

## **Занятие № 11**

### **Исследование электробезопасности трёхфазных сетей переменного тока напряжением до 1000 В**

#### **Цель работы**

---

Исследовать электробезопасность сетей трехфазного тока напряжением до 1000 В.

#### **Теоретическая часть**

---

##### **Краткий анализ безопасности электрических сетей**

Статистика электротравматизма показывает, что до 85% смертельных поражений людей электрическим током происходит в результате прикосновения пострадавшего непосредственно к токоведущим частям, находящимся под напряжением. При этом в сетях напряжением до 1000 В величина тока, протекающего через человека, а, следовательно, и опасность поражения зависят прежде всего от режима нейтрали сети, а также от активной и емкостной проводимостей проводов относительно земли.

Правила устройства электроустановок предусматривают применение при напряжениях до 1000 В лишь двух сетей трехфазного тока: трехпроводной с изолированной нейтралью и четырехпроводной с заземленной нейтралью.

Каждая из этих сетей характеризуется своими технико-экономическими, эксплуатационными и другими показателями и различной степенью электробезопасности.

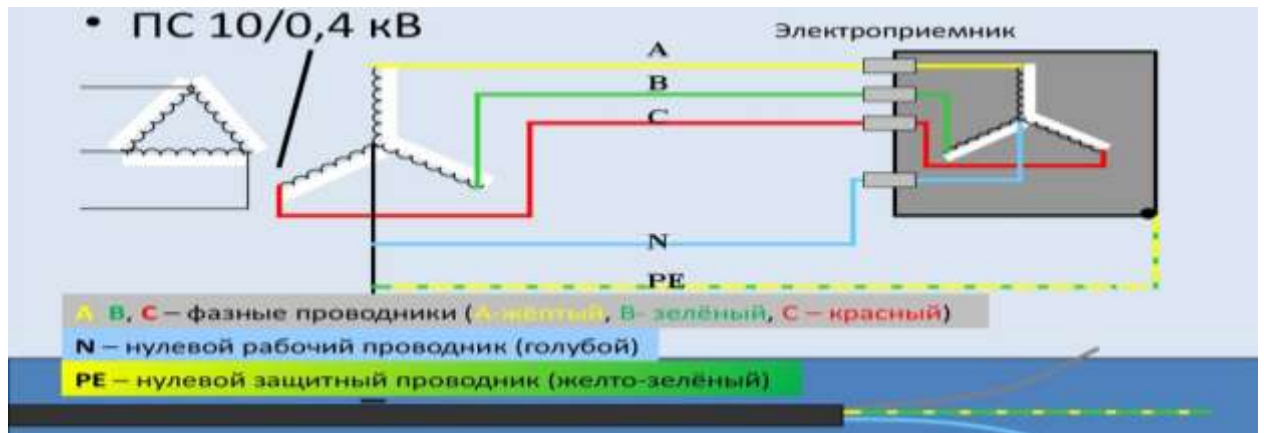


Рисунок 11.1. Электроустановка напряжением 0,4кВ с  
глухозаземленной нейтралью

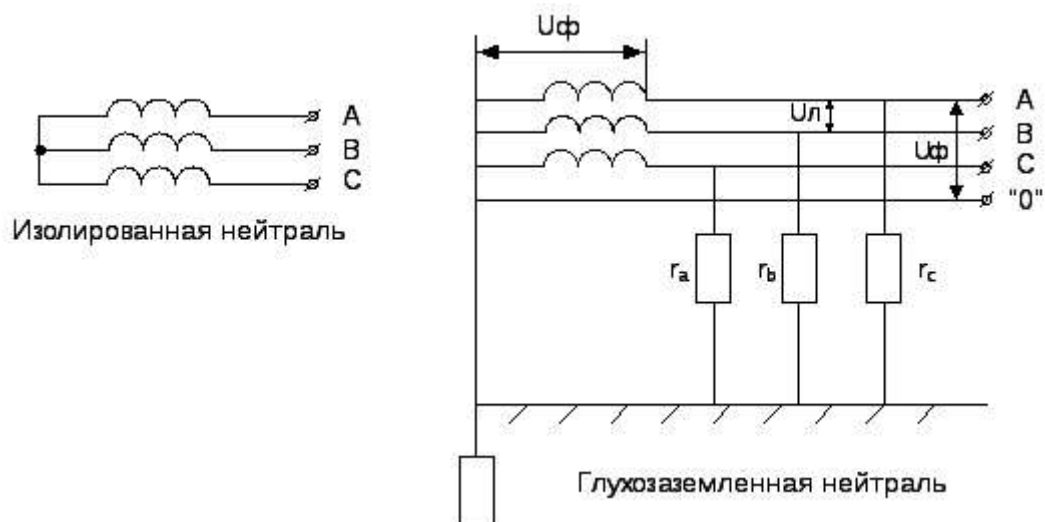


Рисунок 11.2. Разница между схемами

### Трёхфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

При нормальном режиме рассматриваемой сети ток, протекающий через человека в период касания к одной фазе, например, фазе I (рис.11.3.), в комплексной форме запишется

$$I_h = U_{\text{тн}} \cdot Y_h \cdot \frac{Y_2(1-a^2) + Y_3(1-a)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_h}$$

где  $Y_1, Y_2, Y_3$  - полные проводимости изоляции фазных проводов;

$Y_h$  - проводимость тела человека;

$U_\phi$  - фазное напряжение сети;

$a$  - фазный оператор трехфазной системы, учитывающий сдвиг фаз.

На основании выражения  $I_h$  оценим опасность прикосновения человека к фазному проводу для следующих случаев.

1) При равенстве сопротивлений изоляции и емкостей проводов относительно земли, т.е. при

$$r_1 = r_2 = r_3 = r$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C$$

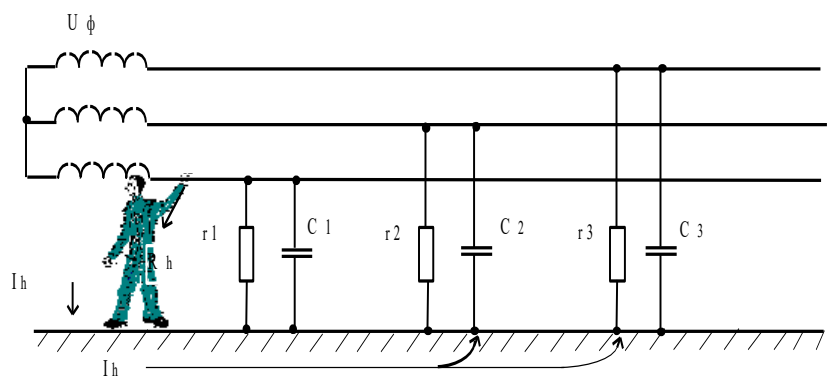


Рисунок 11.3. Трехфазная, трехпроводная сеть с изолированной нейтралью в рабочем режиме

а, следовательно, при, ток через человека в комплексной форме будет

$$I_h = \frac{U_{\text{тм}}}{R_h + \frac{1}{3Y}} = \frac{U_{\text{тм}}}{R_h + \frac{Z}{3}}$$

где  $Z$  - комплекс полного сопротивления провода относительно земли, А.

2) При равенстве сопротивлений изоляции и отсутствии емкостей, т.е. при

$$\begin{aligned} r_1 &= r_2 = r_3 = r \\ c_1 &= c_2 = c_3 = 0 \end{aligned}$$

что имеет место в коротких воздушных сетях, ток через человека будет, А,

$$I_h = \frac{3U_{\text{тм}}}{3R_h + r}$$

3) При равенстве емкостей и весьма больших сопротивлениях изоляции, т.е. при

$$\begin{aligned} c_1 &= c_2 = c_3 = c \\ r_1 &= r_2 = r_3 = \infty, \end{aligned}$$

что может быть в кабельных сетях, будем иметь, А,

$$I_h = \frac{U_{\text{тм}}}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{x_c}{3}\right)^2}}$$

где  $x_c = \frac{1}{\omega \cdot c}$  - емкостное сопротивление, Ом.

Из выражений (2 - 4) видно, что в сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления проводов относительно земли; с увеличением сопротивления опасность уменьшается. Вместе с тем этот

случай менее опасен, чем прикосновение в сети с заземленной нейтралью уравнения (3-4) и (8-9).



Рисунок 21.4. Путь прохождения тока через тело человека

При аварийном режиме сети (рис. 11.5.) ток через тело человека будет равен

$$I_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{TM}}}{R_h + R_{\kappa'}}$$

где  $R_{\text{зм}}$  - сопротивление переходного контакта в месте короткого замыкания провода на землю.

Напряжение прикосновения будет

$$U_{\text{.п}} = I_h R_h = U_{\text{TM}} \sqrt{3} \frac{R_h}{R_h + R_{\kappa'}}$$

Если принять  $R_{\text{зм}} = 0$  или  $R_{\text{зм}} \ll R_h$  (так обычно бывает на практике), то, согласно (6), получим

$$U_{\text{.п}} = U_{\text{TM}} \cdot \sqrt{3}$$

т.е. человек окажется под линейным напряжением сети.

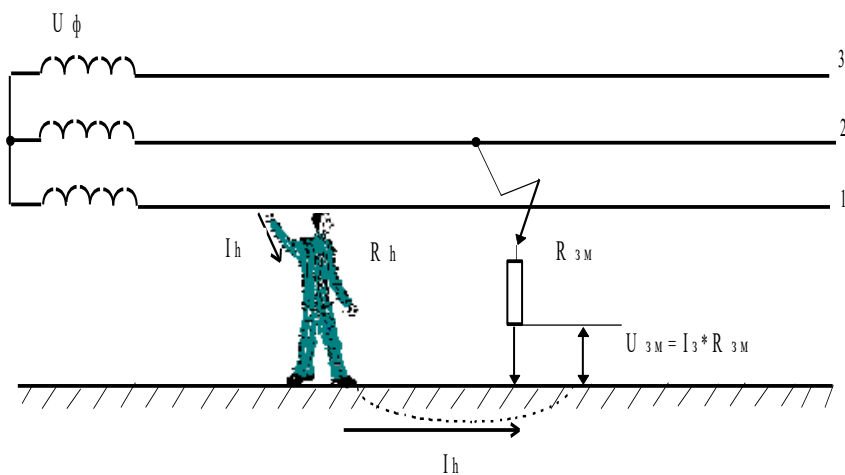


Рисунок 31.5. Трехфазная, трехпроводная сеть с  
изолированной нейтралью  
в аварийном режиме

### Трехфазная четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью

При нормальном режиме рассматриваемой сети ток, протекающий через человека в период касания к одной фазе, например, фазе I будет равен, А,

$$I_h = \frac{U_{TM}}{R_h + R_3}$$

где  $R_3$  - сопротивление заземления нейтральной точки трансформатора.

Согласно ПУЭ  $R_3$  не должно превышать 4 - 10 Ом; сопротивление же тела человека не опускается ниже нескольких сотен Ом:

$$I_h = \frac{U_{TM}}{R_h}$$

т.е. при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью человек оказывается под фазным напряжением  $U_{\phi}$ .

Из этого уравнения вытекает еще один вывод: если полные проводимости проводов относительно земли малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, то ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью в период нормальной его работы, практически не изменяется с изменением сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

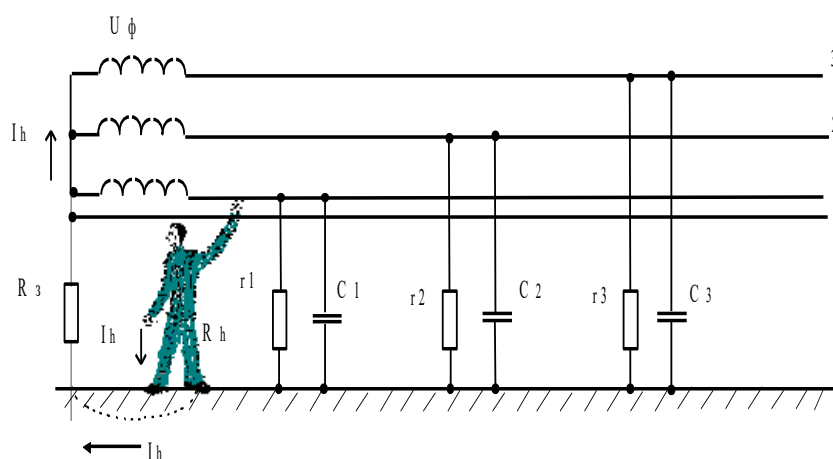


Рисунок 41.6. Трехфазная, четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью в рабочем режиме

При аварийном режиме, когда одна из фаз сети, например фаза 2 (рис.11.7.), замкнута на землю через малое сопротивление  $R_{зм}$ , напряжение прикосновения будет равно

$$U_{\cdot p} = U_{\text{тн}} R_h \frac{R_{K''} + R_3 \sqrt{3}}{R_{K''} R_3 + R_h (R_{K''} + R_3)}$$

Ток через человека будет равен

$$I_h = U_{\text{тн}} \frac{R_{\dot{K}''} + R_3 \sqrt{3}}{R_{\dot{K}''} R_3 + R_h (R_{\dot{K}''} + R_3)}$$

Если принять  $R_{3M} = 0$ , то уравнение примет вид

$$U_{\cdot p} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{тн}}$$

Следовательно, в данном случае человек оказывается под воздействием линейного напряжения сети.

Если принять равным нулю сопротивление заземления нейтрали  $R_3$ , то

$$U_{\cdot p} = U_{\text{тн}},$$

т.е. человек окажется под фазным напряжением.

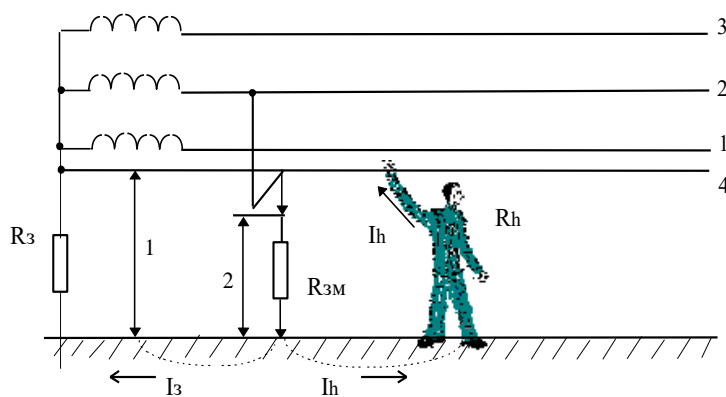


Рисунок 51.7. Трехфазная, четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью в аварийном режиме

Однако, в практических условиях сопротивления  $R_{3M}$  и  $R_3$  всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с заземленной нейтралью, всегда меньше линейного, но



больше фазного, (рис. 1.4б), т.е.

$$U_{\text{TM}} \sqrt{3} > U_{\text{п}} > U_{\text{TM}}$$

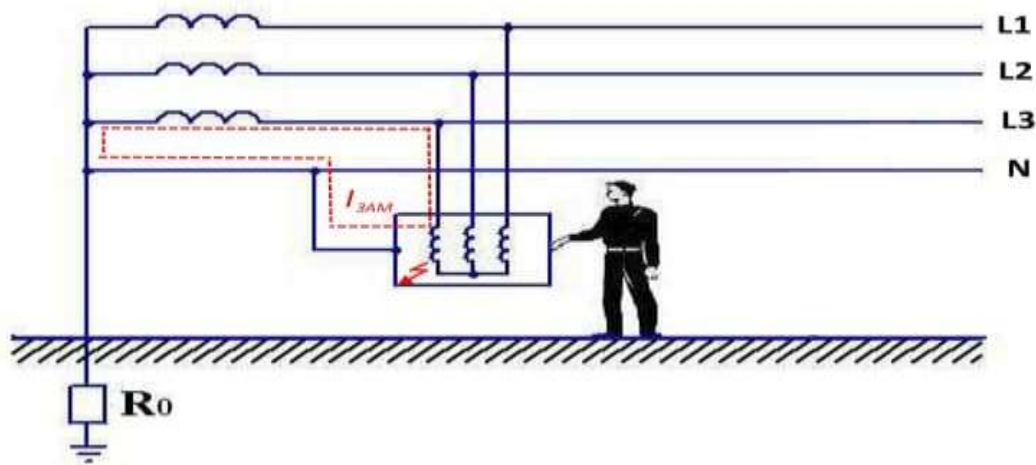


Рисунок 61.8. Движение тока при КЗ на корпус

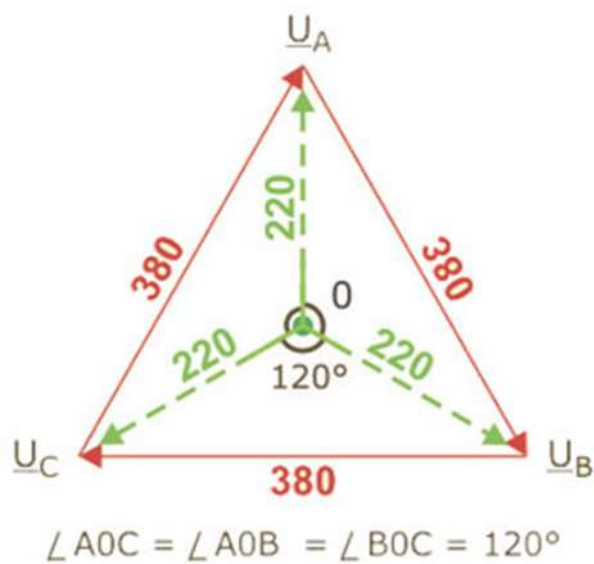


Рисунок 71.9. Трехфазная сеть с показателями смещения

Таким образом, прикосновение человека к исправному фазному проводу сети с заземленной

нейтралью в аварийный период более опасно, чем при нормальном режиме.

1. При нормальном режиме работы сети прикосновение человека к одному из фазных проводов в период нормальной работы более опасно в четырехпроводной сети с заземленной нейтралью.

2. При аварийном режиме работы сети прикосновение человека к одному из фазных проводов в трехпроводной сети с изолированной нейтралью более опасно, чем прикосновение к здоровой фазе четырехпроводной сети с заземленной нейтралью.



Рисунок 81.10. Пример устройства сети TN-C-S

### **Выбор схемы сети напряжением до 1000 В**

При напряжениях до 1000 В распространение получили обе схемы трехфазных сетей: трехпроводная с изолированной нейтралью и четырехпроводная с

заземленной нейтралью. По технологическим требованиям предпочтение чаще отдается четырехпроводной сети, так как она позволяет использовать два рабочих напряжения - линейное и фазное.

По условиям безопасности сети с изолированной нейтралью целесообразно применять в тех случаях, когда возможно поддержание высокого уровня изоляции проводов относительно земли и когда емкость проводов относительно земли незначительна (короткие сети, находящиеся под постоянным надзором, электротехнические лаборатории и т.д.).

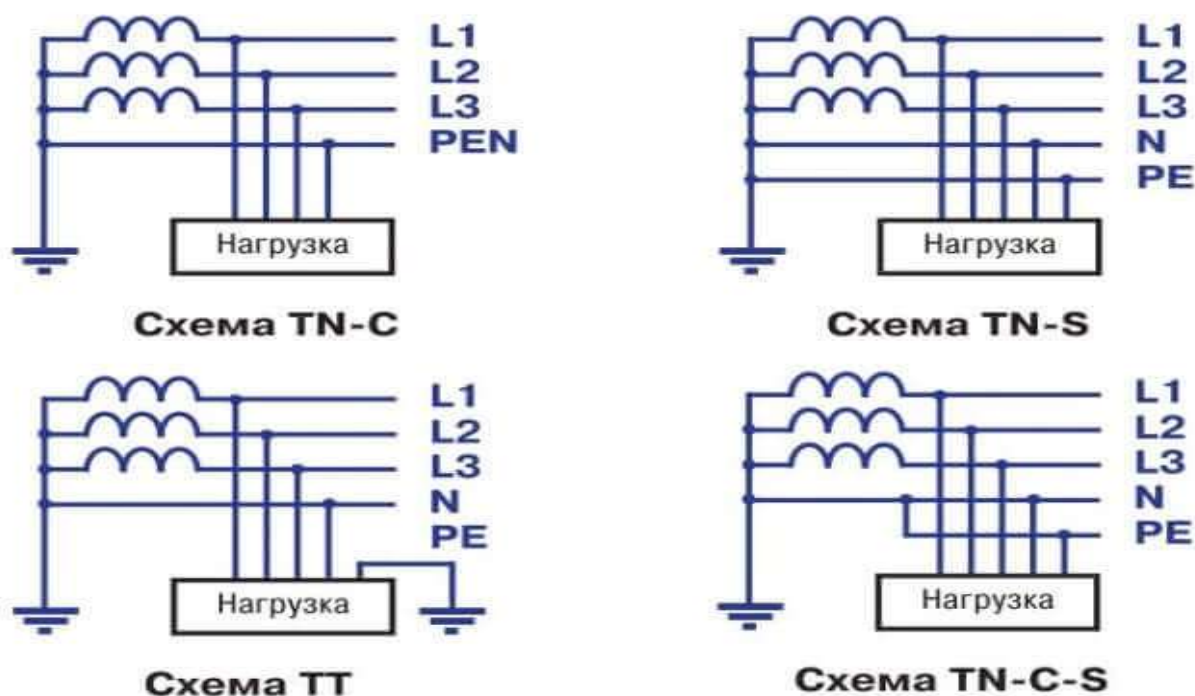


Рисунок 91.11. Подсистемы в цепях с источником энергии, имеющим глухозаземлённую нейтраль

Сети с заземленной нейтралью следует применять там, где трудно обеспечить хорошую изоляцию проводов (из-за

высокой влажности, агрессивной среды и т.д.), когда нельзя быстро отыскать повреждение изоляции или, когда емкостные токи из-за большой протяженности сетей достигают больших значений, опасных для человека (сети крупных предприятий, городские и сельские сети, сети собственных нужд электростанций и т.п.).

## Контрольные вопросы

---

1. Какие величины переменного и постоянного тока являются порогом ощущения и порогом неотпускающего тока?
2. Что такое линейное и фазное напряжение и какое между ними количественное соотношение?
3. Что называется, нормальным и аварийным режимом работы трёхфазных сетей?
4. Как определить величину тока, протекающего через тело человека в сетях с заземленной и изолированной нейтралью при однополюсном и двухполюсном прикосновении в нормальном и аварийном режимах их работы?
5. Как зависит ток, протекающий через человека при однополюсном и двухполюсном прикосновении к сети с заземленной нейтралью от величины сопротивления изоляции фаз относительно земли при нормально и аварийном режимах?

6. Как зависит ток, протекающий через человека при однополюсном прикосновении к сети с заземленной нейтралью, от величины ёмкости фаз относительно земли в нормальном режиме работы?

7. Как зависит ток, протекающий через тело человека при однополюсном и двухполюсном прикосновении к сети с изолированной нейтралью, от величины сопротивления изоляции фаз относительно земли в нормальном и аварийном режимах?

8. Как зависит ток, протекающий через тело человека при однополюсном прикосновении к сети с изолированной нейтралью, от величины ёмкости фаз относительно земли в нормальном и аварийном режимах?

9. Какие виды трехфазных сетей применяются при питающем напряжении до 1000 В?

10. В каких случаях применяется трехфазная четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью?

11. В каких случаях применяется трехфазная четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью?

12. По какому пути замыкается ток через человека при однополюсном прикосновении: а) к сети с изолированной нейтралью, б) к сети с заземленной нейтралью?