

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра БЖД

ОТЧЕТ
по лабораторной работе №2
по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»
Тема: Исследование условий электробезопасности в трехфазных сетях
с заземлённой нейтралью

Студенты гр. 0392	_____	Стаськова А.Р. Частухин Д.А.
Преподаватель	_____	Смирнова Н.В.

Санкт-Петербург
2023

Цель работы:

- Исследование режимов однофазного прикосновения человека;
- Изучение принципа действия зануления;
- Ознакомление с опасностями непрямого прикосновения при использовании защитного заземления и зануления.

Основные теоретические положения.

Общие сведения

Согласно существующим правилам электроустановки с напряжением до 1000 В жилых, общественных и промышленных зданий, а также наружные установки, д. получать питание от источника, как правило, с глухозаземленной нейтралью. Общий вид таких сетей для анализа безопасности:

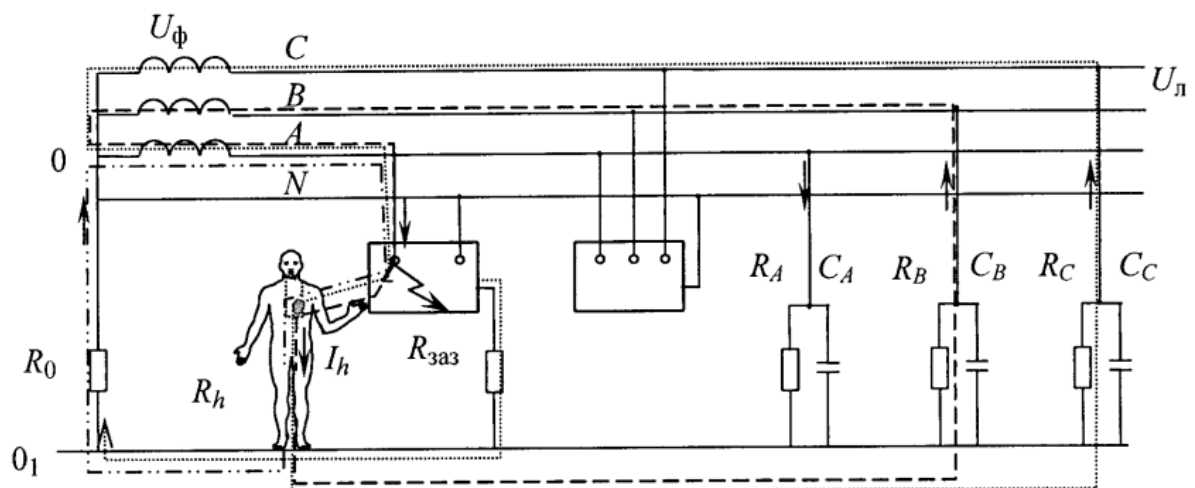


Рисунок 1. Электрическая схема сети для анализа безопасности с контурами возможных токов

Прямое однофазное прикосновение в такой системе очень опасно. Напряжение прикосновения определяется значением фазного напряжения из-за малого сопротивления рабочего заземления нейтрали R_0 (нормируемое значение ≤ 4 Ом для 220 В) и практически не зависит от сопротивления и ёмкостей фаз относительно земли:

$$U_h = U_\phi \frac{R_h}{R_0 + R_h} \approx U_\phi.$$

При замыкании в такой сети какой-либо фазы на землю напряжение прикосновения становится больше фазного, но м.б. скорее всего ближе к фазному, чем к линейному:

$$\dot{U}_h \approx U_\phi \frac{(1-a)g_{\text{зам}}C + g_0}{g_{\text{зам}}C + g_0} > U_\phi.$$

, где

$$a = e^{j120} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \text{ - оператор поворота,}$$

$$j = \sqrt{-1}; \quad g_0 = 1/R_0, \quad g_{\text{зам}} = 1/R_{\text{зам}}, \quad C_m \quad (C_m = 1/\text{Ом}) \quad \text{ - соответственно,}$$

активные проводимости относительно земли рабочего заземления и замыкания.

При выполнении защитного заземления с соблюдением требований к заземляющему устройству ($R_{\text{зз}} = 4 \text{ Ом}$) напряжение м.б. уменьшено максимум в 2 раза, а если заземлить корпус на элементы, случайным образом связанные с землей ($R_{\text{зз}} = 100 \text{ Ом}$), то напряжение прикосновения практически не будет отличаться от фазного напряжения:

$$U_h = U_\phi \frac{R_{\text{зз}}}{R_0 + R_{\text{зз}}} = (0.5 - 0.96)U_\phi.$$

Опасность использования защитного заземления в электроприёмнике не ограничивается тем, где оно применено. Гораздо более опасным оказывается прикосновение к правильно зануленным корпусам исправных электроприемников. При фазном напряжении 220 В на них появится напряжение, которое определяется падением напряжения на рабочем заземлении R_0 :

$$U_{001} = U_\phi \frac{R_0}{R_0 + R_{\text{зз}}} = (0.04 - 0.5)U_\phi.$$

Обработка результатов

1) Анализ условий опасности прямого прикосновения в системе TN

	Значение сопротивлений, Ом					Напряжение фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_a	R_b	R_c	$R_{зам}$	$R_{зав}$	U_{c01}	U_{b01}	U_{a01}	U_{k1}, U_0	U_{k2}	U_{k3}, U_h
1	5к	5к	5к	-	-	21	25	25	0	0	0
2	5к	5к	5к	-	-	22	26	25	0	0	24,5
3	150к	150к	150к	-	-	22	26	25	0	0	24,5
4	150к	150к	150к	50	-	11	32,5	31,5	9	9	31,5
5	150к	150к	150к	100	-	20	27	25,5	0,5	0,5	25

а) Прямое прикосновение к фазе А.

При параллельно соединённых резисторах $U_h = U_A$

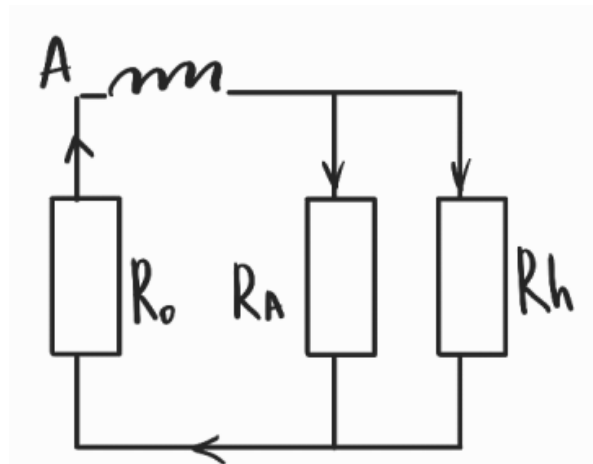


Рис.1 Схема прямого прикосновения человека к фазе А

Приведём формулы для расчёта.

Если $U_h = U_{\phi A} \cdot \frac{R_{h1}}{R_0 + R_{h1}}$ и $R_{h1} = \frac{R_a \cdot R_h}{R_a + R_h}$ тогда:

$$\begin{aligned}
 U_h &= U_{\phi A} \frac{\frac{R_a \cdot R_h}{R_a + R_h}}{\left(\frac{R_a \cdot R_h}{R_a + R_h} + R_0\right)} = U_{\phi A} \frac{\frac{R_a \cdot R_h}{R_a + R_h}}{\left(\frac{R_a \cdot R_h + R_0(R_a + R_h)}{R_a + R_h}\right)} = \\
 &= U_{\phi A} \frac{R_a R_h}{R_a R_0 + R_h R_0 + R_a R_h}
 \end{aligned}$$

- Напряжение прикосновения при $R_a = 5 \text{ кОм}$:

$$U_h = U_{\phi A} \frac{50 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3 \cdot 4 + 10^3 \cdot 4 + 50 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 218.94 \text{ В}$$

- Напряжение прикосновения при $R_a = 150 \text{ кОм}$:

$$U_h = U_{\phi A} \frac{150 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3 \cdot 4 + 10^3 \cdot 4 + 150 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 219.12 \text{ В}$$

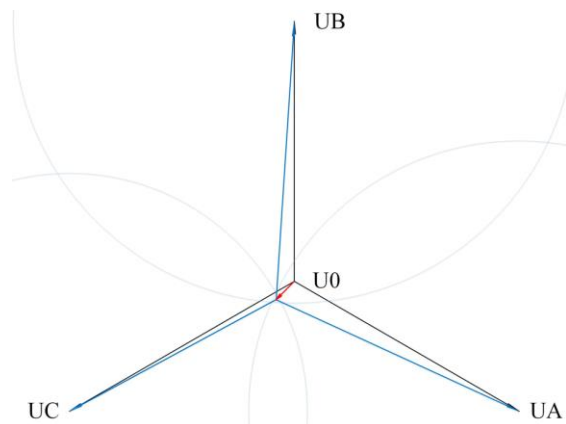


Рис.2 Векторная диаграмма 2 измерения

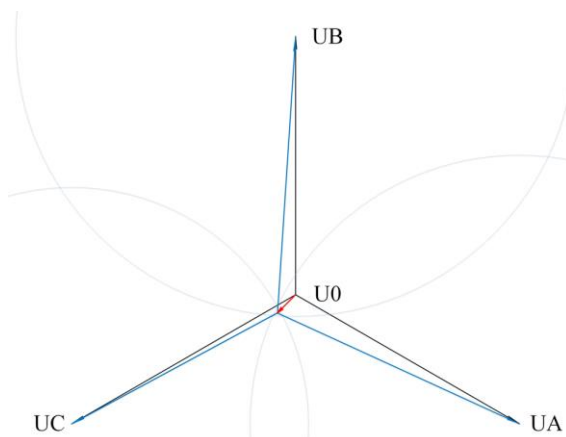


Рис.3 Векторная диаграмма 3 измерения

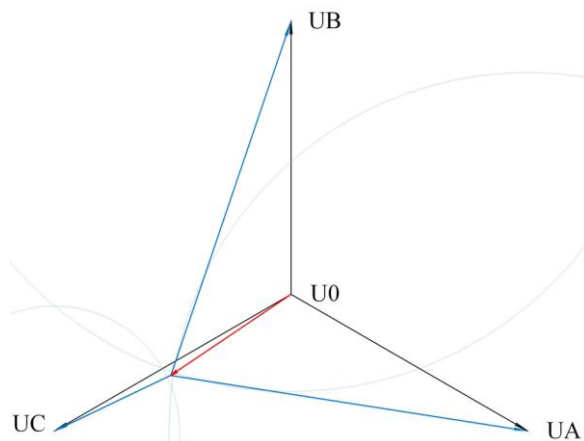


Рис.4 Векторная диаграмма 4 измерения

Вывод:

Исходя из расчётов, можно сделать вывод об эквивалентности напряжения человека и фазы А. При прикосновении к фазе в TN-S опасность прикосновения исходит исключительно от U_f и практически не зависит от сопротивления изоляции фаз.

Почти всё напряжение будет падать на человеке.

б) Прямое прикосновение при замыкании фазы С на землю

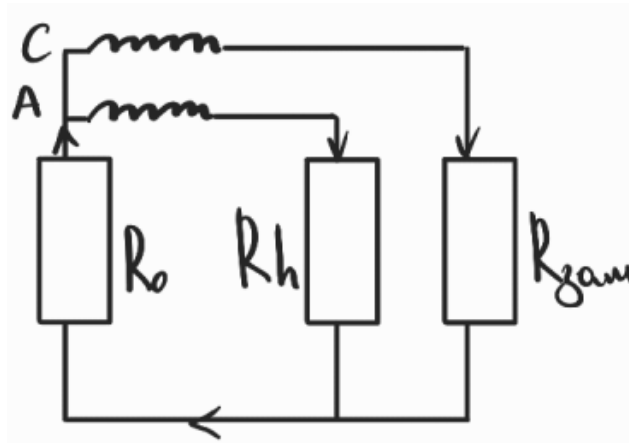


Рис.5 Схема прямого прикосновения к фазе А при замыкании фазы С на землю

Приведём формулы для расчёта.

$$U_h = U_a \cdot \frac{R_h}{R_0 + R_h} + U_c \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_{\text{зам}}}$$

$R_{\text{зам}} \ll R_c$, весь ток пройдет через $R_{\text{зам}}$, тогда:

- При $R_{\text{зам}} = 100 \text{ Ом}$:

$$U_{h1} = 220 \cdot \frac{1000}{4 + 1000} + 220 \cdot \frac{4}{4 + 100} = 227,5 \text{ В}$$

- При $R_{\text{зам}} = 50 \text{ Ом}$:

$$U_{h1} = 220 \cdot \frac{1000}{4 + 1000} + 220 \cdot \frac{4}{4 + 50} = 234,3 \text{ В}$$

Вывод:

После замыкания одной из фаз на землю, измеренное напряжение прикосновения будет больше фазного, но меньше линейного. Отсюда: чем выше сопротивление замыкания, тем выше падение напряжения на нем, и тем меньше падение на человеке. Падение напряжения на человеке немного больше фазного.

2) Оценка опасности заземления корпусов при непрямом прикосновении

	Значение сопротивлений, Ом					Напряжение фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_a	R_b	R_c	$R_{зам}$	$R_{зaz}$	U_{c01}	U_{b01}	U_{a01}	U_{k1}, U_0	U_{k2}	U_{k3}, U_h
7	150к	150к	150к	4	-	32	35,5	10,5	13	13	10,5
8	150к	150к	150к	100	-	23,5	27,5	22	2	2	21,5

Мы рассчитываем тот случай, когда одна из фаз замыкается на корпус.

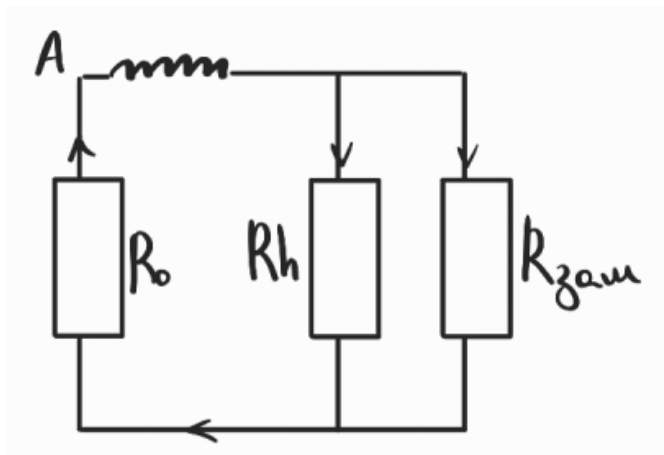


Рис.6 Схема непрямого прикосновения человека к корпусу прибора

Приведём формулы для расчёта.

$$U_h = U_\phi \cdot \frac{R_{зам} R_h}{R_{зaz} R_0 + R_h R_0 + R_{зaz} R_h}$$

- При $R_{зaz} = 4 \text{ Ом}$:

$$U_h = U_\phi \cdot \frac{4 \cdot 10^3}{4 \cdot 4 + 10^3 \cdot 4 + 4 \cdot 10^3} = 109,8 \text{ В}$$

- При $R_{зaz} = 100 \text{ Ом}$:

$$U_h = U_\phi \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{100 \cdot 4 + 10^3 \cdot 4 + 100 \cdot 10^3} = 210,7 \text{ В}$$

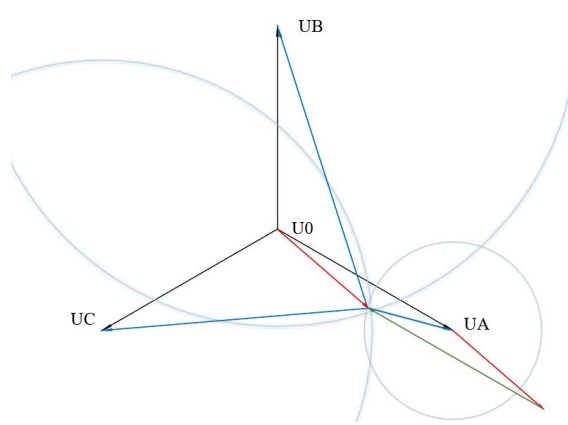


Рис.7 Векторная диаграмма 7 измерения

Вывод:

При сопротивлении заземления в 4 Ом, напряжение прикосновения уменьшается до половины фазного. При сопротивлении заземления в 100 Ом напряжение прикосновения практически не отличается от фазного: чем меньше сопротивление заземления, тем меньше напряжение будет на человеке.

3) Изучение принципа действия зануления

	Значение сопротивлений, Ом					Напряжение фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_a	R_b	R_c	$R_{зам}$	$R_{зaz}$	U_{c01}	U_{b01}	U_{a01}	U_{k1}, U_0	U_{k2}	U_{k3}, U_h
9	150к	150к	150к	-	100	0	0	0	0	0	0

Одним из способов защиты от поражения током в режиме замыкания фазы на корпус является зануление (преднамеренное электрическое соединение корпуса с нулевым проводом).

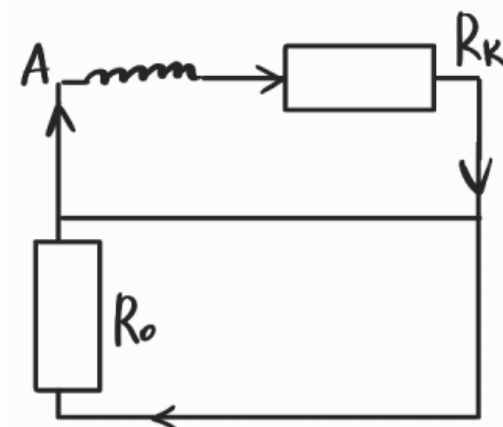


Рис. 8 Схема действия принципа зануления

Вывод:

Из полученных результатов опыта следует, что при замыкании фазного провода на корпус автоматически происходит отключение электрического прибора от сети. Это вызвано тем, что на нулевом проводе оказывается ток короткого замыкания, что инициирует срабатывание максимальной токовой защиты (выключателя и предохранителя).

4) Оценка опасности зануления корпусов при непрямом прикосновении

а) Случай неправильно выбранной (завышенной) установки срабатывания максимальной токовой нагрузки

	Значение сопротивлений, Ом					Напряжение фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_a	R_b	R_c	$R_{зам}$	$R_{заз}$	U_{c01}	U_{b01}	U_{a01}	U_{k1}, U_0	U_{k2}	U_{k3}, U_h
10	150к	150к	150к	-	100	21,5	25	25,5	15	15	0

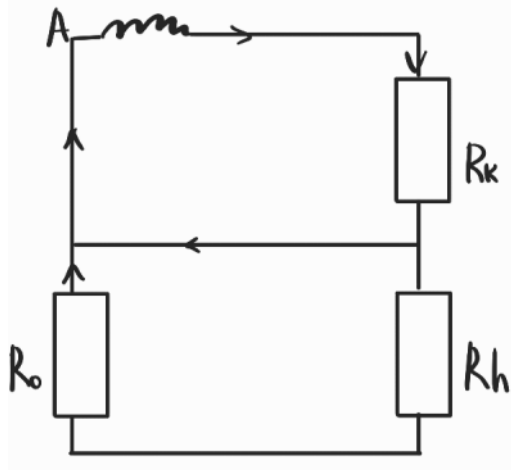


Рис.9 Схема с неправильно выбранной установки срабатывания максимальной токовой защиты

В данной схеме предохранитель (установка), отвечающий за зануление, неисправна.

Площадь поперечного сечения проводника $S = 1,5 \text{ мм}^2$;

Длина проводника $l = 1 \text{ м}$;

Удельная электропроводность меди $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Тогда

$$R_{\text{пр}} = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 1}{1,5} = 0,01 \text{ Ом}$$

$$R_{h\text{пр}} = \frac{R_{\text{пр}}(R_h + R_0)}{R_h + R_0 + R_{\text{пр}}} = \frac{0,01(1000 + 4)}{1000 + 4 + 0,01} = 0,01 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_{h\text{пр}} = U_A \cdot \frac{R_{h\text{пр}}}{R_{h\text{пр}} + R_{\text{пр}}} = 220 \cdot \frac{0,001}{0,001 + 0,001} = 110 \text{ В}$$

Вывод:

В рассматриваемом случае ток замыкания недостаточен для срабатывания предохранителя F1: он не отключил поврежденный электроприемник, автоматическое снятие напряжения со стенда не произошло. При этом напряжение на нулевом проводе и, соответственно, на всех корпусах неповрежденных электроприемников К1-2 И К2 оказывается велико.

В таком случае прикосновение к корпусу опасно для жизни.

б) Случай обрыва нулевого провода или неправильной установки в нем выключателя нагрузки

	Значение сопротивлений, Ом					Напряжение фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_a	R_b	R_c	$R_{\text{зам}}$	$R_{\text{заз}}$	U_{c01}	U_{b01}	U_{a01}	U_{k1}, U_0	U_{k2}	U_{k3}, U_h
11	150к	150к	150к	-	100	22	25	25,5	0	21,5	0
12	150к	150к	150к	-	100	15,5	28,5	29	4,5	11	0

- S-10 выключен, S-16 выключен

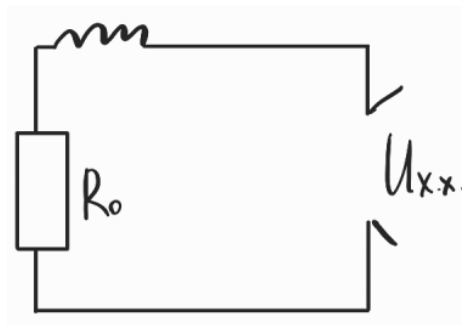


Рис.10 Схема без повторного заземления и без нагрузки

При разомкнутой лампе и отсутствии повторного заземления ток с фазы не поступает на нулевой оборванный провод, приборы работают в штатном режиме, напряжение прикосновения отсутствует. Прикосновение безопасно.

- S-10 включен, S-16 выключен

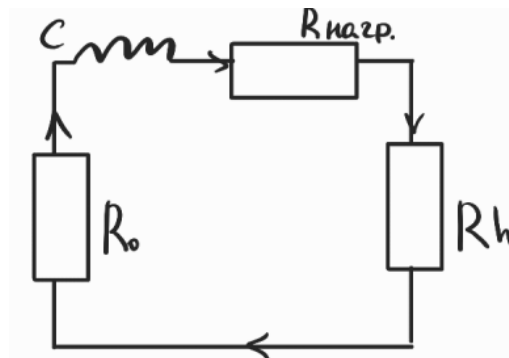


Рис.11 Схема без повторного заземления, но с нагрузкой

$$R_0 = 4 \text{ Ом}$$

$$R_h = 1 \text{ кОм}$$

Рассчитаем $R_{\text{наг}}$: если мощность лампы $P = 30 \text{ Вт}$, тогда $P = UI = \frac{U^2}{R}$;

$$R_{\text{наг}} = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{30} = 1613.3 \text{ Ом}$$

Используем формулу делителя напряжения:

$$U_h = U_{\phi A} \frac{R_h}{R_0 + R_{\text{наг}} + R_h} = 84.06 \text{ В}$$

- S-10 включен, S-16 включен

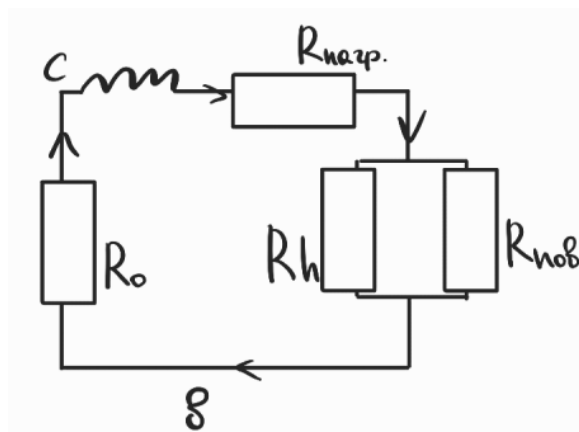


Рис.12 Схема с повторным заземлением и с нагрузкой

$$R_{\text{повт}} = 10 \text{ Ом}$$

Используем формулу делителя напряжения:

$$U_h = U_{\phi A} \frac{R_h R_{\text{повт}}}{R_{\text{повт}} R_h + (R_{\text{повт}} + R_h)(R_0 + R_{\text{наг}})} = 1.34 \text{ В}$$

Вывод:

При обрыве нулевого провода и неправильной установке выключателя нагрузки напряжение прикосновения равно 0 на зануленных приборах, пока нагрузка выключена. При включенной нагрузке и отключенном повторном заземлении напряжение на корпусе К2 велико, а при добавлении повторного заземления происходит перераспределение напряжения между корпусами К1 и К2. Соотношение напряжений зависит от соотношения рабочего и повторного заземлений.

в) Случай обрыва цепи нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю

	Значение сопротивлений, Ом					Напряжение фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_a	R_b	R_c	$R_{\text{зам}}$	$R_{\text{заз}}$	U_{c01}	U_{b01}	U_{a01}	U_{k1}, U_0	U_{k2}	U_{k3}, U_h
13	150к	150к	150к	50	-	0	41,5	41	20	20	0

14	150к	150к	150к	50	-	6,5	35,5	35,5	13,5	13	0
----	------	------	------	----	---	-----	------	------	------	----	---

- S-16 ВЫКЛЮЧЕН

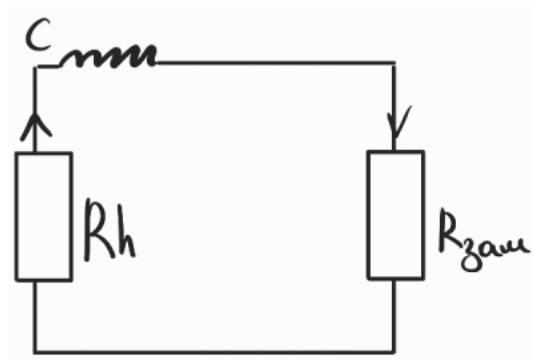


Рис.13 Схема без повторного заземления

$$U_h = U_{\phi A} \frac{R_h}{R_{\text{зам}} + R_h}$$

$$U_h = 220 \frac{1000}{50 + 1000} = 209.52 \text{ В}$$

$$U_{R_{\text{зам}}} = 220 - 209.52 = 10.48 \text{ В}$$

При отключенном повторном заземлении прикосновение к защищенному корпусу опасно для жизни.

- S-16 ВКЛЮЧЕН

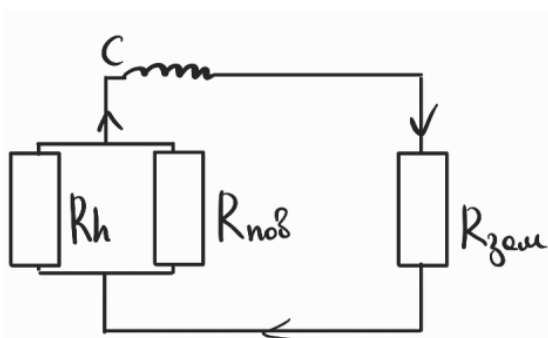


Рис.14 Схема с повторным заземлением

$$U_h = U_{\phi A} \frac{R_{\text{повт}} R_h}{R_{\text{зам}} R_{\text{повт}} + R_{\text{повт}} R_h + R_{\text{зам}} R_h}$$

$$U_h = U_{\phi A} \frac{10 \cdot 1000}{50 \cdot 10 + 10 \cdot 1000 + 50 \cdot 1000} = 36.36 \text{ В}$$

$$U_{R_{\text{зам}}} = 220 - 36.36 = 183.64 \text{ В}$$

При подключенном повторном заземлении происходит перераспределение напряжения и напряжение прикосновения уменьшается на порядок.

Вывод:

В случае обрыва цепи нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю и при отключенном повторном заземлении, на корпусах К1 и К2 образуется напряжение, близкое к фазовому, и зависящее от сопротивления замыкания на землю. Включение повторного заземления позволяет снизить напряжение прикосновения на корпусах приборов, но не нейтрализует его полностью.