

Лабораторная работа
(продолжительность занятия 2 часа)
Исследование эффективности
защитного заземления

Цель работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний и получения студентами практических навыков в исследовании защитных свойств заземления в трехфазных сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1 кВ. Системы *IT*; *TT*.

Рабочее задание

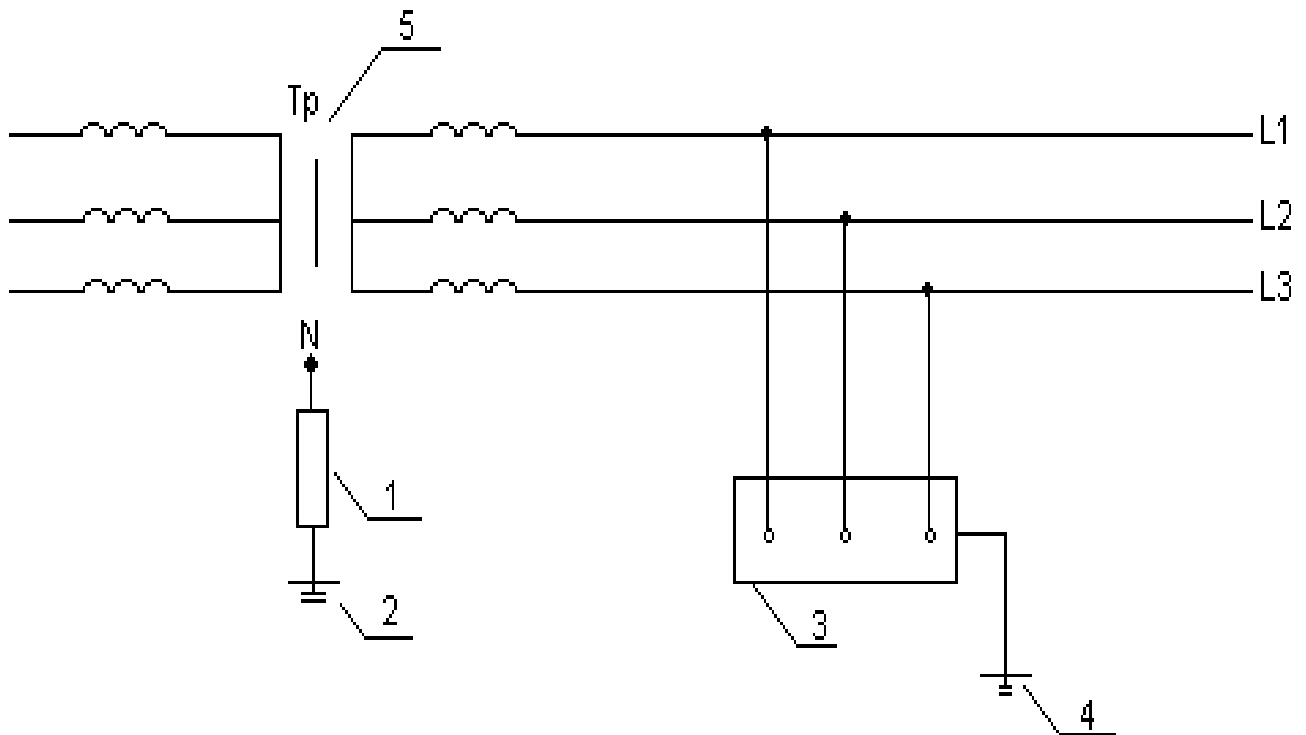
Указания по выполнению работы

Согласно правил устройства электроустановок 7 издания 2002 г. (ПЭУ) электроустановки до 1кВ в отношении мер электробезопасности разделяются на электроустановки в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Рассмотрены электроустановки в сетях с изолированной нейтралью.

Приняты следующие обозначения:

Система IT – система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены (рис. 1).

Рис. 1. Система *IT*

Открытые проводящие части электроустройства заземлены. Нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через большое сопротивление.

1 – сопротивление заземления нейтрали источника питания, (если имеется);

2 – заземлитель;

3 – открытые проводящие части;

4 – заземляющее устройство электроустановки;

5 – источник питания.

Система TT - система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимо от глухозаземленной нейтрали источника (рис. 2).

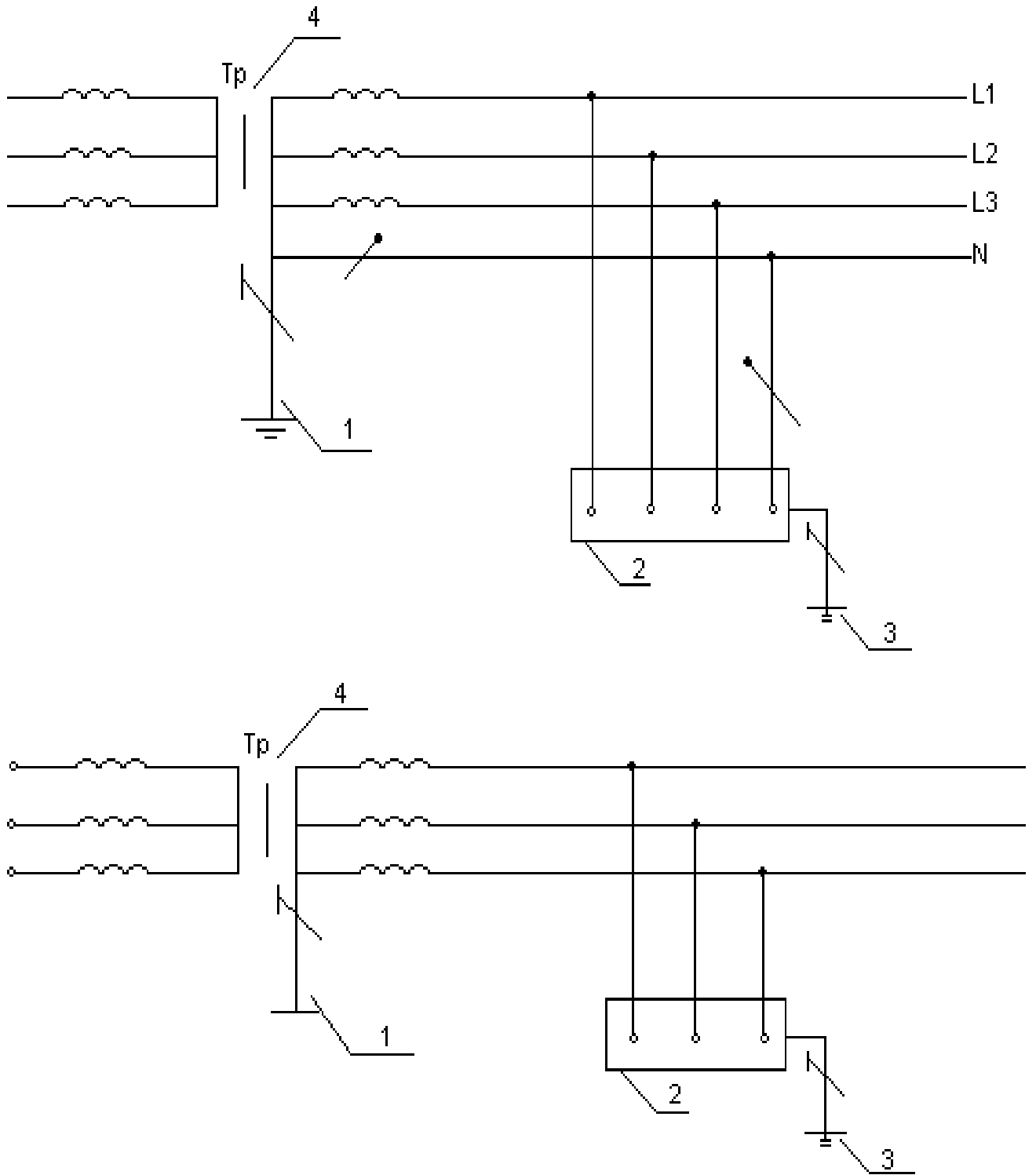


Рис. 2. Система *ТТ*. Открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземления, электрически независимого от заземлителя нейтрали

- 1 – заземлитель нейтрали источника;
- 2 – открытые проводящие части;
- 3 – заземлитель открытых проводящих частей электроустановки;

4 – источник питания.

Первая буква – состояние нейтрали источника питания относительно земли;

T – заземленная нейтраль;

I – изолированная нейтраль.

Вторая буква – состояние открытых проводящих частей относительно земли;

T – открытые проводящие части заземлены, независимо от отношения к земле нейтрали источника питания.

Изолированная нейтраль – нейтраль трансформации или генератора, неприсоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через большое сопротивление приборов сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных устройств.

Глухозаземленная нейтраль – нейтраль трансформации или генератора, присоединенная непосредственно к заземленному устройству.

Проводящая часть – часть, которая может проводить электрический ток.

Токопроводящая часть – проводящая часть электроустановки, находящаяся в процессе ее работы под рабочим напряжением, в то числе нулевой рабочий проводник (*N*)

Открытая проводящая часть – доступная прикосновению проводящая часть электроустановки, нормально не находящаяся под напряжением, но которая может оказаться под напряжением при повреждении изоляции.

Сторонняя проводящая часть – проводящая часть, не являющаяся частью электроустановки.

Прямое прикосновение – электрический контакт людей или животных с токоведущими частями, находящимися под напряжением.

Косвенное прикосновение – электрический контакт людей или животных с открытыми проводящими частями, оказавшимися под напряжением при повреждении изоляции.

Защитное заземление – заземление, выполняемое в целях электробезопасности.

Напряжение прикосновения – напряжение между двумя проводящими частями или между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

Ожидаемое напряжение прикосновения – напряжение между одновременно доступными прикосновению проводящими частями, когда человек или животное их не касается.

Раздел 1. Теоретический расчет

Защитное заземление предназначено для устранения опасности поражения током человека к открытой проводящей части электроустановки.

Область применения защитного заземления *IT* и *TT*.

Принцип действия защитного заземления – снижение напряжения на открытых проводящих частях электроустановки, относительно земли до безопасного значения.

1. Если защитное заземление отсутствует, а у открытой проводящей части повреждена основная изоляция (рис. 3). В этом случае ток, проходящий через тело человека, определяется выражением:

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{(R_h + R_{\text{осн}}) + Z/3} \quad (1)$$

$R_{\text{осн}}$ – сопротивление основания (обувь и пол).

R_h – сопротивление тела человека, Ом.

где $U_{\text{ср}}$ – фазное напряжение, В.

Z – полное сопротивление относительно земли, Ом.

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{3 \cdot (R_h + R_{\text{осн}}) + Z} \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{i}{r} + j\omega c} \quad (3)$$

где r – активное сопротивление фазного провода относительно земли.

c – емкость фазного провода относительно земли.

Напряжение прикосновения определяется выражением:

$$U_{\text{пр.}} = I_h \cdot (R_h + R_{\text{осн.}}) \quad (4)$$

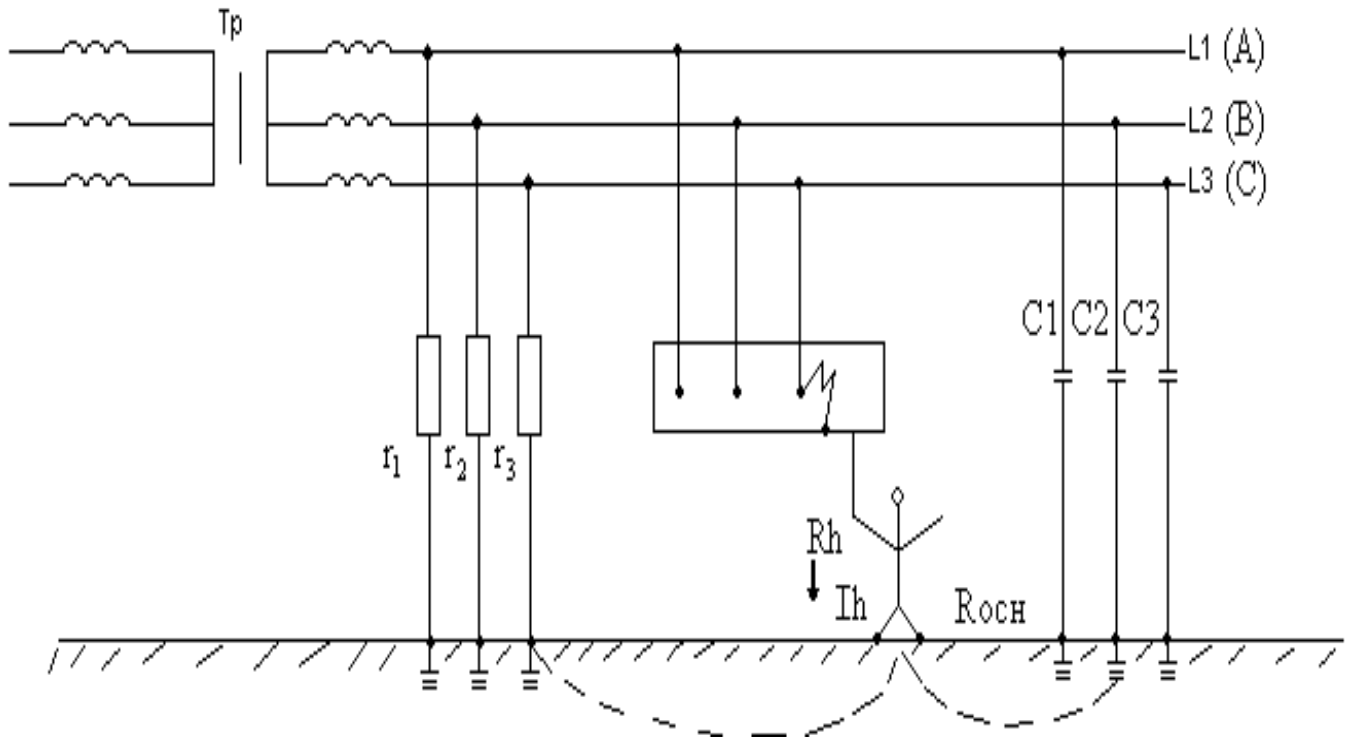


Рис. 3. Система IT при отсутствии защитного заземления

Этот ток может достигнуть опасного значения. Например, если $U_{\text{ср.}} = 220$ В. Сопротивления изоляции фазных проводов $r = 3,0$ кОм, $c = 0$, $R_h = 1000$ Ом, $R_{\text{очн.}} = 1000$ Ом, то ток через человека будет равен:

$$I_h = \frac{3 \cdot U_{\text{ф}}}{3 \cdot (R_h + R_{\text{очн.}}) + r} = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot (1000 + 1000) + 3000} = 73,3 \text{ мА} \quad (5)$$

(Остановка дыхания, фибрилляция сердца).

2. Если применятся защитное заземление, а у открытой проводящей части электроустановки повреждена основная изоляция (рис. 4), то через заземление пройдет ток замыкания – I_3 , который будет являться током однофазного замыкания на землю.

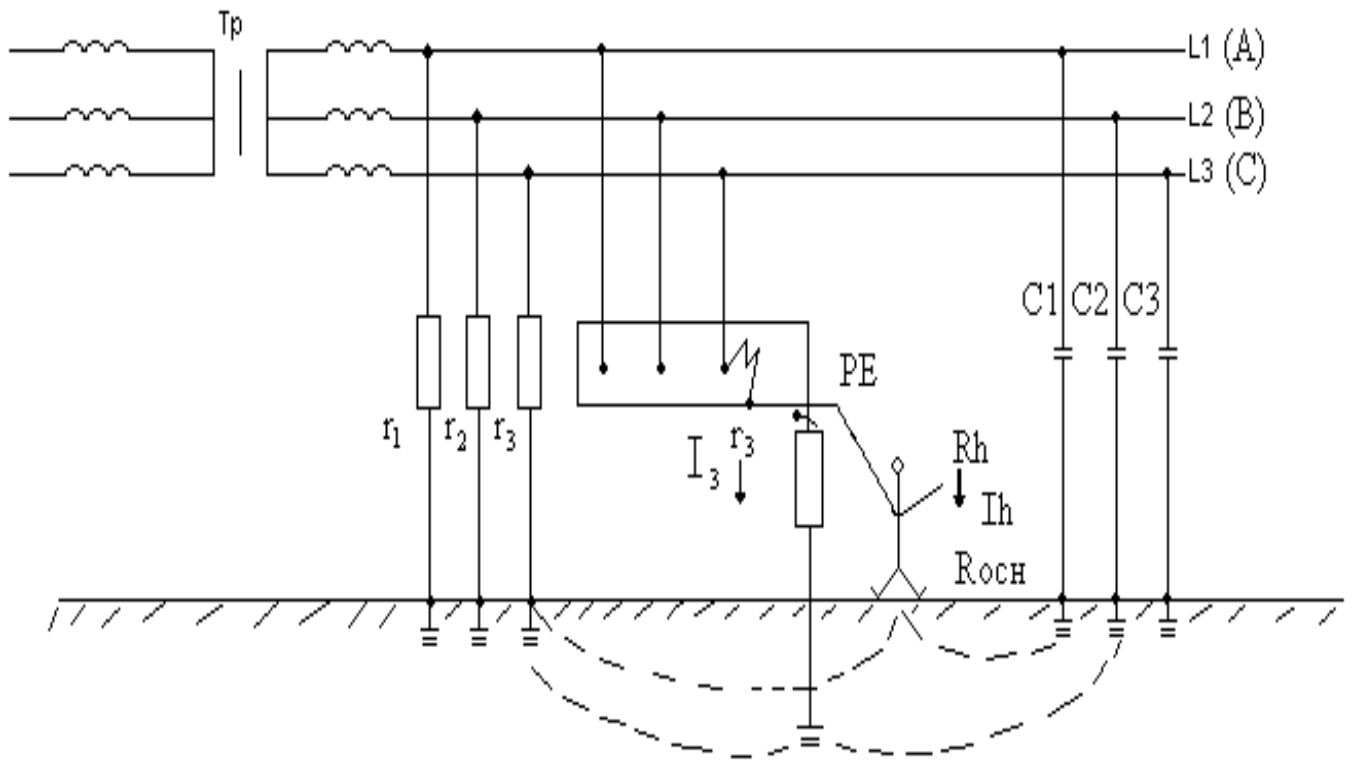


Рис. 4. Система IT

Величина тока замыкания I_3 зависит от сопротивления r_3 , сопротивления фазных проводов относительно земли r и определяется выражением (6) при $r_1 = r_2 = r_3 = r$; $c_1 = c_2 = c_3 = 0$;

$$I_h = \frac{U_\phi}{r_3 + r/3} \quad (6)$$

Напряжение на открытой проводящей части электроустановки относительно земли будет:

$$U_3 = I_3 \cdot r_3 \quad (7)$$

а ток через тело человека определяется:

$$I_h = \frac{U_3}{R_h + R_{\text{очн}}} = \frac{I_3 \cdot r_3}{R_h + R_{\text{очн}}} \quad (8)$$

3. При двухфазном замыкании на открытые проводящие части электроустановок А и В, имеющих отдельные заземлители (рис. 5) возникает 2-х фазное замыкание на землю.

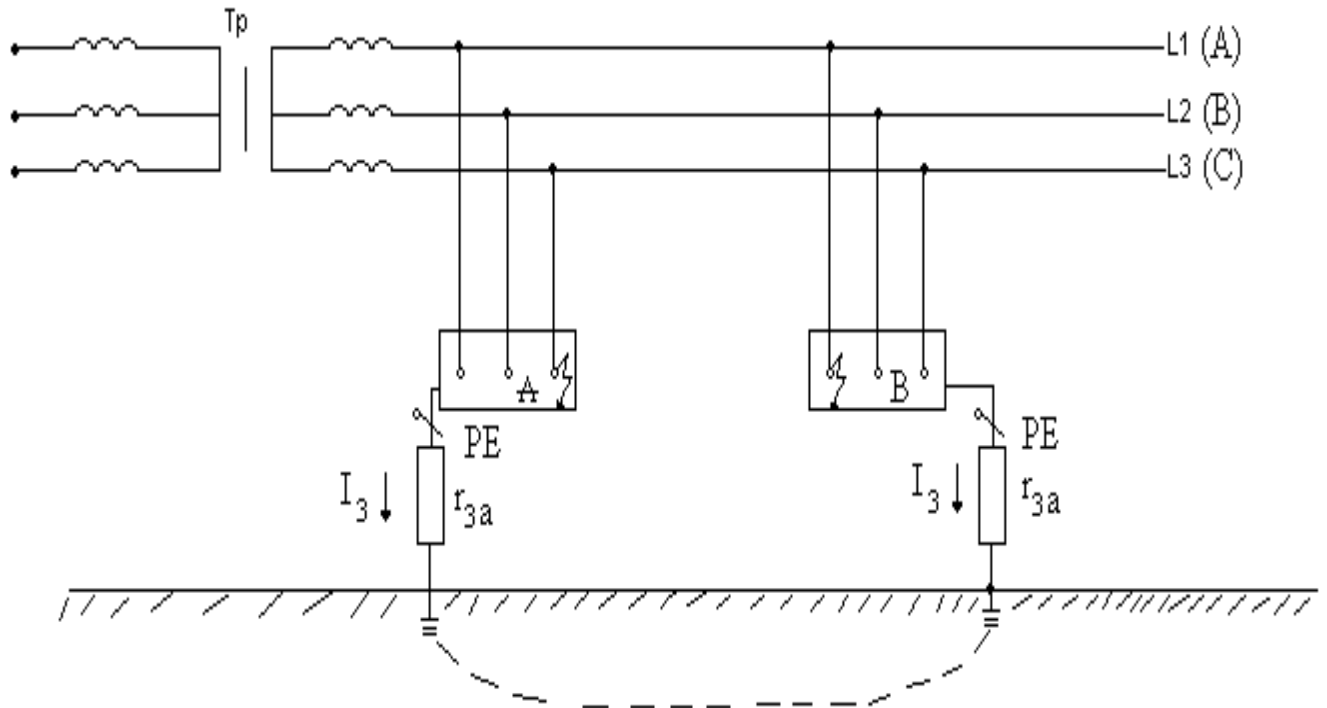


Рис. 5. Система IT с двумя электроустановками

В этом случае заземленные открытые проводящие части электроустановок окажутся под напряжением относительно земли:

$$\left. \begin{aligned} U_A &= I_3 \cdot r_a = \frac{\sqrt{3} \cdot U_\phi}{r_a + r_b} \cdot r_a \\ U_B &= I_3 \cdot r_b = \frac{\sqrt{3} \cdot U_\phi}{r_a + r_b} \cdot r_b \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где r_a и r_b – значения сопротивления заземлителей.

Ток замыкания I_3 определяется из выражения:

$$I = \frac{\sqrt{3} \cdot U_\phi}{r_a + r_b} \quad (10)$$

Сопротивление изоляции и емкости фаз относительно земли практически не влияют на величину тока замыкания на землю. При этом $U_a + U_b = U_{\text{л}}$

Наличие такого напряжения на открытых проводящих частях электроустановок является опасным, поскольку двухфазное замыкание в электроустановках до 1 кВ может существовать длительно.

Если открытые проводящие части электроустановок присоединены к одному заземляющему устройству, то двухфазное замыкание на землю превратится в двухфазное короткое замыкание, что вызовет быстрое отключение защиты.

4. В системе TT (рис. 6) у открытой проводящей части электроустановки повреждена основная изоляция, ток замыкания будет протекать через защитное заземление r_3 и заземлитель нейтрали трансформатора r_0 , величина которого определяется выражением:

$$I = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}}{r_0 + r_3} \quad (11)$$

где r_0 – сопротивление заземлителя нейтрали трансформатора;

r_3 – заземлитель открытой проводящей части электроустановки.

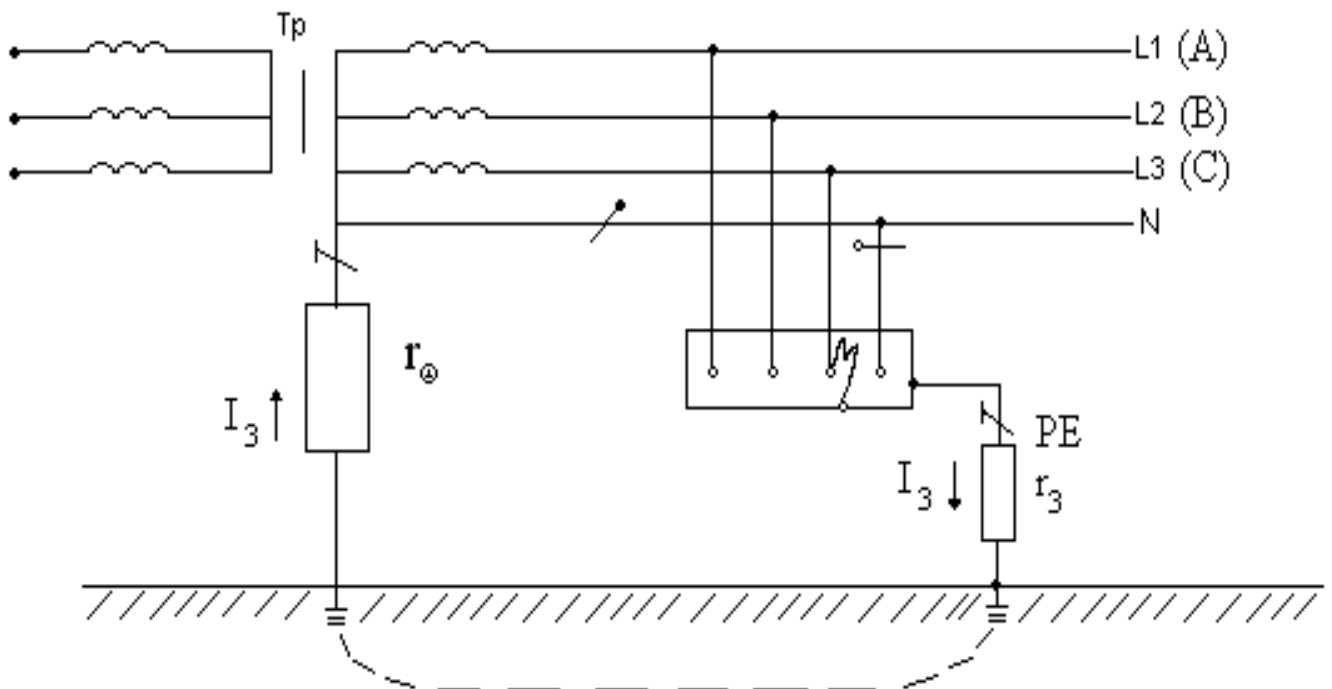


Рис. 6. Система TT с одной электроустановкой

Напряжения на заземлителях распределяются пропорционально сопротивлениям r_0 и r_3 , т.е.

$$U_3 = I_3 \cdot r_3 \quad (12)$$

$$U_0 = I_3 \cdot r_0 \quad (13)$$

$$U_\phi = U_3 + U_0 \quad (14)$$

В рассматриваемой системе TT величина тока замыкания I_3 оказывается больше, чем в системе IT .

По каждой задаче начертить принципиальную схему исследуемой системы. Записать значения параметров сети, используемые уравнения и полученные результаты.

Провести сравнительный анализ результатов исследования и оценить эффективность защиты человека от поражения электрическим током при косвенном прикосновении.

Параметры сети по вариантам приведены в таблице 1 (задания задает преподаватель).

1. По 1. определить I_h и $U_{пр}$.
2. По 2. определить I_3 ; U_3 ; I_h .
3. По 3. определить I_3 ; U_a ; U_B ; U_a .
4. По 4. определить I_3 ; U_3 ; U_0 ; U_ϕ .

Таблица 1

№№ вар.	U_ϕ , Ом	R_h , Ом	$R_{осн.}$, Ом	r , кОм	c , мкФ	r_3 , Ом	r_0 , Ом	$r_{за}$, Ом	$r_{зв.}$, Ом
1	220	1000	1500	5	0,01	4,0	4,0	4,0	4,0
2	220	1100	1600	10	0,02	3,6	3,9	4,0	4,0
3	380	1200	1700	15	0,03	3,5	3,8	4,0	4,0
4	380	1300	1800	20	0,04	3,4	3,7	4,0	4,0
5	220	1400	1900	25	0,05	3,5	3,6	4,0	4,0
6	220	1500	2000	30	0,06	3,6	3,5	4,0	4,0
7	380	1400	1900	35	0,07	3,7	3,6	4,0	4,0
8	380	1300	1800	40	0,08	3,8	3,7	4,0	4,0
9	220	1200	1700	45	0,09	3,9	3,8	4,0	4,0
10	220	1000	1500	110	0,1	4,0	4,0	4,0	4,0

Раздел 2. Работа с лабораторным стендом. Рис. 7.

1. Система ИТ при нормальном режиме работы сети.

В рассматриваемой сети ток I_h при прямом прикосновении в фазе А имеет значение в комплексной форме, А.

$$I_h = U_\phi \cdot Y_h \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_h} \quad (15)$$

где
$$a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{3}{2}$$

Пользуясь этим выражением, оценим опасность прямого прикосновения для следующих трех случаев:

а) При равенстве сопротивлений изоляции и емкости проводов относительно земли, то есть при $r_a = r_b = r_c = r$, $c_a = c_b = c_c = c$,

а, следовательно, при $Y_a = Y_b = Y_c = Y$

$$\frac{I}{r_b} + j \cdot \omega c \quad (16)$$

Ток через человека в комплексной форме будет, А.

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{1}{3Y}} = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{Z}{3}} \quad (17)$$

где
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{r} \cdot j\omega c}$$

В действительной форме этот ток равен, А.

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r \cdot (r + 6R_h)}{9R_h^2 \cdot (1 + r^2 \omega^2 c^2)}}} \quad (18)$$

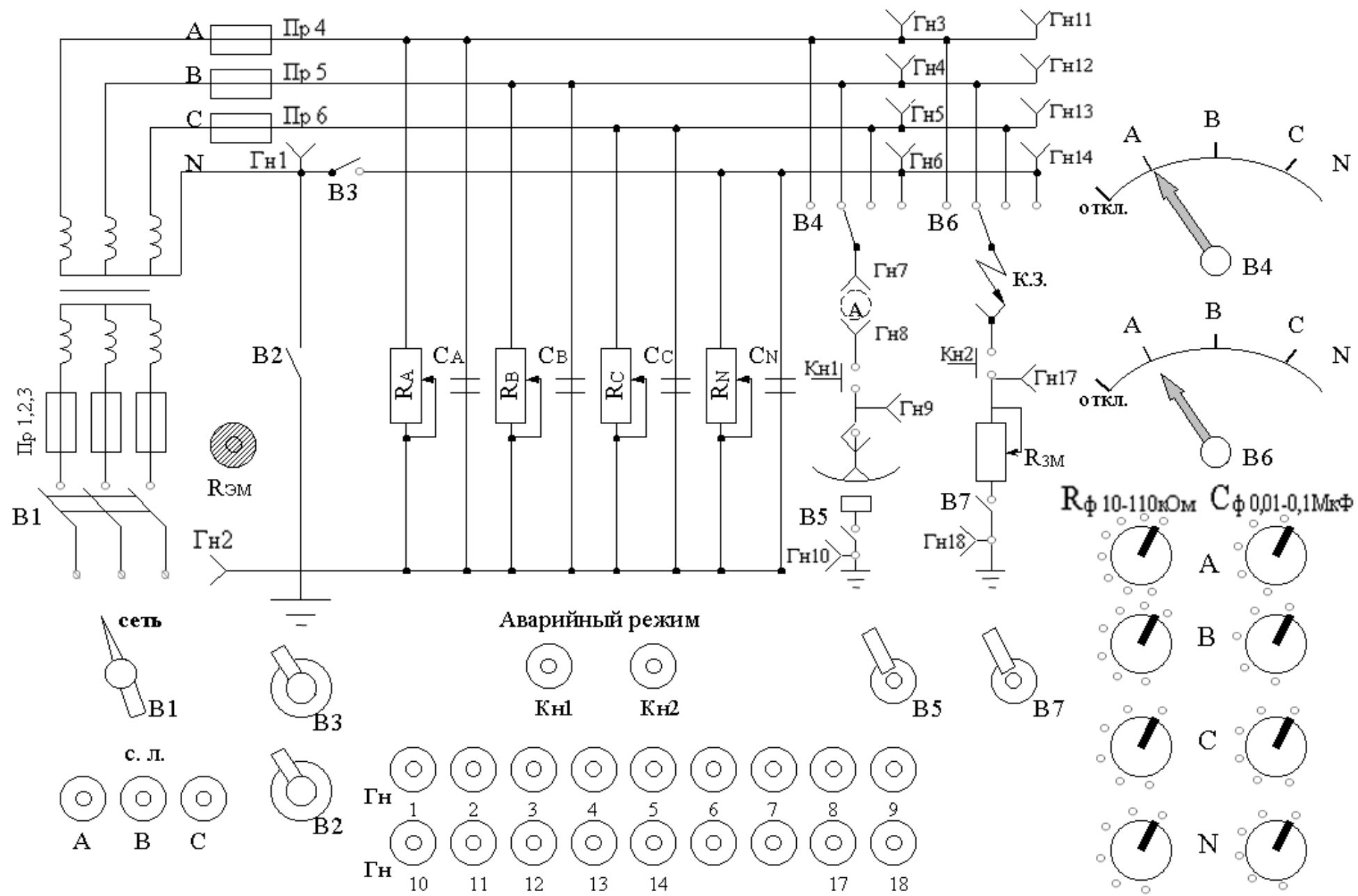


Рис. 7. Схема передней панели лабораторного стенда

б) При равенстве сопротивлений изоляции и отсутствия емкостей, то есть при $r_a = r_b = r_c = r$, $c_a = c_b = c_c = 0$,

Что может иметь место в коротких воздушных линиях, ток через будет, А.

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{r}{3}} \quad (19)$$

в) При равенстве емкостей и весьма больших сопротивлений изоляции $c_a = c_b = c_c = c$, $r_a = r_b = r_c = \infty$,

Что имеет место в кабельных линиях, ток через человека будет, А.

$$I_h = \frac{U_\phi \cdot 3wc}{9R_h^2 \cdot w^2c^2 + 1} = \frac{U_\phi}{R_h^2 + \left(\frac{X_c}{3}\right)^2} \quad (20)$$

где $X_c = \frac{1}{wc}$ – емкость сопротивления, Ом.

Проведем исследование этого режима на стенде.

Указания по технике безопасности

1. Перед подачей питания на стенд необходимо установить значение параметров сети и доложить об этом преподавателю.
2. Подача питания на стенд производится с разрешения преподавателя, который первоначально проверяет правильность собранной схемы.
3. При обнаружении неисправности в работе стенда необходимо выключить питание и сообщить об этом преподавателю.

Порядок проведения эксперимента

Пример 1. Человек прикоснулся к фазе система ИТ (прямое прикосновение) $R_h=1000$ Ом. Определить I_h .

1). $c_a = c_b = c_c = c$ и $r_a = r_b = r_c = r$. Сопротивление r имеет следующие значения: 10, 20, 30, 40, 110 кОм; емкость $c = 0,01$ мкФ.

2). Сопротивление $r = 110$ кОм, максимальное значение, а емкость $c = 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1$ мкФ.

1. Подключить стенд к трехфазной сети.
2. Включить переключатель В1 "сеть". О включенном состоянии стенда сигнализируют неоновые лампы *A*, *B*, *C*, расположенные под переключателем. Отсутствие свечения одной или нескольких ламп говорит об отсутствии питающего напряжения или неисправности стенда (довести до сведения преподавателя).
3. Отключить тумблеры В₂ и В₃.
4. Установить ручку переключателя В₄ в положение (например) *A*, имитируется прикосновение человека к фазе *A*.
5. Установить ручки потенциалов *A*, *B*, *C* в соответствии с заданием примера.
6. Включить тумблер В₅.
7. К клеммам 7 и 8 подключить миллиамперметр Э 536 с током полного отключения стрелки 200 мА.
8. Нажать кнопку КН1 (имитируется прикосновение человека к фазе).
9. Зафиксировать ток I_h и полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

r , кОм при $c = 0,01$ мкФ	10	20	30	40	110
I_h изм., мА					
I_h расч., мА					
c , мкФ при $r = 110$ кОм	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1
I_h изм., мА					
I_h расч., мА					

Произвести расчет тока I_h для случаев 1) и 2) пользуясь уравнением (17) или (18). Для случая 1) считать емкость $c = 0,01$ мкФ равной нулю (с большим допущением) и уравнением (19) для случая 2), считая сопротивление $r = 110$ кОм, стремящимся к ∞ (также с большим допущением).

$U_{\text{ф}}$ принять равным 150 В – фазное напряжение стенда. Полученные результаты занести в таблицу 2 и сравнить их с результатами, зафиксированными в пункте 9.

Этот пример показывает, что в сетях системы ИТ (нейтраль изолирована) опасность для человека при прямом прикосновении к одному из фазных проводов в период нормальной работы сети, зависит от

сопротивления изоляции проводов относительно земли: с увеличением сопротивления опасность уменьшается.

2. Система *IT* при аварийном режиме работы сети, когда возникло замыкание фазы (например, фаза А) на землю через малое активное сопротивление r_{3M} , проводимости двух других фаз можно принять равными нулю. Тогда, подставив в уравнение (15) значения $Y_B = Y_C = Y$, получим

$$I_h = U_{\phi} \cdot Y_h \cdot \frac{Y_A \cdot (1 - a)}{Y_A + Y_h} \quad (21)$$

имея в виду, что $Y_A = \frac{1}{r_{3M}}$; $Y_h = \frac{1}{R_h}$, получим:

$$I_h = \frac{U_{\phi} \cdot 3}{R_h + r_{3M}} \quad (22)$$

Напряжение прикосновения будет:

$$U_{пр} = I_h R_h = U_{\phi} \sqrt{3} \frac{R_h}{R_h + r_{3M}} \quad (23)$$

Если принять, что $r_{3M} \ll R_h$, получим:

$$U_{пр} = U_{\phi} \sqrt{3} \quad (24)$$

В действительных условиях r_{3M} всегда больше 0, поэтому напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшись в аварийный период к неповрежденной фазе системы *IT*, будет значительно больше фазного и несколько меньше линейного напряжения сети.

Таким образом, этот случай прикосновения во много раз опаснее прикосновения к той же фазе сети при нормальном режиме работы.

Вместе с тем этот случай является также, как правило, более опасным, чем прикосновение к неповрежденной фазе системы TN-C (заземленная нейтраль).

В подтверждении полученных выводов проведем исследование на стенде на примере 2 с данными, аналогичными примеру 1.

Пример 2. Человек прикоснулся к проводу в системе IT (изолирована нейтраль) в период, когда другой провод был замкнут на землю через сопротивление r_{3M} .

r_{3M} – в левом положении (мин), среднем и правом (максимальное значение).

Дано:

$$r_1 = r_2 = r_3 = r = 10 \text{ кОм};$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = c = 0,1 \text{ мкФ};$$

$$(X_c = 32 \text{ кОм}; X_c = \frac{1}{\omega c}); R_h = 1000 \text{ Ом.}$$

Определить ток, проходящий через человека, I_h .

До 7-го пункта все делается аналогично примеру 1.

7. К клеммам 7 и 8 подключить амперметр Э 252 на 0,5 - 1 А.

8. Включить тумблер В₇.

9. Установить ручку переключателя В₆ в положение «В» (имитируя короткое замыкание на фазе В).

10. Нажимаем кнопку КН1, а затем, не отпуская её, нажимаем кнопку КН2.

11. Зафиксировать ток I_h при заданных положениях резистора r_{3M} и показания амперметра занести в таблицу 3.

Таблица 3

Положение r_{3M}	Левое (минимальное)	Среднее	Правое (максимальное)
I_h изм., мА			
I_h расч., мА			

12. Рассчитать I_h по уравнению (21). r_{3M} рассчитать по уравнению (22) для левого, среднего, правого положений резистора.

$$r_{3M} = \frac{U_{\phi} \sqrt{3} - I_{h\text{изм}} R_h}{I_{h\text{изм}}}$$

где $R_h = 1000 \text{ Ом}$.

Содержание отчета

По каждому примеру записать значения параметров сети и используемые для расчетов формулы.

Полученные расчетные и измеренные значения I_h занести в таблицы 1 и 2.

Произвести сравнительный анализ результатов и оценить эффективность заземления в рассмотренных сетях.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами сети оценивается опасность поражения человека электрическим током при прямом прикосновении.

2. Как влияет протяженность сетей на значение I_h при прямом прикосновении?

3. Какими параметрами сети относительно земли должны обладать провода, чтобы при прямом прикосновении в нормальном режиме работы ток, проходящий через тело человека, не превышал допустимого значения $I_{h\text{доп}} = 6 \text{ мА}$; $U_{\phi} = 220 \text{ В}$; $R_h = 1000 \text{ Ом}$; $R_{\text{осн}} = 2000 \text{ Ом}$.

4. Что называется защитным заземлением и в чем заключается принцип его действия?

5. Что такое системы IT и TT и в чем их различие?

6. Как зависит в системе IT ток, проходящий через тело человека от сопротивления емкости проводов относительно земли.

7. Область применения защитного заземления.

Литература

1. Правила устройства электроустановки (ПЭУ), 7-е издание. М.: Издательство «НЦЭНАС». 2002.

2. Р.Н. Карякин. Заземляющие устройства электроустановки. М.: Издательство «Энергосервис». 2002.

3. П.А. Долин. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Издательство «Энергоатомиздат». 1984.