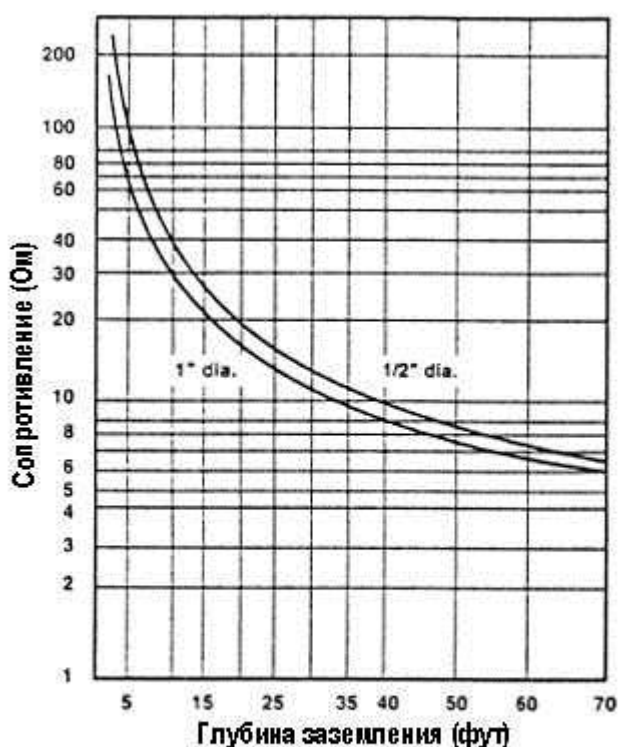
Влияние размера: увеличение диаметра штыря уменьшает сопротивление заземления незначительно. Удвоение диаметра снижает сопротивление меньше, чем на 10% (см. рис.2).

Влияние глубины заземления штыря: сопротивление заземления уменьшается с увеличением глубины. Теоретически при удвоении глубины сопротивление уменьшается на 40 %. Стандарт NEC (1987, 250-83-3) предписывает заземлять штырь минимум на 8 футов (2,4 м) для обеспечения хорошего контакта с землей (см. рис.3). В большинстве случаев штырь, заземленный на 10 футов (3 м), удовлетворяет требованиям NEC.

Минимальный диаметр стального штыря равен 5/8 дюйма (1,59 см), а медного или покрытого медью стального штыря - равен 1/2 дюйма (1,27 см) (NEC 1987, 250-83-2).

На практике минимальный диаметр 3 м штыря заземления равен:

- 1/2 дюйма (1,27 см) для обычного грунта,
- 5/8 дюйма (1,59 см) для сырого грунта,
- 3/4 дюйма (1,91 см) для твердого грунта или для штыря длиннее 10 футов.



Сопротивление устройства заземления в виде электрода в зависимости от глубины его заземления

Рис. 3

ВЛИЯНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА

Приведенная выше формула Дуайта показывает, что сопротивление заземления зависит не только от глубины и площади поверхности электрода, но и от удельного сопротивления грунта. Оно является главным фактором, который определяет сопротивление заземления и глубину заземления штыря, какая потребуется для обеспечения малого сопротивления. Удельное сопротивление грунта сильно изменяется в зависимости от района земного шара и времени года. Оно в значительной степени зависит от содержания в почве электропроводящих минералов и электролитов в виде воды с растворенными в ней и солями. Сухая почва, не содержащая растворимых солей, имеет высокое сопротивление (см. рис. 4).

Рис. 4

Почвы	Удельное сопротивление, Ом·см		
	Мин.	Среднее	Макс.
Зольные почвы, шлаки, засоленные почвы, пустынные	590	2370	7000
Глины, глинистые сланцы, илистая, суглинок	340	4060	16000

Те же с песком или гравием	1020	15 800	135000
Гравий, песок, камни с небольшим количеством глины или суглинка	59000	94000	458000

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТА

Два типа почвы в сухом виде могут стать фактически изоляторами с удельным сопротивлением более $109 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Как можно видеть в таблице на рис 5, сопротивление образца почвы изменяется весьма быстро при увеличении содержания влаги в ней приблизительно до 20%.

Рис. 5

Содержание влаги, %	Удельное сопротивление, Ом·см	
	Земля	Песчаный суглинок
0	>109	>109
2,5	250000	150000
5	165000	43000
10	53000	18500
15	19000	10500
20	12000	6300
30	6400	4200

Удельное сопротивление почвы, также, зависит от температуры. Рис. 6 показывает, как меняется удельное сопротивление песчаного суглинка с содержанием влаги 12,5% при изменении температуры от +20 до -15°C. Как можно видеть, удельное сопротивление изменяется от 7200 до 330 000 Ом-сантиметров.

Рис. 6

Температура, °C	Температура по Фаренгейту, F	Удельное сопротивление, Ом·см
20	68	7200

10	50	9900
0	32(вода)	13800
0	32(лед)	30000
-5	23	79000
-15	14	330000

Поскольку удельное сопротивление грунта сильно зависит от температуры и содержания влаги, разумно считать, что сопротивление устройства заземления будет зависеть от времени года. Такие изменения показаны на рис.7. Поскольку стабильность температуры почвы и содержания в ней влаги улучшается по мере удаления от поверхности, то система заземления будет эффективна в любое время, если штырь вбит на значительную глубину. Отличные результаты получаются, когда штырь достигает уровня воды.

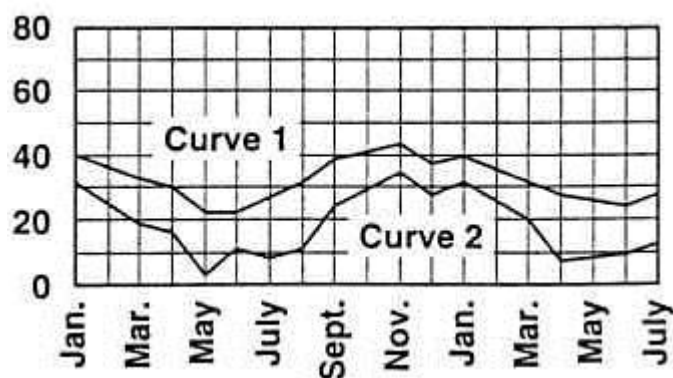


Рис. 7 Сезонные изменения сопротивления заземления водопроводной трубы диаметром 3/4 дюйма в каменистом грунте. Кривая 1 – заглубление трубы 3 фута, кривая 2 – 10 футов.

В некоторых случаях удельное сопротивление грунта настолько велико, что для получения низкого сопротивления заземления требуется сложное устройство и значительные затраты. В этих случаях оказывается более экономичным использовать заземленный штырь небольших размеров и снижать сопротивление заземления, периодически повышая содержание растворимых веществ в почве вокруг электрода. Рисунок 8 показывает существенное уменьшение сопротивления песчаного суглинка при увеличении содержания в нем соли.

Рис. 8

Влияние содержания соли в грунте на его удельное сопротивление (Песчаный суглинок, содержание воды 15% от веса, температура 17°C)	
Количество добавленной соли (% от веса воды)	Удельное сопротивление (Ом-сантиметров)

0	10700
0,1	1800
1,0	460
5	190
10	130
20	120

На рис. 9 показана зависимость удельного сопротивления грунта, пропитанного раствором соли, от температуры. Конечно, если используется пропитка грунта соляным раствором, штырь заземления должен быть защищен от химической коррозии.

Рис. 9

Влияние температуры на удельное сопротивление грунта, содержащего соль (Песчаный суглинок, 20% воды, 5% соли от веса воды)	
Температура, °С	Удельное сопротивление, Ом·см
20	110
10	142
0	190
- 5	312
- 13	1440

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Чтобы помочь инженеру приблизительно определить глубину заглабления электрода, необходимую для получения заданного сопротивления устройства заземления, можно воспользоваться так называемой Номограммой заземления. Она показывает, что для получения сопротивления заземления 20 Ом на грунте с удельным сопротивлением 10000 Ом-сантиметров, потребуется дюймов заглубить на 20 футов штырь диаметром 5/8.

Работа с Номограммой заземления

1. Выберите необходимое сопротивление по шкале R.
2. Отметьте на шкале P точку удельного сопротивления грунта.
3. Проведите прямую линию через точки на шкале R и P до шкалы K.
4. Отметьте точку на шкале K.
5. Выберите диаметр штыря и проведите прямую линию до шкалы D через точки на шкале DIA и на шкале K.

6. Пересечение этой прямой с линией шкалы D покажет величину заглубления штыря, необходимую для того, чтобы обеспечить выбранное вначале сопротивление заземления.

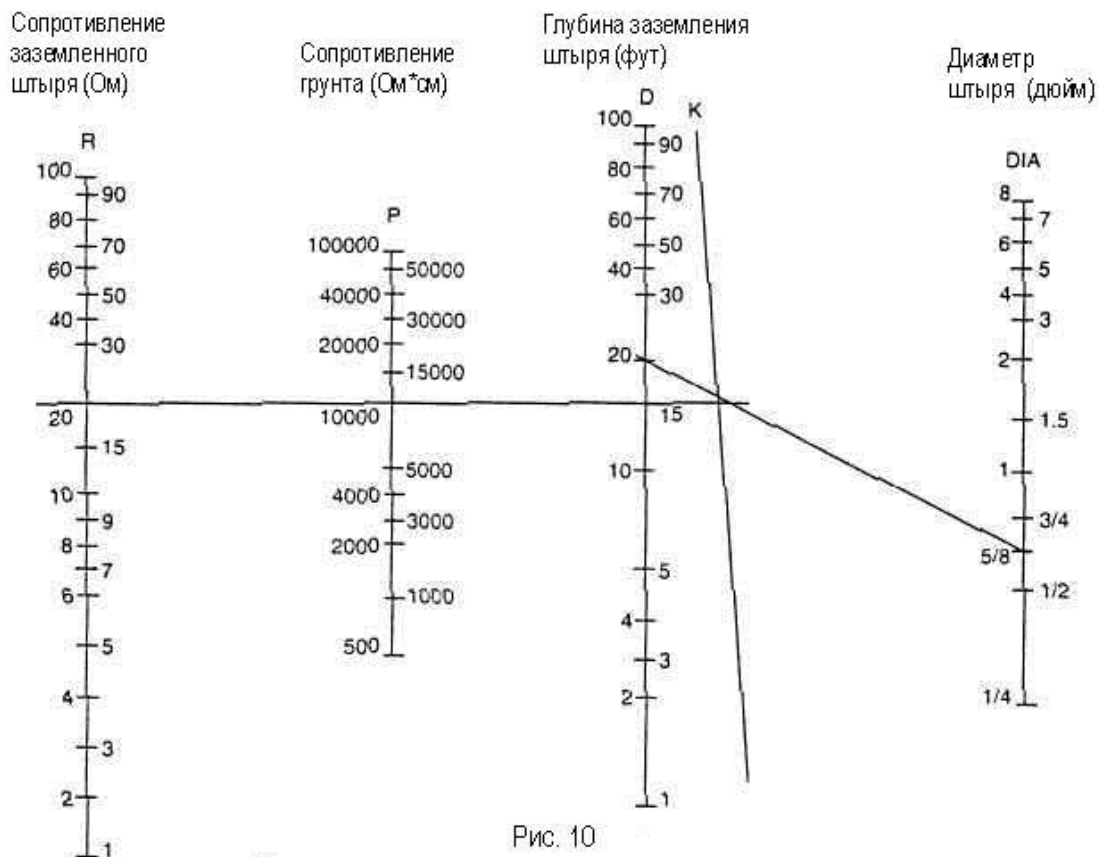


Рис. 10
Номограмма для расчета заземления в виде штыря

ЗНАЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

В разделе “Сопротивление искусственных электродов” стандарта NEC ® 250-84 (1987) написано:

“Если один электрод в виде штыря, трубы или пластины не обеспечивает сопротивление равное или меньшее, чем 25 Ом, то необходимо применить дополнительно любое из устройств, описанных в части 250-83. Где бы ни устанавливалась группа штырей, труб или пластин, указанный раздел требует, чтобы расстояние между ними было не менее 1,8 м.”

Национальный кодекс по электричеству (NEC ®– National Electrical Code) устанавливает, что сопротивление заземления не должно быть больше 25 Ом. Эта директива является верхней границей и во многих случаях требуется гораздо меньшее значение.

Возникает вопрос: “Насколько низким должно быть значение сопротивления заземления?” Трудно назвать конкретное количество Ом. Низкое сопротивление заземления обеспечивает большую защиту персонала и оборудования. Поэтому стоит стремиться сделать его меньше одного Ом. Однако, было бы непрактично добиваться такого низкого значения сопротивления по всей сети распределения и передачи электроэнергии или на малых подстанциях. В некоторых регионах можно получить без

значительных усилий значение 5 Ом. В других - трудно достигнуть и 100 Ом сопротивления заземления.

Стандарты, принятые в промышленности, устанавливают, что передающая электроэнергия подстанция должна обеспечивать сопротивление заземления, не превышающее одного Ом. Для подстанций, распределяющих электроэнергию, рекомендуется сопротивление заземления не выше 5 и даже 1 Ом. На большинстве подстанций требуемое значение сопротивления может обеспечить система заземления в виде решетки.

В сетях электроосвещения или на узлах связи часто приемлемым значением считается 5 Ом. Если в сетях электроосвещения применяется громоотвод, то он должен подключаться к цепи заземления с сопротивлением не больше одного Ом.

Именно такие значения сопротивления заземления, вытекающие из теории, обычно и применяются на практике. Однако всегда существуют случаи, когда очень трудно обеспечить сопротивление заземления, удовлетворяющее стандарту NEC ® или другим стандартам безопасности. Для этих случаев существует несколько методов уменьшения сопротивления заземления. В их числе система из параллельно соединенных электродов, система с глубоким заземлением составных электродов и химическая обработка грунта. Кроме того, в других публикациях обсуждается заземление в виде закопанных пластин, проводников (электрический противовес), в виде подключения к стальным конструкциям зданий и арматуре железобетонных конструкций.

Низкое сопротивление заземления может обеспечить подключение к трубам систем водо- и газоснабжения. Однако, применение с недавнего времени неметаллических труб и непроводящих стыков между трубами сделали проблематичным или вовсе невозможным обеспечить в этом случае низкое сопротивление заземления.

Для измерения сопротивления заземления требуются специальные приборы. Большинство из них используют принцип падения потенциала, созданного переменным током (АС – alternative current) протекающим между вспомогательным и проверяемым электродом. Измерение проводится в омах и показывает сопротивление между заземленным электродом и окружающей его землей. В числе приборов СА® недавно появились измерители сопротивления заземления, применяющие клещи тока.

Примечание. National electric code ® и NEC ® являются зарегистрированными торговыми марками Национальной противопожарной ассоциации (National Fire Protection Association).

ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

(Принцип падения потенциала, 3-точечная схема.)

Вольтметром измеряется напряжение между штырями X и Y и амперметром - ток, протекающий между штырями X и Z (см. рис. 11).

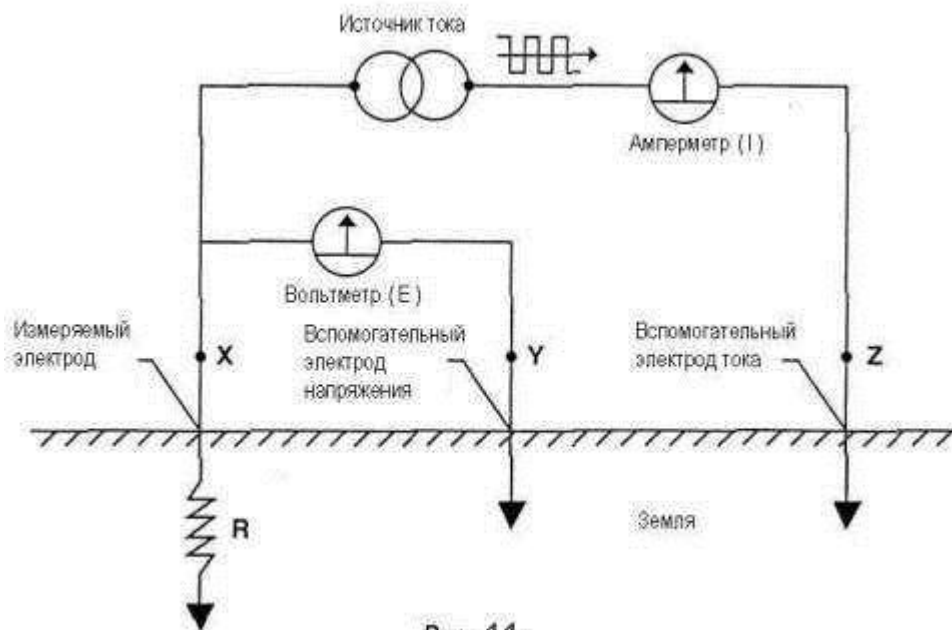


Рис. 11

(Заметьте, что точки X, Y и Z соответствуют точкам X, P и C прибора, работающего по 3-точечной схеме или точкам C1, P2 и C2 прибора, работающего по 4-точечной схеме.)

Пользуясь формулами закона Ома $E = R I$ или $R = E / I$, мы можем определить сопротивление заземления электрода R. Например, если $E = 20$ В и $I = 1$ А, то:

$$R = E / I = 20 / 1 = 20 \text{ Ом}$$

При использовании тестера заземления не потребуется производить эти вычисления. Прибор сам сгенерирует необходимый для измерения ток и прямо покажет значение сопротивления заземления.

ПОЛОЖЕНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ

Для точного измерения сопротивления заземления размещать вспомогательный электрод тока Z достаточно далеко от измеряемого электрода для того, чтобы потенциал на вспомогательном электроде напряжения Y измерялся за пределами зон эффективного сопротивления как проверяемого электрода X, так и вспомогательного электрода тока Z. Наилучшим способом проверить, находится ли электрод за пределами зон эффективного сопротивления остальных электродов, будет проводить измерения, меняя его местоположение. Если вспомогательный электрод напряжения Y находится в зоне эффективного сопротивления одного из остальных электродов (или одновременно в обеих зонах, если зоны перекрываются), то при смене его местоположения показания прибора будут значительно меняться и в этом случае нельзя точно определить сопротивление заземления (см. рис 12).

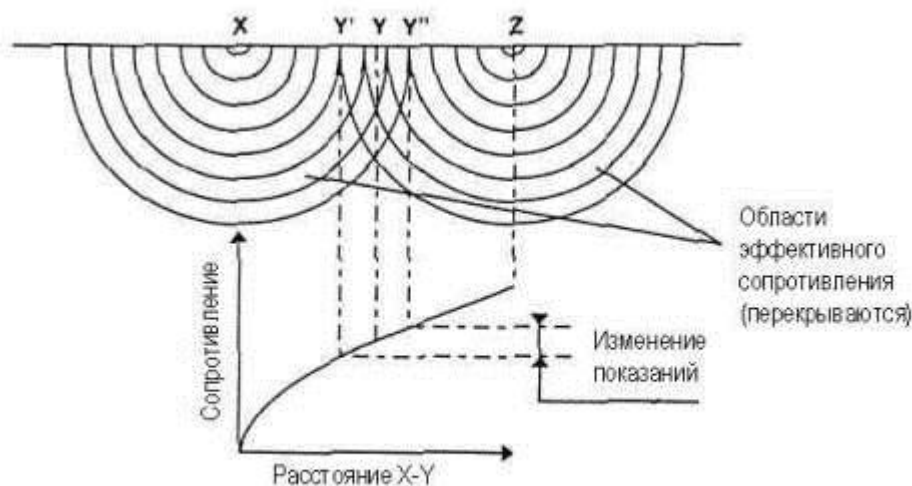


Рис. 12

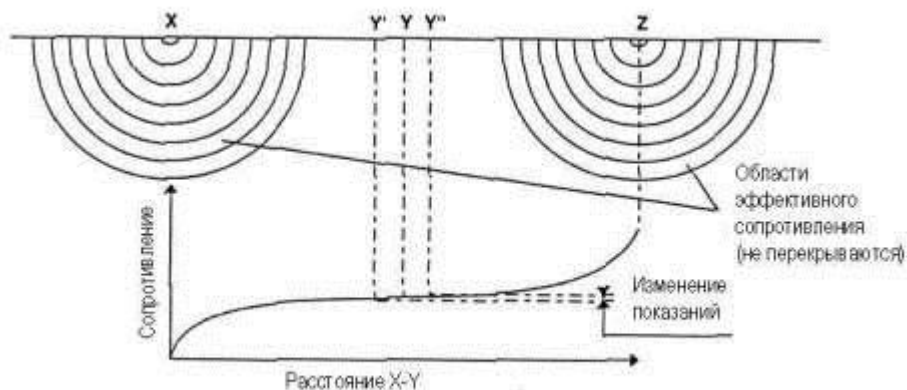


Рис. 13

С другой стороны, если вспомогательный электрод напряжения Y расположен за пределами зон эффективного сопротивления (рис. 13), то при его перемещении показания будут изменяться незначительно. Это и есть наилучшая оценка сопротивления заземления электрода X . Результаты измерения лучше изобразить на графике, чтобы убедиться, что они находятся на почти горизонтальном участке кривой, как показано на рис.13. Часто расстояние от этого участка до проверяемого электрода равно приблизительно 62% расстояния от вспомогательного электрода тока до проверяемого электрода.

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕННОГО ЭЛЕКТРОДА (Метод 62-х процентов)

Метод 62% был принят после изучения графиков и практических проверок. Этот метод обеспечивает наибольшую точность при условии однородности грунта.

Этот метод применяется, если проверяемое устройство заземления и два вспомогательных электрода можно расположить в линию и когда проверяемое устройство заземления состоит из одного штыря, одной трубы, одной пластины и т.п., как показано на рис. 14.

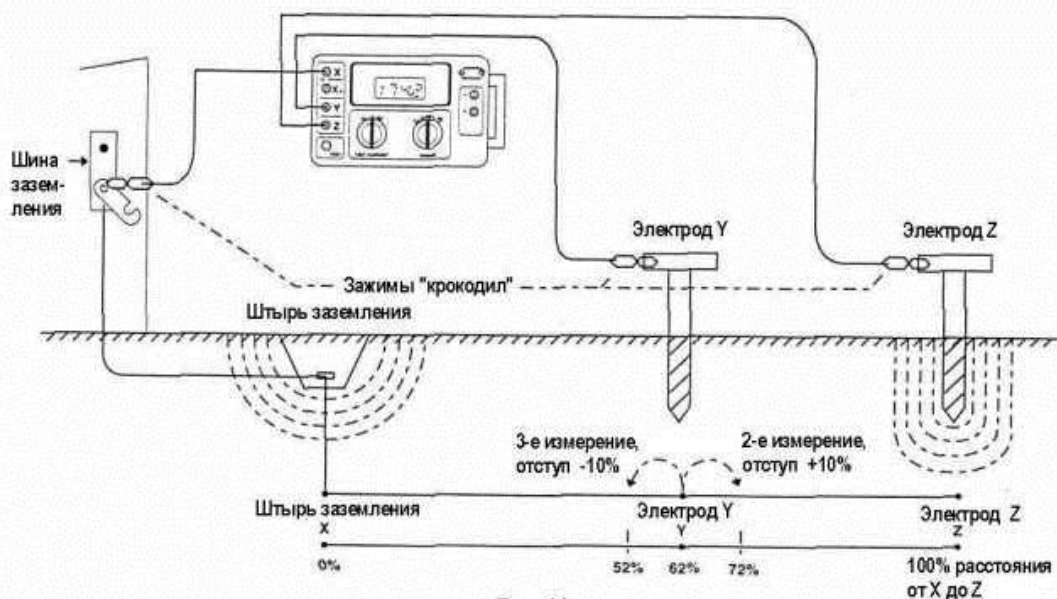


Рис. 14

На рис. 15 показано, что зоны эффективного сопротивления (группа концентрических поверхностей вокруг штырей) проверяемого электрода X и вспомогательного электрода тока Z перекрываются. Если переместить электрод потенциала Y по направлению к электроду X или Z и повторить измерение, то показания будут сильно различаться и измеренное значение будет неприемлемо далеко от истинного сопротивления заземления. Области эффективного сопротивления пересекаются и это приводит к тому, что измеренное значение сопротивления возрастает по мере удаления электрода X от проверяемого электрода Y.

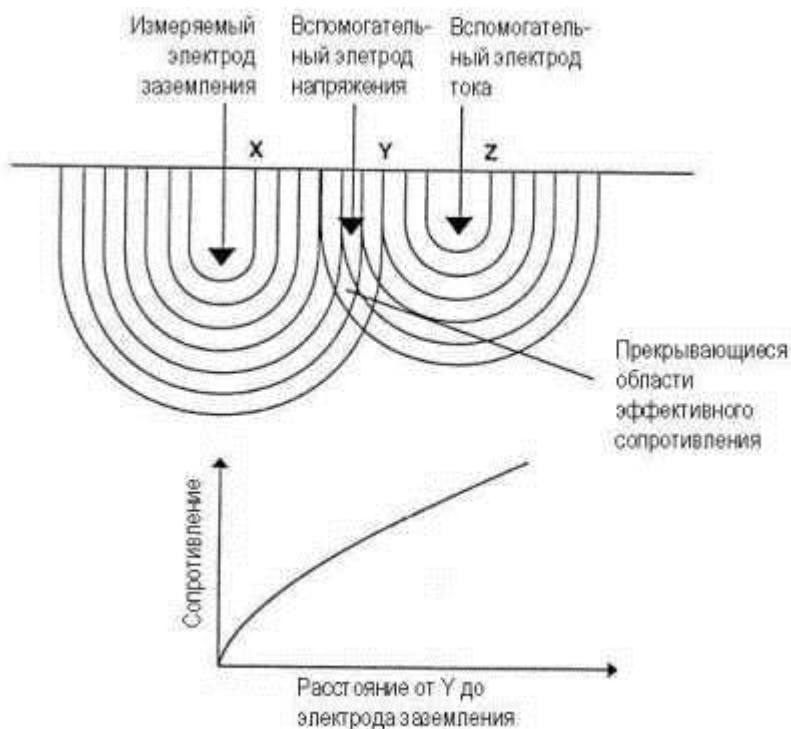


Рис. 15

Теперь рассмотрим рисунок 16, на котором электроды X и Z удалены на расстояние достаточное, чтобы зоны эффективного сопротивления электродов не пересекались. Если

мы теперь построим график сопротивления в зависимости от расстояния между электродами X и Y, мы увидим, что разница между сопротивлением слева и справа от точки 62% (относительное расстояние от Y X) приемлемо мала. Обычно эта разница измеряется в процентах от измеренной величины: $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ и т.д.

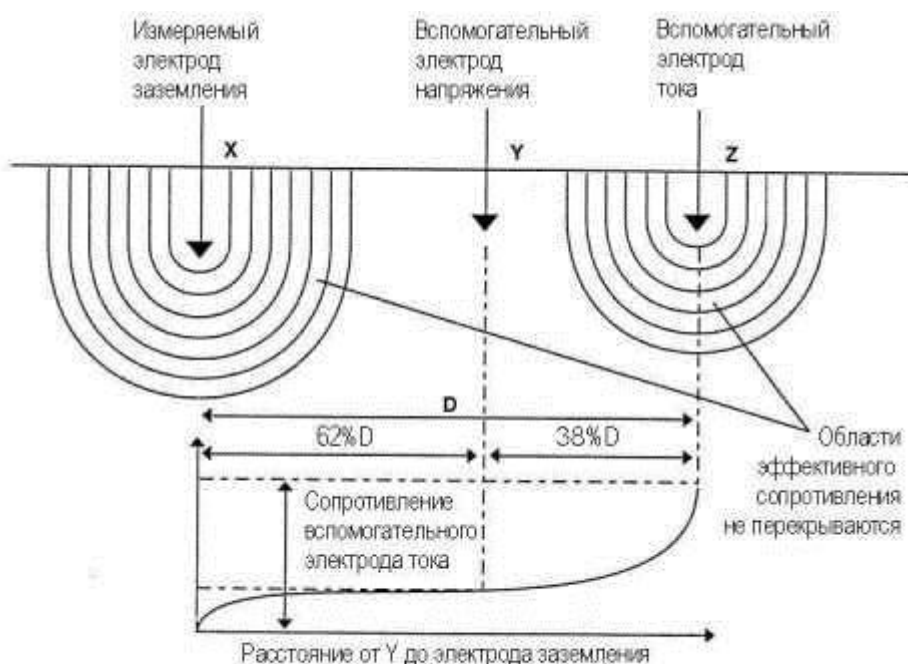


Рис. 16

УДАЛЕННОСТЬ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА

Нельзя назвать одно на все случаи значение расстояния от вспомогательного электрода тока Z до проверяемого электрода X, поскольку оно зависит от длины и диаметра проверяемого электрода, однородности грунта и, особенно, от размеров эффективных областей сопротивления электродов. Однако, в данном параграфе дано приблизительное значение этого расстояния для электрода диаметром 1 дюйм при однородном грунте (для диаметра 2 дюйма уменьшите расстояние на 10%, для диаметра 2 дюйма увеличьте расстояние на 10%).

Приблизительное расстояние до вспомогательных электродов для метода 62%		
Глубина заземления проверяемого электрода, футов	Расстояние до электрода Y, футов	Расстояние до электрода Z, футов
6	45	72
8	50	80
10	55	88
12	60	96
18	71	115
20	74	120

30

86

140

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПРОВОДНИКА ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Проводимость проводника заземления можно измерить, включив его между двумя входами измерительного прибора (см. рис. 17).

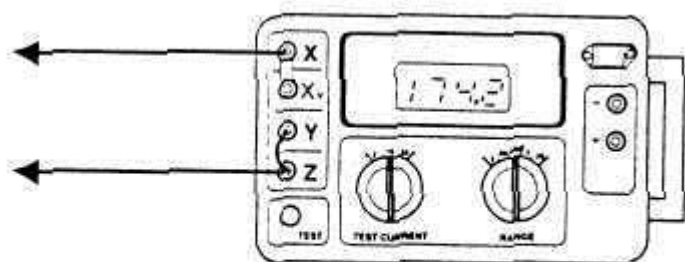


Figure 17

ДВУХТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ (Упрощенный метод)

Этот альтернативный способ применяется, когда доступно другое очень хорошее заземление, кроме измеряемого.

В густонаселенных районах, где трудно найти места для установки двух вспомогательных электродов, можно применить двухточечный метод. Измерение показывает сопротивлению двух устройств заземления, включенных последовательно. Поэтому второе заземление должно быть очень хорошим, настолько, чтобы его сопротивлением можно было пренебречь. Необходимо, также, измерить сопротивление провода и вычесть его из полученного измерения.

Двухточечный метод не такой точный, как 3-точечный метод (метод 62%), поскольку зависит от расстояния между измеряемым электродом и вспомогательным заземлением (неиспользуемое заземление или водопроводная труба). Этот метод нельзя использовать как стандартный. Скорее, - это выход из положения в густонаселенных районах.
См. рис. 18.

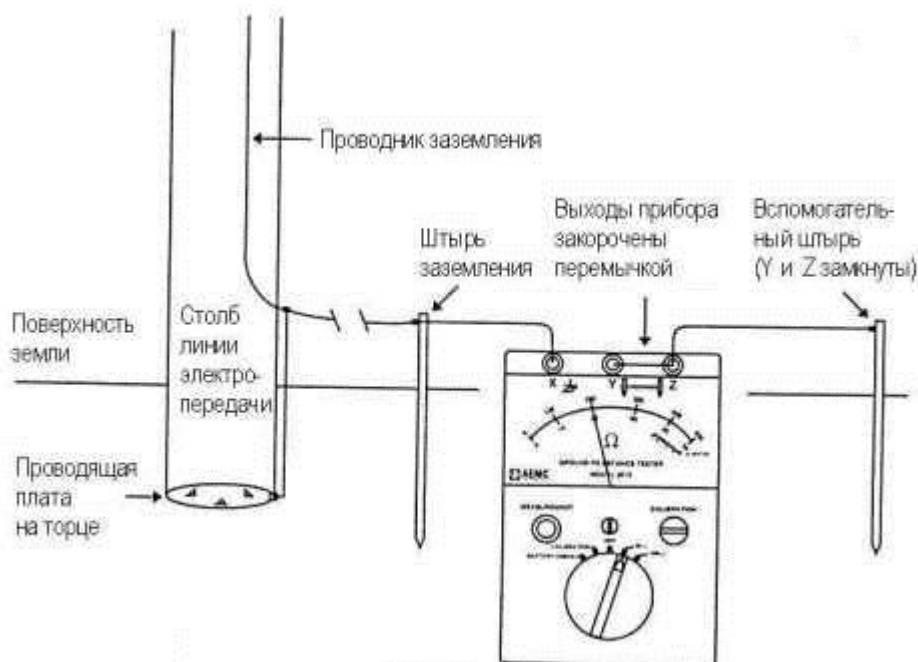


Рис. 18

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА (4-точечный метод)

Почему так важно измерять сопротивление грунта?

Измерение сопротивления грунта преследует тройную цель. Во-первых, эти данные используются для геофизического изучения залегающих пород с целью определения зон и глубины залегания руд и для изучения других геофизических феноменов. Во-вторых, сопротивление грунта оказывает непосредственное влияние на степень коррозии подземных трубопроводов. Уменьшение сопротивления грунта приводит к усилению процесса коррозии и, следовательно, заставляет проводить специальную защитную обработку труб. В-третьих, сопротивление грунта непосредственно влияет на конструкцию устройств заземления. И именно поэтому здесь обсуждается вопрос о сопротивлении грунта. При разработке систем заземления большого размера, разумно определить области наименьшего сопротивления грунта, чтобы сконструировать наиболее экономичную установку.

Измерять сопротивление можно двумя методами: двухточечным или 3-точечным. Двухточечный метод заключается просто в измерении сопротивления между двумя точками. В большинстве случаев наиболее точным является 4-точечный метод, который применен в тестере заземления модели 4500.

Как следует из названия, 4-точечный метод (см рис. 19 и 20 ниже) на измеряемом участке требуется установить в линию четыре равноудаленных электрода. Между крайними электродами протекает ток известной величины, созданный генератором тока. Между внутренними электродами измеряется падение напряжения. Модель 4500 показывает непосредственно значение сопротивления в омах:

$$\rho = 4 \frac{AR}{(1 + 2A/(A^2 + 4B^2) - 2A/(4A^2 + 4B^2))}$$

A – расстояние между электродами в см;
 B – глубина заземления электродов в см.
Если $A > 20 B$, то формула такова:

$$\rho = 2 \pi A R \text{ (если } A \text{ - в см)}$$
$$\rho = 191,5 \pi A R \text{ (если } A \text{ - в футах)}$$

ρ = Сопротивление грунта (в Ом·см)

Это значение есть среднее удельное сопротивление грунта на глубине равной расстоянию A между электродами.

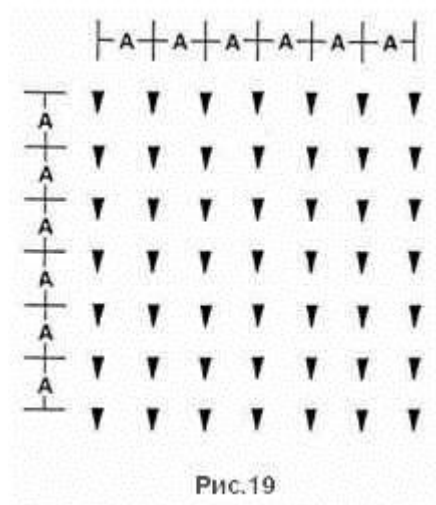
ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА ПРИБОРОМ TERCA 2

Имеется обширный участок земли, на котором надо определить место с наилучшим удельным сопротивлением. Немного интуиции не помешает. Поскольку наша цель найти место с наименьшим сопротивлением, сухой песчаной почве мы предпочтем влажный суглинок. Также следует оценить глубину залегания слоя с наименьшим удельным сопротивлением.

Пример:

После обследования зона поиска сократилась приблизительно до 75 квадратных футов (22,5 м²). Допустим, необходимо определить сопротивление на глубине 15 футов (450 см). Расстояние между крайними штырями заземления равно глубине, на которой необходимо измерить среднее удельное сопротивление (15 футов или 450 см). Чтобы применить более простую формулу Венера ($\rho = 2 \pi A R$), необходимо заземлять электрод на глубину равную $1/20$ расстояния между электродами или на $8 \frac{7}{8}$ футов (22,5 см).

Устанавливайте электроды по сетке, как показано на рис. 19, и подключайте тестер заземления модели 4500 по схеме на рис. 20. Выполните следующие действия:



- Снимите перемычку, замыкающую выводы X и X V (C1 и P1) прибора;
- Подключите прибор ко всем четырем штырям (см. рис.20).

Например, пусть измерено сопротивление $R = 15$,
 ρ (удельное сопротивление) = $2 \cdot 10^{-8} \text{ RA}$
 A (расстояние между электродами) = 450 см.

Тогда :

$$\rho = 6,28 \times 15 \times 450 = 42\,390 \text{ Ом}\cdot\text{см.}$$

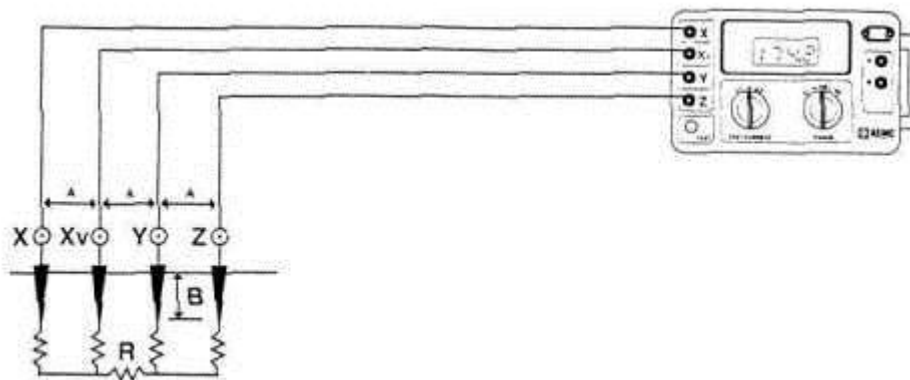


Рис.20

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ

Первой причиной для измерения напряжения прикосновения является необходимость оценить безопасность персонала и защиту оборудования от высокого напряжения. Однако, в некоторых случаях степень электрической безопасности можно оценивать с различных точек зрения.

Периодические измерения сопротивления устройства заземления в виде электрода или решетки электродов рекомендуются в следующих случаях:

1. Когда устройство заземления в виде электрода или решетки относительно мало и его удобно отключать.
2. Когда есть подозрение, что идет коррозия электрода, вызванная низким сопротивлением грунта и гальваническими процессами.
3. Когда пробой на землю поблизости от проверяемого устройства заземления маловероятен.

Измерение напряжения прикосновения является альтернативным способом определения безопасности. Он рекомендуется в следующих случаях:

1. Когда невозможно физически или по экономическим соображениям отключать заземление для того, чтобы произвести измерение.
2. Когда можно ожидать пробоев на землю рядом с проверяемым заземлением или рядом с оборудованием, которое подключено к проверяемому заземлению.
3. Когда “след” оборудования сравним с размером заземления, которое подлежит проверке.
(“След” – контур той части оборудования, которая соприкасается с землей.)

Ни измерение сопротивления заземления методом падения потенциала, ни измерение напряжения прикосновения не говорят о способности проводника заземления

выдержать большие токи утечки с проводника фазы на проводник заземления. Требуется другой тест с использованием большого тока для того, чтобы это проверить.

Для измерения напряжения прикосновения применяется 4-точечный тестер заземления. В процессе измерения прибор генерирует в земле небольшое напряжение, имитирующее напряжение неисправности неподалеку от проверяемой точки на земле. Прибор показывает значение в вольтах на ампер тока, протекающего при этом в цепи заземления. Отображенное на экране значение затем умножается на максимальную величину тока, ожидаемого в земле, чтобы вычислить напряжение прикосновения данной установки для худшего случая.

Например, если при проверке системы с максимальным ожидаемым током неисправности 5000 А, прибор показал значение 0,100, то напряжение прикосновения будет равно 500 В.

Измерение напряжения прикосновения похоже на метод падения потенциала тем, что так же требует установки вспомогательных электродов в землю или на ее поверхность. Но расстояние между вспомогательными электродами будет другое - см. рис. 21.

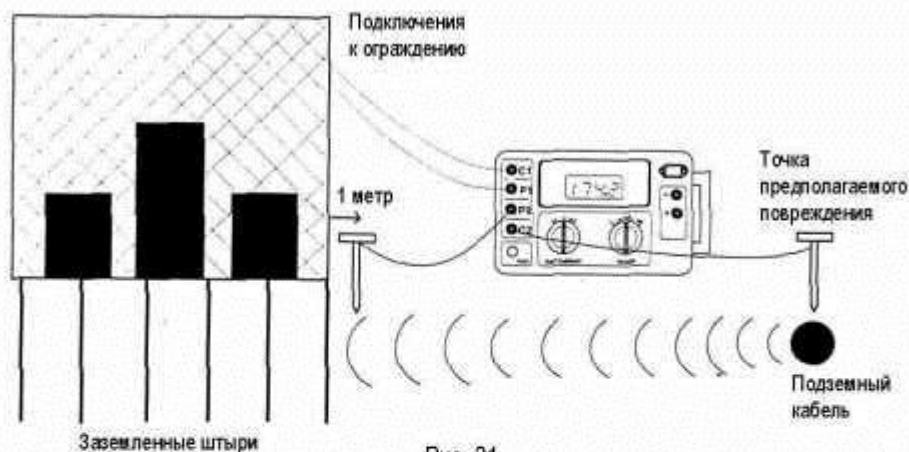


Рис. 21

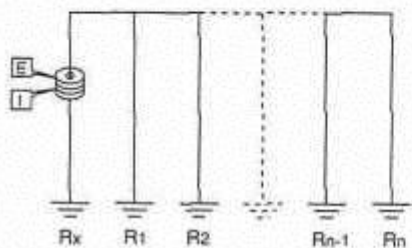


Рис. 22

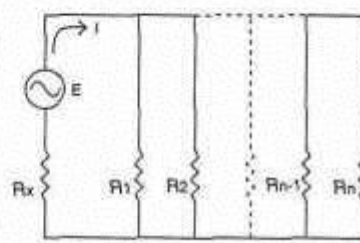


Рис. 23

Рассмотрим следующий пример. Пусть изоляция изображенного на рисунке подземного кабеля была пробита недалеко от изображенной подстанции. В земле появятся токи, вызванные аварией, которые потекут к устройству заземления подстанции, создавая разность потенциалов. Это напряжение может быть опасным для здоровья, и даже жизни, персонала, который находится на данном участке земли.

Чтобы приблизительно измерить напряжение прикосновения для данной ситуации, выполните следующие действия. Включите кабели между ограждением подстанции и точками С1 и Р1 4-точечного тестера заземления. Установите электрод в земле в точке,

где можно ожидать пробой кабеля и подключите электрод к выводу С2 прибора. Установите в землю еще один электрод на линии между первым электродом и точкой подключения к ограждению на расстоянии одного метра (или вытянутой руки) от места подключения к ограждению и подключите этот электрод к точке Р2 прибора. Включите прибор, выберите диапазон 10 мА и снимите измерение. Умножьте его на максимально возможный в случае аварии ток.

Устанавливая электрод, подключенный к выводу Р2 прибора, в различные места вокруг ограждения, примыкающие к неисправной линии, можно получить карту изменения потенциала.

Цифровой измеритель сопротивления заземления и удельного сопротивления грунта от 0,01 Ом до 100 кОм 3/4 электрода С.А6470 - характеристики

ИЗМЕРЕНИЕ ПРИБОРОМ С.А 6415 С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОКОВЫХ КЛЕЩЕЙ

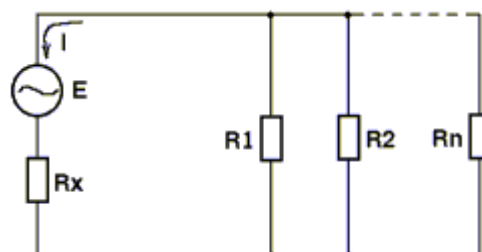
Это новый уникальный метод измерения сопротивления заземления. Он позволяет проводить измерение без отключения цепи заземления. Кроме того, преимущество метода в том, что он позволяет измерять общее сопротивление устройства заземления, включая сопротивление соединений в цепи заземления.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

рис.22



рис.23



Обычно, проводник заземления электросети общего назначения можно представить схемой, показанной на рис. 22 или эквивалентной схемой, показанной на рис. 23. Если в какой-нибудь ветви с сопротивлением R_X с помощью трансформатора создать напряжение E , через цепь потечет ток I .

Описанные величины связаны соотношением $E / I = R_X$. При известном неизменном напряжении E сопротивление R_X можно получить, измерив ток I .

Обратимся снова к рис. 22 и 23. Ток создается специальным трансформатором, подключенным к через усилитель мощности к источнику напряжения с постоянной амплитудой и частотой 1,6 кГц. Этот ток регистрируется в образующем контуре. Измеряемый сигнал регистрируется синхронным детектором, усиливается избирательным

усилителем, преобразуется аналогово-цифровым преобразователем и отображается на ЖК-дисплее.

Избирательный усилитель применяется для очищения полезного сигнала от сигналов с частотой сети и от высокочастотных шумов. Напряжение регистрируется катушками, охватывающими проводник в возбуждаемом контуре, затем усиливается и очищается, когда сравнивается в компараторе с опорным сигналом. Если клещи тока неправильно закрыты, на дисплее появляется сообщение “open jaws” (“клещи открыты”).

ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА МЕСТНОСТИ

Ниже следуют примеры измерения сопротивления заземления на местности в типовых ситуациях.

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА, СМОНТИРОВАННОГО НА СТОЛБЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Снимите защитную крышку с провода заземления и обеспечьте достаточно свободного места для захвата проводника клещами тока. Клещи должны свободно охватывать проводник заземления. Клещами можно захватить и непосредственно штырь заземления.

Примечание: клещи должны находиться на электрическом пути от нейтрали системы или проводника заземления к штырю или штырям (в зависимости от исполнения)

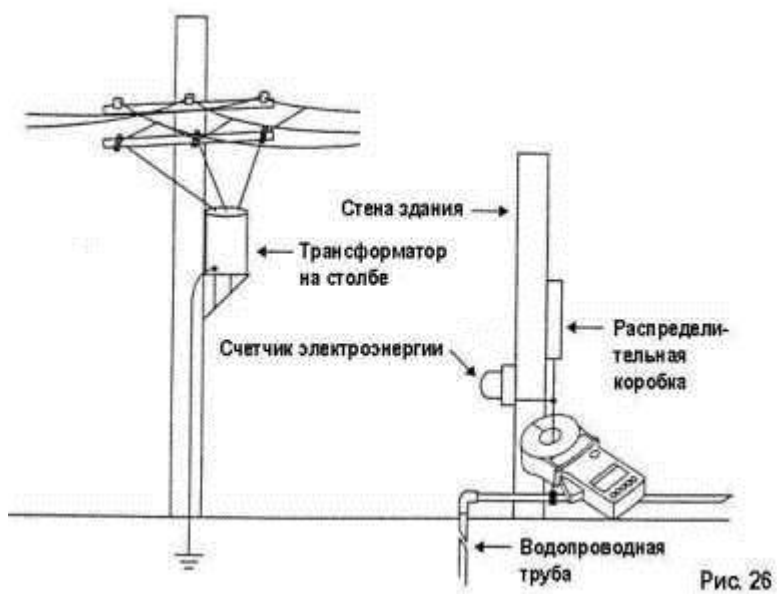
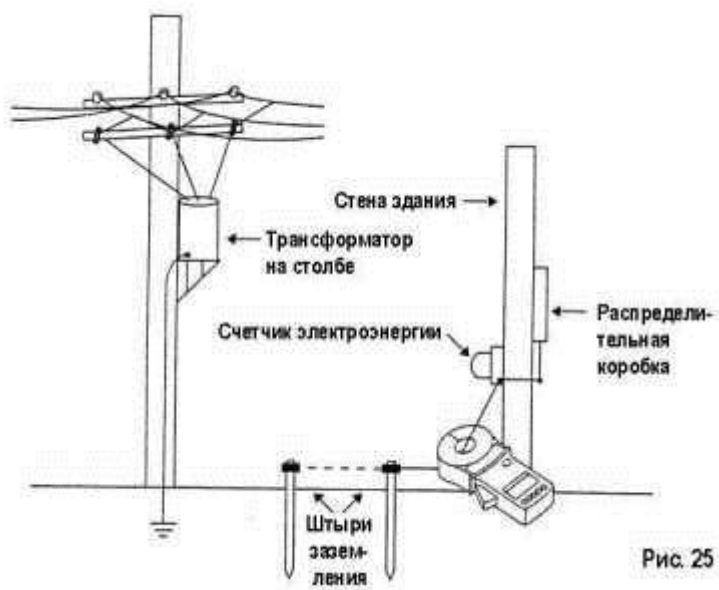
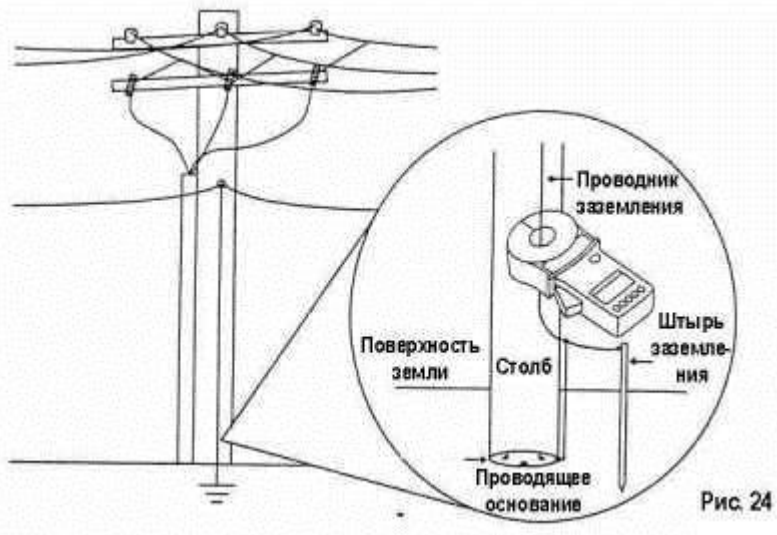
Выберите измерение тока “А”. Захватите клещами проводник заземления и измерьте ток в проводнике. Максимальное значение равно 30 А. Если значение тока превышает 30 А, измерение сопротивления заземления невозможно. Прекратите измерение. Снимите прибор С.А 6415 с данной точки и продолжите измерение в других точках.

Если измеренный в цепи заземления ток не превышает допустимого, выберите режим “?” прибора и прочитайте результат измерения в омах. Измеренное значение соответствует не только сопротивлению системы заземления, но и включает сопротивление контакта нейтрали со штырем и всех соединений между нейтралью и штырем.

Заметьте, что на рисунке 24 заземление обеспечивается торцом столба и заземленным штырем. Необходимо подключить клещи выше точки соединения проводников от торца столба и от штыря, чтобы измерить общее сопротивление заземления обоих заземлителей. Для последующих обращений к результату запишите дату, ток, сопротивление заземления в омах и номер столба.

Примечание: большое значение сопротивления может быть вызвано:

- А) плохим заземлением штыря;
- Б) отключенным проводником заземления;
- В) большим сопротивлением контактов или мест сращивания проводника; осмотрите клещи, соединение на конце штыря, нет ли заглублённых трещин на стыках.



ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ КОРОБКЕ ИЛИ НА СЧЕТЧИКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Следуйте в основном описанной выше методике. Заметьте на рис. 25, что заземление может быть исполнено в виде группы штырей или, как показано на рис. 26, в качестве заземления может быть использована выходящая из земли водопроводная труба. Можно использовать одновременно оба вида заземления. В этом случае следует выбирать точку измерения на нейтрали так, чтобы измерить общее сопротивление заземления системы.

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА ТРАНСФОРМАТОРЕ, УСТАНОВЛЕННОМ НА ПЛОЩАДКЕ

- **Замечание.** Никогда не открывайте ограждение трансформатора. Это - имущество коммунальной службы. Данное измерение может выполнять только специалист.
- **Соблюдайте все необходимые меры безопасности.**
- **Присутствует опасное напряжение.**



Рис. 27

Определите и посчитайте все штыри заземления (обычно имеется единственный штырь). Если штыри заземления находятся внутри ограждения, обратитесь к рис. 27, а если за пределами ограждения – к рис.28. Если имеется единственный штырь заземления и он находится внутри ограждения, то для измерения следует подключиться к проводнику сразу после контакта проводника со штырем. Часто, от зажима на штыре возвращается к нейтрали или внутри ограждения несколько проводников.

Во многих случаях, наилучшее измерение можно получить при помощи клещей 3710 или 3730, подключенных непосредственно к заземленному штырю. При этом измеряется исключительно сопротивление устройства заземления. Подключайте клещи только в той точке, где имеется единственный путь для тока, текущего в нейтраль.

Обычно, если вы получили очень низкое значение сопротивления, то это означает, что вы подключились к петле и вам следует переместить точку измерения ближе к штырю. На рис. 28 штырь заземления вне ограждения. Чтобы получить правильный результат, выберите точку подключения клещей, как показано на рисунке. Если внутри ограждения имеется несколько штырей в разных углах, надо определить, как они подключены, чтобы правильно выбрать точку измерения.

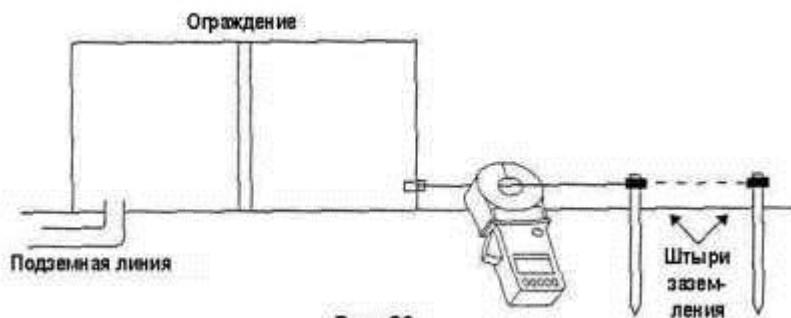


Рис. 28

ПЕРЕДАЮЩИЕ СТОЙКИ

**Соблюдайте все необходимые меры безопасности.
Присутствует опасное напряжение.**

Найдите проводник заземления около фундамента стойки. Заметьте, что существует много конфигураций. Будьте осторожны при определении проводников заземления. На рис. 29 показана одна стойка на бетонном фундаменте с внешним проводником заземления. Точка подключения клещей должна находиться выше места электрического соединения частей системы заземления, которая может быть выполнена в виде группы штырей, пластин, витков или элементов фундамента.

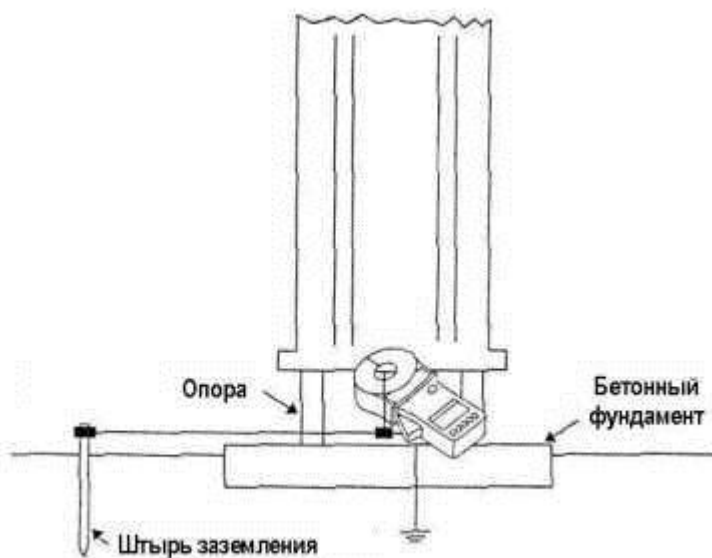
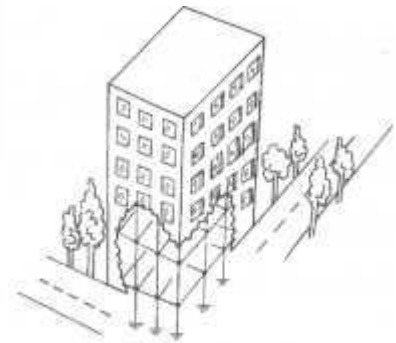
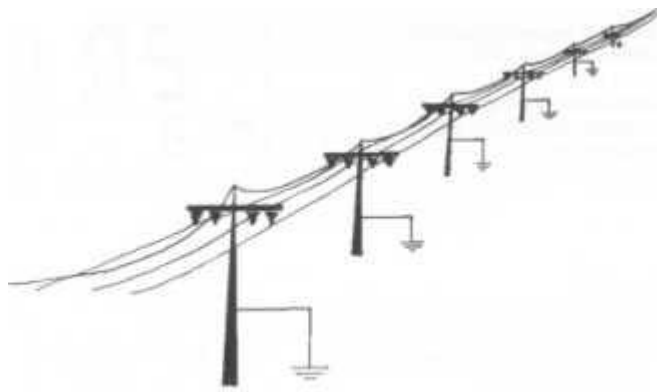


Рис. 29

Примеры объектов, где применение прибора С.А6415 наиболее эффективно:



Электрическое сопротивление земли

Земля является плохим проводником электрического тока: проводимость ее в несколько миллиардов раз меньше проводимости металлов. Однако поскольку площадь земли, через которую проходит ток, обычно весьма велика, сопротивление земли оказывается сравнительно небольшим.

Грунт представляет собой дисперсное пористое тело, состоящее из трех частей: твердой, жидкой (связанная вода и свободная вода) и газообразной (рис. 2.18).



Рис. 2.18. Схематичная структура грунта

- 1 — твердая часть; 2 — связанная вода;
- 3 — свободная вода;
- 4 — газообразная часть (воздух, пары воды)

Электрическое сопротивление грунта характеризуется его объемным удельным сопротивлением ρ , т. е. сопротивлением куба грунта с ребром длиной

1 м. Единицей объемного удельного сопротивления является Ом на метр (Ом х м).

Значение ρ земли колеблется в широких пределах: от десятков до тысяч Ом на метр. Оно зависит от многих факторов, в том числе от:

- влажности,
- температуры,
- рода грунта,
- степени его уплотненности,
- от времени года.

Измерение удельного сопротивления грунта. При проектировании заземляющего устройства необходимо знать ρ грунта в том месте, где будет сооружаться заземление. Пользоваться для этой цели данными таблиц нельзя, так как в них приводятся ориентировочные значения ρ , которые могут отличаться от истинных в десятки и сотни раз.

Удельное сопротивление однородной земли

Удельное сопротивление однородной земли определяется методом разового (или глубокого) зондирования (иначе этот метод называется методом простого пробного электрода) с помощью контрольного зонда в два этапа. Вначале контрольный зонд — стержневой электрод в виде сплошного стержня или трубы диаметром $d=4-5$ см с острым наконечником — погружается в землю вертикально до глубины l , м предполагаемого заложения заземлителей так, чтобы верхний его конец возвышался над землей, и замеряется его сопротивление растеканию $R_{изм}$, Ом.

Затем определяется искомое измеренное удельное сопротивление земли, Ом*м по формуле для расчета стержневого заземлителя:

$$\rho_{расч} = R_{изм} \cdot \psi \cdot \quad (2.49)$$

Для большей точности измерений контрольный зонд погружают в землю не менее чем в трех – четырех местах исследуемой площадки. *Чтобы посмотреть пример расчета, щелкните Пример.*

Удельное сопротивление многослойной земли определяется методом послойного (или ступенчатого) зондирования (иначе методом ступенчатого погружения электрода или методом погружаемого пробного электрода) с помощью контрольного зонда, погружаемого в землю не сразу на всю длину, а в несколько приемов участками (ступенями) длиной h_n , равной 0,5—1,5 м (рис. 2.23). Каждая такая ступень представляет собой как бы отдельный слой земли, подлежащий измерению.

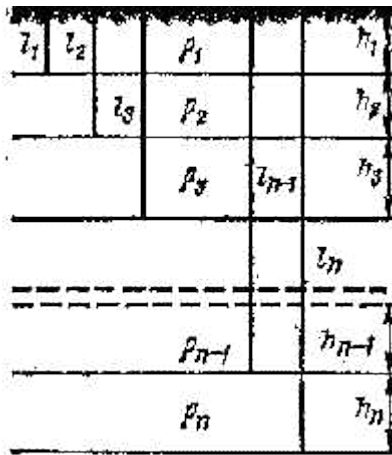


Рис. 2.23. Схема измерений удельного сопротивления земли методом послойно (ступенчатого) зондирования

l — глубина погружения зонда; ρ — удельное сопротивление данного слоя земли; h — толщина (мощность) слоя земли

После очередного погружения измеряется сопротивление растеканию зонда R_n , Ом, при данной глубине его погружения l_n , м. Затем для каждого значения R_n по формуле (2.49) вычисляется среднее удельное сопротивление земли, соответствующее данной глубине погружения зонда, Ом*м,

$$\rho_{\text{изм}} = R_{\text{изм}} \frac{2\pi l_n}{\ln \frac{4l_n}{d}},$$

(2.51)

где d — диаметр зонда, м.

После этого вычисляются значения удельных сопротивлений каждого слоя (ступени) земли по выражению, Ом*м,

$$\rho_{\text{изм}} = \frac{h_n}{\frac{l_n}{\rho_{\text{изм}}} - \frac{l_{n-1}}{\rho_{(n-1)\text{изм}}}}.$$

(2.52)

Зная климатическую зону местности, в которой производились измерения, и состояние земли во время измерений, находим по табл. 2.5 толщину слоя сезонных изменений h_c и коэффициент сезонности ψ , на который умножаем вычисленные по (2.52) $\rho_{\text{изм}}$ из тех слоев грунта, которые находятся в пределах h_c .

В итоге получаем расчетные значения удельных сопротивлений верхних слоев грунта:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{изм}} \cdot \psi. \quad (2.53)$$

Все остальные слои (лежащие ниже h_c) считаются не подверженными сезонным изменениям, поэтому их расчетные удельные сопротивления принимаются равными измеренным.

Приведение многослойной земли к двухслойной производится путем отнесения к верхнему слою тех слоев (ступеней), у которых удельные сопротивления имеют большие значения, а к нижнему слою — малые значения.

При этом удельные сопротивления соответственно верхнего и нижнего слоев двухслойной земли определяются следующими выражениями, Ом*м:

$$\rho_{1\text{-расч}} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_k}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_k}{\rho_k}}; \quad (2.54)$$

$$\rho_{2\text{-расч}} = \frac{h_{k+1} + h_{k+2} + \dots + h_n}{\frac{h_{k+1}}{\rho_{k+1}} + \frac{h_{k+2}}{\rho_{k+2}} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}}. \quad (2.55)$$

Здесь индексы от 1 до k означают номера измеренных слоев (ступеней), вошедших в верхний, а от $(k+1)$ до n — вошедших в нижний слои двухслойной земли.

Пример 1. Определение удельного сопротивления однородной земли

На участке земли в III климатической зоне предполагается выполнить заземлитель из стержней длиной 5 м, погружаемых в землю вертикально. При этом верхние концы стержней должны находиться на глубине 0,8 м и будут соединены друг с другом горизонтальным полосовым заземлителем длиной 50 м. Требуется определить удельные сопротивления однородной земли — измеренное $\rho_{\text{изм}}$ и расчетные для вертикального и горизонтального заземлителей $\rho_{\text{расч.в}}$ и $\rho_{\text{расч.г}}$. Измерение сопротивлений растекания производилось в четырех местах участка методом разового зондирования с помощью стержневого электрода диаметром $d=4$ см с глубиной погружения его в землю $l = 6$ м (что соответствует предполагаемой глубине погружения вертикальных электродов заземлителя). Во время измерений земля была сухая, количество осадков ниже нормы. Результаты измерения сопротивлений растеканию зонда: $R_{\text{изм1}}=20$ Ом, $R_{\text{изм2}} = 16$ Ом, $R_{\text{изм3}}=19$ Ом, $R_{\text{изм4}}=17$ Ом.

Решение. Находим среднее значение измеренного сопротивления растеканию зонда:

$$R_{\text{изм}} = \frac{20 + 16 + 19 + 17}{4} = 18 \text{ Ом.}$$

Измеренное значение удельного сопротивления земли по (2.49) будет

$$\rho_{\text{изм}} = 18 \frac{2\pi \cdot 6}{\ln \frac{46}{0,04}} = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Из табл. 2.4 согласно условию задачи находим коэффициенты сезонности для вертикального электрода $\psi = 1,1$ и для горизонтального электрода $\psi = 1,6$.

Тогда расчетные удельные сопротивления земли по (2.50) будут:

- для вертикального электрода $\rho_{\text{расч.в}}=120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- для горизонтального электрода $\rho_{\text{расч.г}}=176 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Пример 2. Определение расчетных удельных сопротивлений двухслойной земли

Определить расчетные удельные сопротивления двухслойной земли $\rho_{1-расч}$ и $\rho_{2-расч}$ на участке земли в III климатической зоне. При сооружении заземлителя предполагается использовать вертикальные стержневые электроды длиной 5 м с заглублением в землю верхних концов на 0,8—0,9 м. Измерения сопротивлений земли проводилось методом послойного зондирования с использованием зонда диаметром $d=12$ мм. Во время измерений земля была сухая, количество осадков — ниже нормы.

В итоге измерений $R_{n\text{ изм}}$ и вычислений $\rho_{n\text{ изм}}$ и $\rho_{h\text{ изм}}$ (по 2.51 и 2.52) получены следующие данные:

n	1	2	3	4	5	6
$h_n, \text{ м}$	0,8	1	1	1	1	1,2
$l_n, \text{ м}$	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,0
$R_{n\text{ изм}}, \text{ Ом}$	230	100	60	40	30	20
$\rho_{n\text{ изм}}, \text{ Ом*м}$	215	177	155	133	122	110
$\rho_{h\text{ изм}}, \text{ Ом*м}$	215	155	193	95	93	65

Здесь n — порядковый номер измерения (или погружения, слоя), l_n — глубина погружения зонда, м; h_n — толщина слоя (глубина очередного погружения), м.

Здесь n — порядковый номер измерения (или погружения, слоя), l_n — глубина погружения зонда, м; h_n — толщина слоя (глубина очередного погружения), м.

По табл. 2.5 в соответствии с условиями задачи находим $h_c = 1,8$ м и $\psi = 1,5$. Следовательно, лишь первые два слоя (ступени) оказываются в пределах h_c и их $\rho_{h\text{ изм}}$ умножаем на ψ . Получаем значения расчетных удельных сопротивлений всех слоев грунта:

$$\rho_1 = 215 * 1,5 = 322 \text{ Ом*м}; \rho_4 = 95 \text{ Ом*м};$$

$$\rho_2 = 155 * 1,5 = 232 \text{ Ом*м}; \rho_5 = 93 \text{ Ом*м}; \rho_3 = 193 \text{ Ом*м};$$

$$\rho_6 = 65 \text{ Ом*м}.$$

Очевидно, что в данном случае первые три слоя (ступени), как имеющие значительно большие ρ , следует отнести к верхнему слою двухслойной земли, а другие три — к нижнему. Мощность верхнего слоя при этом будет $h_1 = 2,8$ м.

Искомые расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев двухслойной земли согласно (2.54) и (2.55) будут:

$$\rho_{1-\text{расч}} = \frac{0,8 + 1 + 1}{\frac{0,8}{322} + \frac{1}{232} + \frac{1}{193}} \approx 230 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

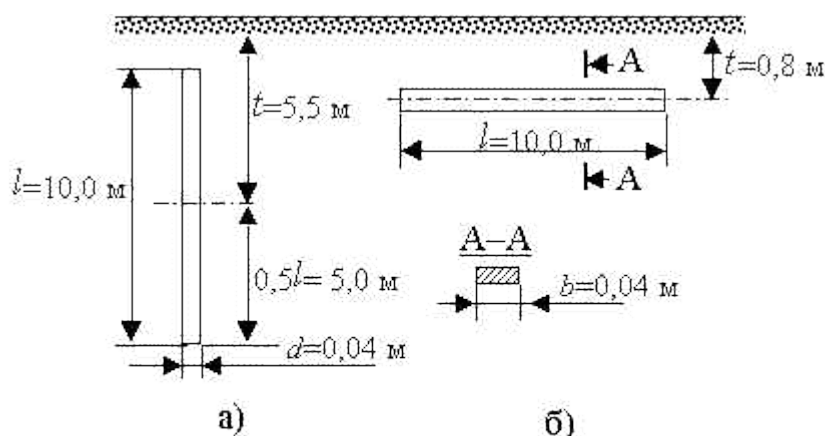
$$\rho_{2-\text{расч}} = \frac{1 + 1 + 1,2}{\frac{1}{95} + \frac{1}{93} + \frac{1,2}{65}} \approx 80 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

Явления при стекании тока в землю

Примеры решения задач на растекание тока с одиночных заземлителей

Задача 1

Определить сопротивления растеканию тока одиночных заземлителей вертикального стержневого R_B и горизонтального полосового R_T и сравнить их значения. Размеры одиночных заземлителей и их размещение в земле показаны на рисунке.



Одиночные заземлители – вертикальный стержневой (а) и горизонтальный полосовой (б)

Удельное сопротивление грунта $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Решение:

Подставив исходные данные в выражение для определения сопротивления растеканию тока (см. табл. 2.1) получим:

для вертикального электрода

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \left(\ln \frac{2 \cdot 10}{0,04} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 5,5 + 10}{4 \cdot 5,5 - 10} \right) = 10,8 \text{ Ом};$$

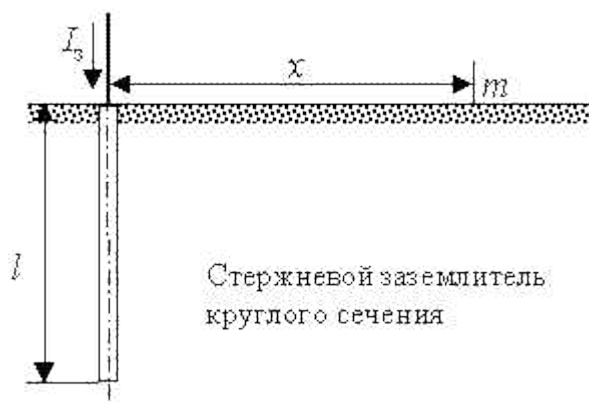
для горизонтального электрода

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \ln \frac{2 \cdot 10^2}{0,04 \cdot 0,8} = 14 \text{ Ом.}$$

Ответ задачи: $R_B = 10,8 \text{ Ом}$; $R_T = 14 \text{ Ом}$.

Задача 2

Ток стекает в землю через стержневой заземлитель круглого сечения, погруженный в землю на глубину $l = 3$ м (см. рисунок).



Определить потенциал точки m на поверхности земли, отстоящей от центра заземлителя на расстояние $x = 20$ м, при токах I_3 , равных 1; 10; 50; 100; 500; 1000 А. Принять удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом*м.

Решение:

Пользуясь известным уравнением потенциальной кривой одиночного стержневого заземлителя (электрода) (2.12)

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x},$$

вычисляем потенциалы на поверхности земли в точке m , отстоящей от центра заземлителя на расстояние $x = 20$ м, при указанных значениях тока по формуле:

$$\varphi = \frac{I_3 \cdot 100}{2\pi \cdot 3} \ln \frac{\sqrt{20^2 + 3^2} + 3}{20} \approx 0,8 \cdot I_3, \text{ В.}$$

Ответ задачи: Результаты вычислений представлены в таблице

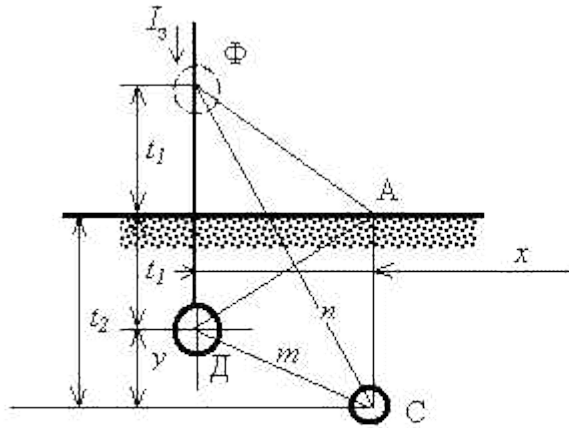
Ток I_3 , стекающий в землю, А	1	10	50	100	500	1000
Потенциал φ в точке m , В	0,8	8,0	40,0	80,0	400,0	800,0

Примечание. Широко распространено мнение, что потенциал земли на расстоянии 20 и более метров от заземлителя, с которого стекает ток,

незначителен, и поэтому его можно принимать равным нулю. Однако ответ, полученный при решении настоящей задачи, свидетельствует, что это мнение справедливо лишь при малых токах, стекающих в землю. В частности, такое положение возможно в сетях до 1000 В.

Задача 3

Ток $I_3 = 100$ А стекает в землю через металлический предмет неправильной формы, который может быть условно уподоблен шару с радиусом $r = 0,5$ м (см. рисунок). Предмет погружен в землю на глубину $t_1 = 3$ м; ток к нему подается по изолированному проводу. Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом*м.



К определению потенциалов на трубопроводе (С), на поверхности земли (А) и на заземлителе, с которого в землю стекает ток.

Требуется определить потенциал φ_c на металлическом трубопроводе С, проложенном в земле на глубине $t_2 = 4$ м и на расстоянии по горизонтали от центра шара $x = 3$ м.

Решение:

Известно, что при бесконечно большой глубине погружения шарового заземлителя в землю потенциал φ в некоторой точке земли, создаваемый током I_3 , А, стекающим с заземлителя, выражается зависимостью (2.1):

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi x},$$

где ρ - удельное сопротивление земли, x – расстояние от центра шара до интересующей нас точки.

Однако, в данном случае шар находится вблизи поверхности земли, поэтому для решения задачи следует воспользоваться методом зеркального отображения. При этом потенциал φ_c , В в некоторой точке С (трубопровод) будет равен сумме потенциалов φ_d и φ_ϕ , В, создаваемых в этой точке полями

токов, стекающих как с действительного, так и с фиктивного заземлителей, В (см. рисунок выше):

$$\varphi_c = \varphi_d + \varphi_{\phi}.$$

С учетом приведенного выше уравнения можно записать:

$$\varphi_c = \frac{I_3 \rho}{4\pi m} + \frac{I_3 \rho}{4\pi n} = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right),$$

где m и n - расстояния от центров действительного и фиктивного заземлителей до трубопровода (точки С), м:

$$m = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + (t_2 - t_1)^2} = \sqrt{3^2 + (4 - 3)^2} = 3,16 \text{ м},$$

$$n = \sqrt{x^2 + (t_2 + t_1)^2} = \sqrt{3^2 + (4 + 3)^2} = 7,6 \text{ м}.$$

Искомый потенциал на трубопроводе С:

$$\varphi_c = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) = \frac{100 \cdot 100}{4\pi} \left(\frac{1}{3,16} + \frac{1}{7,6} \right) = 360 \text{ В}.$$

Ответ задачи: 360 В.