



**ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

Лекция № 3

Анализ опасности поражения электрическим током в сетях различного назначения

Рассматриваются случаи *прямого прикосновения* (электрический контакт человека с токоведущими частями, находящимися под напряжением) и случаи *косвенного прикосновения* (электрический контакт осуществляется с открытыми токопроводящими частями, оказавшимися под напряжением при повреждении изоляции).

Выделяют следующие режимы работы сети:

- нормальный режим работы электрической сети;
- режим замыкания фазы на корпус электроустановки;
- режим однофазного замыкания на землю.

Наиболее характерные схемы включения человека в цепь тока:

- *однофазное прикосновение* (при включении человека между одной фазой и землей).
- *двухфазное прикосновение* (человек оказывается под рабочим напряжением U в однофазной сети или под линейным напряжением $U_{\text{л}}$ в трёхфазной сети, а ток через тело человека I_h ограничивается только его сопротивлением R_h и не зависит от схемы сети и режима нейтрали).

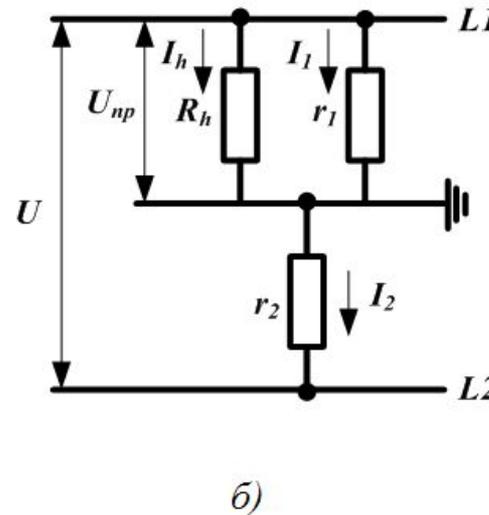
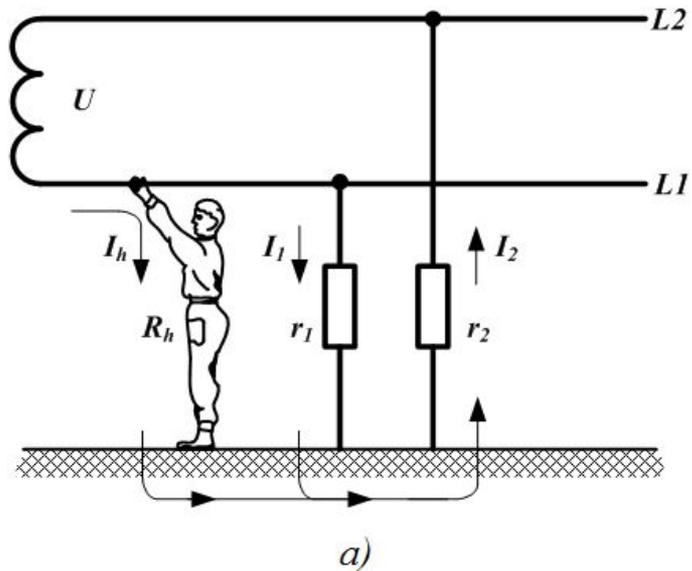
В связи с этим анализ электрических сетей проводится только для режима однофазного прикосновения.

Тип сети	Напряжение прикосновения	Ток через тело человека
однофазная	$U_{\text{пр}} = U$	$I_h = \frac{U}{R_h}$
трёхфазная	$U_{\text{пр}} = U_{\text{л}}$	$I_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{R_h}$

Однофазные сети

1. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети, изолированной от земли

Нормальный режим работы сети – когда электрическая сеть находится в исправном состоянии, замыкания в сети отсутствуют, а человек коснулся одного из проводов сети



$$U = I_h \cdot R_h + I_2 \cdot r_2$$

Токи в схеме замещения равны:

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h}; I_1 = \frac{U_{\text{пр}}}{r_1}; I_2 = I_h + I_1$$

После подстановки получим

$$U = \frac{U_{\text{пр}}}{\cancel{R_h}} \cdot \cancel{R_h} + (I_h + I_1) \cdot r_2 = U_{\text{пр}} + \left(\frac{U_{\text{пр}}}{R_h} + \frac{U_{\text{пр}}}{r_1} \right) \cdot r_2$$

Прикосновение человека к проводу сети, изолированной от земли в нормальном режиме работы сети:

a – схема прикосновения; b – схема замещения; r_1, r_2 – сопротивления изоляции проводников; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; I_1, I_2 – токи утечки через сопротивления изоляции

Нормальный режим работы

Однофазные сети

1. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети, изолированной от земли

Окончательно: напряжение прикосновения и ток через тело человека можно

определить по формулам

$$U_{\text{пр}} = U \cdot \left(\frac{R_h \cdot r_1}{R_h \cdot r_1 + R_h \cdot r_2 + r_1 \cdot r_2} \right)$$
$$I_h = U \cdot \left(\frac{r_1}{R_h \cdot r_1 + R_h \cdot r_2 + r_1 \cdot r_2} \right)$$

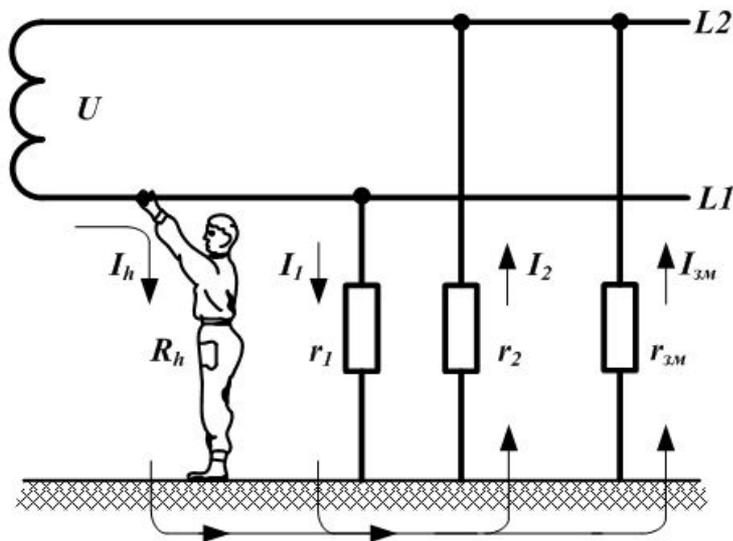
Т.е. чем выше значения сопротивления изоляции, тем меньшие значения будут иметь напряжение прикосновения $U_{\text{пр}}$ и ток через тело человека I_h .

Ток через тело человека I_h определяется сопротивлением того провода, которого человек не касается, так как именно это сопротивление оказывает токоограничивающее действие.

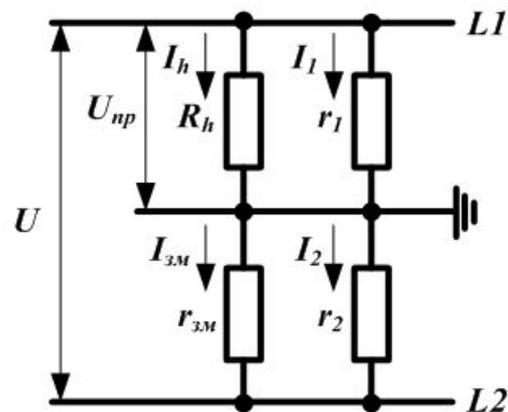
Следовательно, прикосновение человека к проводу с более высоким сопротивлением изоляции является более опасным.

1. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети, изолированной от земли

Аварийный режим работы сети соответствует такому режиму, когда один из проводов замкнут на землю (ОЗЗ) через сопротивление замыкания, а человек коснулся другого исправного провода сети.



а)



б)

Прикосновение человека к проводу сети, изолированной от земли в аварийном режиме работы сети:

a – схема прикосновения; *б* – схема замещения; r_1, r_2 – сопротивления изоляции проводников; r_{3M} – сопротивление в месте замыкания; I_{3M} – ток однофазного замыкания; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; I_1, I_2 – токи утечки через сопротивления изоляции

Аварийный режим работы

1. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети, изолированной от земли

Тогда напряжение прикосновения определяется по выражению:

$$r_3 = \frac{r_2 \cdot r_{3M}}{r_2 + r_{3M}}, \text{ где } r_{3M} - \text{сопротивление}$$

изоляции поврежденного провода

$$U_{\text{пр}} = U \cdot \left(\frac{R_h \cdot r_1}{R_h \cdot r_1 + R_h \cdot r_3 + r_1 \cdot r_3} \right)$$

Ток через тело человека можно определить по формуле:

$$U_{\text{пр}} = U \cdot \left(\frac{\cancel{R_h \cdot r_1}}{\cancel{R_h \cdot r_1} + \underbrace{R_h \cdot r_3}_0 + \underbrace{r_1 \cdot r_3}_0} \right)$$

$$I_h = U \cdot \left(\frac{r_1}{R_h \cdot r_1 + R_h \cdot r_3 + r_1 \cdot r_3} \right)$$

Как правило $r_{3M} \ll r_1, r_2$ и $r_{3M} \ll R_h$
поэтому напряжение прикосновения
и ток через тело человека можно
записать в виде:

$$I_h = U \cdot \left(\frac{\cancel{r_1}}{\cancel{R_h \cdot r_1} + \underbrace{R_h \cdot r_3}_0 + \underbrace{r_1 \cdot r_3}_0} \right)$$

$$U_{\text{пр}} \approx U; I_h \approx \frac{U}{R_h}$$

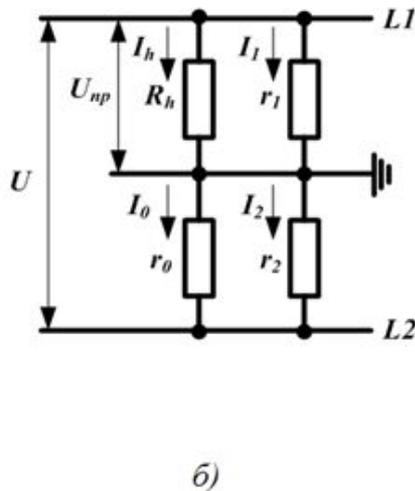
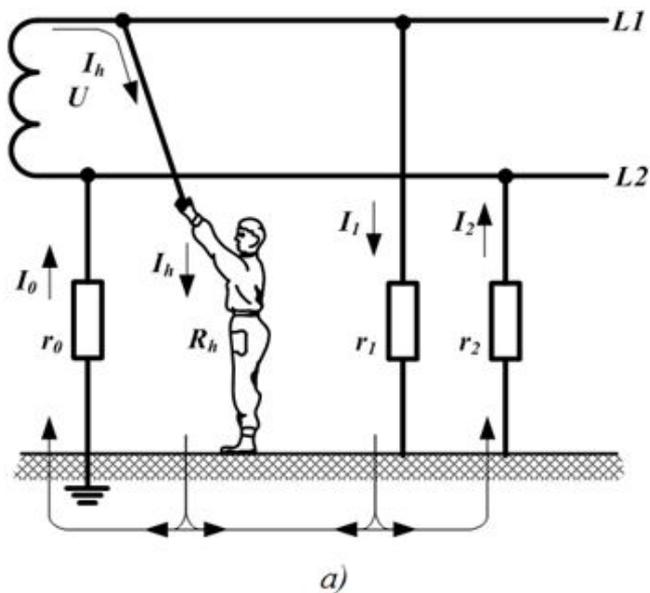
Человек, прикоснувшийся к исправному проводу, оказывается под напряжением, близким к рабочему напряжению сети, а токоограничивающее действие току будет оказывать только сопротивление тела человека.

Т.е. в аварийном режиме работы **изоляция практически не влияет на ток через тело человека**, поэтому опасность поражения человека в аварийном режиме работы сети **значительно выше**, чем в нормальном режиме

Аварийный режим работы

2. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети с заземлённым проводом

Нормальный режим работы сети – когда электрическая сеть находится в исправном состоянии, замыкания в сети отсутствуют, а человек прикоснулся к незаземлённому проводу сети.



Прикосновение человека к незаземлённому проводу в нормальном режиме работы сети:

a – схема прикосновения; b – схема замещения; r_1, r_2 – сопротивления изоляции проводников; r_0 – сопротивление заземления провода; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; I_1, I_2 – токи утечки через сопротивления изоляции; I_0 – ток через заземление провода

$$U = I_h \cdot R_h + I_0 \cdot r_0$$

r_0 – сопротивление заземления

Токи в схеме замещения равны:

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h}; \quad I_1 = \frac{U_{\text{пр}}}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U - U_{\text{пр}}}{r_2};$$

$$I_0 = I_h + I_1 - I_2$$

После подстановки получим

$$U = U_{\text{пр}} + \left(\frac{U_{\text{пр}}}{R_h} + \frac{U_{\text{пр}}}{r_1} - \frac{U - U_{\text{пр}}}{r_2} \right) \cdot r_0$$

Нормальный режим работы

2. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети с заземлённым проводом

Окончательно: напряжение прикосновения и ток через тело человека можно определить по формулам

$$U_{\text{пр}} = U \cdot \left(\frac{R_h \cdot r_1 \cdot (r_2 + r_0)}{R_h \cdot r_1 \cdot (r_2 + r_0) + r_2 \cdot r_0 \cdot (R_h + r_1)} \right)$$
$$I_h = U \cdot \left(\frac{r_1 \cdot (r_2 + r_0)}{R_h \cdot r_1 \cdot (r_2 + r_0) + r_2 \cdot r_0 \cdot (R_h + r_1)} \right)$$

Как правило, сопротивление заземления $r_0 \ll r_1, r_2$ или $r_0 \ll R_h$, то выражение можно записать в виде:

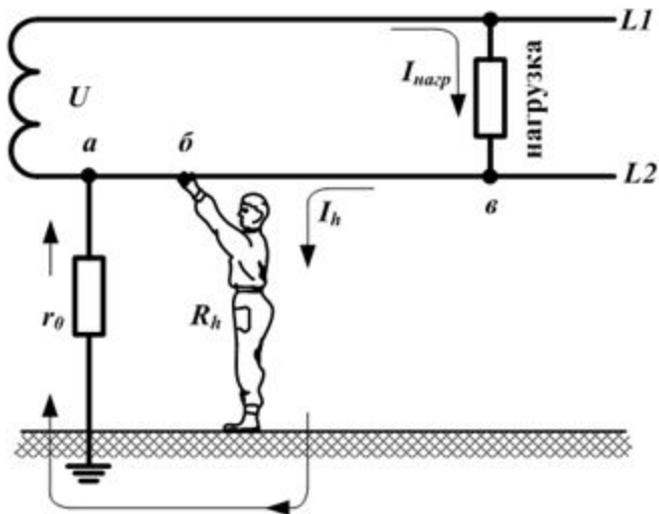
$$U_{\text{пр}} = U ; I_h = \frac{U}{R_h}$$

При малом значении r_0 , изоляция не влияет на ток через тело человека и напряжение прикосновения $U_{\text{пр}}$ оказывается равным рабочему напряжению сети. Ток через тело человека I_h зависит только от рабочего напряжения сети и R_h .

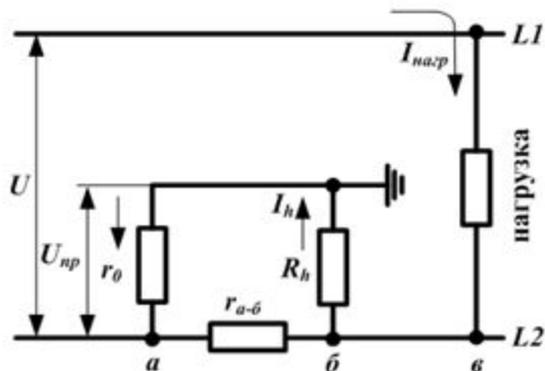
Следовательно, прикосновение человека к незаземлённому проводу сети оказывается опасным, даже при высоком сопротивлении изоляции проводов.

Нормальный режим работы

2. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети с заземлённым проводом



а)



б)

$$U_{пр} = \frac{I_{нагр} \cdot r_{a-b} \cdot R_h}{R_h + r_0},$$

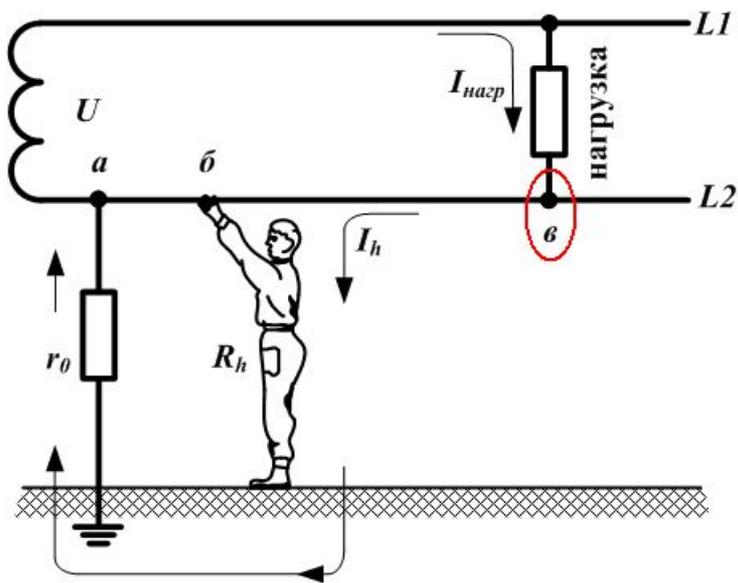
где $I_{нагр}$ – ток нагрузки;
 r_{a-b} – активное сопротивление
 провода на участке $a-b$

Прикосновение человека к заземлённому проводу в нормальном режиме работы сети:

a – схема прикосновения; b – схема замещения; r_0 – сопротивление заземления провода; r_{a-b} – активное сопротивление провода на участке $a-b$; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; $I_{нагр}$ – ток нагрузки

Нормальный режим работы под нагрузкой

2. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети с заземлённым проводом

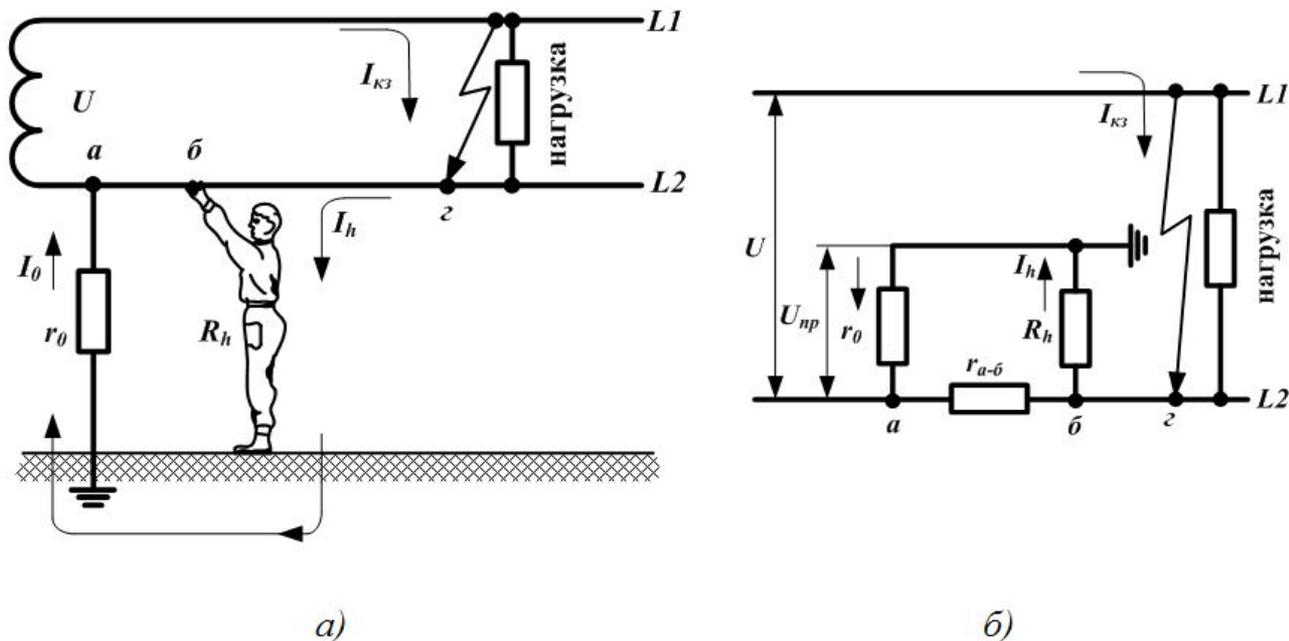


Человек при прикосновении к заземлённому проводу оказывается под напряжением прикосновения, равным потере напряжения в заземлённом проводе на участке от места его заземления (точка a) до места прикосновения (точка $б$).

Напряжение прикосновения в *нормальном режиме* работы увеличивается по мере удаления от места заземления провода и достигает максимума в точке $в$. В случае, если сеть спроектирована с учетом требований ПУЭ в части допустимого отклонения напряжения, то наибольшее значение напряжения прикосновения (точка $в$) **не превысит 5% номинального напряжения сети.**

Нормальный режим работы под нагрузкой

2. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети с заземлённым проводом



Прикосновение человека к заземлённому проводу в аварийном режиме работы сети:

а – схема прикосновения; *б* – схема замещения; r_0 – сопротивление заземления провода; $r_{a-б}$ – активное сопротивление провода на участке *а-б*; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания

Аварийный режим работы сети (при КЗ) - когда человек касается заземлённого провода сети, ток в проводе возрастает до величины тока однофазного короткого замыкания. В этом случае величина потери напряжения в проводе достигает 100% номинального напряжения сети. При одинаковых сечениях проводов напряжение в точке КЗ (точка *з*) будет близким к половине номинального напряжения сети.

Аварийный режим работы под нагрузкой

2. Анализ опасности поражения электрическим током в однофазной двухпроводной сети с заземлённым проводом

Напряжение прикосновения зависит от величины тока КЗ и может достигать значения равного половине напряжения сети.

Т.е. в сети с заземлённым проводом сопротивление изоляции практически не влияет на ток через тело человека, прикосновение к незаземлённому проводу сети оказывается более опасным, чем к заземлённому проводнику.

При прикосновении человека к заземлённому проводнику, ток через тело человека зависит от режима работы сети. В аварийном режиме работы прикосновение к заземлённому проводнику более опасно, чем в нормальном режиме.

Аварийный режим работы под нагрузкой

Трёхфазные сети

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

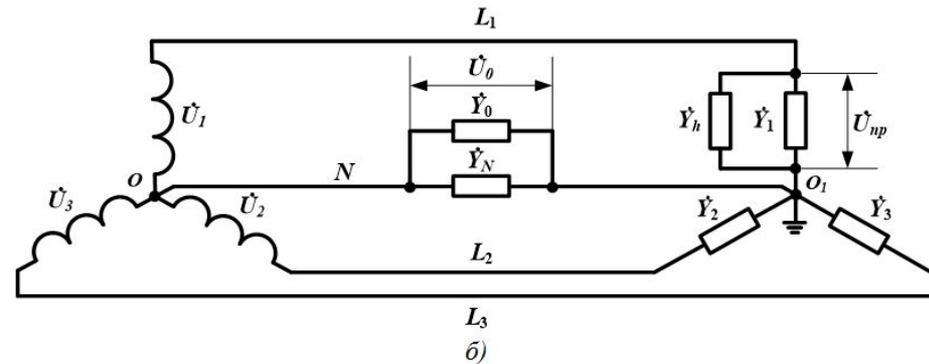
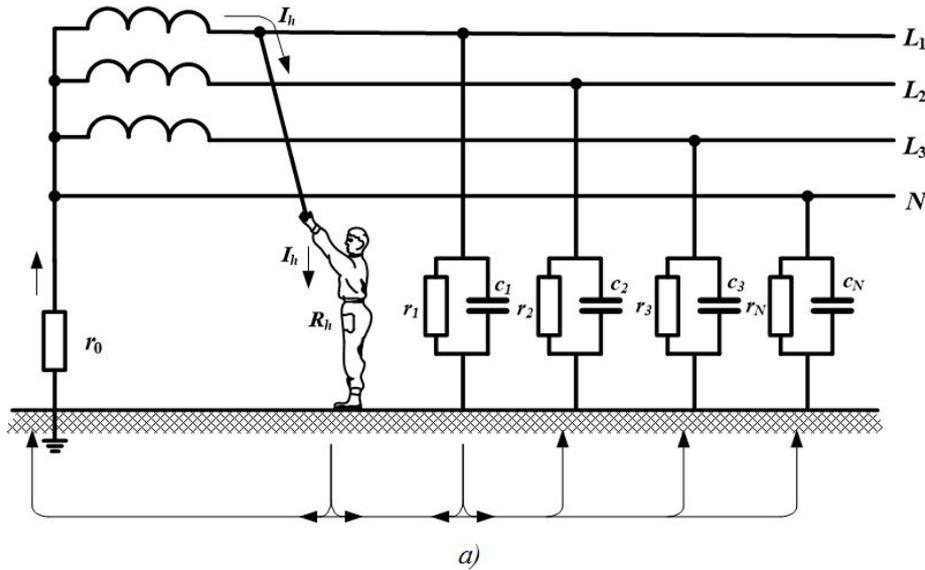
При проведении анализа принимаются следующие допущения:

- 1) Внутренние сопротивления источника питания и продольные сопротивления проводников сети малы и поэтому не учитываются.
 - 2) Сопротивления изоляции, как и ёмкости проводов относительно земли, не равны между собой: $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_N$; $c_1 \neq c_2 \neq c_3 \neq c_N \neq 0$.
 - 3) Замыкание фазы на землю происходит через переходное сопротивление r_{3M} (при коротком металлическом замыкании принимается равным нулю).
 - 4) Тело человека обладает только активным сопротивлением, а сопротивление основания, на котором стоит человек, включая сопротивление обуви равны нулю.
-

Трёхфазные сети

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

Нормальный режим работы сети – когда электрическая сеть находится в исправном состоянии, замыкания в сети отсутствуют, а человек коснулся одной из фаз сети



Прикосновение человека к фазному проводу трёхфазной сети:
a – схема прикосновения; *б* – схема замещения; r_1, r_2, r_3, r_N – активные сопротивления изоляции проводников; r_0 – сопротивление заземления нейтрали; c_1, c_2, c_3, c_N – ёмкости проводников сети относительно земли;
 I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека;
 $\dot{Y}_1, \dot{Y}_2, \dot{Y}_3$ – полные проводимости изоляции фазных проводников; \dot{Y}_N – полная проводимость изоляции нулевого проводника; \dot{Y}_0 – полная проводимость заземления нейтрали; \dot{Y}_h – полная проводимость тела человека

Нормальный режим работы

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

Напряжение прикосновения и значение тока через тело человека в

комплексной форме $\dot{U}_{\text{пр}}$:

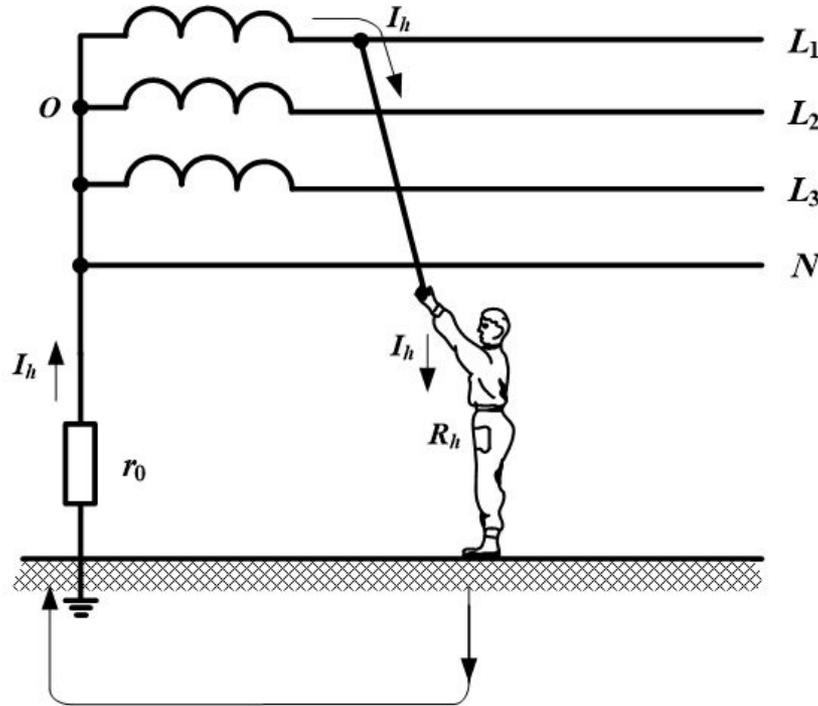
$$\dot{U}_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{\dot{Y}_2 \cdot (1 - a^2) + \dot{Y}_3 \cdot (1 - a) + \dot{Y}_N + \dot{Y}_0}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_N + \dot{Y}_0 + \dot{Y}_h}$$

$$\dot{I}_h = U_{\phi} \cdot \dot{Y}_h \cdot \frac{\dot{Y}_2 \cdot (1 - a^2) + \dot{Y}_3 \cdot (1 - a) + \dot{Y}_N + \dot{Y}_0}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_N + \dot{Y}_0 + \dot{Y}_h}$$

Приведенные выражения для общего случая трёхфазной сети, можно, с учётом особенностей каждого типа сети, распространить на трёхфазные сети с различными режимами работы нейтрали источника питания.

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.1. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной четырёхпроводной сети с глухозаземлённой нейтралью



Прикосновение человека к фазному проводу трёхфазной сети с глухозаземлённой нейтралью:

r_0 – сопротивление заземления нейтрали; R_h – сопротивление тела человека

Проводимости нулевого и фазных проводников относительно земли имеют малые значения по сравнению с проводимостью заземления нейтрали и могут быть приравнены к нулю, т.е.:

$$\dot{Y}_1, \dot{Y}_2, \dot{Y}_3, \dot{Y}_N \ll \dot{Y}_0 \Rightarrow \dot{Y}_1 = \dot{Y}_2 = \dot{Y}_3 = \dot{Y}_N \approx 0.$$

Тогда, выражение для расчёта $\dot{U}_{\text{пр}}$ примет вид:

$$\dot{U}_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{\dot{Y}_0}{\dot{Y}_0 + \dot{Y}_h}$$

В действительной форме получим:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{R_h}{R_h + r_0}$$

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.1. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной четырёхпроводной сети с глухозаземлённой нейтралью

Ток через тело человека в **нормальном режиме** работы сети равен:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + r_0}$$

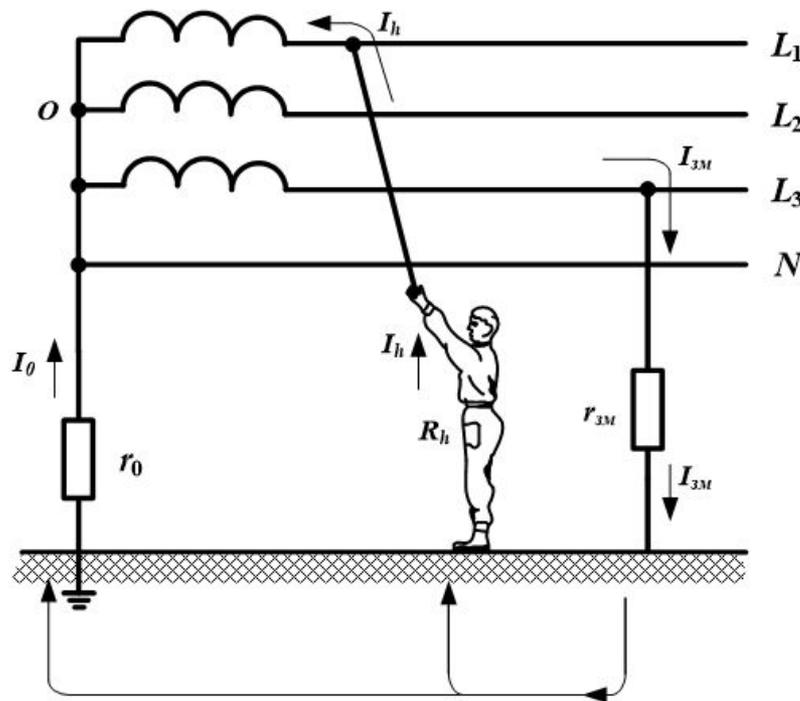
Т.к. $r_0 \ll R_h$, то его можно принять равным нулю. Тогда ток через тело человека и напряжение прикосновения будут равны:

$$I_h \approx \frac{U_\phi}{R_h}; U_{\text{пр}} \approx U_\phi$$

Человек оказывается под фазным напряжением сети U_ϕ . При условии, что полные проводимости проводов относительно земли малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, **величина тока через тело человека оказывается не зависящей от сопротивлений изоляции и ёмкости проводов относительно земли** и ограничивается только сопротивлением тела человека R_h .

Нормальный режим работы

При **аварийном режиме** работы сети при прикосновении человека к одной из фаз сети, например к фазному проводнику L_1 , происходит замыкание одной из других фаз сети, например фазного проводника L_3 , на землю через малое сопротивление $r_{зм}$.



Прикосновение человека к фазному проводу трёхфазной сети с глухозаземлённой нейтралью в аварийном режиме работы сети:
 r_0 – сопротивление заземления нейтрали; R_h – сопротивление тела человека;
 $r_{зм}$ – сопротивление в месте замыкания фазного проводника L_3 на землю

В месте замыкания фазного проводника L_3 на землю, проводимости нулевого и фазных проводников относительно земли могут быть приняты равными нулю. Тогда:

$$\dot{U}_{np} = U_{\phi} \cdot \frac{\dot{Y}_{зм} \cdot (1 - a) + \dot{Y}_0}{\dot{Y}_{зм} + \dot{Y}_0 + \dot{Y}_h},$$

где $\dot{Y}_{зм}$ – полная проводимость в месте замыкания фазного проводника L_3 на землю.

a – оператор, учитывающий сдвиг фаз,

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

Полная проводимость в месте замыкания равна: $\dot{Y}_{зм} = \frac{1}{r_{зм}}$.

Аварийный режим работы

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.1. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной четырёхпроводной сети с глухозаземлённой нейтралью

В действительной форме получим:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{R_h \cdot (r_{\text{ЗМ}} + r_0 \cdot \sqrt{3})}{R_h \cdot (r_{\text{ЗМ}} + r_0) + r_{\text{ЗМ}} \cdot r_0}.$$

Ток через тело человека в **аварийном режиме** работы сети равен:

$$I_h = U_{\phi} \cdot \frac{r_{\text{ЗМ}} + r_0 \cdot \sqrt{3}}{R_h \cdot (r_{\text{ЗМ}} + r_0) + r_{\text{ЗМ}} \cdot r_0}.$$

При металлическом замыкании сопротивление $r_{\text{ЗМ}}$ можно принять равным нулю. Тогда:

$$I_h \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}{R_h}; \quad U_{\text{пр}} \approx \sqrt{3} \cdot U_{\phi}.$$

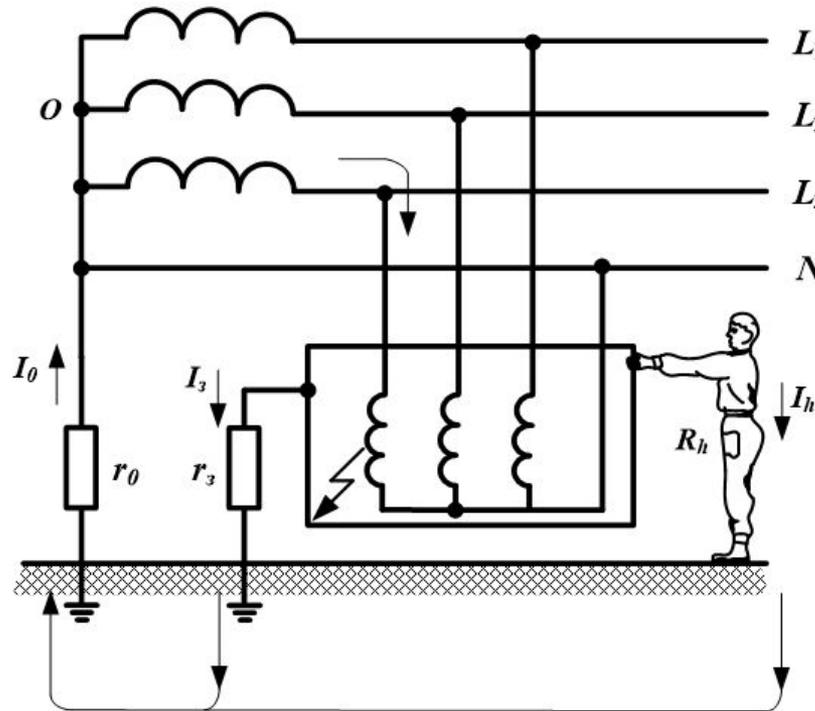
Человек оказывается под напряжением, величина которого зависит от сопротивления в месте замыкания. Т.к. $r_{\text{ЗМ}}$ и $r_0 > 0$, напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу всегда меньше линейного, но больше фазного напряжения сети ($U_{\phi} < U_{\text{пр}} < U_{\text{л}}$).

Наиболее опасным случаем является **режим металлического замыкания** фазы сети, в этом режиме **человек оказывается под линейным напряжением** сети, а ток через тело человека ограничивается только его сопротивлением R_h .

Аварийный режим работы

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.1. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной четырёхпроводной сети с глухозаземлённой нейтралью



Проводимости нулевого и фазных проводников относительно земли имеют малые значения по сравнению с проводимостью заземления нейтрали и корпуса электроустановки, поэтому принимаем их равными нулю. Тогда с учётом шунтирования сопротивления тела человека R_h сопротивлением заземления r_3 , напряжение прикосновения $\dot{U}_{пр}$ в комплексной форме, примет вид:

$$\dot{U}_{пр} = U_{\phi} \cdot \frac{\dot{Y}_0}{\dot{Y}_{33} + \dot{Y}_0},$$

где \dot{Y}_{33} — полная проводимость заземления корпуса электроустановки.

Прикосновение человека к заземлённому корпусу в сети с глухим заземлением нейтрали:

r_0 — сопротивление заземления нейтрали; R_h — сопротивление тела человека;
 r_3 — сопротивление заземления корпуса электроустановки

Полная проводимость заземления корпуса электроустановки равна: $\dot{Y}_{33} = \frac{1}{r_3}$.

Режим косвенного прикосновения

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.1. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной четырёхпроводной сети с глухозаземлённой нейтралью

В действительной форме получим:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{r_3}{r_3 + r_0}.$$

Ток через тело человека при **косвенном прикосновении** равен:

$$I_h = U_{\phi} \cdot \frac{r_3}{R_h \cdot (r_3 + r_0)}.$$

Согласно ПУЭ сопротивление r_0 источника питания в сетях напряжением до 1000 В не должно превышать 2÷8 Ом, сопротивление заземления r_3 корпусов электроустановок также не должно превышать 10 Ом. Величины сопротивлений практически эквивалентны и в случае их равенства ток через тело человека и напряжение прикосновения будут равны:

$$I_h \approx U_{\phi} \cdot \frac{r}{R_h \cdot (r + r)} \approx \frac{U_{\phi} \cdot \cancel{r}}{2\cancel{r} \cdot R_h} \approx \frac{U_{\phi}}{2 \cdot R_h}; \quad U_{\text{пр}} \approx \frac{U_{\phi} \cdot \cancel{r}}{2\cancel{r}} \approx \frac{U_{\phi}}{2}$$

Режим косвенного прикосновения

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.1. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной четырёхпроводной сети с глухозаземлённой нейтралью

Напряжение прикосновения оказывается равным половине фазного напряжения сети. При этом опасные потенциалы появляются и на нулевом проводе. Опасность увеличивается, если в качестве заземлителей используются батареи отопления, водопроводные трубы с высоким сопротивлением r_3 . В этом случае $U_{\text{пр}}$ оказывается близким к фазному напряжению сети:

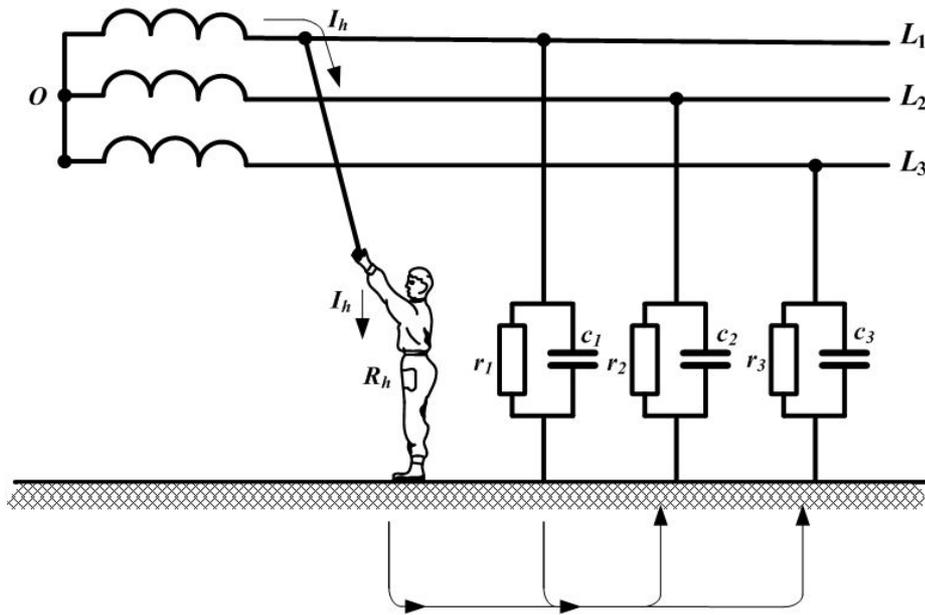
$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \cdot \frac{r_3}{r_3 + r_0} = U_{\text{ф}} \cdot \frac{r_3}{r_3} \approx U_{\text{ф}}$$

В связи с этим в электрических сетях с глухим заземлением нейтрали напряжением до 1000 В защитное заземление корпусов электроустановок является неэффективной мерой защиты и поэтому запрещается его применение в качестве единственной меры защиты от замыкания на корпус электроустановки, но допускается использовать его в качестве дополнительной меры защиты.

Режим косвенного прикосновения

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью



Прикосновение человека к фазному проводу трёхфазной сети с изолированной нейтралью:

r_1, r_2, r_3 – активные сопротивления изоляции проводников; c_1, c_2, c_3 – ёмкости проводников сети относительно земли; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека

Для трёхфазной сети с изолированной нейтралью источника питания проводимость нулевого проводника относительно земли и проводимость заземления нейтрали равны нулю, т. е.: $\dot{Y}_0 = \dot{Y}_N = 0$.

Т.е. напряжение прикосновения и величина тока через тело человека будут находиться по формулам:

$$\dot{U}_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{\dot{Y}_2 \cdot (1 - a^2) + \dot{Y}_3 \cdot (1 - a)}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_h}$$

$$\dot{I}_h = U_{\phi} \cdot \dot{Y}_h \cdot \frac{\dot{Y}_2 \cdot (1 - a^2) + \dot{Y}_3 \cdot (1 - a)}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_h}$$

Нормальный режим работы

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью

При $r_1=r_2=r_3=r$ и $c_1=c_2=c_3=c$, а следовательно, при $\dot{Y}_1 = \dot{Y}_2 = \dot{Y}_3 = \dot{Y}$, ток, проходящий через тело человека, в комплексной форме:

$$\dot{I}_h = \frac{3 \cdot U_\phi}{3 \cdot R_h + \dot{Z}}, \text{ где } \dot{Z} = \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{1}{\frac{1}{r} + j \cdot \omega \cdot c} - \text{ полное комплексное сопротивление провода относительно земли.}$$

В действительной форме ток, проходящий через тело человека, равен:

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

При **нормальной работе** сети с изолированной нейтралью, **ток через тело человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов, зависит от величин активного и емкостного сопротивлений** проводов относительно земли. С **увеличением активного сопротивления и уменьшением ёмкости сети величина тока уменьшается.**

Нормальный режим работы (сети до 1000 В)

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью

В случае воздушной или кабельной линии малой протяженности и напряжения до 1000 В, ёмкостью сети можно пренебречь, т. е. принять, что $r_1=r_2=r_3=r$ и $c_1=c_2=c_3=0$, а следовательно $\dot{Y}_1=\dot{Y}_2=\dot{Y}_3=1/r$. Тогда ток, проходящий через тело человека будет определяться по формуле:

$$I_h = \frac{3 \cdot U_\phi}{3 \cdot R_h + r}$$

Таким образом, в сетях **малой протяжённости напряжения до 1000 В** ток через тело человека зависит только **от активного сопротивления изоляции**. Поддержание высокого активного сопротивления изоляции приводит к уменьшению величины тока через тело человека в период прикосновения.

Нормальный режим работы (сети до 1000 В) малой протяженности

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью

При $r_1=r_2=r_3=\infty$ и наличии одной только ёмкости сети $c_1=c_2=c_3=c$, величина тока, протекающего через тело человека:

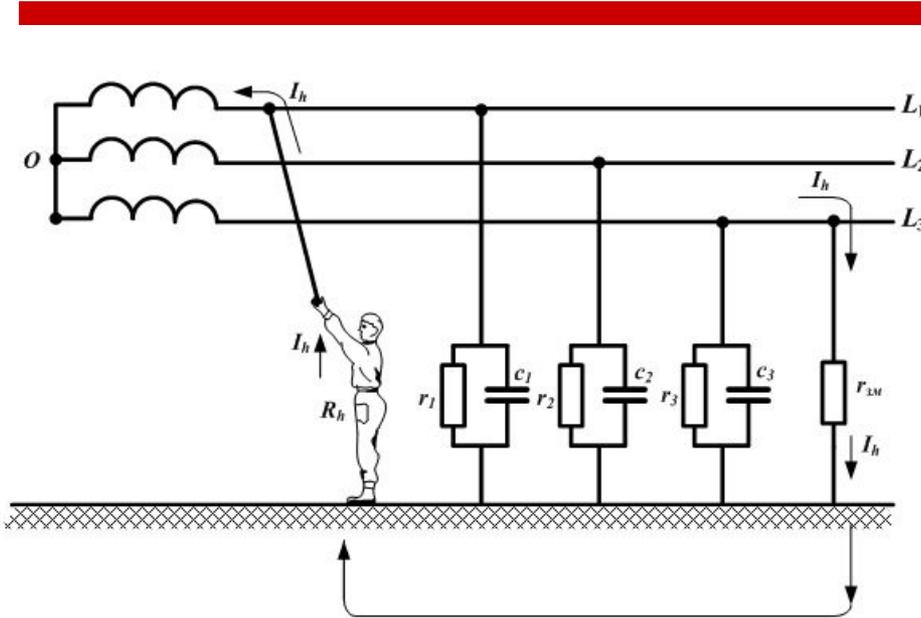
$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot c}\right)^2}} = \frac{3 \cdot U_\phi \cdot \omega \cdot c}{\sqrt{1 + (3 \cdot R_h \cdot \omega \cdot c)^2}}$$

Ток через тело человека зависит только **от ёмкостного сопротивления изоляции** и **даже при идеальной** изоляции ($r = \infty$) прикосновение к токоведущим частям **смертельно опасно**. Поддержание малой величины ёмкости сети уменьшает величину тока через тело человека в период прикосновения.

Нормальный режим работы (кабельные сети U выше 1000 В) значительной протяженности

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью



Прикосновение человека к фазному проводу трёхфазной сети с изолированной нейтралью в аварийном режиме работы сети:

r_1, r_2, r_3 – активные сопротивления изоляции проводников; c_1, c_2, c_3 – ёмкости проводников сети относительно земли; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; $r_{зм}$ – сопротивление в месте замыкания фазного проводника L_3 на землю

Напряжение прикосновения $\dot{U}_{пр}$ в комплексной форме, примет вид:

$$\dot{U}_{пр} = U_{\phi} \cdot \frac{\dot{Y}_{зм} \cdot (1 - a)}{\dot{Y}_{зм} + \dot{Y}_h},$$

где $\dot{Y}_{зм} = \frac{1}{r_{зм}}$ – полная проводимость в месте замыкания фазного проводника L_3 на землю. В действительной форме в аварийном режиме работы сети получим:

$$U_{пр} = U_{\phi} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{R_h}{R_h + r_{зм}}, \quad I_h = \frac{U_{\phi} \cdot \sqrt{3}}{R_h + r_{зм}}.$$

Аварийный режим работы

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью

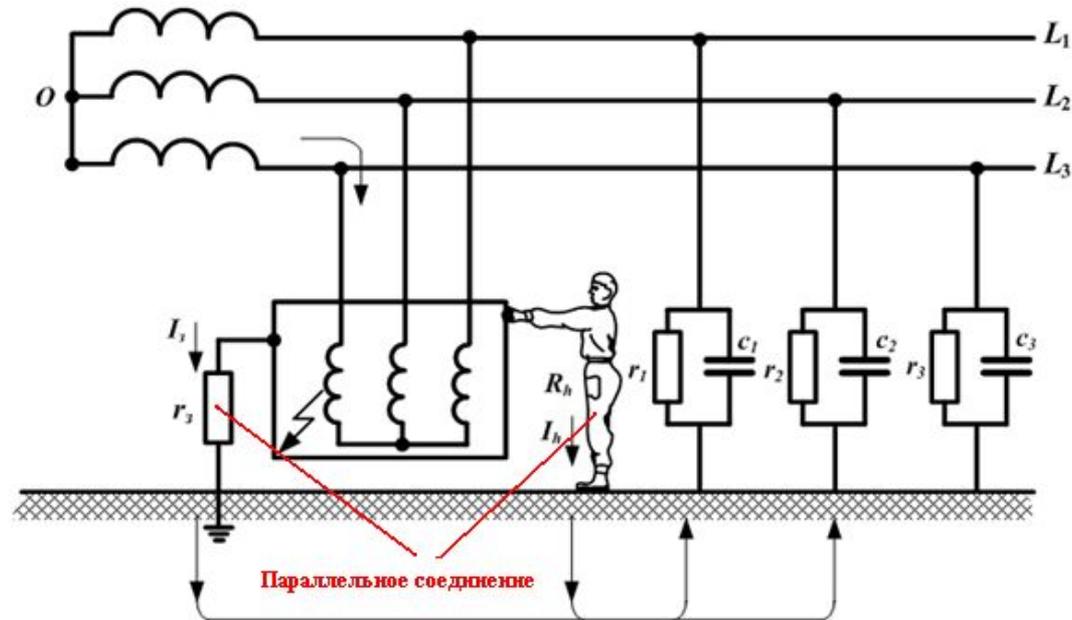
При металлическом замыкании сопротивление $r_{зм}$ можно принять равным нулю. Тогда ток через тело человека и напряжение прикосновения будут равны:

$$I_h = \frac{U_\phi \cdot \sqrt{3}}{R_h + r_{зм}} \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_\phi}{R_h}; U_{пр} = U_\phi \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{R_h}{R_h + r_{зм}} \approx \sqrt{3} \cdot U_\phi$$

При прикосновении к одной из фаз трехфазной сети с изолированной нейтралью в аварийном режиме работы сети, человек оказывается под напряжением, величина которого зависит **от сопротивления в месте замыкания**. Т.к. $r_{зм} \ll R_h$, то напряжение, под которым оказывается человек, близко **к линейному напряжению сети**, а ток через тело человека ограничивается только его сопротивлением R_h .

3. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети

3.2. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазной сети с изолированной нейтралью



Прикосновение человека к заземлённому корпусу в сети с изолированной нейтралью:

r_1, r_2, r_3 – активные сопротивления изоляции проводников; c_1, c_2, c_3 – ёмкости проводников сети относительно земли; I_h – ток через тело человека; R_h – сопротивление тела человека; r_3 – сопротивление заземления корпуса электроустановки

Ток через тело человека зависит от величин активного и емкостного сопротивлений проводов относительно земли, а также от величины сопротивления заземления r_3 , с уменьшением которого уменьшается и величина тока I_h .

Режим косвенного прикосновения