

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербургская государственная академия аэрокосмического
приборостроения

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы

Санкт Петербург
1997

Составители: Н.Ф. Екимова, Т.А. Пожарова, Б.И. Попов, С.С. Симонов,
В.И. Турубаров

Рецензенты: кафедра технологии приборостроения СПГААП;
канд. техн. наук доц. Н.М. Иванов

В лабораторной работе студенты изучают схемы трёхфазных электрических сетей, опасности, возникающие при прикосновении человека к одной из фаз, факторы опасности поражения человека электрическим током, методы исследования сопротивления тела человека, изоляции электрических сетей и проводов, заземляющих и зануляющих устройств.

© Санкт-Петербургская государственная
академия аэрокосмического
приборостроения, 1997

Подписано к печати 5.03.97	Формат 60x84 1/16	Бумага тип №3. Печать офсетная
Усл.печ. п.3,02	Уч.-изд.л. 3,25	Тираж 500 экз.
Заказ №76		

Редакционно-издательский отдел
Отдел оперативной полиграфии СПбГААП
190000, С.-Петербург, ул. Б. Морская, 67

Цель работы: изучение основных схем трёхфазных электрических сетей переменного тока до 1000 В и опасностей, возникающих при прикосновении человека к одной из фаз, исследование факторов, определяющих опасность поражения человека электрическим током, методов теоретического и экспериментального исследования сопротивления тела человека, изоляции электрических сетей и проводов, ознакомление с защитными функциями заземляющих и зануляющих устройств, обеспечивающих электробезопасность при работе с электроустановками, методами их исследования, нормами, приборами и методикой контроля.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Многообразное воздействие электрического тока на организм человека приводит к электротравмам, которые условно подразделяют на электрический удар и местные электротравмы (электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения, электроофтальмия).

Исход поражения человека электрическим током зависит от величины тока, протекающего через тело человека, продолжительности воздействия, частоты тока, пути протекания тока через человека и индивидуальных особенностей организма.

Электрическое сопротивление тела человека и приложенное к нему напряжение (напряжение прикосновения) также влияют на исход поражения, так как они определяют величину тока, проходящего через человека. Напряжение прикосновения – напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек.

Для разработки средств защиты от поражения электрическим током в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82 установлены предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Нормы установлены при условии прохождения тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги. Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном и аварийном режимах работы.

При нормальном режиме работы регламентируются род и частота тока, наибольшие допустимые значения напряжения прикосновения $U_{пр}$ и тока $I_{чел}$, проходящего через человека. При аварийном режиме регламентируются частота и род тока, продолжительность воздействия и предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и тока, протекающего через человека.

На промышленных предприятиях обычно применяются трехпроводные сети с изолированной нейтралью напряжением 36, 42, 127, 220, 380, 660 В и четырехпроводные сети с заземленной нейтралью напряжением 220/127, 380/220, 660/360 В. Также применяются сети постоянного тока напряжением 6, 12, 24, 36, 48, 60, 110, 220, 400 В. На летательных аппаратах применяются сети следующих видов:

- 1) постоянного тока напряжением 27 В – двухпроводные и одно проводные с использованием корпуса летательного аппарата в качестве минусового провода;
- 2) переменного трёхфазного тока (с изолированной или заземлённой силовой нейтралью) напряжением 36, 208 и 360 В, частотой 400 Гц;
- 3) переменного однофазного тока напряжением 115 и 208 В, частотой 400 Гц.

Все случаи поражения человека током являются результатом замыкания электрической цепи через тело в результате прикосновения человека к точкам цепи, между которыми существует напряжение. Вероятность поражения электрическим током оценивается по величине тока $I_{чел}$, или величине напряжения прикосновения $U_{пр}$. Напряжение прикосновения зависит от ряда факторов: схемы включения человека в электрическую цепь, напряжения сети, схемы самой цепи и режима ее нейтрали, степени изоляции токоведущих частей от земли, сопротивления тела человека.

Сопротивление тела человека – величина нелинейная, меняется в широких пределах и зависит от следующих факторов: состояния кожи (сухая, влажная, повреждённая и т.п.); плотности контакта; площади контакта; величины тока, проходящего через человека; величины приложенного напряжения; времени воздействия тока на человека. Наибольшим электрическим сопротивлением в теле человека обладает верхний пороговый слой кожи.

Сухая неповреждённая кожа имеет сопротивление 10-100 кОм. При протекании электрического тока в теле человека происходят сложные биофизические процессы. Условно вариант прикосновения человека (рука-рука) к двум одинаковым электродам можно представить в виде электрической схемы замещения, изображённой на рис. 1.

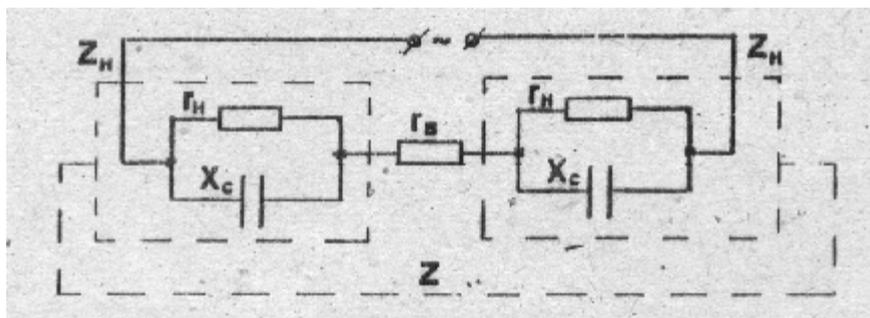


Рис. 1 Электрическая схема замещения тела человека

Здесь Z – полное сопротивление тела человека (рука-рука); Z_H – полное сопротивление наружного слоя кожи; γ_H – активное сопротивление наружного слоя кожи; x_c – ёмкостное сопротивление наружного слоя кожи; γ_B – внутреннее сопротивление рук и корпуса тела.

Обозначив через Z_f полное сопротивление тела человека при данной частоте, можно написать

$$Z_f = 2 \cdot Z_H + \gamma_B.$$

Отсюда

$$Z_H = \frac{Z_f - \gamma_B}{2}, \text{ кОм.} \quad (1)$$

Полное сопротивление человека зависит от ёмкостного сопротивления. Ёмкостное сопротивление определяется частотой:

$$x_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \quad (2)$$

где x_c – ёмкостное сопротивление человека, кОм; ω – круговая частота; f – частота, кГц; C – ёмкость наружного слоя кожи, мкФ.

С увеличением частоты величина x_c стремится к нулю, шунтируя активное сопротивление γ_H . Полное сопротивление тела человека на частотах 10-20 кГц можно представить в виде

$$Z_f = \gamma_B \quad (3)$$

С уменьшением частоты f (ниже 100 Гц) ёмкостное сопротивление возрастает. При $f \rightarrow 0$, $x_c \rightarrow \infty$ и формула (1) примет вид

$$Z_f = Z_0 = 2 \cdot \gamma_H + \gamma_B.$$

Отсюда

$$\gamma_H = \frac{Z_0 - \gamma_B}{2}, \text{ кОм} \quad (4)$$

Где z_0 – сопротивление тела человека при $f \rightarrow 0$

Полное сопротивление тела человека на частотах 0-100 Гц условно можно аппроксимировать линейной зависимостью от частоты. При этом Z_0 может быть определено методом экстраполяции, для чего в линейном масштабе строится график зависимости полного сопротивления от частоты тока, как показано на рис.2. Значение Z_0 расположено на оси ординат при пересечении с прямой $Z_1 - Z_4$.

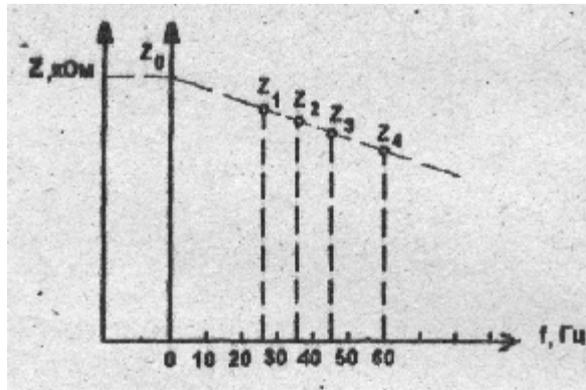


Рис.2 График экстраполяции

По формуле (3) определяем значение $\gamma_{вн}$. По формуле (4) определяется γ_n . Величина полного сопротивления наружного слоя кожи может быть определена из формулы

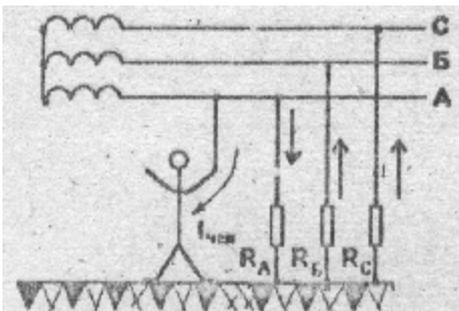
$$\frac{1}{Z_n^2} = \frac{1}{\Gamma_n^2} + \frac{1}{\chi_c^2} \quad , \text{кОм} \quad (5)$$

Из формулы (5) получим ёмкость C наружного слоя кожи

$$C = \frac{\sqrt{\Gamma_n^2 - Z_n^2}}{2 \cdot \pi \cdot Z_n \cdot \Gamma_n \cdot f} \quad , \text{мкФ} \quad (6)$$

Прикосновение к трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью в нормальном режиме

а)



б)

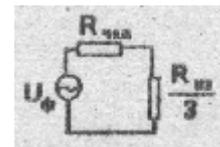


Рис.3. Прикосновение человека к трехфазной сети переменного тока в нормальном режиме: а) схема сети; б) эквивалентная схема

При однофазном прикосновении в сетях с изолированной нейтралью (рис.3) переменный ток, проходящий через человека, замыкается через землю, активное сопротивление изоляции и ёмкость фаз относительно земли. Для сетей малой протяжённости ёмкость фаз относительно земли невелика ($C \approx 0$) и ею можно пренебречь.

Эквивалентная схема цепи замыкания тока с учётом равенства сопротивлений изоляции фаз $R_A = R_B = R_C = R_{из}$ представлена на рис.3,б. Напряжение $U_{пр}$ и ток $I_{чел}$ определяются следующими выражениями:

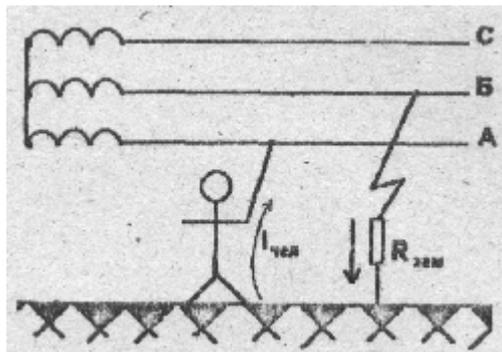
$$I_{чел} = \frac{U_{\phi}}{R_{чел} + \frac{R_{из}}{3}} = \frac{3 \cdot U_{\phi}}{3 \cdot R_{чел} + R_{из}} \quad , \quad (7)$$

$$U_{пр} = \frac{3 \cdot U_{\phi} \cdot R_{чел}}{3 \cdot R_{чел} + R_{из}} \quad , \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) показывают, что в сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одной из фаз в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления изоляции проводов относительно земли. С увеличением сопротивления изоляции опасность уменьшается.

Прикосновение человека к трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью в аварийном режиме

а)



б)

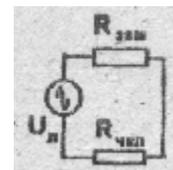


Рис.4. Прикосновение человека к проводу трёхфазной сети с изолированной нейтралью при аварийном режиме: а) схема сети; б) эквивалентная схема

Аварийный режим – замыкание через малое сопротивление или электрический пробой одной или нескольких фаз на землю (рис.4)

Анализируя эквивалентную схему прикосновения, можно написать

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{ф}} \sqrt{3}}{R_{\text{чел}} + R_{\text{зем}}} \quad , \quad (9)$$

$$U_{\text{пр}} = I_{\text{чел}} \cdot R_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{ф}} \sqrt{3} \cdot R_{\text{чел}}}{R_{\text{чел}} + R_{\text{зем}}} \quad . \quad (10)$$

Если в этой формуле принять, что $R_{\text{зем}}=0$ или считать, что $R_{\text{зем}} < R_{\text{чел}}$ (так обычно бывает в действительных условиях), то

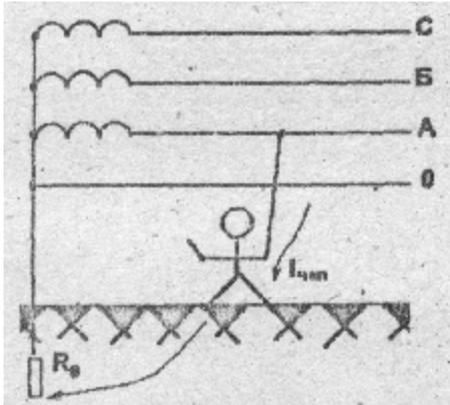
$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \sqrt{3} \quad ,$$

т.е. человек окажется под линейным напряжением $U_{\text{л}}$.

В действительных условиях $R_{\text{зем}} > 0$, поэтому напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшегося в период аварийного режима к исправной фазе трёхфазной сети с изолированной нейтралью, значительно больше фазного и несколько меньше линейного напряжения сети, т.е. случай прикосновения к исправной фазе в аварийном режиме во много раз опаснее прикосновения к той же фазе сети при нормальном режиме работы.

Прикосновение человека к одной из фаз трёхфазной сети переменного тока с глухозаземленной нейтралью при нормальном режиме работы.

а)



б)

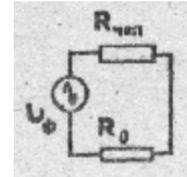


Рис.5. Прикосновение человека к одной из фаз трёхфазной сети с глухозаземленной нейтралью: а) схема сети; б) эквивалентная схема

При нормальном режиме работы сети (рис.5) проводимости фазных и нулевого проводов относительно земли достаточно малы по сравнению с проводимостью заземлителя нейтрали и ими можно пренебречь. Тогда, исходя из эквивалентной схемы прикосновения рис.5.б, $I_{чел}$ и $U_{пр}$ будут определяться следующими выражениями:

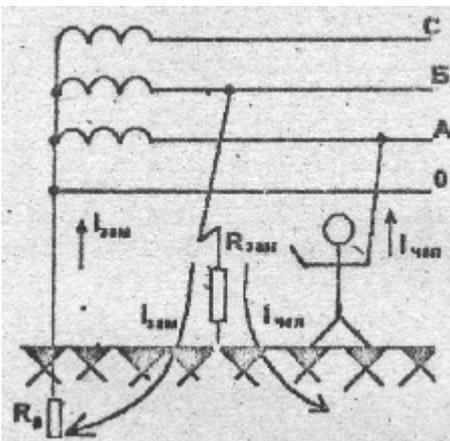
$$I_{чел} = \frac{U_{ф}}{R_{чел} + R_0} \quad (11)$$

$$U_{пр} = \frac{U_{ф} \cdot R_{чел}}{R_{чел} + R_0} \quad (12)$$

Полагая, что $R_0 < R_{чел}$, можно считать, что при прикосновении к одной из фаз напряжение прикосновения близко к фазному напряжению. Кроме того, в таких сетях сопротивление изоляции не влияет на величину тока, проходящего через человека, так как человек включен параллельно сопротивлению изоляции.

Прикосновение человека к одной из фаз трёхфазной сети переменного тока с глухозазёмленной нейтралью при аварийном режиме работы

а)



б)

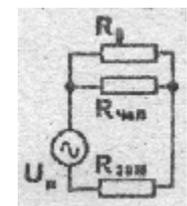


Рис.6. Прикосновение человека к фазному проводу трёхфазной сети с заземлённой нейтралью при аварийном режиме: а) схема сети; б) эквивалентная схема

В случае, когда одна из фаз сети замкнута на землю через относительно малое сопротивление $R_{зам}$ (рис.6), $I_{чел}$ и $U_{пр}$ определяются зависимостями

$$I_{чел} = U_{\phi} \frac{R_{зам} + R_0 \sqrt{3}}{R_{зам} R_0 + R_{чел} (R_{зам} + R_0)} \quad (13)$$

$$U_{пр} = U_{\phi} R_{чел} \frac{R_{зам} + R_0 \sqrt{3}}{R_{зам} R_0 + R_{чел} (R_{зам} + R_0)} \quad (14)$$

Если принять сопротивление замыкания равным нулю, то

$$U_{пр} = U_{\phi} \sqrt{3} = U_{л}$$

т.е. человек окажется под линейным напряжением. Если сопротивление заземления нейтрали равно нулю, то

$$U_{пр} = U_{\phi}$$

т.е. человек окажется под фазным напряжением.

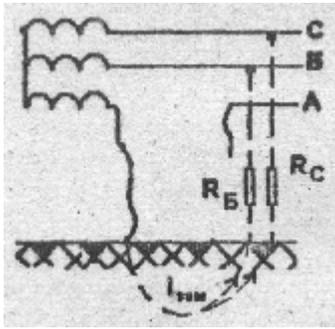
Однако в практических условиях сопротивление $R_{зам}$ и R_0 всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в период аварийного режима к исправному фазному проводу трёхфазной сети с заземленной нейтралью, всегда меньше линейного, но больше фазного.

Таким образом прикосновение еловека к исправной фазе сети с заземлённой нейтралью в период аварийного режима более опасно, чем при нормальном режиме.

Шаговое напряжение и напряжение прикосновения

При обрыве провода, пробое изоляции с замыканием фазы на корпус или на землю (аварийный режим) возможно поражение человека электрическим током при касании корпуса электроаппарата или попадании человека в зону растекания тока. Если фазный провод соединяется проводником с землёй, то происходит стекание тока на землю. Контакт фазы с землёй может осуществляться случайным образом (при обрыве провода, касании металлической конструкции и т.п.) или через заземлитель, например, при пробое фазы на заземленный металлический корпус электроустановки. На рис.7.а изображён случай обрыва провода в сети с изолированной нейтралью, на рис.7.б – случай замыкания фазы на землю в сети с заземлённой нейтралью, на рис.8 – пробой фазы на заземлённый корпус в сети с изолированной нейтралью и на рис.9 – пробой фазы на корпус в сети с заземлённой нейтралью. Цепь, по которой проходит ток замыкания $I_{зам}$, показана на рисунках пунктиром. Явления, сопровождающие процесс стекания тока в землю, одинаковы как при случайном соединении фазы с землёй, так и при контакте фазы с заземлителем, поэтому, в дальнейшем, можно ограничиться рассмотрением процесса стекания тока в землю через заземляющее устройство. При прохождении тока замыкания через заземлитель последний приобретает потенциал, который можно измерить как разность потенциалов между точкой ввода тока в заземлитель и любой из точек зоны нулевого потенциала, т.е. зоны, удалённой от заземляющего устройства на бесконечно большое расстояние. В сети с изолированной нейтралью ток замыкания возвращается в сеть через распределённые сопротивления изоляции фаз $R_{из}$. В сети с заземлённой нейтралью ток замыкания возвращается в сеть через заземлитель нейтрали (рис.7.б). При незначительных размерах заземлителя по сравнению с протяжённостью сети можно условно считать, что сопротивление изоляции $R_{из}$ расположено на бесконечно большом удалении от заземляющего устройства, т.е. в зоне нулевого потенциала. На практике зоной нулевого потенциала считают область поверхности земли, в пределах которой при стекании тока с заземлителя отсутствует градиент потенциала. В большинстве случаев эта зона располагается на расстоянии свыше 20м от заземлителя.

а)



б)

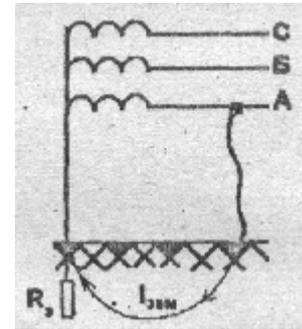


Рис.7. Замыкание фазы на землю в сетях с изолированной (а) и заземлённой (б) нейтралью

Пространство между заземлителем и зоной нулевого потенциала, т.е. область, в пределах которой при стекании тока с заземлителя возникает заметный градиент потенциала, называется зоной растекания. Наличие градиента потенциала в зоне растекания приводит к появлению "напряжения шага", т.е. разности потенциалов между двумя точками земли, на которых одновременно стоит человек, и находящихся друг от друга на расстоянии шага (~0,8м).

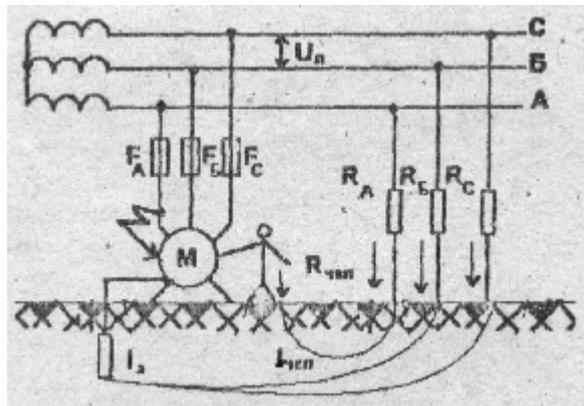


Рис.8. Принципиальная схема защитного заземления

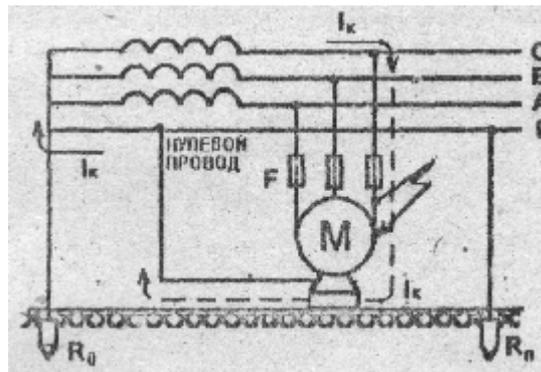


Рис.9. Принципиальная схема зануления: М-зануляемое одорудование; R_0 -сопротивление заземлителя нейтрали; R_n -сопротивление повторного заземлителя нулевого провода; F-предохранитель; I_k -ток короткого замыкания

Опасным фактором для человека является также "напряжение прикосновения", которое в данном случае определяется как напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (корпус) при одновременном прикосновении к ним человека. Для полушарового заземлителя радиусом r_0 (рис.10) распределение потенциала по поверхности земли может быть достатоно просто описано аналитически. Если грунт однороден по удельному сопротивению, то ток в земле растекается во все стороны по радиусам полусферы. Тогда плотность тока j на

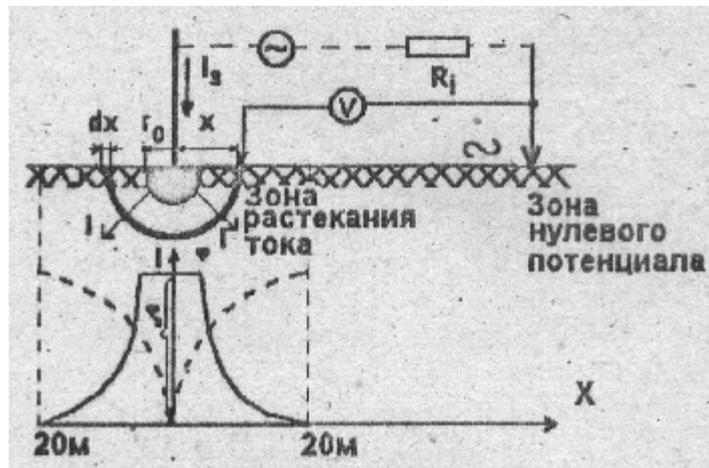


Рис.10. Распределение потенциала на поверхности земли вокруг полушарового заземлителя

Расстоянии x от центра заземлителя составит

$$j = \frac{I_3}{2 \cdot \pi \cdot x^2}$$

В соответствии с законом Ома напряжённость электрического поля E в зоне растекания тока связана с плотностью тока j и удельным сопротивлением среды (грунта) ρ следующим выражением:

$$E = \rho \cdot j$$

Потенциал любой точки на поверхности земли в зоне растекания тока, определенный относительно бесконечности, равен падению напряжения в грунте за пределами полусферы радиусом x

$$\varphi_x = \int_x^{\infty} dU$$

Где x – расстояние от центра заземлителя до точки определения потенциала φ_x ; dU – падение напряжения в элементарном слое толщиной dx .

Так как $dU = E dx$, то распределение потенциала в зоне растекания тока имеет вид гиперболы:

$$\varphi_x = \int_x^{\infty} E dx = \frac{I_3 \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{I_3 \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{x}$$

Потенциал заземлителя равен потенциалу точки с координатой $x = r_0$, т.е. $\varphi_3 = I_3 \cdot \rho / 2 \cdot \pi \cdot r_0$. Следовательно, для любой точки поверхности земли в зоне растекания тока можно записать:

$$\varphi_x / \varphi_3 = r_0 / x \quad (14)$$

где x – координата точки

Из определения напряжения прикосновения следует, что человек, касающийся корпуса заземленной электроустановки и находящийся на расстоянии x от заземлителя, будет находиться под действием напряжения прикосновения $U_{пр}(x)$

$$U_{пр} = \varphi_a - \varphi_x = \varphi_a * \left(1 - \frac{\Gamma_0}{x} \right) \quad (15)$$

Напряжение шага или шаговое напряжение можно определить как

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a} = \varphi_a * \left(\frac{\Gamma_0}{x} - \frac{\Gamma_0}{x+a} \right) \quad (16)$$

Где $U_{ш}$ – напряжение шага; a – ширина шага при движении человека по направлению к заземлителю или величина проекции шага на это направление.

Для уменьшения значений напряжения прикосновения и шага используется «выравнивание потенциалов» с помощью дополнительных заземлителей, расположенных друг от друга на расстоянии, меньше 40см. На рис.11 приведено распределение потенциала в системе из двух заземлителей. В зоне между двумя заземлителями напряжение прикосновения и шаговое напряжение уменьшаются. Степень выравнивания потенциала прежде всего зависит от расстояния между дополнительными заземлителями.

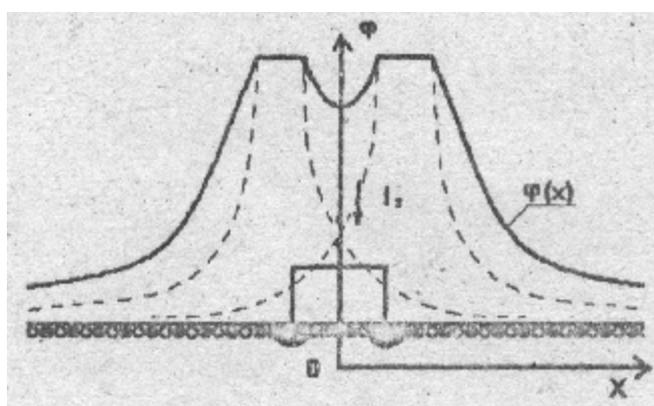


Рис.11. Распределение потенциала в групповом заземлителе из двух полусферических электродов

Защитное заземление и зануление

В каждой электроустановке, в зависимости от ее вида и назначения, условий эксплуатации и других факторов, предусматриваются различные защитные меры от поражения электрическим током. В процессе эксплуатации, при введении электроустановок в действие и ремонте необходимо контролировать состояние средств защиты человека от поражения электрическим током. Металлические нетоковедущие части электроустановок при разрушении изоляции и замыкании на корпус могут оказаться под напряжением. Прикосновение человека к таким частям столь же опасно, как и непосредственное прикосновение к токоведущим частям.

Для защиты человека от поражения электрическим током применяют защитное заземление, зануление совместно с защитным отключением, а также надёжную изоляцию токоведущих частей оборудования.

Защитное заземление – преднамеренное соединение металлических нетоковедущих частей электроустановок с землей или её эквивалентом. Оно обеспечивает снижение напряжения прикосновения при пробое изоляции на корпус до безопасного значения и применяется в сетях напряжением до 1000В с изолированной нейтралью и в сетях напряжением выше 1000В как с изолированной так и с заземленной нейтралью. Для обеспечения безопасности защитное заземление должно иметь сопротивление, во много раз меньше сопротивления тела человека. Тогда основная часть тока замыкания будет протекать через заземлитель, при этом $I_{чел}$ и $U_{пр}$ будут малы и опасности при прикосновении к заземлённому корпусу не возникает.

Зануление обеспечивает защиту человека за счет отключения аварийной электроустановки от сети при замыкании на корпус и применяется в сетях напряжением до 1000В с глухим заземлением нейтрали. Зануление – преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей металлических нетоковедущих частей (рис.9). Оно превращает замыкание на корпус в однофазное короткое замыкание, вызывающее срабатывание защитного отключения (плавкий предохранитель, АЗС и т.п.). Защитное отключение должно отключить повреждённую фазу от корпуса оборудования.

В цепи нулевых защитных проводников не допускается включение предохранителей и других разъединяющих приспособлений. Как правило, нулевой защитный проводник повторно заземляется для снижения напряжения на корпусе, в момент короткого замыкания, а также для уменьшения опасности при обрыве нулевого провода.

В соответствии с ПУЭ программа испытаний заземляющих и зануляющих устройств включает в себя измерение сопротивления заземляющего устройства, проверку наличия цепи между заземлителями и заземленными элементами, проверку полного сопротивления цепи «фаза-нуль» (в установках напряжением до 1000В с глухим заземлением нейтрали), измерение удельного электрического сопротивления грунта и т.п.

Измерение сопротивления заземления

Величина сопротивления заземляющих устройств, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), нормируется в зависимости от напряжения сети, мощности электроустановок и режима нейтрали. Сопротивление заземляющего устройства R_z зависит от удельного сопротивления грунта ρ , диаметра d и глубины заложения t заземлителей, их количества, длины соединительной полосы и глубины её заложения и ряда других факторов. Сопротивление одиночного стержневого заземлителя выражается формулой

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi \times L} * \left(\ln \frac{2 \times L}{d} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 \times t + L}{4 \times t - L} \right) \quad (17)$$

Удельное сопротивление грунта зависит от его вида (песок, глина и т.п.), влажности, температуры и содержания в нём солей. Ориентировочные значения удельных сопротивлений различных грунтов приведены в Прил.2.

В процессе эксплуатации в результате коррозии под действием токов замыкания на землю, высыхания грунта вблизи заземлителей увеличивается сопротивление заземляющего устройства. Это вызывает необходимость определения фактических параметров заземляющих устройств и контроля их технического состояния как перед началом эксплуатации, так и периодически в процессе эксплуатации.

Измерение сопротивления заземляющих устройств для цеховых электроустановок следует проводить перед вводом в эксплуатацию и в последующем не реже 1 раза в год. Измерения должны проводиться в периоды наименьшей проводимости грунта: один год – летом при наибольшем просыхании грунта, другой год – зимой при наибольшем промерзании грунта.

Измерить сопротивление заземляющих устройств можно методом амперметр-вольтметра, методом «трёх земель» (или трёх измерений), прибором типа МС-08.

Для измерения сопротивления заземляющего устройства любым методом необходимо создать цепь тока через землю. Для этого необходимы ещё два дополнительных заземлителя – вспомогательный (токовый) R_v и зонд (потенциальный) R_z . Вспомогательный заземлитель создаёт цепь тока. Назначение зонда – получение точки с нулевым потенциалом, т.е. точки, в которой ток растекания практически отсутствует и по отношению к которой может быть измерен потенциал испытуемого заземлителя.

Точность измерения сопротивления заземляющих устройств зависит от правильного взаимного расположения испытуемого и вспомогательных заземлителей и от расстояния между ними. Для получения результатов измерений с погрешностью, не превышающей $\pm 10\%$ (для сосредоточенного заземлителя), минимальное расстояние между заземлителями должно быть не менее 20см.

Для измерения сопротивления заземляющих устройств должен применяться переменный ток, так как при протекании в земле постоянного тока возникает ЭДС поляризации электродов, искажающая результат измерения. Величина тока не оказывает существенного влияния на результат измерения, но при слишком малой его величине не сказывается влияние посторонних токов. При измерении нужно применять небольшие напряжения исходя из условий безопасности.

Метод амперметра-вольтметра позволяет измерять практически любые величины сопротивлений заземляющих устройств с достаточной степенью точности.

Сопротивление испытуемого заземлителя равно:

$$R_x = U_x / I_x, \text{ Ом} \quad (18)$$

Где U_x – напряжение испытуемого заземлителя относительно точки с нулевым потенциалом, в которую помещён зонд R_3 , В (рис.12); I_x – ток, проходящий через испытуемый заземлитель, А.

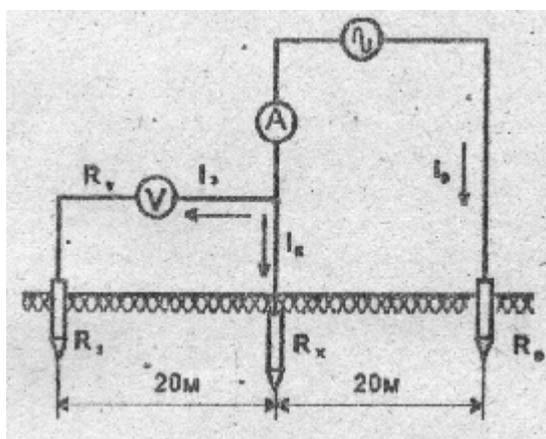


Рис.12. Метод амперметра-вольтметра

Для уменьшения погрешности измерения сопротивление вольтметра должно превышать сопротивление зонда в 50 раз и более. В этом случае погрешность измерения не превысит 2%.

Прибор типа МС-08 реализует метод амперметра-вольтметра. Роль амперметра и вольтметра в приборе выполняет магнитоэлектрический логометр. Прибор МС-08 имеет свой источник тока и клеммы для подключения к испытуемому заземлителю, зонду и вспомогательному электроду (рис.13). Шкала прибора проградуированна в омах. Погрешность измерения не превышает 10% при сопротивлении зонда до 1000Ом.

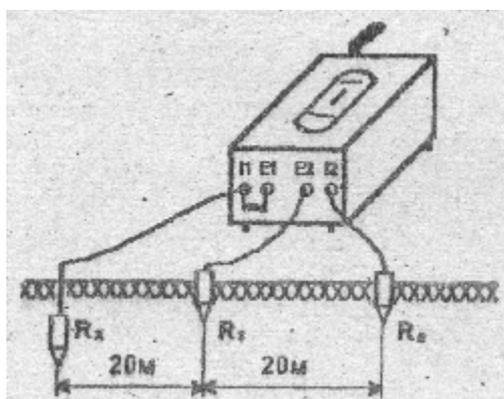


Рис.13 Схема измерения сопротивления заземляющих устройств прибором типа МС-08

Метод «трёх земель» или метод трёх измерений амперметром-вольтметром позволяет использовать вольтметр с малым внутренним сопротивлением.

Измерения проводят последовательно при подключении источника питания и прибора по схемам. Приведённым на рис.14. Для каждой пары заземлителей находят величину тока и падение напряжения на них. Так как

$$R_x + R_y = U_1/I_1 = R_1 \quad , \quad (19)$$

$$R_x + R_z = U_2/I_2 = R_2 \quad , \quad (20)$$

$$R_y + R_z = U_3/I_3 = R_3 \quad , \quad (21)$$

то величину сопротивления испытуемого заземлителя находят путём решения системы уравнений как

$$R_x = 0,5 \cdot (R_1 + R_2 - R_3) \quad , \quad (22)$$

Недостатком метода является большая (более 10%) погрешность измерения из-за того, что сопротивление вспомогательных заземлителей значительно больше сопротивления испытуемого заземлителя.

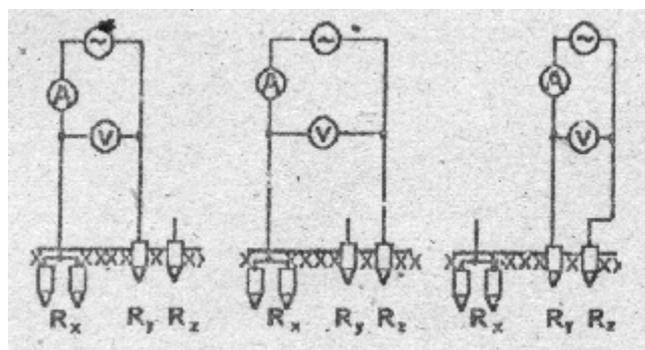


Рис.14. Схемы подключения приборов при измерении сопротивления заземлителя методом «трёх земель»

Измерение сопротивления цепи фаза-нуль

Измерение сопротивления цепи «фаза-нуль»- основная проверка действия системы зануления, т.е. отключения аварийного участка при замыкании на корпус. Это измерение даёт возможность проверить правильность выбора плавких вставок предохранителей и автоматов защиты.

Измерение ведётся на отключенном оборудовании, а для создания цепи тока при измерении фазный провод с помощью выключателя ВК2 (рис.15) соединяют с корпусом проверяемого оборудования. Полное сопротивление цепи «фаза-нуль» определяется по формуле

$$Z_n = U/I \quad , \text{ Ом} \quad (23)$$

где U – показания вольтметра, В; I – показания амперметра, А.

Быстрое и надёжное отключение повреждённого участка сети достигается при выполнении условия

$$I_k > k \cdot I_n \quad , \text{ А} \quad (24)$$

где I_n – номинальный ток плавкой вставки предохранителя или автомата защиты, А; k – коэффициент, значение которого регламентируется ПУЭ (Прил.3, табл.1); I_k – ток однофазного короткого замыкания на корпус.

$$I_{\text{к}} = \frac{0,85 \cdot U_{\text{ф}}}{Z_{\text{г}} + Z_{\text{т}}/3}, \text{ А} \quad (25)$$

где $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети, В; $Z_{\text{т}}$ – расчётное сопротивление обмоток трансформатора, Ом (Прил.3, табл.2); 0,85 – коэффициент, учитывающий возможное снижение фазного напряжения в процессе эксплуатации и переходное сопротивление в месте замыкания.

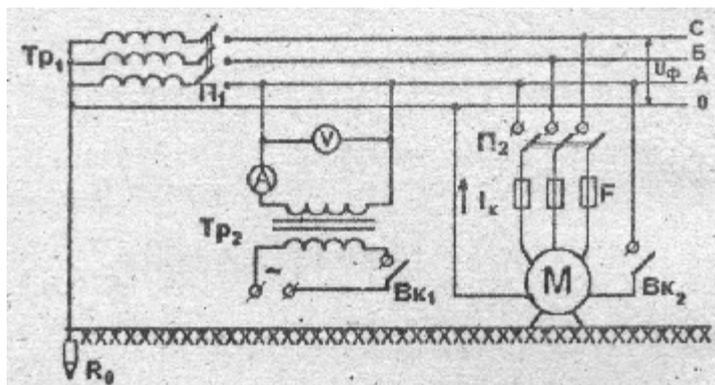


Рис.15. Схема подключения приборов для измерения сопротивления цепи «фаза-нуль»: М – испытуемая электроустановка; R_0 – сопротивление заземлителя нейтрали; П1 – выключатель силовой цепи; П2 – выключатель испытуемой электроустановки; Вк1 – выключатель понижающего трансформатора; Tr1 – силовой трансформатор; Tr2 – понижающий трансформатор; F – предохранитель; $I_{\text{к}}$ – ток короткого замыкания

Измерение удельного сопротивления грунта

Наиболее распространёнными методами измерения удельного сопротивления грунта ρ (Ом*см) являются метод пробного (контрольного) электрода и метод четырёх электродов.

При измерении методом пробного электрода в исследуемый грунт забивают контрольный электрод в виде трубы (стержня, уголка) таких же размеров и на такую же глубину, как у действительного заземлителя. Кроме контрольного электрода в грунт забивают вспомогательный заземлитель и зонд. Затем любым из указанных выше методов измеряют сопротивление контрольного электрода R_x .

Удельное сопротивление грунта (контрольный электрод – труба, забитая вровень с поверхностью земли) вычисляют по формуле

$$\rho = 2,73 \cdot R_x \cdot L / \lg(4 \cdot L / d) \quad (26)$$

где R_x – сопротивление контрольного электрода, Ом; L и d – его длина и диаметр соответственно, см.

Контрольные электроды необходимо забивать в разных местах исследуемой площади и определять среднее значение удельного сопротивления грунта.

При измерении удельного сопротивления грунта методом четырёх электродов (рис.16) в исследуемый грунт забивают на одинаковом расстоянии d друг от друга четыре электрода, располагая их на одной прямой линии. Электроды подключают к измерителю сопротивления заземления типа МС-08 таким образом, чтобы крайние электроды А и Д были соединены с токовыми клеммами П1 и П2, а средние электроды В и С с потенциальными клеммами Е1 и Е2. Падение напряжения в рунте между электродами В и С прямо пропорционально удельному сопротивлению грунта ρ и величине тока, протекающего на этом участке, и обратно пропорционально расстоянию d между электродами $U = I \cdot \rho / 2 \cdot \pi \cdot d$, откуда

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot R \quad (27)$$

где R – показания прибора МС-08, Ом; d – расстояние между электродами, см.

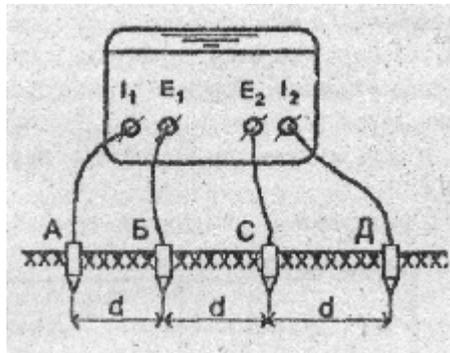


Рис.16. Схема соединения электродов с измерителем заземления типа МС-08 для измерения удельного сопротивления грунта

Для учета возможной неоднородности грунта делают несколько измерений при значениях $d=50, 75, 100$ см и определяют среднее арифметическое значение удельного сопротивления.

Измерение сопротивления изоляции

Основными видами оценки качества электрической изоляции являются измерение величины сопротивления изоляции и испытание изоляции на электрическую прочность.

Измерение изоляции обычно измеряется на постоянном токе при помощи мегаомметра и является основным показателем состояния изоляции сетей, электроаппаратов, приборов и проводов.

Проверку сопротивления изоляции электрооборудования, работающих при номинальном напряжении до 500В, производят мегаомметром на 500В, а при номинальном напряжении свыше 500В – мегаомметром на 1000В.

На рис.17 представлен участок трёхфазной сети переменного тока с изолированной

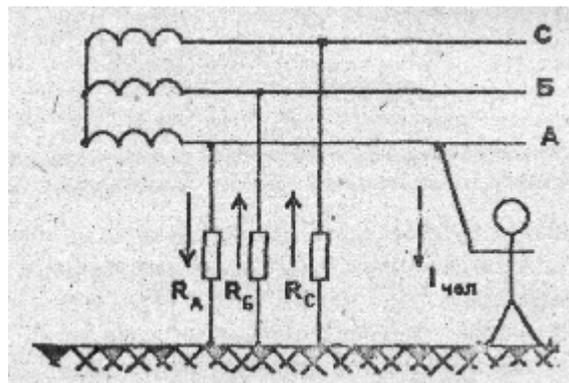


Рис.17. Схема участка трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью: R_A, R_B, R_C – сопротивление изоляции фаз относительно земли

нейтралью. В таких схемах обычно измеряется сопротивление изоляции каждой фазы относительно земли. Величина сопротивления изоляции отдельной фазы относительно земли не может служить критерием безопасности, так как ток замыкания на землю, а следовательно, и ток через человека, определяется полным сопротивлением изоляции всей сети относительно земли.

Полное сопротивление изоляции сети определяется по формуле

$$R = \frac{R_A \cdot R_B \cdot R_C}{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_A \cdot R_C} \quad , \quad (28)$$

Зная полное сопротивление изоляции сети, можно получить значение величины тока через человека, при прикосновении его к одной из фаз, из следующего выражения:

$$I_{\text{чел}} = \frac{3 \cdot U_{\Phi}}{3 \cdot R_{\text{чел}} + R_{\text{из}}} \quad (29)$$

Наиболее полное представление о состоянии изоляции сети и электроустановки с точки зрения безопасной эксплуатации может быть получено в том случае, если сопротивление изоляции данной сети и электроустановки измерено в нормальных эксплуатационных условиях, т.е. при рабочем напряжении и включенных токоприёмниках. В этих условиях учитывается сопротивление изоляции всех участков сети, а также зависимость сопротивления от напряжения. Этому требованию наиболее полно удовлетворяют устройства непрерывного контроля сопротивления изоляции.

Наибольшее распространение получили так называемы схемы непрерывного контроля сопротивления изоляции на выпрямленных токах. Контроль сопротивления изоляции выпрямленными токами предполагает использование так называемых вентильных схем. В таких схемах необходимые для работы токи образуются посредством трёх вентиляей, подключенных к фазам контролируемой сети (рис.18). Общая точка вентиляей, соединяется с землёй через килоомметр PR и сигнальное реле К. Килоомметр измеряет сопротивление изоляции сети относительно земли, а сигнальное реле приводит в действие световую или звуковую сигнализацию при снижении сопротивления изоляции ниже установленного предела.

Среднее значение тока нагрузки в вентильной схеме контроля изоляции не зависит от

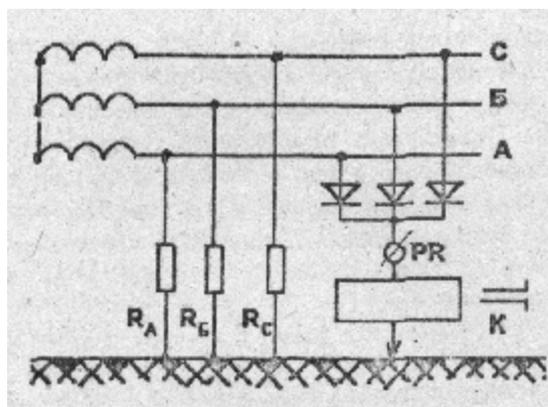


Рис.18. Вентильная схема контроля сопротивления изоляции: VD – диоды; PR – килоомметр; К – реле; Ra, Rб, Rc – сопротивление изоляции фаз

асимметрии сопротивлений изоляции отдельных фаз и всегда пропорционально полному сопротивлению изоляции относительно земли.

Схемы непрерывного контроля состояния изоляции с помощью трёх вольтметров (рис.19) по своему принципу действия не могут осуществлять измерение величины

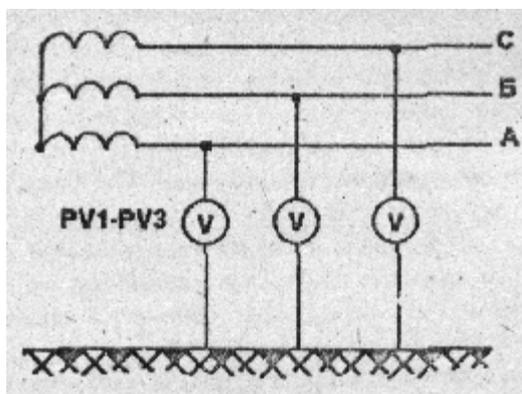


Рис.19. Схема непрерывного контроля изоляции с помощью трёх вольтметров

сопротивления изоляции сети относительно земли. Их главное назначение состоит в контроле однофазных замыканий на землю, т.е. повреждений, при которых сопротивление сети относительно земли становится близким к нулю.

При исправной изоляции вольтметры показывают напряжение, приблизительно равное фазному. В случаях глухого замыкания на землю один из них показывает нуль, а два других – линейное напряжение. По показаниям вольтметра можно судить лишь о наличии или отсутствии замыканий на землю, а не о величине сопротивления изоляции. При симметричном снижении сопротивлений вплоть до короткого замыкания вольтметры будут постоянно показывать напряжения, равные фазному.

Требования, предъявляемые к сопротивлению изоляции

Контроль сопротивления изоляции производится не только для электрических сетей, но и для любых видов электрооборудования, электрических машин, приборов и аппаратов. Величина сопротивления изоляции оценивается по нормам, которые указаны в действующих электротехнических правилах, стандартах и ТУ.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) требуют, чтобы сопротивление изоляции силовой и осветительной сети напряжением до 1000В на участке между двумя смежными предохранителями или за последними предохранителями между любым проводом и землёй, а также между двумя любыми проводами было не менее 0,5 МОм.

Проверка сопротивления изоляции бортовой сети разделяется на проверку сопротивления изоляции всей силовой сети и проверку сопротивления изоляции отдельных фидеров. Сопротивление изоляции всей однопроводной сети постоянного тока при выключенных потребителях и отключенных от корпуса летательного аппарата потребителях, не имеющих выключателей, при влажности воздуха не выше 70% должно быть не менее 0,3 МОм. Сопротивление изоляции каждого фидера при влажности воздуха не выше 70% должно быть не менее 10МОм – при числе потребителей в фидере до трёх; 8МОм – при числе потребителей в фидере больше трёх.

Согласно ГОСТ 16325-76 сопротивление изоляции электрических цепей электронных цифровых вычислительных машин общего назначения (ЭВМ) зависят от максимального рабочего напряжения цепи и должно быть в нормальных климатических условиях, соответственно, не менее 5, 20 и 100 МОм при напряжениях 100, 500, 10000 В. При повышенной температуре сопротивления изоляции ЭВМ уменьшаются до значений 1; 5; 20 МОм. При повышенной влажности (свыше 80%) сопротивления изоляции должны быть, соответственно, не менее 0,2; 1; 2 МОм.

Бортовые сети летательных аппаратов выполняются проводами различных марок, но наиболее часто используются следующие:

а) провод БПВЛ с изоляцией из винилового пластиката в лакированной оплётке из хлопчатобумажной пряжи, токонесущая жила из медных проволок, применяется для эксплуатации при температуре окружающей среды от +70 до -60°С. Провод БПВЛЭ – то же, что и БПВЛ, но в экранированной плетёнке. Сопротивление изоляции проводов должно быть не менее 500 МОм/м;

б) провод БПТ-250 и БПТЭ-250 с изоляцией из фторопласта-4, обмотанный и оплетённый стекловолокном и пропитанный лаком, эксплуатируется при температуре от -60 до +250°С. Сопротивление изоляции после воздействия температуры +250°С должно быть не менее 500МОм/м;

в) провод БНФ и БНФЭ с полиамидно-фторопластовой изоляцией.

Токоведущие жилы из посеребрённой меди или никелированной проволоки, применяются для эксплуатации при температуре окружающей среды от -60 до +200°С. Сопротивление изоляции после воздействия температуры +200°С должно быть не менее 10000МОм/м.

В производственных помещениях для выполнения осветительных и силовых сетей широко применяются провода марок ПР и АПР. Провод ПР с медной жилой, резиновой изоляцией, в оплётке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом, применяется при напряжении до 500В. Провод АПР – то же, что и ПР, но жила из алюминия. Сопротивление изоляции должно быть не менее 200МОм/м.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для экспериментального исследования опасностей поражения человека электрическим током созданы два лабораторных стенда. В первом стенде смоделирована электрическая схема замещения тела человека, схема трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью, схема трёхфазной сети переменного тока с изолированной и заземлённой нейтралью, работающая в аварийном режиме, схема непрерывного контроля состояния изоляции сети, схема трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью для исследования изоляции. На стенде представлены различные марки проводов летательных аппаратов и силовых сетей для исследования изоляции.

Для исследования защитных функций заземляющих и зануляющих устройств в лабораторных условиях применён второй стенд, в котором смоделированы явления растекания тока в земле, различные варианты измерения сопротивления заземляющих устройств, цепь фаза-нуль и участок земли, удельное сопротивление грунта которого необходимо измерить.

Модель электрической схемы замещения тела человека

Электрическая схема замещения тела человека показана на вертикальной панели стенда и рис.1. В схему исследования включен звуковой генератор ГЗ-33 и милливольтметр ВЗ-38 с шунтом. Клеммы подключения приборов (1,2,3) выведены на горизонтальную панель стенда. Соединение приборов показано на рис.20.

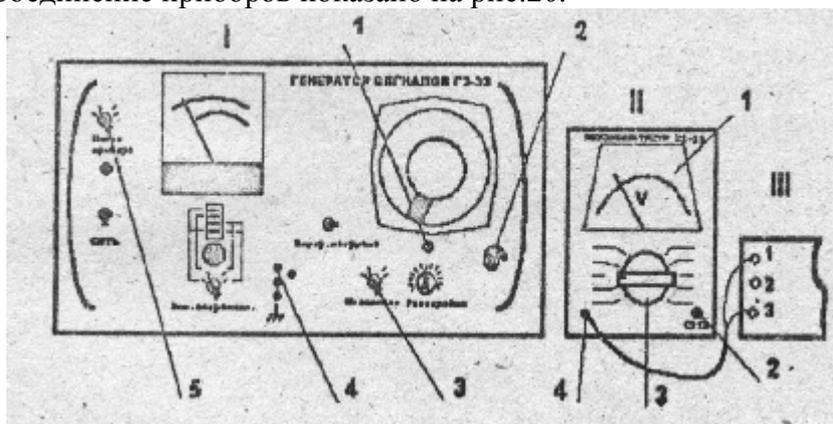


Рис.20. Схема подключения приборов к стенду: I – генератор сигналов типа ГЗ-33; II – милливольтметр ВЗ-38; III – стенд (модель электрической схемы замещения человека)

1. Генератор сигналов типа ГЗ-33:

1 – плавная установка частоты; 2 – потенциометр установки выходного уровня; 3- ступенчатая установка частоты; 4 – выходные гнезда синусоидального сигнала; 5 – переключатель амплитуды выходного сигнала;

2. Милливольтметр ВЗ-38:

1 – индикатор; 2 – выключатель сети; 3 – переключатель пределов измерений; 4 – вход.

3. Стенд

Генератор сигналов типа ГЗ-33 представляет собой источник синусоидальных электрических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты. Частота устанавливается по диапазону переключателем 3 «Множитель». Амплитуда выходного напряжения регулируется потенциометром 2 «Рег. Выхода».

Милливольтметр ВЗ-38 предназначен для измерения напряжения переменного тока синусоидальной формы. Вольтметр обеспечивает измерение среднеквадратического напряжения синусоидальной формы от 0,1 мВ до 300В в диапазоне частот от 20 Гц до 5 МГц.

Модель трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью

Исследуемая схема трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью показана на рис.21

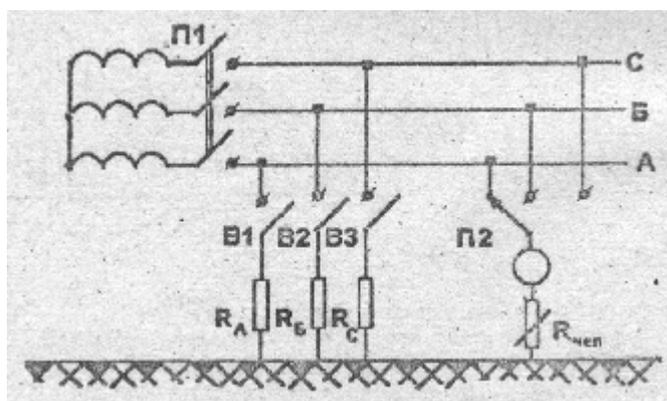


Рис.21. Схема исследуемой трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью

Одной из фаз, в зависимости от положения переключателя П2, меняя значение $R_{чел}$, можно исследовать изменение величины тока, протекающего через человека при прикосновении его к одной из фаз, а меняя значение $R_{из}$ фаз (R_A, R_B, R_C) – зависимость тока через человека $I_{чел}$ от изменения сопротивления изоляции фаз.

Все регулировочные элементы схемы вынесены на горизонтальную панель стенда, там же размещён миллиамперметр.

Модель трёхфазной сети переменного тока с изолированной и заземлённой нейтралью

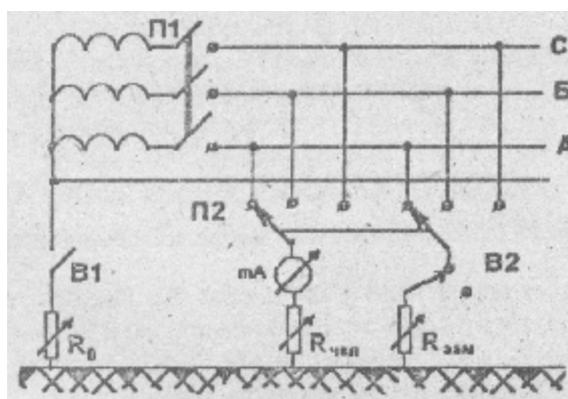


Рис.22. Схема исследуемой трёхфазной сети переменного тока с изолированной и заземлённой нейтралью

На рис.22 представлена схема трёхфазной сети переменного тока, которая с помощью выключателя В1 моделируется в сеть с изолированной нейтралью (В1 «Выкл») или в сеть с глухозаземлённой нейтралью (В1 «Выкл»).

Выключателем В2 можно моделировать замыкание одной из фаз на землю, т.е. работа схемы превращается в аварийный режим. Меняя значение $R_{чел}$, R_0 и $R_{зам}$, исследуется величина тока через человека $I_{чел}$ при нормальном и аварийном режиме работы схемы.

На горизонтальной панели стенда расположены все регулируемые элементы схемы, выключатели и миллиамперметр.

Схема непрерывного контроля сопротивления изоляции.

Исследуемая схема непрерывного контроля сопротивления изоляции представлена на рис.23.

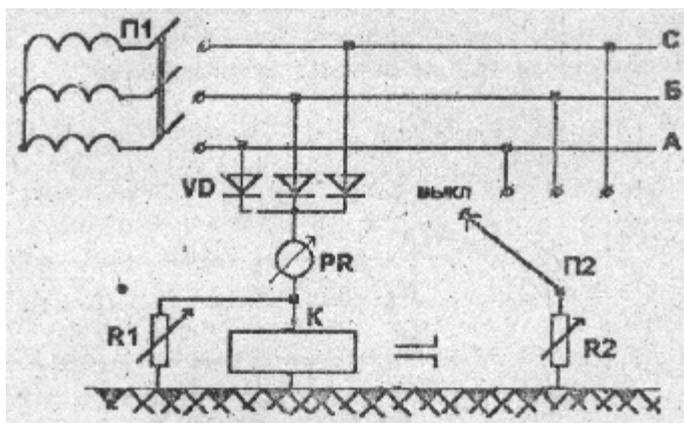


Рис.23. Схема непрерывного контроля сопротивления изоляции

Схема состоит из вентиляных диодов VD, километра магнитоэлектрической системы PR, исполнительного реле К, регулировочных сопротивлений R1 и R2, переключателей П1 и П2. Потенциометр R2 с помощью переключателя П2 подключается к одной из фаз исследуемой сети. По километру потенциометром R2 устанавливается требуемое значение полного сопротивления изоляции, а потенциометром R1 – ток срабатывания реле, фиксируемый загоранием сигнальной лампочки. После настройки схемы переключатель П2 устанавливается в положение «Выкл».

Модель трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью для исследования сопротивления изоляции

Схема трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью показана на вертикальной панели стенда. Сопротивление изоляции отдельных фаз сети относительно земли обозначены соответственно R_a , R_b , R_c . На горизонтальной панели стенда находятся клеммы А, Б и С, соединённые с соответствующими фазами сети и клемма «Земля».

Исследование проводов

В правой части стенда расположены исследуемые провода марок БПВЛ, БПВЛЭ, БПТ-250, ПР и АПР. На горизонтальной панели стенда расположены клеммы, к которым подключены провода. Измерение изоляции проводов производится мегомметром М1102.

Мегомметр типа М1102

В лабораторной работе для измерения сопротивления изоляции используется переносной мегомметр М1102. Мегомметр состоит из генератора переменного тока с ручным приводом, выпрямителя, измерительного механизма и вспомогательных элементов. Измерительным механизмом является магнитоэлектрический логометр. Шкала мегомметра проградуированна непосредственно в единицах сопротивления. Выбор диапазона измерения производится тумблером. Конструктивно мегомметр оформлен в виде переносного прибора (рис.24).

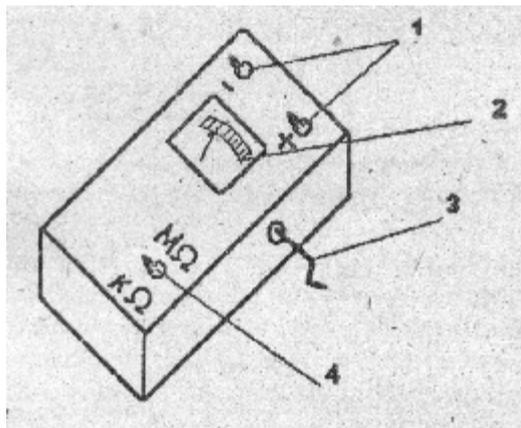


Рис.24. Внешний вид мегомметра М1102

На лицевой панели прибора расположены клеммы 1 для подключения соединительных проводов, измерительный прибор 2, переключатель пределов измерений 4. Сбоку на корпусе прибора имеется ручка привода генератора 3.

Мегомметр имеет два диапазона измерения 0-1000 кОм и 0-500МОм. Напряжение на разомкнутых зажимах в диапазоне измерения «МΩ» составляет 500 ± 50 В. Основная погрешность в рабочей части шкалы не превышает $\pm 1\%$ от длины шкалы.

При подготовке мегомметра к работе необходимо выполнить следующие операции:

1. Проверить исправность мегомметра. В исправном мегомметре при вращении ручки генератора и замкнутых зажимах стрелка должна установиться на отметке «∞» шкалы «МΩ», если переключатель находится в положении «МΩ», и на отметке «0» той же шкалы, если переключатель находится в положении «кΩ».

2. Установить переключатель диапазонов измерения в положение «кΩ» или «МΩ» в зависимости от величины измеряемого сопротивления. Подключить прибор к исследуемой сети, как показано на рис.25.

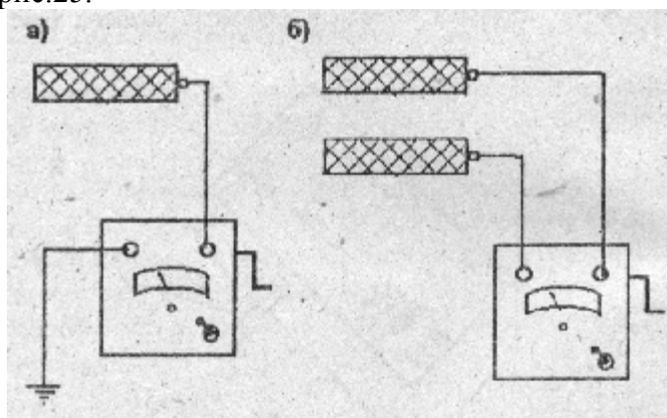


Рис.25. Схемы присоединения мегомметра: а) измерение сопротивления изоляции фазного провода; б) измерение сопротивления изоляции между фазами

3. Произвести отсчёт по соответствующей шкале, плавно вращая ручку генератора по часовой стрелке с номинальной скоростью.

ВНИМАНИЕ! При вращении рукоятки не касайтесь оголённых проводов, присоединённых к зажимам мегомметра.

Модель зоны растекания тока

Для экспериментального исследования явлений, сопровождающих растекание тока от заземлителя, используется модель зоны растекания. В состав модели зоны растекания входят: диск из токопроводящей бумаги с наложенными электродами и вспомогательными рейками, облегчающими измерение расстояния от центра диска; вольтметр постоянного тока с большим входным сопротивлением; источник постоянного напряжения. Центральный электрод моделирует одиночный заземлитель. Кольцевой электрод моделирует зону нулевого потенциала. В состав модели входит также несколько дополнительных элементов: электроды, щупы вольтметра, колодки для фиксации щупов вольтметра на заданном расстоянии друг от друга; модель группы электроаппаратов, заземлённых на общую шину. Применение этих элементов описано в методике исследований.

Токопроводящая бумага моделирует грунт с постоянным удельным сопротивлением ρ . Модель зоны растекания имеет закон распределения потенциала в зоне растекания.

$$\frac{\varphi_x}{\varphi_3} = \left(\ln \frac{x}{r_1} \right) / \left(\ln \frac{r_0}{r_1} \right), \quad (30)$$

где φ_x – потенциал в точке измерения; φ_3 – потенциал заземлителя; x – расстояние от центра модели; r_1 – радиус внутренней окружности кольцевого электрода; r_0 – радиус центрального электрода.

Этот закон растекания отличается от рассмотренного закона растекания тока полусферического заземлителя, однако все явления, сопровождающие растекание тока через заземлитель, успешно моделируются на качественном уровне, а при правильном выборе масштаба преобразования и способов представления результатов измерения можно получать количественные зависимости, характерные для реальных заземлителей.

Модель заземляющего устройства

Модель заземляющего устройства и измерительная схема для изучения метода амперметра-вольтметра содержит имитаторы заземлителя, вспомогательного электрода и зонда (см. рис.12). Вспомогательный электрод и зонд обозначены соответственно R_v и R_z . На горизонтальной панели стенда расположены клеммы R_x , R_v и R_z для соединения их с точками 1, 2, 3 измерительной схемы. Здесь же расположен выключатель цепи ВК1 и регулировочное сопротивление R для измерения напряжения источника тока;

Модель заземляющего устройства, исследуемого прибором МС-08, также содержит заземлитель, вспомогательный электрод и зонд (см. рис.13). Клеммы для подключения прибора МС-08 расположены на горизонтальной панели стенда.

Модель заземляющего устройства, исследуемого методом «трёх земель», содержит имитаторы заземлителя (R_x) и двух вспомогательных электродов (R_y и R_z) (см. рис.14). Здесь же расположены амперметр и вольтметр. Для подключения измерительной схемы на горизонтальную панель выведены клеммы R_x , R_y , R_z , соединённые с соответствующими испытуемыми заземлителями. Выключатель ВК1 служит для подачи напряжения в измерительную схему.

Модель цепи фаза-нуль

Модель трёхфазной сети переменного тока с глухозаземлённой нейтралью и устройством для измерения сопротивления цепи «фаза-нуль» состоит из участка трёхфазной четырёхпроводной сети, электродвигателя, выключателей сети П1 и П2, заземлителя нейтрали R_0 , выключателя имитации короткого замыкания ВК2 (см. рис.15).

В цепь «фаза-нуль» включены амперметр, вольтметр и понижающий трансформатор Тр1 с выключателем ВК1. Выключатели П1, П2, ВК1 и ВК2 расположены на горизонтальной панели стенда.

Модель для исследования удельного сопротивления грунта

Модель участка земли для исследования удельного сопротивления грунта методом четырёх электродов имитирует участок земли с контрольными электродами А, В, С, Д, к которым подключается измеритель заземления МС-08 (см. рис.16). На горизонтальной панели расположены клеммы А, В, С, Д, соединённые с соответствующими электродами, и переключатель ПК для имитации изменения расстояния между электродами.

Инструкция по работе с прибором МС-08

Принцип действия прибора основан на методе амперметра-вольтметра. Ток и напряжение измеряются магнитоэлектрическим логометром. Прибор снабжён генератором постоянного тока с ручным приводом. Постоянный ток генератора с помощью прерывателя преобразуется в переменный. Шкала прибора проградуированна в омах. На лицевой панели расположен показывающий прибор и переключатель пределов измерений. Сбоку на корпусе прибора имеется ручка привода генератора и потенциометр калибровки. Прибор имеет три предела измерения: от 0 до 1000, от 0 до 100 и от 0 до 10 Ом. Погрешность прибора не более 1,5% при сопротивлении зонда до 1000 Ом. Скорость вращения ручки генератора должна быть в пределах 90-150 об/мин. Измеритель заземления располагают в непосредственной близости от испытуемого устройства и присоединяют клеммы Е1, П1, Е2, П2 к соответствующим точкам исследуемой схемы. Все соединения проводят изолированным проводом. Перед измерением производят компенсацию сопротивления зонда. Для этого переключатель рода работ устанавливают в положение «регулировка» и, вращая ручку генератора со скоростью около 120 об/мин, ручкой потенциометра калибровки устанавливают стрелку прибора на красную отметку шкалы. После компенсации сопротивления зонда переключатель ставят в положение «измерение х 1», т.е. на предел 1000 Ом, и производят замер, вращая ручку генератора. При незначительном отклонении стрелки прибора последовательно переходят на шкалы «х 0,1» - 100 Ом и «х 0,01» - 10 Ом. Отсчёт производят по шкале в омах с учётом множителя. Делается не менее трёх измерений и за измеренную величину принимается среднее арифметическое этих измерений.

3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

При проведении электрических испытаний на лабораторном стенде следует руководствоваться ГОСТ 12.3.019-80, в котором изложены общие требования безопасности.

Стенды лабораторной установки потребляют электрическую энергию, поэтому есть опасность поражения электрическим током, а при коротких замыканиях в электрической схеме стенда возможно появление пожарной опасности. В целях уменьшения электрической опасности на измерительные схемы лабораторных стендов питание подаётся через понижающий трансформатор, напряжение на выходе которого составляет 12В.

Конструкция стендов выполнена с учётом требований ОСТ40.4.78 «Оборудование учебно-лабораторное. Общие требования безопасности».

В целях уменьшения электрической и пожарной безопасности в конструкции стендов предусмотрены следующие мероприятия:

- 1) корпуса стендов выполнены из токонепроводящих материалов (пластик и дерево);
- 2) для подсоединения стендов к сети использован кабель с наружной резиновой изоляцией;
- 3) электрический монтаж выполнен скрытно, проводом марки МГШВ с сопротивлением изоляции 20000МОм/м;
- 4) в цепи питания установлены предохранители на 1А;
- 5) используемые в стендах электроизоляционные материалы по классу нагревостойкости соответствуют ГОСТ 8865-70;

При работе на стендах необходимо соблюдать общие требования пожарной безопасности:

- 1) необходимо знать размещение ближайшего пожарного инвентаря и общего выключателя электроэнергии данной лаборатории;
- 2) для тушения пожара на лабораторных стендах следует применять углекислотные огнетушители.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В лабораторной работе, в зависимости от предложенного преподавателем варианта, можно исследовать:

- 1) зависимость сопротивления тела человека от частоты;
- 2) зависимость тока через человека от величины сопротивления изоляции и сопротивления тела человека;
- 3) опасность поражения человека электрическим током в трёхфазных сетях переменного тока с изолированной и заземлённой нейтралью в нормальном и аварийном режимах;
- 4) устройство непрерывного контроля сопротивления изоляции;
- 5) состояние изоляции трёхфазной сети переменного тока;
- 6) состояние изоляции некоторых марок проводов бортовой сети летательных аппаратов и проводов силовой сети;
- 7) явления, сопровождающие растекание тока с заземлителя на модели зоны растекания (шаговое напряжение и напряжение прикосновения);
- 8) сопротивление заземляющего устройства методом амперметра-вольтметра;
- 9) характеристики заземляющего устройства прибором МС-08;
- 10) качество заземляющего устройства методом трёх измерений («трёх земель»);
- 11) сопротивление цепи «фаза-нуль» и надёжность срабатывания автомата защиты;
- 12) удельное сопротивление грунта методом четырёх электродов.

Определение параметров электрического сопротивления
тела человека

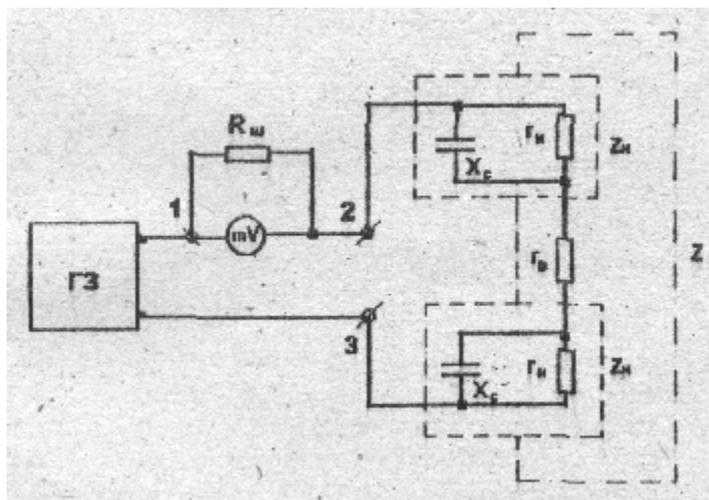


Рис.26. Схема включения приборов

Электрическая схема замещения тела человека смонтирована в секции 1 стенда. Для подключения звукового генератора и милливольтметра используются клеммы 1, 2, 3 стенда. Схема включения приборов показана на рис.26 и в вертикальной панели стенда.

Проверьте подключение приборов и положение ручек на генераторе и вольтметре и при необходимости установите:

- ручку 1 плавной установки частоты генератора на 20 Гц;
- переключатель 3 установки частоты в положение х1;
- переключатель режима работы 5 в положение «1»;
- ручку установки выходного напряжения 2 в «0»;
- переключатель пределов измерения 3 на В3-38 установить в положение 10мВ.

Подключить приборы ГЗ-33 и В3-38 к сети и включите их. Ручкой установки частоты генератора установите соответствующую частоту тока (см. табл.3). Регулятором выходного напряжения установите напряжение, соответствующее варианту задания. Показания приборов запишите в табл.3. Установите следующую частоту в соответствии с данными табл.3 и продолжите эксперимент. После окончания работы выключите приборы.

Таблица 3

Частота		Результаты			
		измерений		расчётов	
f, Гц	lgf	Uв	UmB	I, мА	Z, кОм
25	1.4				
35	1.5				
45	1.6				
60	1.8				
100	2.0				
250	2.4				
500	2.7				
1000	3.0				
2500	3.4				
5000	3.7				
10000	4.0				
20000	4.3				

Здесь Uв – выходное напряжение генератора;
UmB – показания вольтметра.

Подсчитайте величину тока и сопротивления тела человека (для данной установки) и заполните табл.3.

$$I = \frac{U_{\text{мВ}}}{10}, \text{ мА} ; Z = \frac{U_{\text{В}}}{I}, \text{ кОм}$$

По данным табл.3. построить график $Z=\varphi(f)$. На графике частота откладывается в логарифмическом масштабе. Определите внутренне сопротивление $r_{\text{в}}$ из графика $Z=\varphi(f)$ и используя равенство (3) при $f > 10000$ Гц. Методом экстраполяции (см. рис.2) найдите величину полного сопротивления тела человека Z_0 при $f \rightarrow 0$. Рассчитайте активное сопротивление наружного слоя кожи $r_{\text{н}}$ по формуле (4). На частоте, указанной в задании, определите из выражения (1) полное сопротивление наружного слоя кожи $Z_{\text{н}}$ при $f < 1000$ Гц. Рассчитайте по формуле (6) величину ёмкости C наружного слоя кожи. Рассчитайте ёмкостное сопротивление $X_{\text{с}}$ по формуле (2). Результаты расчёта основных параметров электрической схемы замещения сопротивления тела человека для заданной частоты внесите в табл.3. Укажите факторы, влияющие на условия поражения человека электрическим током.

Прикосновение человека к одной из фаз трёхфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью

Исследуемая схема показана в секции 2 стенда на вертикальной панели, а органы управления выведены на горизонтальную панель (см. рис. 21). Необходимо исследовать изменение тока через человека при прикосновении к одной из фаз в зависимости от величины сопротивления тела человека и сопротивления изоляции фаз.

Исследование влияние сопротивления тела человека на величину тока при прикосновении его к одной из фаз

Приведите стенд в исходное положение: выключатели В1, В2 и В3 и переключатель П1 установите в положение "Выкл", а регулируемые резисторы Ra, Rб и Rc поставьте в нулевое положение. Переключателем П2 подключите миллиамперметр и Rчел к заданной фазе. Выключатели В1, В2 и В3 поставьте в положение "Вкл".

Таблица 4

Наименование фазы	Результаты измерений					
	Rиз.фазы = ... , МОм					
	Rчел, кОм					
	Iчел, мА					

Установите заданное значение изоляции фаз. Переключателем П1 включите схему под напряжение. Меняя последовательно значение Rчел, снимите показания миллиамперметра и занесите их в табл. 4.

Исследование влияния сопротивления изоляции фаз на величину тока при прикосновении человека к одной из фаз

По заданию преподавателя или варианту установите необходимое значение Rчел. Переключателем П2 подключите миллиамперметр и Rчел к заданной фазе и включите схему. Включите выключатели В1, В2, В3 и, меняя значение сопротивления изоляции данной фазы, снимите показания миллиамперметра. Полученные значения занесите в табл.5. Приведите стенд в исходное положение и выключите схему.

По данным табл.4 и 5 постройте графики $I_{чел} = f_1(R_{чел})$ и $I_{чел} = f_2(R_{чел})$. Сделайте выводы по экспериментальным данным и графикам о степени опасности поражения человека электрическим током, используя требования ГОСТ 12.1.038-83 и ПУЭ.

Таблица 5

Наименование фазы	Результаты измерений Риз.фазы = ... , МОм						
	Риз.ф., МОм						
	Ичел, мА						

Исследование опасностей прикосновения человека к трёхфазной сети переменного тока с изолированной и заземлённой нейтралью в аварийном режиме

Исследуемая схема показана в секции 3 стенда на вертикальной панели, а органы управления и миллиамперметр расположены на горизонтальной панели (см. рис. 22).

Исследование сети с изолированной нейтралью, работающей в аварийном режиме

Приведите стенд в исходное положение: выключатели В1, В2 и П1 поставьте в положение "Выкл", переключатель П2 в положение А, Rзам в положение 0.1, Rчел – в положение "Выкл". Переключателем П1 включите схему. По заданию преподавателя или варианту установите значение Rзам, включите выключатель В2, имитирующий замыкание фазы, а переключатель П2 в положение заданной фазы. Меняя значение Rчел, снимите показания с миллиамперметра и занесите их в табл.6. По окончании измерений приведите стенд в исходное состояние.

Таблица 6

Режим работы схемы	Результаты измерений для фазы ... Rзам = ... , Ом						
	Rчел, кОм						
Аварийный	Ичел, мА						

Исследование сети с глухозаземлённой нейтралью, работающей в нормальном режиме

Сеть с глухозаземлённой нейтралью моделируется выключателем В1 (положение "Вкл").

Переключателем П1 включите схему. По заданию преподавателя установите требуемое значение сопротивления зануления R_0 , а переключателем П2 – фазу, к которой имитируется прикосновение человека. Меняя значение Rчел, снимите показания миллиамперметра и занесите их в табл.7. Приведите стенд в исходное состояние.

Таблица 7

Режим работы схемы	Результаты измерений для фазы ... $R_0 = ...$, Ом, Rзам = ... , Ом						
	Rчел, кОм						
Нормальный	Ичел, мА						
	Rчел, кОм						
Аварийный	Ичел, мА						

Исследование сети с глухозаземлённой нейтралью,
работающей в аварийном режиме

Аварийный режим моделируется выключателем В2 (положение "Вкл") и переключателем П2.

Установите заданные значения R_0 , $R_{зам}$ и фазу. Переключателем П1 включите схему. Включите выключатели В1 и В2. Меняя значения $R_{чел}$, снимите показания миллиамперметра и занесите в табл.7. По окончании измерений выключите схему.

По данным табл.6 и 7 постройте следующие графики:

1) $I_{чел} = f_3(R_{чел})$ для трёхфазной сети с изолированной нейтралью, работающей в аварийном режиме;

2) $I_{чел} = f_4(R_{чел})$ для сети с глухозаземлённой нейтралью, работающей в нормальном режиме;

3) $I_{чел} = f_5(R_{чел})$ для сети с глухозаземлённой нейтралью, работающей в аварийном режиме.

Проведите анализ исследуемых схем с точки зрения их опасности при прикосновении человека к одной из фаз.

Исследование устройства непрерывного контроля
сопротивления изоляции

В секции 4 стенда показана исследуемая схема (см. рис.23). На горизонтальную панель стенда выведены все органы управления.

Переключатели П1 и П2 установите в положение "Выкл". Потенциометры R1 и R2 установите в крайнее левое положение. С помощью мегомметра измерьте сопротивление фаз А, Б и С и их значения занесите в табл.8. По полученным значениям R_a , R_b , R_c , используя формулу (17), определите полное сопротивление изоляции R. По заданию переключатель П2 установите в положение фазы А, Б или С. Переключателем П1 включите схему. Потенциометром R2 по шкале километра выставьте расчётное значение R. Вращая ручку потенциометра R1, измените чувствительность реле до момента его срабатывания, что фиксируется загоранием сигнальной лампочки на панели стенда. После этого переключатель П2 установите в положение "Выкл".

Таблица 8

Наименование фазы	Результаты измерения и расчётов	
	$R_{из}$, МОм	R
А		
Б		
С		

Исследование изоляции трёхфазной сети переменного тока

Исследуемая схема показана на вертикальной панели стенда в секции 5, а на горизонтальную панель выведены клеммы исследуемых фаз А, Б и С и клемма "Земля" (см. рис. 25).

С помощью мегомметра измерьте сопротивление изоляции фаз А, Б и С. Полученные значения занесите в табл.9. Сравните полученные значения сопротивления изоляции фаз А, Б и С с $R_{доп}$ согласно ПУЭ и сделайте вывод о пригодности исследуемой сети к эксплуатации.

Таблица 9

Наименование фазы	Результаты измерения и расчётов	
	Риз, МОм	Рдоп, МОм
А		
Б		
С		

Исследование изоляции проводов

Исследуемые провода показаны на вертикальной панели стенда, на горизонтальную панель выведены клеммы исследуемых проводов.

Таблица 10

Марка провода	Результаты измерения Ризм, Мом	Рдоп, МОм
БПВЛ		
БПВЛЭ		
БПТ		
БПТЭ		
ПР		
АПР		

С помощью мегомметра измерьте сопротивление изоляции проводов БПВЛ, БПВЛЭ, БПТ, БПТЭ, ПР и АПР и заполните табл.10 сравните полученные значения сопротивления изоляции всех марок проводов с $R_{доп}$ и сделайте вывод об их пригодности к эксплуатации.

Исследование распределения потенциала в зоне растекания тока одиночного заземлителя

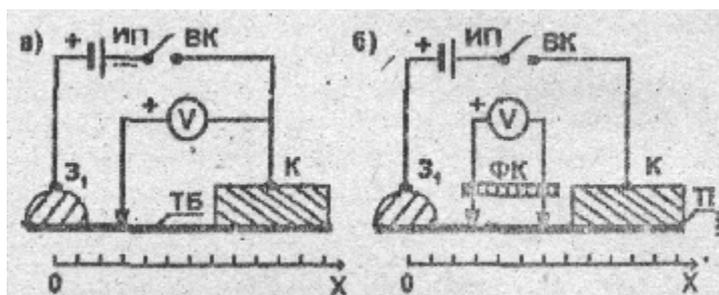


Рис.27. Исследование распределения потенциала (а) и шагового напряжения (б) в зоне растекания тока: З1 – одиночный заземлитель (центральный электрод); К – зона нулевого потенциала (кольцевой электрод); ИП – источник питания; ВК – выключатель источника питания; ТБ – токопроводящая бумага; ФК – фиксирующая колодка

Соберите схему, изображённую на рис.27.а Включите источник питания и установите напряжение U_0 . Перемещая щуп вольтметра с шагом 0,5 см в прорези рейки с делениями, измерьте потенциалы U_x . Рассчитайте значения величин U_x/U_0 . По формулам (14) и (30) рассчитайте теоретические значения потенциала для грунта и для модели с токопроводящей бумагой. Результаты измерений, расчётов и исходные данные занесите в протокол лабораторной работы. Постройте на одном графике зависимости всех вычисленных величин от расстояния x .

Исследование зависимости шагового напряжения от расстояния до одиночного заземлителя

Собрать схему, изображённую на рис.27.б. Включить источник питания. Оба щупа вольтметра закрепить в специальной колодке (Расстояние между щупами моделирует ширину шага "а"). На колодке нанесена черта между центрами щупов. Определение расстояния x между колодкой и центром модели производится от этой черты. Перемещая колодку с шагом 0,5 см, измерить разность потенциалов $U_{ш}(x)$. Записать x и $U_{ш}(x)$ в протокол. Построить график $U_{ш}(x)$.

Исследование зависимости напряжения прикосновения от расстояния до заземлителя

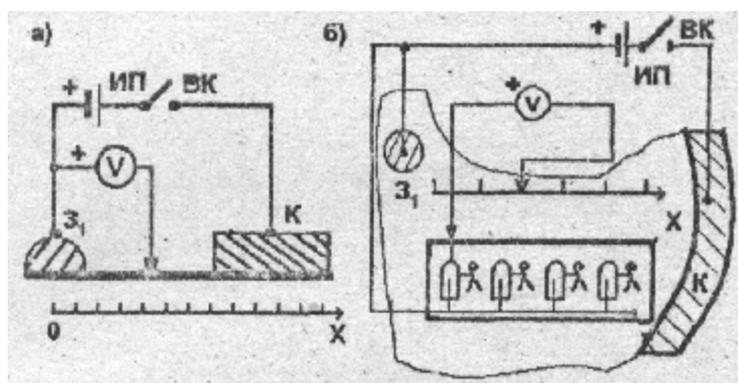


Рис. 28. Исследование напряжения прикосновения к заземлителю (а) и к корпусам электроаппаратов, заземлённых на одиночный заземлитель (б)

Собрать схему, изображённую на рис.28.а Включить источник питания. Перемещая щуп вольтметра с шагом 0,5 см в прорези рейки с делениями, измерить значения напряжения прикосновения $U_{пр}(x)$. Рассчитать значения величин $U_{пр}(x)/U_0$ и по формуле (2) теоретическое значение напряжение прикосновения. Результаты измерений и расчётов занести в протокол лабораторной работы. Построить на одном графике зависимости вычисленных величин от расстояния до центра модели.

Исследование напряжения прикосновения к корпусу электроаппарата

Собрать схему, изображённую на рис.28.б. Включить источник питания. Последовательно присоединяя щупы вольтметра к корпусу каждого электроаппарата и токопроводящей бумаге возле метки, обозначающей положение человека относительно соответствующего электроаппарата, измерить напряжение прикосновения $U_{пр}$ и координату x положения человека относительно одиночного заземлителя. Результаты измерений занести в протокол лабораторной работы. Построить график $U_{пр}(x)$.

Исследование эффекта выравнивания потенциала в системе группового заземлителя из двух электродов

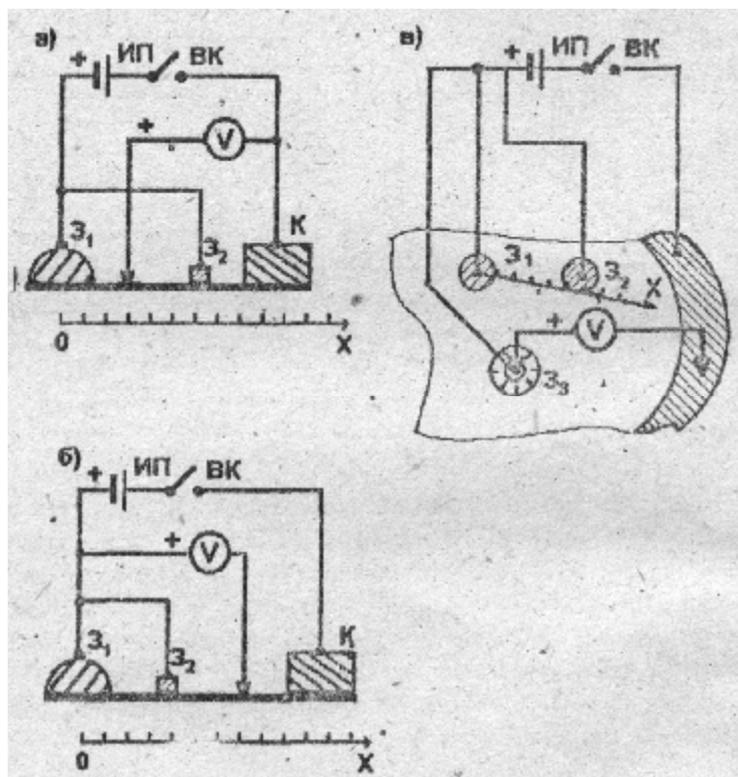


Рис.29. Исследование эффекта выравнивания потенциала в групповом заземлителе, состоящем из двух (а) и (б) и трёх электродов (в): 31, 32, 33 – электроды группового заземлителя; V – вольтметр; ИП – источник питания; K – кольцевой электрод, моделирующий зону нулевого потенциала; ВК – выключатель ИП

Собрать схему, изображённую на рис.29.а,б. Включить источник питания. Проверить значение напряжения U_0 . Если значение напряжения U_0 не соответствует заданию, то зафиксировать новое значение U_0 . Измерить распределение потенциала $U(x)$, перемещая щуп вольтметра вдоль прорези рейки, в которой закреплён второй электрод группового заземлителя 32. Результаты измерений занести в протокол лабораторной работы. Построить график распределения потенциала в зоне растекания группового заземлителя.

Исследование эффекта выравнивания потенциалов в системе группового заземлителя из трёх электродов

Собрать схему, изображённую на рис.29.в. Проверить значение U_0 после включения источника питания; зафиксировать истинное значение $U_{0и}$, причём $U_{0и}$ должно быть больше $U_0/2$. Измерить распределение потенциала $U(\theta)$ вокруг третьего электрода заземлителя, пользуясь пазами, выпиленными по периферии диска из органического стекла. Вся окружность диска имеет 12 пропилов. Угловое смещение θ при переходе на соседний пропил составляет 30° . Черта на диске должна быть направлена на центр модели. Результаты измерений занести в протокол лабораторной работы. Построить график $U(\theta)$.

Исследование заземляющего устройства методом амперметра-вольтметра

Переключатель сети ВК1 У установить в положение "Выкл". Поворотом ручки движка реостата R против часовой стрелки установить его в нулевое положение. Амперметр и вольтметр подключить к заземлителям R_x, R_y и R_z в соответствии со схемой (см. рис.12). Установить переключатель ВК1 в положение "Вкл" и, плавно поворачивая ручку реостата R по часовой стрелке, снять показания приборов. Отсчёт производить одновременно по обоим приборам. Сделать не менее трёх отсчётов. Пользуясь формулой (18), по полученным значениям U₁, U₂, U₃ и I₁, I₂, I₃ найти значения R_{x1}, R_{x2}, R_{x3} и подсчитать среднее значение R_x. Сравнить полученное значение R_x с допустимым значением R_{зу}. результаты измерений, расчётов и исходные данные занести в протокол лабораторной работы.

Измерение заземляющего устройства прибором МС-08

Подключить прибор МС-08 к измерительной схеме согласно рис.13. Перед измерением произвести компенсацию сопротивления зонда согласно инструкции по работе с прибором МС-08. Произвести не менее трёх замеров и найти среднее значение сопротивления R_x. Сравнить полученное значение R_x с допустимым значением R_{зу}. Результаты замеров занести в протокол лабораторной работы.

Измерение сопротивления заземляющего устройства методом трёх измерений (трёх земель)

Измерительную схему (рис.14) последовательно подключить к заземлителям R_x и R_y, R_x и R_z, R_y и R_z, и занести показания вольтметра и амперметра в протокол. Используя формулы (19), (20), (21), найти значения R₁, R₂ и R₃, а по формуле (22) вычислить величину сопротивления контролируемого заземляющего устройства R_x и сравнить его с допустимым значением R_{зу}. Результаты расчёта и исходные данные занести в протокол лабораторной работы.

Измерение сопротивления цепи "фаза-нуль"

Установить переключатели П1, П2 и ВК1 в положение "Выкл", а переключатель ВК2 в положение "Вкл", подключив тем самым фазный провод к корпусу электродвигателя, имитируя короткое замыкание. Установить выключатель ВК1 в положение "Вкл", снять показания амперметра и вольтметра и занести их в протокол. Рассчитать по формуле (23) сопротивление цепи "фаза-нуль" Z_п и по формуле (25) определить ток однофазного короткого замыкания I_к (Z_т берётся из табл.2 Прил.3). Результаты расчёта и исходные данные занести в протокол лабораторной работы.

Измерение удельного сопротивления грунта методом четырёх электродов

Подключив прибор МС-08 к клеммам А, Б, С и Д, расположенным на горизонтальной панели стенда, в соответствии с рис.16. Установить переключатель ПК последовательно в положения, соответствующие разным значениям α и произвести измерения величины сопротивления R в соответствии с инструкцией по работе с прибором МС-08. Подставить полученные значения R в формулу (27), рассчитать значения ρ и определить среднее значение удельного сопротивления грунта $\rho_{\text{ср}}$. Найти по значению $\rho_{\text{ср}}$ вид грунта. Результаты измерений, расчёты и исходные данные занести в протокол лабораторной работы.

Измерение удельного сопротивления грунта методом пробного электрода

Определить по формуле (26) удельное сопротивление грунта, используя полученные ранее при измерении сопротивления заземляющего устройства прибором МС-08 значения R_x . Найти по значению ρ вид грунта. Исходные данные и результаты расчёта занести в протокол лабораторной работы.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

- первичный протокол измерений;
- принципиальные схемы подключения приборов по всем выполняемым разделам лабораторной работы;
- расчётные формулы с обозначением их элементов;
- заполненный протокол лабораторной работы;
- графики полученных теоретических и экспериментальных зависимостей;
- конкретные выводы по результатам исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы безопасности жизнедеятельности: Учеб. пособие/ В.И.Козаченко, Ю.В.Кольцов, Л.А.Нейман, Б.И.Попов/ СПбГААП, СПб., 1994. 82с
2. ГОСТ 12.1.009-76. ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986. 213с
3. ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление и зануление. М.: Изд-во стандартов, 1986. 213 с.
4. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновений и токов. М.: Изд-во стандартов, 1986. 273с.
5. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984. 448с.
6. Павлов С.П., Губонина З.И. Охрана труда в приборостроении. М.: Высш. шк., 1986. 215с.
7. Правила устройства электроустановок. Изд. 6-е. М.: Энергоатомиздат, 1985. 640с.
8. Охрана труда в машиностроении/ Под ред. В.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1983. 431с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Максимально допустимые величины сопротивления заземляющих устройств

Назначение заземляющего устройства	Сопротивление заземлителя, не более
Заземляющие устройства электроустановок напряжением выше 1 кВ сети с эффективнозаземлённой нейтралью, выполненные с соблюдением требований к его сопротивлению, включая сопротивление естественных заземлителей.	0,5 МОм
Заземляющее устройство только для электроустановок напряжением выше 1кВ сети с изолированной нейтралью	$R=250/I$, Ом, но не более 10 Ом, I – расчётный ток замыкания на землю, А
Заземляющие устройства, используемые одновременно для электроустановок до и свыше 1 кВ сети с изолированной нейтралью.	$R=125/I$, Ом
Заземляющие устройства электроустановок напряжением до 1 кВ с глухозаземлённой нейтралью при напряжении трёхфазного <div style="margin-left: 100px;">660В</div> <div style="margin-left: 100px;">380В</div> <div style="margin-left: 100px;">220В</div> Или однофазного <div style="margin-left: 100px;">360В</div> <div style="margin-left: 100px;">220В</div> <div style="margin-left: 100px;">127В</div> тока с учётом сопротивления естественных заземлителей и повторных заземлений нулевого провода	<div style="margin-left: 100px;">2</div> <div style="margin-left: 100px;">4</div> <div style="margin-left: 100px;">8</div> <div style="margin-left: 100px;">2</div> <div style="margin-left: 100px;">4</div> <div style="margin-left: 100px;">8</div>
Заземляющие устройства электроустановок напряжением до 1 кВ с изолированной нейтралью при мощности генераторов и трансформаторов до 100 кВА свыше 100 кВА	<div style="margin-left: 100px;">10</div> <div style="margin-left: 100px;">4</div>

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Приближённые значения удельных электрических сопротивлений различных грунтов и воды

Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом*см
Песок	$7 \cdot 10^4$
Супесок	$3 \cdot 10^4$
Чернозём	$2 \cdot 10^4$
Суглинок	$1 \cdot 10^4$
Глина	$0,4 \cdot 10^4$
Садовая земля	$0,4 \cdot 10^4$
Торф	$0,2 \cdot 10^4$
Речная вода	$0,5 \cdot 10^4$
Морская вода	$0,01 \cdot 10^4$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 1

Значение коэффициента к

Вид защитного аппарата	Элемент, отключающий ток короткого замыкания	Класс помещения	
		с нормальной средой	С взрывоопасной средой
Предохранители	Плавкая вставка	3	4
Автоматы с тепловым расцепителем	Тепловой элемент расцепления	3	6
Автоматы с электромагнитным расцепителем	Электромагнитный расцепитель мгновенного срабатывания	1,27 – 1,43	1,27 – 1,43

Таблица 2

Расчётное сопротивление трансформатора

Мощность трансформатора, кВ*А	Полное сопротивление обмоток трансформатора Z_T , Ом
20	4,356
25	3,609
30	3,330
40	2,586
50	2,391
60	2,266
100	1,074
160	0,699
180	0,612
250	0,432

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Сопротивление изоляции электрических цепей электронных цифровых вычислительных машин общего назначения

Климатические условия	Сопротивление изоляции, МОм, для различных максимальных значений рабочего напряжения цепи, U_p , кВ			
	до 0,1	0,1-0,5	0,5-10	Свыше 10
Нормальные	5,0	20,0	100	По нормативно-технической документации на конкретные ЭВМ или отдельные устройства
Повышенная температура	1,0	5,0	20	
Повышенная влажность (выше 80 до 95%)	0,2	1,0	2	