

Лабораторная работа:

«Защита от поражения электрическим током»

Теоретическая часть

1. Краткая характеристика и анализ электробезопасности трехфазных сетей

В зависимости от режима нейтрали и наличия нулевого провода на практике применяются главным образом два вида электрических сетей - трехфазные четырехпроводные с заземленной нейтралью и трехфазные трехпроводные с изолированной нейтралью. Кроме того, в передвижных электроустановках (ЭУ) и устройствах допускается применение четырехпроводных сетей с изолированной нейтралью.

Изолированной называется нейтраль трансформатора или генератора (источника электрической энергии сети), не присоединенная к заземляющему устройству, т.е. не имеющая электрического соединения с землей.

Заземленной называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству через малое сопротивление.

Каждая из применяемых сетей характеризуется различной степенью электробезопасности.

Оценка электробезопасности электрических сетей заключается в измерении или расчете протекающего через тело человека тока I_h (определении напряжения прикосновения $U_{пр}$) и сравнении этих величин с предельно допустимыми в зависимости от продолжительности воздействия тока на человека, оказавшегося под напряжением при одно- или двухфазном прикосновении.

В трехфазных сетях величина тока I_h , зависит от напряжения сети, режима нейтрали и состояния изоляции фазных проводов по отношению к земле.

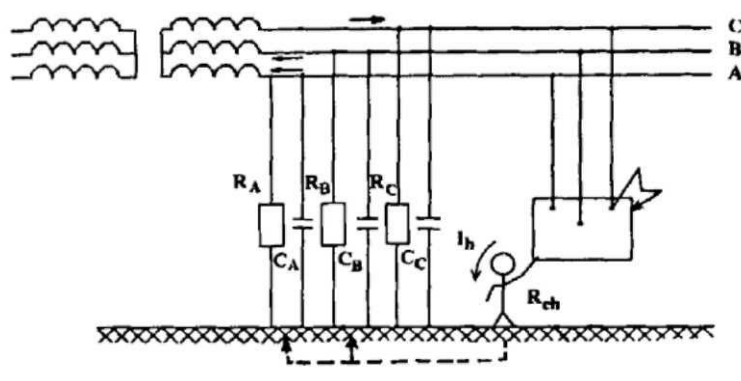


Рис.1.1. Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью.

Для трехфазной сети с изолированной нейтралью (рис.1.1) и при равенстве сопротивлений изоляции фазных проводов по отношению к земле ($Z_A=Z_B=Z_C=Z$) величина тока, проходящего через тело человека, стоящего на земле, при однофазном прикосновении (например, при пробое фазы C на корпус)

пус электрической установки равна:

$$\dot{I}_h = \frac{3 \cdot U_\phi}{3 \cdot R_{ch} + \dot{Z}}, \quad (1.1)$$

где U_ϕ — фазное напряжение сети, В;

R_{ch} — сопротивление в цепи тела человека, Ом; $R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{пол}$,

где R_h — активное сопротивление тела человека (равное 1 кОм при $U_{ип} > 42$ В и 6 кОм при $U_{ип} < 42$ В);

$R_{об}$ — сопротивление обуви;

$R_{пол}$ — сопротивление покрытия пола.

Значения $R_{об}$ и $R_{пол}$ определяются по справочнику или измеряются.

$\dot{Z}$ — комплексное значение сопротивления изоляции фазных проводов сети по отношению к земле, Ом. ($\dot{Z} = R + 1/j\omega C$, где C — величина электрической ёмкости между проводами сети и землёй, Ф).

Действительное значение тока в общем случае можно определить из выражения:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_{ch} \sqrt{1 + \frac{R(R + 6R_{ch})}{9R_{ch}^2(1 + R^2\omega^2C^2)}}}, \quad (1.2)$$

где $R = R_A = R_B = R_C$ — активное сопротивление фазных проводов по отношению к земле, Ом;

$C = C_A = C_B = C_C$ — ёмкость между фазными проводами и землей, Ф;

$\omega = 2\pi f$ — угловая скорость переменного тока, рад/с, (f — частота, Гц).

Величина ёмкости сети C относительно земли, соответствующая для кабельных линий $(0,1-0,4) \cdot 10^{-6}$ Ф/км и для воздушных $0,005 \cdot 10^{-6}$ Ф/км, возрастает с увеличением протяженности и разветвлённости сети. Поэтому в таких сетях величину I_h следует определять по формуле (1.2).

В сетях малой протяженности и неразветвленных можно принимать

$C_A = C_B = C_C = 0$, и при $R_A = R_B = R_C = R$ выражение (1.2) примет вид:

$$I_h \approx \frac{3 \cdot U_\phi}{3 \cdot R_{ch} + R}, \quad (1.3)$$

Выражения (1.1 — 1.3) показывают, что величина тока, проходящего через тело человека при однофазном прикосновении в сетях с изолированной нейтралью зависит не только от значения фазного напряжения, сопротивления тела человека, но и от состояния изоляции сети (Z или R) относительно земли. Надежная и качественная изоляция фазных проводов и токоведущих частей электроустановок является, таким образом, одним из основных технических мероприятий, обеспечивающих безопасность работ. Поэтому в сетях напряжением до 1000 В значение этого сопротивления изоляции не должно быть ниже 500 кОм..

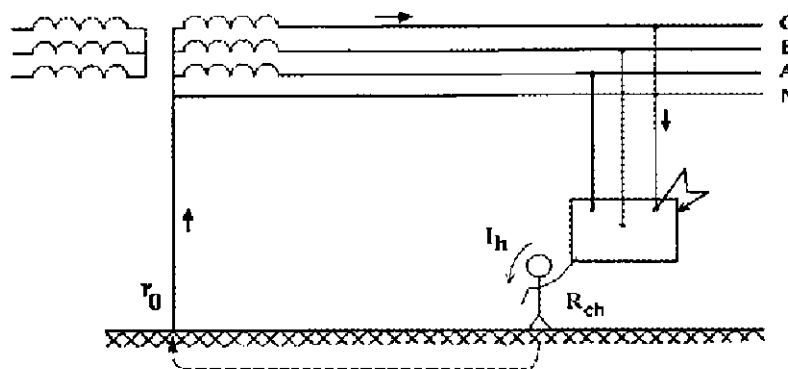


Рис.1.2. Однофазное прикосновение в сети с заземлённой нейтралью.

В сетях с заземленной нейтралью (рис.1.2) сопротивление заземления нейтрали r_0 не должно превышать 8 Ом при линейном напряжении сети $U_L=220$ В, 4 Ом при $U_L = 380$ В и 2 Ом при $U_L = 660$ В.

Выражение для тока, проходящего через тело человека при однофазном прикосновении в такой сети, будет иметь вид:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_{ch} + r_0} \quad (1.4)$$

В выражении (1.4) значением r_0 можно пренебречь, так как сопротивление тела человека $R_{ch} \gg r_0$ и ток, проходящий через тело человека, не зависит от сопротивления изоляции фазных проводов относительно земли.

Таким образом, трехфазные сети с заземленной нейтралью опаснее трехфазных сетей с изолированной нейтралью при однофазном прикосновении в период нормальной их работы (выражения (1.3) и (1.4)).

В аварийном режиме, когда имеет место замыкание одной из фаз на землю через малое сопротивление $r_{зм}$ (например, фазы В на рис.1.3) сеть с изолированной нейтралью оказывается опаснее.

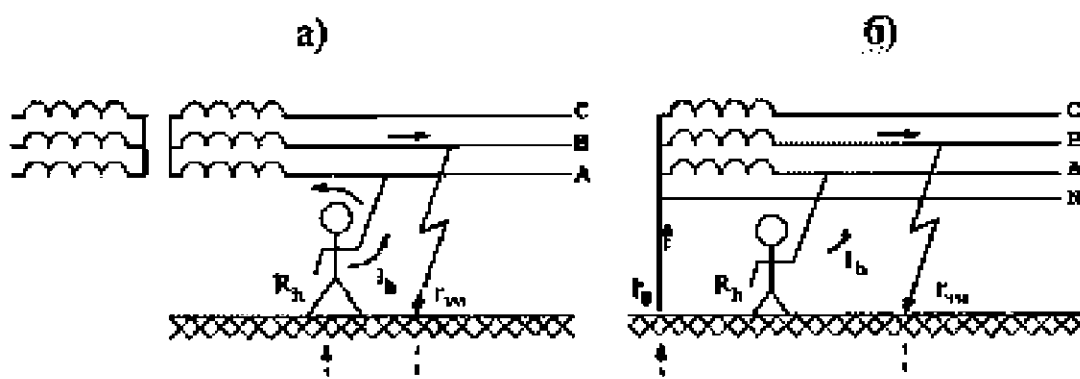


Рис.1.3. Путь протекания тока при однофазном прикосновении и замыкании на землю другой фазы: а — в сети с изолированной нейтралью; б — в сети с заземлённой нейтралью.

Действительно, как видно из рис.1.3,а в сети с изолированной нейтралью человек при однофазном прикосновении попадет под линейное напряжение ($U_{пр}=U_L$). В трехфазной сети с заземленной нейтралью (рис.1.3, б) величина напряжения

прикосновения, действующего на человека при прикосновении его к исправной фазе, будет зависеть от соотношения значений сопротивлений $\Gamma_{зм}$ и Γ_0 . Если принять, что сопротивление замыкания провода на землю $\Gamma_{зм}$ равно нулю, то $I_{пр} = I_{л}$. Если же равно нулю сопротивление заземления нейтрали Γ_0 , то $I_{пр} = I_{ф}$. На практике же $\Gamma_{зм}$ и Γ_0 всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается человек при прикосновении его к исправному фазному проводу трехфазной сети с заземленной нейтралью, в аварийном режиме её работы всегда меньше линейного, но больше фазного, т.е. $U_{л} > U_{пр} > U_{ф}$.

Таким образом, в аварийном режиме работы трехфазные сети с заземленной нейтралью менее опасны, чем сети с изолированной нейтралью.

В связи с вышеизложенным, на практике сети с изолированной нейтралью (трехфазные трехпроводные) применяются в тех случаях, когда поддерживается высокий уровень изоляции проводов относительно земли и емкость проводов относительно земли незначительна (т.е. $Z > 500$ кОм). В тех случаях, когда невозможно обеспечить хорошую изоляцию проводов (например, из-за большой протяжённости сети, высокой влажности и т.п.), применяются трехфазные четырехпроводные сети с заземленной нейтралью, которые, кроме того, имеют эксплуатационные преимущества перед трехпроводными, так как позволяют использовать два рабочих напряжения — линейное и фазное (например, 380 и 220 В в сети напряжением 380/220 В). Именно поэтому трёхфазные четырёхпроводные сети с заземлённой нейтралью получили наибольшее применение на практике.

2. Оценка опасности возможного электропоражения при эксплуатации потребителей электрической энергии

Оценка опасности электропоражения заключается в сравнении максимально возможных токов электропоражения, полученных с помощью измерения или расчёта, с предельно допустимыми их значениями.

Предельно допустимые напряжения прикосновения ($U_{пр}$) и токи, проходящие через человека ($I_{н\text{ пд}}$) при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Род и частота тока	Предельно допустимые значения	
	$U_{пр}$, В	$I_{н\text{ пд}}$, мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Постоянный	8	1,0

Предельно допустимые напряжения прикосновения ($U_{пр}$) и токи, проходящие через человека ($I_{н\text{ а}}$) при аварийном режиме работы электроустановки (замыкании электропитания на корпус установки), приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

Род и частота тока	Предельно допустимые значения при продолжительности воздействия более 1 с	
	$U_{пр}, В$	$I_{н\text{ пд}}, мА$
Переменный, 50 Гц	42	6
Постоянный	50	15

Оценка опасности позволяет определить необходимость применения способов и средств защиты, а возможные или фактические и предельно допустимые значения тока, проходящего через тело человека, и напряжения прикосновения служат исходными данными для их выбора, проектирования и расчёта.

3. Технические способы обеспечения электробезопасности

Для обеспечения безопасной эксплуатации электроустановок применяются следующие технические способы защиты: защитное заземление, зануление, защитное отключение и др.

Защитное заземление

Для устранения опасности поражения электрическим током в случае прикосновения персонала к корпусу и другим нетоковедущим металлическим частям ЭУ, оказавшимся под напряжением, наряду с другими мерами защиты в сетях с изолированной нейтралью широко применяется защитное заземление, представляющее собой преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением, с землёй посредством заземляющего устройства.

Принцип действия защитного заземления заключается в снижении напряжения прикосновения в результате уменьшения потенциала на корпусе заземленного электрооборудования за счет малого сопротивления заземляющего устройства и выравнивания потенциалов на заземленных частях электроустановки и основания, на котором стоит человек, вследствие образования потенциала на основании до значения, близкого к потенциалу заземленных частей оборудования.

Таким образом, напряжение заземленного корпуса относительно земли определяется выражением $U_k = I_3 R_3$, где I_3 — величина тока, протекающего через заземлитель; R_3 — сопротивление заземлителя.

Образование потенциалов на поверхности земли вокруг заземлителя обусловлено стеканием тока в землю через заземлитель, его растеканием в грунте и замыканием через сопротивление изоляции на две другие фазы (в трёхфазных сетях).

Потенциал на поверхности земли (основании) вокруг заземлителя в зависимости от расстояния до него изменяется по гиперболическому закону, уменьшаясь от своего максимального значения на заземлителе практически до нуля (рис.1.4).

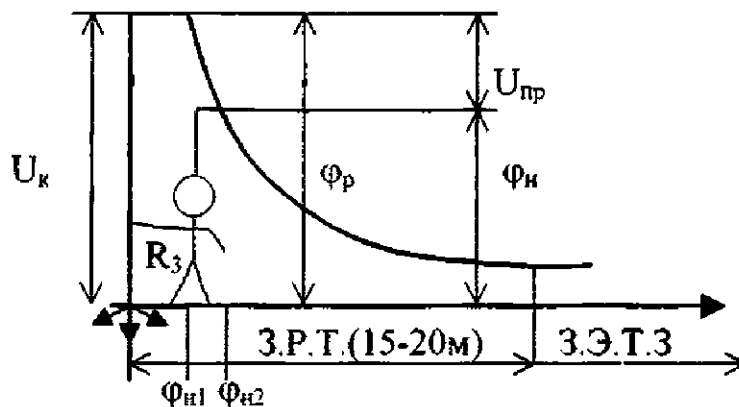


Рис.1.4. Изменение потенциала на поверхности грунта вокруг заземлителя в зависимости от расстояния (х).

Обозначения:

ϕ_p — потенциал рук; ϕ_n — потенциал ног; $U_{пр}$ — напряжение прикосновения; ЗРТ. — зона растекания тока; ЗЭТЗ. — зона электротехнической земли.

При прикосновении к поврежденной и заземленной ЭУ человек оказывается под действием напряжения прикосновения $U_{пр}$, которое определяется разностью потенциалов крайних точек электрической цепи через тело человека, обычно «рука-ноги», т.е.

$$U_{пр} = \phi_p - \phi_n = \phi_p (1 - \phi_n / \phi_p) = \phi_p \alpha_1 = U_k \alpha_1 = I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha_1, \quad (1.5)$$

где α_1 — коэффициент напряжения прикосновения.

Величина α_1 изменяется от нуля при $\phi_p = \phi_n$ и до 1 при $\phi_n = 0$ (при нахождении человека в зоне электротехнической земли).

Определённую опасность для человека может представлять также разность потенциалов между отдельными точками на поверхности поля растекания тока. Напряжение между точками, находящимися одна от другой на расстоянии шага (рис. 1.4), называется напряжением шага U_m и равно:

$$U_m = \phi_{n1} - \phi_{n2} = I_3 \cdot U_3 \cdot \beta_3, \quad (1.6)$$

где β_3 — коэффициент напряжения шага.

Для обеспечения электробезопасности сопротивление заземляющего устройства R_3 необходимо поддерживать достаточно малым, не превышающим в сетях напряжением до 1000 В 4 Ом (10 Ом — при мощности сети < 100 кВА.). Тогда напряжение прикосновения не превысит допустимого значения 42 В при длительности воздействия более 1 с.

Требуемое значение R_3 можно обеспечить следующими способами:

путем использования не одного, а нескольких заземлителей, соединенных параллельно;

правильным выбором расстояния между заземлителями и их взаимным расположением;

размещением заземляющего устройства в грунтах с достаточно малым значением удельного сопротивления ρ .

Заземление электроустановок следует выполнять в следующих случаях:

при напряжениях 380 и 440 В и выше соответственно переменного и постоянного тока;

при номинальных напряжениях, равных 42 В и выше переменного, 110 В и выше постоянного токов в помещениях с повышенной и особой опасностью и в наружных электроустановках;

во взрывоопасных помещениях при всех величинах напряжений переменного и постоянного токов.

Зануление

Для устранения опасности поражения работающих электрическим током при прикосновении к корпусу и другим нетоковедущим металлическим частям электрооборудования, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания фазного провода на корпус в сетях с заземленной нейтралью, наряду с другими мерами применяется зануление.

Зануление — это преднамеренное, электрическое соединение корпусов оборудования и других металлических нетоковедущих его частей, которые могут оказаться под напряжением, с неоднократно заземлённым защитным проводником сети (рис.1.5). В трёхфазных четырёхпроводных сетях с заземлённой нейтралью в качестве такого проводника служит заземлённая нейтраль сети (нулевой защитный проводник).

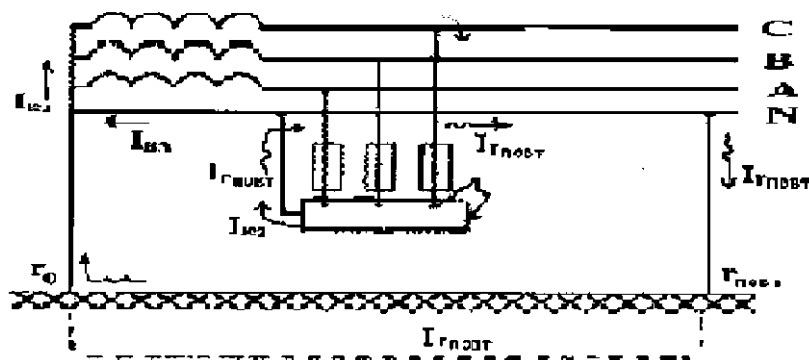


Рис.1.5. Принципиальная схема зануления.

Принцип действия зануления основан на превращении замыкания на корпус электроустановки в однофазное короткое замыкание с целью появления большого тока, способного обеспечить срабатывание защиты и тем самым автоматически отключить поврежденную установку от питающей сети. Заземление корпусов ЭУ через нулевой защитный проводник посредством повторного заземления снижает также их напряжение относительно земли, до срабатывания защиты и отключения установки от сети.

В качестве защиты при занулении могут применяться плавкие предохранители, магнитные пускатели с тепловой защитой и др., автоматы с расцепителями, осуществляющие защиту от токов короткого замыкания и перегрузок.

Зануление как защитная мера применяется в трехфазных четырехпроводных сетях с заземленной нейтралью, в двухпроводных сетях переменного тока с заземленным выводом или в сетях постоянного тока при заземленной средней точке источника или полюса.

Применение в этих случаях защитного заземления неэффективно, так как оно не уменьшает напряжение корпуса ЭУ, находящегося в контакте с токо-ведущими частями (фазным проводом), до безопасной величины. Так, в сети 380/220 В с заземленной нейтралью напряжение на корпусе заземленной ЭУ U_k при нормативных значениях сопротивления нейтрали $r_0 = 4$ Ом и заземления $R_3 = 4$ Ом будет равно:

$$U_k = I_3 R_3 = \frac{U_\phi}{r_0 + R_3} R_3 = \frac{220}{4 + 4} 4 = 100 \text{ В}, \quad (1.7)$$

что опасно для жизни, т.к. $U_{пр}$ при $t > 1$ с не должно превышать 42 В (50 Гц).

Назначение нулевого защитного проводника сети состоит в обеспечении необходимого для отключения установки достаточного значения тока короткого замыкания **IK3** путем создания для этого тока цепи с малым сопротивлением.

Заземление нейтрали (источника напряжения) предназначено для снижения напряжения зануленных корпусов относительно земли в аварийном режиме работы сети, т. е. при замыкании одной из фаз на землю (рис. 1.6).

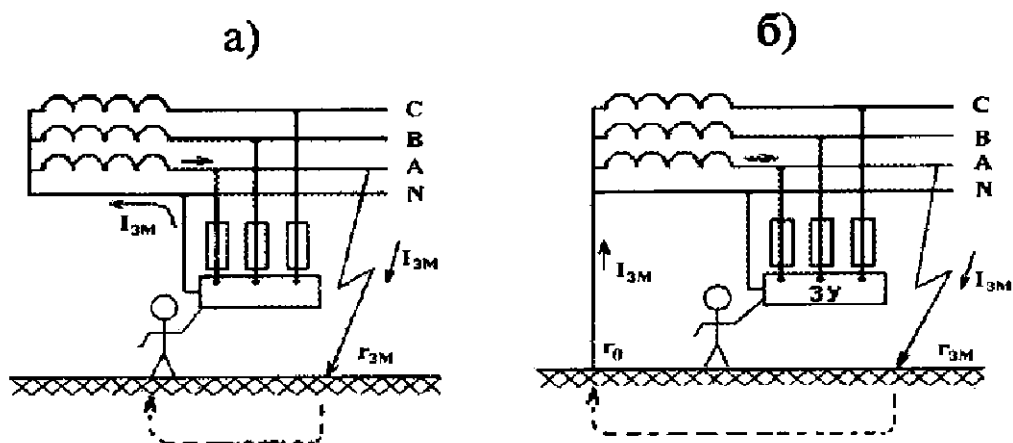


Рис.1.6. Замыкание фазы на землю в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью.

Как видно из рис.1.6,а, в аварийной сети с изолированной нейтралью напряжение, действующее на человека (напряжение прикосновения), практически будет равно фазному напряжению ($U_{пр} = U_\phi$), а в сети с заземленной нейтралью (рис. 1.6, б) оно снизится до значения $U_{пр} = I_3 r_0$, уменьшая этим опасность прикосновения к зануленному корпусу.

При возможном обрыве нулевого защитного проводника и не срабатывании зануления, его повторное заземление ($r_{повт}$) обеспечит значительное снижение напряжения прикосновения (рис.1.7):

$$U_{пр} = U_k \cdot \alpha_1 = I_{r_{повт}} \cdot r_{повт} \cdot \alpha_1 = \frac{U_\phi}{r_0 + r_{повт}} r_{повт} \cdot \alpha_1, \quad (1.8)$$

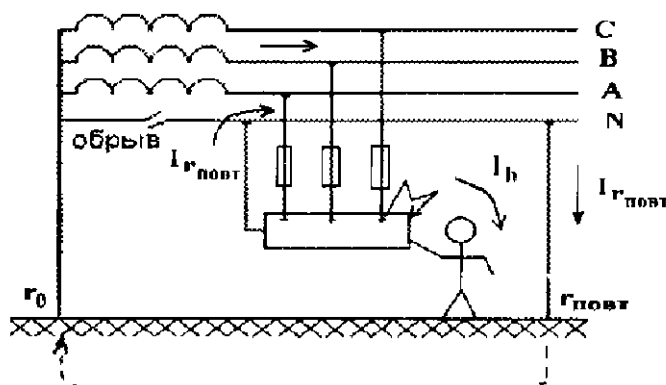


Рис. 1.7.Замыкание на корпус при обрыве нулевого защитного провода.

Для надежной работы зануления к нему предъявляются следующие требования:

а) значение тока однофазного короткого замыкания на зануленный корпус электроустановки должно удовлетворять условию:

$$I_{\text{кз}} \geq k \cdot I_n, \quad (1.9)$$

где I_n — номинальный ток перегорания плавкой вставки предохранителя или ток срабатывания автоматического выключателя, А;

k — коэффициент кратности тока, принимается равным 3 при защите электроустановки плавким предохранителем (4 - во взрывоопасных помещениях); если защита осуществляется автоматическим выключателем с номинальным током до 100 А, $k = 1,4$. Для прочих автоматов $k = 1,25$;

б) сечение и материал нулевого защитного провода выбираются исходя из условия, что его проводимость должна составлять не менее 50 % проводимости фазного провода, т.е. $R_N < 2R_{\text{ф}}$;

в) для обеспечения непрерывности цепи зануления запрещается вставлять в нулевой провод предохранители или выключатели. Исключения допускаются в том случае, если выключатель вместе с нулевым проводом размыкает и все фазные провода.

г) для воздушных линий повторное заземление нулевого провода должно выполняться через каждые 250 м и на концах ответвлений длиной 200 м и более.

д) зануление должно осуществляться специальным проводником, который не может служить одновременно проводником рабочего тока (например, однофазных потребителей);

е) сопротивление повторных заземлений должно быть не более: 20 Ом при $U_n=220$ В, 10 Ом при 380 В, 5 Ом при 660 В.

Для надежной работы зануления необходимо осуществлять контроль его исправности. Зануление проверяется при вводе электроустановок в эксплуатацию, периодически (не реже 1 раза в 5 лет) и после ремонта. Для проверки соответствия зануления требованиям безопасности необходимо замерять сопротивление заземления нейтрали, сопротивление повторных заземлений, целостность зануляющей цепи, а также сопротивление петли "фаза-нуль".

Измерение сопротивления петли "фаза-нуль" проводится с целью определения истинного значения полного сопротивления цепи однофазного замыкания, которое должно быть таким, чтобы ток $I_{кз}$ был достаточным для отключения поврежденной установки от сети:

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{мр}} + Z_{\text{п}}}, \quad (1.10)$$

где $Z_{\text{мр}}$ — сопротивление трансформатора сети (источника энергии);

$Z_{\text{п}}$ — сопротивление петли "фаза-нуль". Величина сопротивления $Z_{\text{п}}$ может быть определена из следующего выражения:

$$Z_{\text{п}} = \sqrt{(R_{\phi} + R_{\text{н}})^2 + (X_{\phi} + X_{\text{н}} + X_{\text{п}})^2} \quad , \quad (1.11)$$

где $R_{\phi}, R_{\text{н}}$ — активные сопротивления фазного и нулевого проводов, соответственно;

$X_{\phi}, X_{\text{н}}$ — индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводов, соответственно;

$X_{\text{п}}$ — внешнее индуктивное сопротивление петли "фаза-нуль". Для измерения сопротивления можно использовать схему вольтметра-амперметра, представленную на (рис.1.8.).

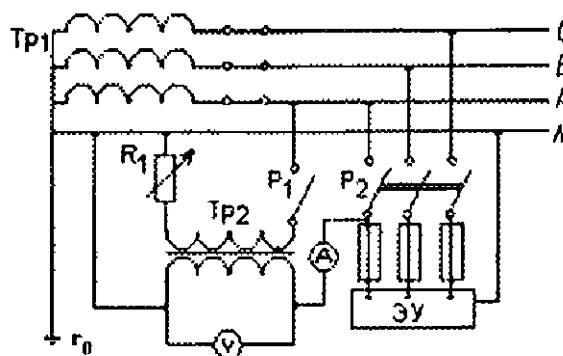


Рис.1.8. Схема измерения сопротивления петли «фаза-нуль».

Для измерения сопротивления $Z_{\text{п}}$, необходимо один вывод вторичной обмотки понижающего трансформатора присоединить к нулевому защитному проводнику, другой — к одному из фазных проводов, идущих к электроустановке после выключателя, который при этом должен быть отключен. Искомое сопротивление определяется как частное от деления этих показаний:

$$Z_{\text{п}} = \frac{U_{\text{изм}}}{I_{\text{изм}}}, \text{ Ом.} \quad (1.12)$$

Защитное отключение

Защитное отключение — это такой вид быстродействующей защиты, который обеспечивает автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения электрическим током (например, при замыкании фазы на корпус, снижении сопротивления изоляции сети ниже определенного значения, при

прикосновении человека непосредственно к токово-дущим частям, при переходе напряжения с высшей стороны трансформатора на низшую и т. п.).

Поврежденная ЭУ и нарушение нормального режима работы сети приводят к изменениям электрических параметров установки или сети, которые могут быть использованы как входные величины для срабатывания устройств защитного отключения (УЗО). В зависимости от того, что является входной величиной (уставкой), на изменение которой реагирует схема отключения, применяют следующие типы УЗО: на напряжении корпуса относительно земли; на токе замыкания на землю; на токе нулевой последовательности и др.

УЗО должны удовлетворять высокой чувствительности, малому времени отключения, избирательности действия, т. е. способности осуществлять самоконтроль исправности и надежности.

Применение УЗО практически не ограничено, т. е. они могут применяться в сетях любого напряжения постоянного и переменного токов, трехфазных сетях с любым режимом нейтрали. Особенно рациональной мерой защиты защитное отключение является в передвижных электроустановках, в условиях, когда по каким-либо причинам трудно осуществить защитное заземление или зануление, а также при использовании ручного электроинструмента.

На рис.1.9 представлены две схемы УЗО — на напряжении корпуса относительно земли и на токе замыкания на землю.

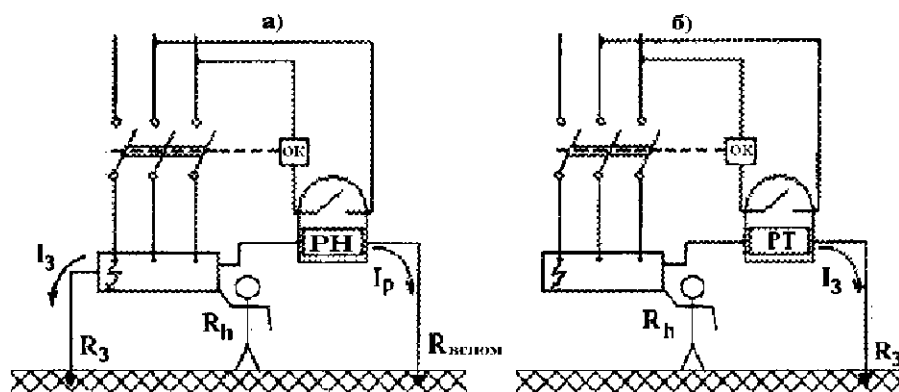


Рис.1.9 Принципиальные схемы УЗО, реагирующие: а - на напряжение корпуса относительно земли; б - на ток замыкания на землю.

Датчиком в схеме УЗО на напряжении корпуса относительно земли (рис.1.9,а) служит реле максимального напряжения РН, включенное между защищаемым корпусом и вспомогательным заземлителем. При пробое фазы на корпус напряжение на нем относительно земли снизится до значения $U_k = I_3 R_3$ (вследствие наличия защитного заземления).

Если величина U_k будет равна или превысит допустимое значение напряжения прикосновения ($U_k > U_{пд}$), срабатывает УЗО, и поврежденная установка отключается от сети. В данной схеме уставкой является допустимое значение напряжения прикосновения $U_{пд}$. Напряжение срабатывания реле максимального

напряжения $U_{\text{ср}}$ можно определить из выражения:

$$U_{\text{ср}} = I_{\text{р}} \cdot Z_{\text{р}} = \frac{U_{\text{пд}}}{Z_{\text{р}} + R_{\text{вспом}}} Z_{\text{р}}, \text{В}, \quad (1.13)$$

где $Z_{\text{р}}$ — полное сопротивление реле, Ом;

$I_{\text{р}}$ — ток реле, А.

При расчете сопротивления вспомогательного заземлителя необходимо учитывать оптимальное соотношение $Z_{\text{р}}/Z_{\text{вспом}} = 6/7$.

Эта схема УЗО может применяться в сетях любого напряжения как дополнительная мера к защитному заземлению, когда оно малонадежно или недостаточно эффективно.

Достоинством этой схемы является ее простота, а основными недостатками — необходимость вспомогательного заземления, отсутствие селективности отключения при присоединении к одному заземлителю нескольких электроустановок.

Принцип действия УЗО на токе замыкания на землю (рис.1.9,б) заключается в отключении поврежденной установки от сети, если ток, проходящий через заземляющий проводник, превысит $I_{\text{уст}}$, при котором напряжение прикосновения имеет допустимое значение. Датчиком здесь служит реле тока РТ, включенное непосредственно в заземляющий провод и обладающее малым сопротивлением. При замыкании фазы на корпус ток I_3 , если он превышает величину тока уставки ($I^{\wedge}$), вызывает срабатывание реле и ЭУ отключается от сети. Величина тока уставки определяется из выражения:

$$I_{\text{уст}} = \frac{U_{\text{пд}}}{Z_{\text{р}} + R_3}, \quad (1.14)$$

где $U_{\text{пд}}$ — величина допустимого напряжения прикосновения, зависящая от времени срабатывания РТ;

$Z_{\text{р}}$ — полное сопротивление РТ;

R_3 — сопротивление заземлителя. Ом.

Эта схема УЗО может применяться как дополнительная мера защиты к защитному заземлению или занулению.

Измерение сопротивления заземляющего устройства

Для определения соответствия заземляющего устройства требованиям безопасности необходимо проводить измерение его сопротивления после монтажа, при комплексном ремонте электроустановок, а также периодически — через три года на подстанциях потребителей и через год в цеховых электроустановках.

Измерение сопротивления заземляющего устройства R_3 осуществляется различными методами, наиболее простым из которых является метод амперметра-вольтметра.

В настоящей лабораторной работе для измерения R_3 применяется прибор М-416. Инструкция по его эксплуатации изложена на внутренней стороне крышки прибора, а схема измерения сопротивления заземления показана на рис.1.10.

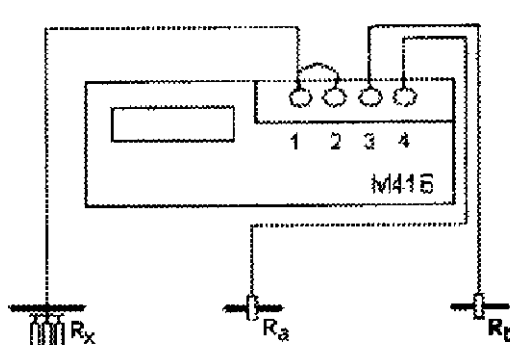


Рис.1.10. Схема измерения сопротивления заземления измерителем М-416.

Контроль сопротивления изоляции

Как указывалось выше, в целях обеспечения электробезопасности в сетях с изолированной нейтралью осуществляется периодическое измерение сопротивления изоляции в установленные сроки (не реже одного раза в 3 года), после монтажа электроустановок и ремонтных работ. Величина сопротивления изоляции в электроустановках напряжением до 1000 В должна соответствовать нормам, приведенным в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Наименование электрооборудования	Значение допустимого сопротивления изоляции, МОм	Испытательное напряжение, В
Силовые и осветительные электропроводки, обмотки статора электродвигателя переменного тока и др.	1	1000
Вторичные цепи управления, защиты, измерения, сигнализации в релейно-контактных схемах	0,5	500-1000
Вторичные обмотки измерительных трансформаторов с присоединёнными к ним цепями и комплектных распределительных устройств.	1	500-1000

Необходимость систематических измерений сопротивления изоляции обусловлена изменением ее диэлектрических свойств под влиянием возможных механических повреждений, термических воздействий, увлажнения, химически активных загрязнений воздушной среды и др.

Измерения проводят между каждым проводом и землей, а также между двумя любыми проводами на участках, разделенных двумя смежными предохранителями, после полного отключения электропроводов и всех электроустановок и снятия остаточных емкостных зарядов с их токоведущих частей.

Для измерения сопротивления изоляции используют мегомметры, которые три зажима Л(линия), З(земля), Э(экран). Схема измерения сопротивления изоляции между фазными проводами и землей показана на рис. 1.11.

выпускаются на напряжения 500, 1000 и 2500 В. Мегомметр М1101 имеет

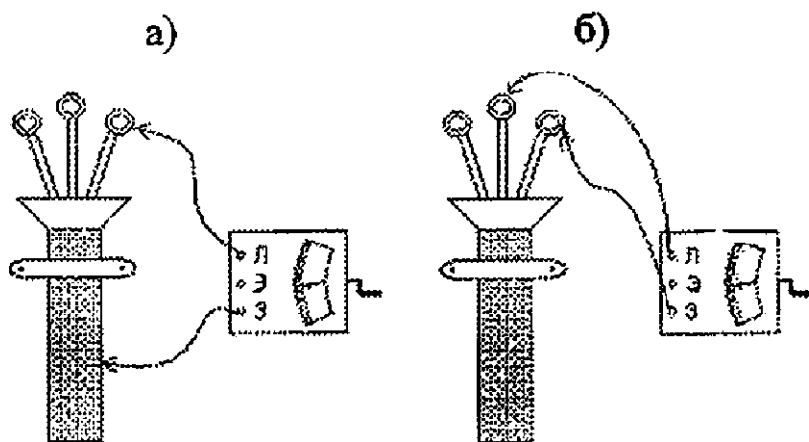


Рис.1.11.Схема измерения сопротивления изоляции мегомметром:
а - между проводом и землёй (корпусом); б - между фазными проводами.

Экспериментальная часть

Меры безопасности при выполнении лабораторных работ по электробезопасности

1. К выполнению работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж на рабочем месте по технике безопасности с соответствующей записью в специальном журнале.
2. Перед тем как приступить к выполнению работы, студент обязан изучить теоретическую часть лабораторной работы, ознакомиться с методами измерения и измерительной аппаратурой.
3. При выполнении экспериментальной части работы необходимо строго соблюдать требования безопасности и производственной санитарии, изложенные в Инструкциях №1 и №2.

Лабораторная работа №1 Оценка опасности электропоражения при использовании трёхфазных трёхпроводных сетей с изолированной нейтралью

Цель работы

1. Исследовать влияние параметров трехфазной трехпроводной сети напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью на величину тока, протекающего через тело человека, прикоснувшегося к корпусу поврежденной электроустановки (ЭУ).

2. Исследовать эффективность защитного заземления как технического способа обеспечения электробезопасности.

1.1. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на специальном стенде, где имеется возможность изменять величину сопротивления изоляции и емкость проводов сети относительно земли, определять эффективность защитного заземления в различных условиях.

1. Исследовать зависимость тока, проходящего через тело человека, прикоснувшегося к незаземленному корпусу поврежденной ЭУ, от величины активной и емкостной составляющих сопротивления изоляции фазных проводов относительно земли и величины сопротивления изоляции фазного провода, замкнувшегося на корпус установки (рис.1.1). Для этого с помощью перемычки замкнуть фазу С на корпус установки. Пользуясь соответствующими переключателями, установить требуемые параметры сети, а через миллиамперметр подключить изображение тела человека к корпусу установки. Измерить и занести в табл. 2.1.1. величину тока, проходящего через тело человека, при указанных условиях.

Таблица 2.1.1.

№ п/п	R_A , кОм	R_B , кОм	R_C , кОм	C , мкф	Величина I_h (мА) при незаземленном корпусе ($R_3 = \infty$)
1	5	5	5	0	
2	50	50	50	0	
3	100	100	100	0	
4	500	500	500	0	
5	500	500	500	0,5	
6	500	500	500	2,5	
7	500	500	100	0	
8	500	500	50	0	
9	500	500	5	0	
10	5	5	5	2,5	

3. Произвести необходимые измерения мегомметром и оценить состояние изоляции токоведущих частей ЭУ относительно друг друга и земли (заземленного корпуса с $R_3 = 4 \text{ Ом}$) и на исследуемом участке сети согласно нормативным требованиям. Результаты измерений занести в табл. 2.1.2.

Таблица 2.1.2

№ п/п	Место и условия измерения сопротивления изоляции при отключённой установке и сети	Величина сопротивления изоляции R, кОм.		Вывод
		Фактическая	Требуемая	
1	Точка А относительно корпуса		≥ 500	
2	Точка В относительно корпуса		≥ 500	
3	Точка С относительно корпуса		≥ 500	
4	Фаза А относительно земли		≥ 500	
5	Фаза В относительно земли		≥ 500	
6	Фаза С относительно земли		≥ 500	
7	Межфазное сопротивление: А-В		≥ 500	
7.2	В-С		≥ 500	
7.3	С-А		≥ 500	

4. Исследовать зависимость тока I_h при прикосновении к заземленному корпусу поврежденной электроустановки от величины сопротивления заземляющего устройства R_3 . Для этого подключить изображение тела человека к корпусу установки, измерить и занести в табл. 2.1.3. значение тока I_h в случаях, указанных в этой таблице.

Таблица 2.1.3

№ п/п	R_A кОм	R_B кОм	R_C кОм	С МкФ	Величина I_h при заземлённом корпусе		
					$R_3=4 \text{ Ом}$	$R_3=10 \text{ Ом}$	$R_3=100 \text{ Ом}$
1	5	5	5	0			
2	500	500	500	2,5			
3	5	5	5	2,5			

5. Произвести контрольные измерения величины сопротивления заземляющих устройств с помощью прибора М-416 по методике, указанной в инструкции по

Таблица 2.1.4.

Величина сопротивления R_3 заземлителя, Ом		Вывод
Измеренная	Нормативная	
	4	
	10	

6. Выключить стенд.

7. Произвести анализ полученных данных и построить графики зависимостей:

1) $I_h = f(R)$ при $R_A = R_B = R_C = R$ и $C = 0$;

2) $I_h = f(C)$ при $R = 500$ кОм;

3) $I_h = f(R_C)$ при $R_A = R_B = 500$ кОм, $C = 0$;

4) $I_h = f(R_3)$;

где R_C — сопротивление изоляции фазы C , которая при эксперименте замыкается на корпус установки;

R — сопротивление изоляции фазных проводов относительно земли;

C — электрическая ёмкость фазных проводов относительно земли;

R_3 — сопротивление защитного заземления электроустановки.

8. По проделанной работе составить письменный отчет, в котором представить принципиальную схему исследуемой сети, таблицы с результатами измерений, необходимые графики и письменные выводы о результатах выполненных измерений и исследований.

эксплуатации прибора. Результаты измерений занести в табл.2.1.4.

1.2. Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на опасность поражения человека электрическим током?
2. Какие типы трехфазных сетей преимущественно применяются на производстве, в общественных и жилых зданиях?
3. Какое влияние оказывают активная и емкостная проводимости фаз относительно земли на величину поражающего тока в трехфазных сетях с изолированной нейтралью при однофазном прикосновении?
4. Как влияет на опасность электропоражения замыкание фазного проводника на землю в сетях с различным режимом нейтрали?
5. Какие факторы влияют на сопротивление изоляции? Каковы его нормативные значения?
6. В чём состоит принцип защитного заземления?
7. Каковы значения нормативных сопротивлений защитного заземления, почему?
8. Что такое поле растекания тока, напряжение прикосновения и напряжение шага? Как рассчитать их значения?
9. В каких случаях требуется заземлять корпуса электрооборудования в зависимости от величины напряжения питания и условий эксплуатации потребителя электрической энергии?
10. Опишите методики измерения сопротивления защитного заземления и сопротивления изоляции.

Лабораторная работа №2 Исследование эффективности технических способов защиты от электропоражения в трёхфазных сетях с изолированной и заземлённой нейтралью

Цель работы

1. Исследовать влияние режима нейтрали (изолированной, заземленной) на безопасность трехфазных сетей.
2. Исследовать эффективность зануления. Экспериментально подтвердить полезность с точки зрения электробезопасности наличие в трехфазной сети нулевого провода и его повторного заземления.
3. Исследовать эффективность применения устройств защитного отключения (УЗО). Сравнить его защитные свойства с занулением.

2.1. Порядок выполнения работы

1. Определить опасность прикосновения человека к корпусу поврежденной установки (при замыкании фазного провода на корпус), питающейся от трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью и трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью при нормальном и аварийном режимах работы сетей (смотри теоретическую часть рис.1.1, 1.2, 1.3)

Степень опасности поражения электрическим током определяется величиной тока, протекающего через тело человека

Результаты измерений занести в табл.2.2.1. (обозначения Н и А соответствуют нормальному и аварийному режимам работы сети).

Таблица 2.2.1.

Режим работы сети	Величина тока I_h (мА) при прикосновении человека к корпусу поврежденной установки		Выводы
	Режим нейтрали трёхфазной сети		
	Изолированная	Заземленная	
Н			
А			

На основании результатов исследования сделать выводы:

а) о степени опасности трехфазных сетей в нормальном и аварийном режимах;

б) о роли режима нейтрали (заземленная, изолированная от земли) как в нормальном, так и в аварийном режимах работы сетей.

4. Исследовать эффективность действия защитного заземления и зануления в трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью при пробое фазы на корпус установки и появлении в результате этого реальной опасности поражения персонала электрическим током. Результаты исследования занести в табл. 2.2.2. и сделать вывод об эффективности того или иного способа защиты в данной трехфазной сети.

Таблица 2.2.2.

Величина тока I_h (мА) при прикосновении человека к корпусу поврежденной установки		Выводы
Установка заземлена	Установка занулена	

5. Исследовать эффективность защитного действия зануления в следующих случаях:

а) при заземленной и изолированной от земли нейтрали в аварийном режиме работы сети без пробоя фазного провода на корпус электроустановки (см. рис.1.6);

б) при наличии и отсутствии повторного заземления нулевого защитного провода, в случае обрыва последнего в четырехпроводной сети с заземленной нейтралью и при пробое фазного провода на корпус электроустановки (см. рис.1.7). Для блокировки автоматической защиты зануления включать тумблер

Полученные данные занести в табл.2.2.3. и сделать вывод о роли заземления нейтрали источника и повторного заземления нулевого защитного провода при занулении.

Таблица 2.2.3

Режим работы сети и электроустановки	Величина тока I_h (мА) при прикосновении человека к корпусу установки	Выводы
1. Аварийный режим работы сети (одна из фаз замкнута на землю); установка не повреждена: а) нейтраль заземлена; б) нейтраль изолирована от земли; 2. Обрыв нулевого провода сети, пробой фазы на корпус установки: а) наличие повторного заземления нулевого провода; б) отсутствие повторного заземления нулевого провода.		

6. Проверить надежность работы зануления, т.е. соответствие величины тока однофазного короткого замыкания $I_{кз}$ (при пробое фазы на корпус).

Величина I_0 определяется по формуле 1.10, а Z_n измеряется по схеме вольтметра-амперметра (см. рис.1.8). Сопротивление трансформатора принять равным $Z_{ТР}=30$ Ом. Так как в данном случае в качестве защиты применяется автоматический выключатель с номинальным током $I_{нл} = 4,5$ А (т.е. до 100 А), то $k=1,4$.

Полученные данные занести в табл. 2.2.4 и сделать вывод о надежности работы зануления.

Таблица 2.2.4.

Z_n , Ом	$I_{кз}$, А	kI_n , А	Выводы

7. Исследовать эффективность действия УЗО на токе замыкания на землю (см.рис.1.9,б), т.е. опытным и расчетным путями определить уставку (величину тока $I_{уст}$, при которой срабатывает УЗО). Для этого собрать схему (рис.2.1.) и, изменяя сопротивление замыкания фазного провода на корпус установки (R_1), измерить величину I_3 ($I_{уст}$), при которой срабатывает УЗО.

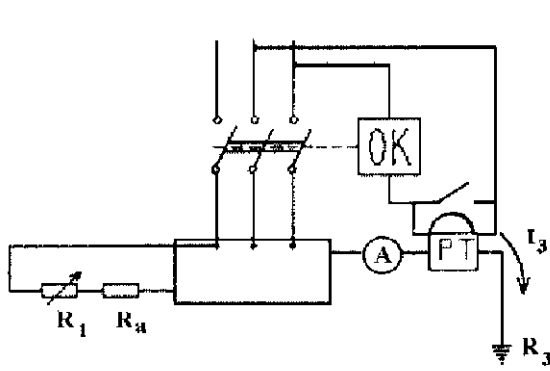


Рис.2.1. Схема УЗО для определения тока уставки.

Используя выражение 1.14., рассчитать необходимую величину $I^{\wedge}L^{\wedge}$, при которой должно сработать УЗО для обеспечения безопасности работающих при пробое фазы на корпус в зависимости от технических характеристик реле тока $R_n = 0,5$ Ом, время срабатывания реле $t < 0,1$ с).

Для определения предельно допустимого напряжения прикосновения $U_{пд}$ от продолжительности воздействия можно использовать выражение $U_{пд} \sim 50/t$.

Полученные данные занести в табл. 2.2.5. и сделать вывод относительно надежности УЗО и его эффективности.

Таблица 2.2.5.

$I_{уст.}$ расчетное, мА	$I_{уст.}$ фактическое,	Вывод

8. Выключить стенд.

9. По выполненной работе составить письменный отчет, в котором представить:

- а) название лабораторной работы и ее цель;
- б) принципиальные схемы исследования по всем пунктам;
- в) табл. 2.2.1 - 2.2.5 с полученными результатами исследования и выводами по ним.

На основании результатов исследований сделать выводы:

а) о степени опасности трехфазных сетей в нормальном и аварийном режимах работы;

б) о роли режима нейтрали (заземленная, изолированная от земли) как в нормальном, так и в аварийном режимах работы сети.

4. Исследовать эффективность действия каждого из предложенных средств защиты: защитного заземления или зануления, в трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью при пробое фазы на корпус ЭУ и появлении в результате этого реальной опасности поражения персонала электрическим током. Результаты исследования занести в табл. 2.3.4 и сделать вывод об эффективности того или иного способа защиты в трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью.

Таблица 2.3.4.

Величина тока I_h (мА) при прикосновении человека к корпусу поврежденной установки		Выводы
Установка заземлена	Установка занулена	

5. Исследовать эффективность защитного действия:

а) при заземленной и изолированной от земли нейтрали в аварийном режиме работы сети (т.е. при замыкании одной из фаз на землю) без пробоя фазного провода на корпус ЭУ (см. рис.1.6);

б) при наличии и отсутствии повторного заземления нулевого защитного провода в случае обрыва последнего в четырехпроводной сети с заземленной нейтралью и при пробое фазного провода на корпус ЭУ (см.рис. 1.7).

Полученные данные занести в табл.2.3.5 и сделать вывод о роли заземления нейтрали источника электрической энергии и повторного заземления нулевого защитного провода в четырехпроводной сети.

Таблица 2.3.5

Режим работы сети и электроустановки	Величина тока I_h (мА) при прикосновении человека к корпусу установки	Выводы
1. Аварийный режим работы сети (одна из фаз замкнута на землю); установка не повреждена : а) нейтраль заземлена; б) нейтраль изолирована от земли. 2. Обрыв нулевого провода сети, пробой фазы на корпус установки: а) наличие повторного заземления нулевого провода; б) отсутствие повторного заземления нулевого провода.		

6. Исследовать эффективность УЗО на токе замыкания на землю (см. рис.2.1), т.е. опытным и расчетным путями определить уставку (величину тока $I_{уст}$, при которой срабатывает УЗО).

Изменяя сопротивление замыкания (R) фазного провода на корпусе установки, измерить величину I_3 , при которой срабатывает УЗО. Используя выражение 1.14, рассчитать необходимую величину I_3 ($I_{3н}$), при которой должно сработать УЗО для обеспечения безопасности работающих.

Таблица 2.3.6

Род тока и частота тока	Нормируемая величина	Наибольшие допустимые значения при продолжительности воздействия, с										
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	>1
Переменный 50 Гц	$U_{пр}$, В	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
	I_h , мА	500	250	196	125	100	85	70	65	55	50	6

Полученные данные занести в табл.2.3.7 и сделать выводы относительно надежности УЗО и его эффективности.

Таблица 2.3.7

$I_{уст}$, расчетное, мА	$I_{уст}$, фактическое, мА	Вывод

7. Ознакомить преподавателя с результатами измерений.

9. По выполненной работе составить письменный отчет, в котором представить:

- а) название лабораторной работы и ее цель;
- б) принципиальные схемы исследований по всем пунктам;
- в) табл.2.3.1-2.3.7 с полученными данными и выводами по ним.

2. Контрольные вопросы

1. Какие основные технические способы и средства используются в электроустановках для обеспечения электробезопасности?
2. Какая трехфазная сеть более безопасна в нормальном и аварийном режимах работы и почему?
3. В чем заключается принцип работы зануления, и в каких сетях оно применяется?
4. Каково назначение нулевого защитного проводника и повторного его заземления в трёхфазных четырёхпроводных сетях с заземлённой нейтралью?
5. Какие требования предъявляются к занулению для обеспечения надежности его работы?
6. Почему в сетях с заземленной нейтралью нельзя применять защитное заземление?
7. В чем заключается принцип действия защитного отключения, область его применения?
8. Что является уставкой в УЗО на напряжении корпуса относительно земли и на токе замыкания на землю?
9. Каковы преимущества УЗО перед другими техническими способами обеспечения электробезопасности?
10. Назовите нормированные значения сопротивления повторного заземления нейтрального (нулевого) провода в сетях напряжением 380/220 В.
11. От чего зависит (в основном) величина тока, проходящего через тело человека, при однофазном прикосновении в трехфазных сетях с изолированной и заземленной нейтралью?
12. Укажите назначение заземления нейтрали в трехфазных четырехпроводных сетях и нормативное значение его сопротивления.
13. Опишите методику измерения сопротивления петли "фаза-нуль".

Литература

1. Правила устройства электроустановок. Изд. 6-е. перераб. и доп. -М: Энергоатомиздат, 1985.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей, -М: Энергоатомиздат, 1986.
3. Михнюк Т.Ф. Охрана труда. Учебник . -Мн.: Дизайн ПРО, 2009, 365с