

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

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

Студенты гр.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Преподаватель

\_\_\_\_\_

Овдиенко Е.Н.

Санкт-Петербург

2022

### Цель работы.

- Исследование режимов однофазного прикосновения человека
- изучение принципа действия зануления
- ознакомление с опасностями непрямого прикосновения при использовании защитного заземления и зануления

### 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:

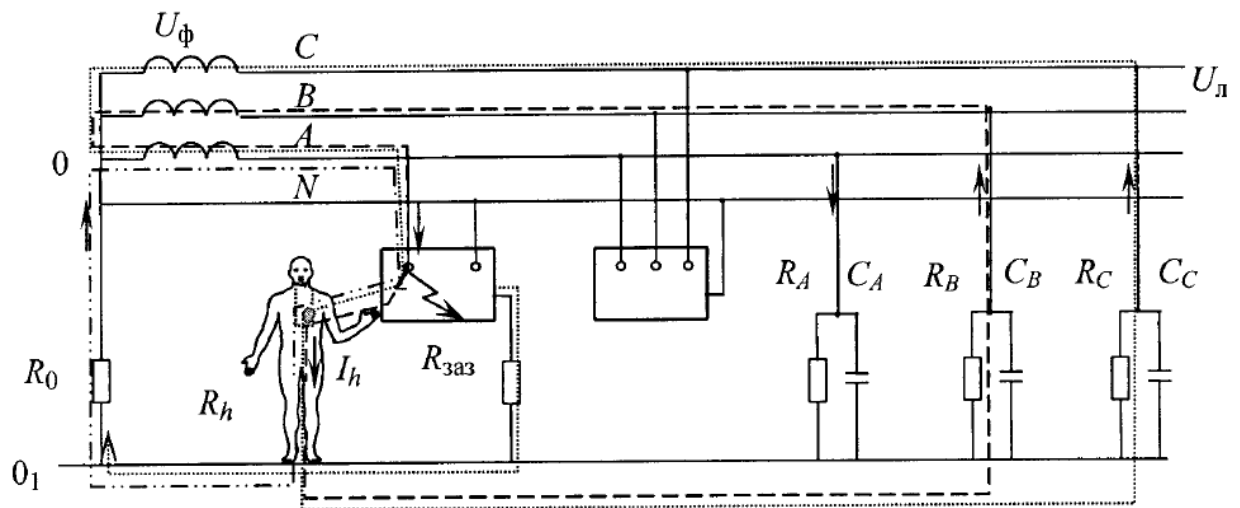


Рисунок 1. Электрическая схема сети для анализа безопасности с контурами  
ВОЗМОЖНЫХ ТОКОВ

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  $R_0 \leq 4$  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:

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

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

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

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  $R_0$ :

$$U_{00_1} = U_\phi \frac{R_0}{R_0 + R_{\text{зз}}} = (0.04 - 0.5)U_\phi.$$

## 1. Анализ условий опасности прямого прикосновения к системе TN

### 1.1 Прямое прикосновение

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В					
R <sub>A</sub>	R <sub>B</sub>	R <sub>C</sub>	R <sub>зам</sub>	R <sub>раз</sub>	U <sub>A01</sub>	U <sub>B01</sub>	U <sub>C01</sub>	U <sub>K1</sub> , U <sub>0</sub>	U <sub>K2</sub>	U <sub>K3</sub> , U <sub>h</sub>
5	5	5	-	-	27	27,5	23	0	0	0
150	150	150	-	-	27	27,5	23	0	0,1	26,5

При параллельно соединённых резисторах  $U_h = U_A$ . Приведём расчёт схемы.

Для  $R_A = 5000$  Ом:

$$R_{hA} = \frac{R_h \cdot R_A}{R_h + R_A} = \frac{1000 \cdot 5000}{1000 + 5000} = 833,330 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_A = U_\Phi \cdot \frac{R_{hA}}{R_{hA} + R_0} = 220 \cdot \frac{833,330}{(833,330 + 4)} = 218,940 \text{ В}$$

Для  $R_A = 150000$  Ом:

$$R_{hA} = \frac{R_h \cdot R_A}{R_h + R_A} = \frac{1000 \cdot 150000}{1000 + 150000} = 993,370 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_A = U_\Phi \cdot \frac{R_{hA}}{R_{hA} + R_0} = 220 \cdot \frac{993,370}{(993,370 + 4)} = 219,120 \text{ В}$$

#### Вывод

Исходя из расчётов, можно сделать вывод об эквивалентности напряжения человека и фазы А. При прикосновении к фазе в СГЗН опасность прикосновения исходит исключительно от  $U_\Phi$  (по формуле делителя напряжения) и практически не зависит от сопротивления изоляции фаз.

Напряжение на корпусах остаётся нулевым, поскольку нулевой провод не участвует в процессе и остаётся не под напряжением.

## 1.2 Прямое прикосновение к фазе А при заземлённой фазе С

Во втором случае будет наблюдаться аналогичная картина (векторная диаграмма аналогична с небольшой разницей длин векторов).

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В					
$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_{зам}$	$R_{заз}$	$U_{A0}$	$U_{B0}$	$U_{C0}$	$U_{K1}, U_0$	$U_{K2}$	$U_{K3}, U_h$
150	150	150	0,05	-	32	34	12	9	9	32
150	150	150	0,1	-	26	28	21	1	1	26

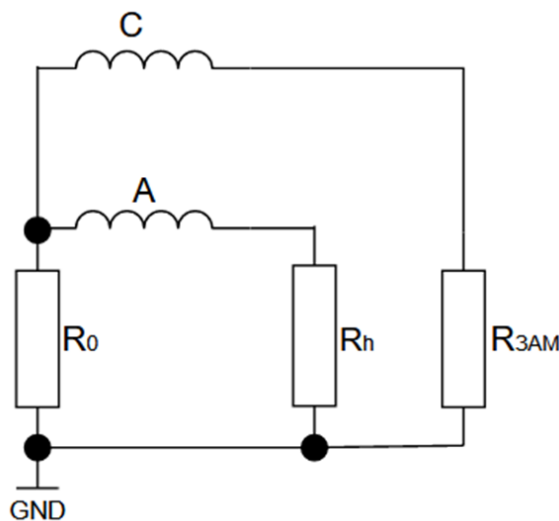


Рисунок 3. Прямое прикосновение к фазе А при заземлённой фазе С.

После того, как замкнули фазу С на землю, напряжение прикосновения возросло и стало больше фазного:

$$U_h = U_a * (R_h / (R_0 + R_h)) + U_0$$

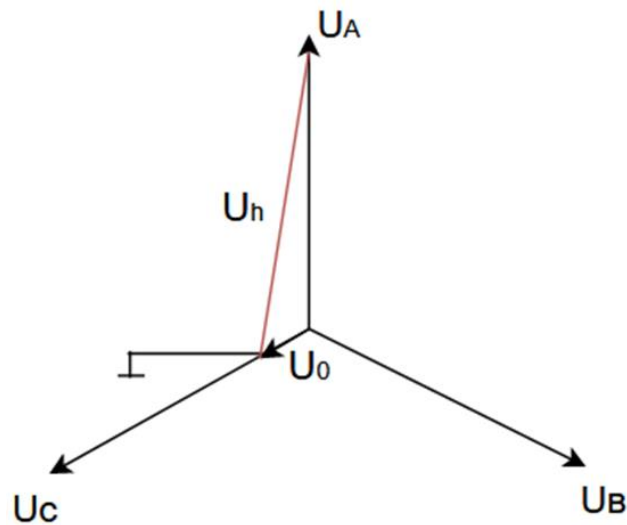
$$U_0 = U_c * R_0 / (R_0 + R_{зам})$$

$$U_{01} = 220 \cdot 4 / (4 + 50) = 16,3 \text{ В}$$

$$U_{02} = 220 \cdot 4 / (4 + 100) = 8,5 \text{ В}$$

$$U_{h1} = 220 \cdot (1000 / (4 + 1000)) + 16,3 = 235,4 \text{ В}$$

$$U_{h2} = 220 \cdot (1000 / (4 + 1000)) + 8,5 = 227 \text{ В}$$



Векторная диаграмма 2.

### Вывод

После замыкания одной из фаз на землю, измеренное напряжение прикосновения получилось больше фазного, но меньше линейного. Можно сделать вывод о том, что чем выше сопротивление замыкания, тем выше падение напряжения на нем, и тем меньше оно возрастает на человеке.

$U_0$  откладывается на векторе фазы C, так как человек замыкается позже замыкания фазы, поэтому откладывается сначала обычное замыкание (фаза C), а потом уже новое (замыкание фазы A на человека).

## 2. Оценка опасности заземления корпусов при непрямом прикосновении

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В					
R <sub>A</sub>	R <sub>B</sub>	R <sub>C</sub>	R <sub>зам</sub>	R <sub>заз</sub>	U <sub>A01</sub>	U <sub>B01</sub>	U <sub>C01</sub>	U <sub>K1</sub> , U <sub>0</sub>	U <sub>K2</sub>	U <sub>K3</sub> , U <sub>h</sub>
5	5	5	-	-	27	27,5	23,5	0,1	0	26,5
5	5	5	-	0,00 4	16	34	30,1	9	9	16
5	5	5	-	0,1	25	29	25	1,5	1,5	24,5

Мы рассчитываем тот случай, когда одна из фаз замыкается на корпус (когда остальные фазы исправно функционируют и также остаются изолированными относительно корпуса электропотребителя).

Приведём формулы для расчёта. По закону Ома ток на фазе будет равен напряжению на фазе и общему сопротивлению  $R_0$ ,  $R_{зАЗ}$  и  $R_h$ :

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{R} = \frac{U_{\Phi}}{\frac{R_{зАЗ} \cdot R_h}{R_{зАЗ} + R_h} + R_0}$$

Таким образом получается, что напряжение прикосновения (равное напряжению заземления, так как они находятся в одном контуре):

$$U_h = I_\Phi \cdot R_{(h+3A3)} = \frac{U_\Phi}{\frac{R_{3A3} \cdot R_h}{R_{3A3} + R_h} + R_0} \cdot \frac{R_{3A3} \cdot R_h}{R_h + R_{3A3}}$$

$$= U_\Phi \cdot \frac{\frac{R_{3A3} \cdot R_h}{R_h + R_{3A3}}}{\frac{R_{3A3} \cdot R_h}{R_{3A3} + R_h} + R_0} = (*)$$

$$(*) = \left[ \frac{R_{3A3} \cdot R_h}{R_h + R_{3A3}} = R_{(h+3A3)} = R_{3A3}(\text{общ}) \right] = U_\Phi \cdot \frac{R_{3A3}(\text{общ})}{R_0 + R_{3A3}(\text{общ})}$$

$$R_{3A3}(\text{общ}) = \frac{R_{3A3} \cdot R_h}{R_{3A3} + R_h}$$

$$U_h = U_{3A3} = U_\Phi \cdot \frac{R_{3A3}(\text{общ})}{R_0 + R_{3A3}(\text{общ})}$$

$$I = \frac{U_\Phi}{R_{3A3}(\text{общ}) + R_0}$$

$$U_0 = I \cdot R_0$$

$$R_0 = 4 \text{ Ом}$$

Рассчитаем напряжение для  $R_{3A3} = 4 \text{ Ом}$  и для  $U_\Phi = U_A = 220 \text{ В}$  (при  $R_0 = 4 \text{ Ом}$ ):

$$R_{3A3}(\text{общ}) = \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} = 3,984 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_{3A3} = 220 \cdot \frac{3,984}{4 + 3,984} = 109,780 \text{ В}$$

$$U_0 = \frac{220}{3,984 + 4} \cdot 4 = 110,220 \text{ В}$$

Рассчитаем напряжение для  $R_{3A3} = 100 \text{ Ом}$  и для  $U_\Phi = U_A = 220 \text{ В}$  (при  $R_0 = 4 \text{ Ом}$ ):

$$R_{3A3}(\text{общ}) = \frac{100 \cdot 1000}{100 + 1000} = 90,909 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_{3A3} = 220 \cdot \frac{90,909}{4 + 90,909} = 210,728 \text{ В}$$



$$U_0 = \frac{220}{90,909 + 4} \cdot 4 = 9,272 \text{ В}$$

Рассчитаем напряжение для  $R_{\text{ЗАЗ}} = 4 \text{ Ом}$  и для  $U_{\text{Ф}} = U_{\text{А}}$  согласно протоколу (при  $R_0 = 4 \text{ Ом}$ ):

$$R_{\text{ЗАЗ}}(\text{общ}) = \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} = 3,984 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_{\text{ЗАЗ}} = 16 \cdot \frac{3,984}{4 + 3,984} = 7,984 \text{ В}$$

$$U_0 = \frac{16}{3,984 + 4} \cdot 4 = 8,016 \text{ В}$$

Рассчитаем напряжение для  $R_{\text{ЗАЗ}} = 100 \text{ Ом}$  и для  $U_{\text{Ф}} = U_{\text{А}}$  согласно протоколу (при  $R_0 = 4 \text{ Ом}$ ):

$$R_{\text{ЗАЗ}}(\text{общ}) = \frac{100 \cdot 1000}{100 + 1000} = 90,909 \text{ Ом}$$

$$U_h = U_{\text{ЗАЗ}} = 25 \cdot \frac{90,909}{4 + 90,909} = 23,946 \text{ В}$$

$$U_0 = \frac{16}{90,909 + 4} \cdot 4 = 0,674 \text{ В}$$

где:

$R_{\text{ЗАЗ}}$  – величина сопротивления заземления

$R_{\text{ЗАЗ}}(\text{общ})$  – величина сопротивления заземления и сопротивления человека

$U_h = U_{\text{ЗАЗ}}$  – величина напряжения человека при заземлении при непрямом прикосновении

## Вывод

При защитном заземлении при непрямом прикосновении человека к корпусу имеет значение сопротивление заземления: чем оно меньше, тем больший ток будет протекать НЕ через человека, а чем оно больше, тем больший

ток будет протекать через человека. Это наглядно демонстрирует проведённый эксперимент.

Исходя из этого, можно сказать, что смысл защитного заземления в том, чтобы брать на себя больший ток, чтобы через человека прошёл меньший, поэтому важно проводить заземление не через проводники, которые имеют большое сопротивление, так как это не только не поможет человеку, который находится под напряжением, но и поставит под угрозу жизни остальных.

### 3. Изучение принципа зануления

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В					
$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_{зам}$	$R_{заз}$	$U_{A01}$	$U_{B01}$	$U_{C01}$	$U_{K1},$ $U_0$	$U_{K2}$	$U_{K3},$ $U_h$
5	5	5	-	-	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).

Из полученных результатов опыта следует, что при замыкании фазы на корпус происходит автоматическое отключение электрического прибора от сети. Происходит это вследствие протекания тока короткого замыкания на нулевой провод, что в свою очередь вызывает срабатывание максимальной токовой защиты (выключателя и предохранителя).

### Вывод

Под действием тока короткого замыкания срабатывают приборы токовой защиты, которые отключают стенд от сети, в результате чего напряжение прикосновения к корпусу становится равным нулю.

Таким образом, зануление является одним из эффективных способов защиты и при прикосновении к зануленому корпусу позволяет полностью устранить опасность поражения электрическим током.

#### 4. Оценка опасности зануления корпусов при непрямом прикосновении

##### 4.1 Случай неправильно выбранной (завышенной) установки срабатывания максимальной токовой нагрузки

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В					
$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_{зам}$	$R_{зав}$	$U_{A01}$	$U_{B01}$	$U_{C01}$	$U_{K1},$ $U_0$	$U_{K2}$	$U_{K3},$ $U_h$
5	5	5	-	-	27	27	23,5	12,5	12,5	0

В данной схеме предохранитель (установка), отвечающий за зануление, неисправна. Сопротивлением корпуса пренебрегаем, поэтому  $R_{КОР} = 0$  Ом. Определим сопротивление проводов  $R_{ПР}$  (на фазе и на нейтрали оно одинаковое). Для этого положим, что:

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

Длина проводника  $l = 50 \text{ м}$ ;

Удельная электропроводность алюминия  $\rho = 0,0263 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Сопротивление провода с длиной  $l = 50 \text{ м}$  с площадью поперечного сечения  $S = 1,5 \text{ мм}^2$  и с удельной электропроводностью  $\rho = 0,0263 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  равно  $R_{ПР} =$

$$\frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,0263 \cdot 50}{1,5} = 0,877 \text{ Ом}$$

Рассчитаем по закону Ома напряжение прикосновения человека  $U_h$  и  $U_0$  (при  $R_{КОР} = 0$  Ом). Для начала определим фазный ток, затем определим ток замыкания, а после рассчитаем напряжение прикосновения:

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{R} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ПР}} + \left( \frac{(R_h + R_0) \cdot R_{\text{ПР}}}{(R_h + R_0) + R_{\text{ПР}}} \right)}$$

$$I_h = I_0 = \frac{U_{(h+0)}}{R_h + R_0} = \frac{U_{\Phi} - U_{\text{ПР1}}}{R_h + R_0} = \frac{U_{\Phi} - I_{\Phi} \cdot R_{\text{ПР}}}{R_h + R_0}$$

$$U_h = I_h \cdot R_h$$

$$U_0 = I_0 \cdot R_0$$

Рассчитаем напряжение для  $U_{\Phi} = U_A = 27$  В согласно протоколу (при  $R_0 = 4$  Ом и  $R_{\text{ПР}} = 0,877$  Ом):

$$I_{\Phi} = \frac{27}{0,877 + \left( \frac{(1000 + 4) \cdot 0,877}{(1000 + 4) + 0,877} \right)} = 15,400 \text{ A}$$

$$I_h = I_0 = \frac{27 - 15,400 \cdot 0,877}{1000 + 4} = 0,013 \text{ A}$$

$$U_h = 0,013 \cdot 1000 = 13 \text{ В}$$

$$U_0 = 0,013 \cdot 4 = 0,054 \text{ В}$$

Рассчитаем напряжение для  $U_{\Phi} = U_A = 220$  В (при  $R_0 = 4$  Ом и  $R_{\text{ПР}} = 0,877$  Ом):

$$I_{\Phi} = \frac{220}{0,877 + \left( \frac{(1000 + 4) \cdot 0,877}{(1000 + 4) + 0,877} \right)} = 125,482 \text{ A}$$

$$I_h = I_0 = \frac{220 - 125,482 \cdot 0,877}{1000 + 4} = 0,110 \text{ A}$$

$$U_h = 0,110 \cdot 1000 = 110 \text{ В}$$

$$U_0 = 0,110 \cdot 4 = 0,438 \text{ В}$$

**Вывод**

Исходя из полученных результатов, ток будет зависеть от сопротивления провода. Иными словами, если сопротивление провода маленькое, то и через человека будет проходить меньший ток, а больший через провод.

Для решения проблемы отсутствия срабатывания защитной установки необходимо проверять саму установку на наличие неисправностей. А при потенциальном её возникновении, во-первых, нужно обращать внимание на сопротивление провода, которое играет решающую роль, так как именно через него будет проходить ток, который может пойти через человека, во-вторых, проверять изоляцию корпуса, чтобы обнаружить неисправность (в данном пункте  $R_{\text{кор}} = 0 \text{ Ом}$ , чтобы упростить проверку устройства, но при большем сопротивлении будет проходить ток через человека, недостаточный для срабатывания установки и не выдающий неисправность).

В данном случае, при неправильно выбранной (завышенной) уставке срабатывания максимальной токовой нагрузки зануление корпуса будет небезопасно и не сможет спасти от поражения электрическим током. Это происходит потому, что величина тока замыкания недостаточна для срабатывания предохранителя, а напряжение на корпусе большое.

#### 4.2 Случай обрыва нулевого провода или неправильной установки в нем выключателя нагрузки

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В							
$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_{3a}$ м	$R_{3az}$	$U_{A0}$ 1	$U_{B01}$	$U_{C0}$ 1	$U_{K1},$ $U_0$	$U_{K2}$	$U_{K3},$ $U_h$	S10	S16
5	5	5	-	-	27	27	23,5	0	0	0	ВЫКЛ	ВЫКЛ
5	5	5	-	-	27	27	23,5	0	0	0	ВЫКЛ	ВКЛ

5	5	5	-	-	27	27	23,5	0	23,5	0	ВКЛ	ВЫКЛ
5	5	5	-	-	27,8	27,5	22,5	0,9	2	0	ВКЛ	ВКЛ

Мы будем использовать нагрузку лампы, мощность которой равна 40 Вт, таким образом:

$$R_{\text{НАГР}} = \frac{U_{\Phi}}{\frac{P}{U_{\Phi}}} = \frac{(U_{\Phi})^2}{P} = \frac{220^2}{40} = 1210 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПОВТ}} = 4 \text{ Ом}.$$

Случай 1: S10 – выключен, S16 – выключен.

При отсутствии подключения к нагрузке (S10) и при отсутствии повторного заземления (S16) на корпусах напряжения будет отсутствовать, так как поступления тока с фазы на неисправную нейтраль не будет – ток не будет идти через корпуса, подключённые к этой нейтрали, так как разрыв нейтрали будет эквивалентен разрыву цепи.

$$I_{\Phi} = 0 \text{ А}$$

$$I_0 = 0 \text{ А}$$

$$I_{h1} = 0 \text{ А}$$

$$I_{h2} = 0 \text{ А}$$

$$I_{\text{НАГР}} = 0 \text{ А (нагрузка не подключена)}$$

$$I_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ А (повторное заземление не подключено)}$$

$$U_0 = I_0 \cdot R_0 = 0 \cdot 4 = 0 \text{ В}$$

$$U_{h1} = I_{h1} \cdot R_{h1} = 0 \cdot 1000 = 0 \text{ В}$$

$$U_{h2} = I_{h2} \cdot R_{h2} = 0 \cdot 1000 = 0 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = 0 \text{ В (нагрузка не подключена)}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ В (повторное заземление не подключено)}$$

Случай 2: S10 – выключен, S16 – включён.

При отсутствии подключения к нагрузке (S10) и при наличии повторного заземления (S16) на корпусах напряжение будет отсутствовать, так как поступление тока с фазы на неисправную нейтраль не будет – ток не будет идти через корпуса, подключённые к этой нейтрали, так как разрыв нейтрали будет эквивалентен разрыву участка цепи.

$$I_{\Phi} = 0 \text{ A}$$

$$I_0 = 0 \text{ A}$$

$$I_{h1} = 0 \text{ A}$$

$$I_{h2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{\text{НАГР}} = 0 \text{ A (нагрузка не подключена)}$$

$$I_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ A}$$

$$U_0 = I_0 \cdot R_0 = 0 \cdot 4 = 0 \text{ В}$$

$$U_{h1} = I_{h1} \cdot R_{h1} = 0 \cdot 1000 = 0 \text{ В}$$

$$U_{h2} = I_{h2} \cdot R_{h2} = 0 \cdot 1000 = 0 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = 0 \text{ В (нагрузка не подключена)}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = I_{\text{ПОВТ}} \cdot R_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ В}$$

Случай 3: S10 – включён, S16 – выключен.

$$I_{\Phi} = I_{\text{НАГР}} = I_{h2} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ОБЩ}}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{НАГР}} + R_{h2} + \frac{R_0 \cdot R_{h1}}{R_0 + R_{h1}}} = (*)$$

$$(*) = \frac{220}{1210 + 1000 + \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000}} = 0,099 \text{ A}$$

$$I_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ A (повторное заземление не подключено)}$$

$$U_0 = U_{h1} = I_{\Phi} \cdot R_{(0+h1)} = I_{\Phi} \cdot \frac{R_0 \cdot R_{h1}}{R_0 + R_{h1}} = 0,099 \cdot \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} = 0,356 \text{ В}$$

$$U_{h2} = I_{\Phi} \cdot R_{h2} = 0,099 \cdot 1000 = 99 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = I_{\Phi} \cdot R_{\text{НАГР}} = 0,099 \cdot 1210 = 119,790 \text{ В}$$

$U_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ В}$  (повторное заземление не подключено)

Случай 4: S10 – включён, S16 – включён.

$$I_{\Phi} = I_{\text{НАГР}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ОБЩ}}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{НАГР}} + \frac{R_{\text{ПОВТ}} \cdot R_{h2}}{R_{\text{ПОВТ}} + R_{h2}} + \frac{R_0 \cdot R_{h1}}{R_0 + R_{h1}}} = (*)$$

$$(*) = \frac{220}{1210 + \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} + \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000}} = 0,181 \text{ А}$$

$$U_0 = U_{h1} = I_{\Phi} \cdot R_{(0+h1)} = I_{\Phi} \cdot \frac{R_0 \cdot R_{h1}}{R_0 + R_{h1}} = 0,181 \cdot \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} = 0,721 \text{ В}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = U_{h2} = I_{\Phi} \cdot R_{(\text{ПОВТ}+h2)} = I_{\Phi} \cdot \frac{R_{\text{ПОВТ}} \cdot R_{h2}}{R_{\text{ПОВТ}} + R_{h2}} = (**)$$

$$(**) = 0,181 \cdot \frac{4 \cdot 1000}{4 + 1000} = 0,721 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = I_{\Phi} \cdot R_{\text{НАГР}} = 0,181 \cdot 1210 = 219,010 \text{ В}$$

### Вывод

В данном случае, при обрыве нулевого провода или при неправильной установке в нём выключателя нагрузки, ситуация для человека ещё опаснее, чем при завышенной установки срабатывания максимальной токовой нагрузки.

Если нулевой провод (нейтраль) имеет обрыв и если не работает нагрузка (вне зависимости от того, сделано повторное заземление или нет), то электрическая цепь будет разомкнута, что не представляет угрозу для человека.

Если же имеет место работающая нагрузка (неправильная установка в нём выключателя нагрузки), то при отсутствии повторного заземления эта ситуация крайне опасна для человека 2, напряжение прикосновения которого составит 99 В, так как ток будет течь через него в землю, образуя замкнутую цепь. Для человека 1, через которого будет протекать ток (параллельно), ситуация будет чуть лучше, но также опасной (если нагрузку увеличить, то повторное заземление также не будет эффективно, хоть и значительно снизит напряжение



прикосновения). При повторном заземлении ситуация для человека 2 становится аналогичной человеку 1.

#### 4.3 Случай обрыва цепи нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю

Сопротивления фаз, кОм					Напряжения фаз и корпусов, В						
R <sub>A</sub>	R <sub>B</sub>	R <sub>C</sub>	R <sub>за</sub> М	R <sub>заз</sub>	U <sub>A0</sub> 1	U <sub>B01</sub>	U <sub>C0</sub> 1	U <sub>K1</sub> , U <sub>0</sub>	U <sub>K2</sub>	U <sub>K3</sub> , U <sub>h</sub>	S16
5	5	5	100	-	44	44	0	22	22	0	ВЫКЛ
5	5	5	100	-	29,2	29,2	19,2	3,1	3	0	ВКЛ

Случай 1: S16 – выключен.

В данном случае при включённой нагрузке, при замыкании фазы на землю (в этом случае – фаза C), но без повторного заземления, рассчитаем напряжения прикосновения человека к корпусам электроприёмников, а также напряжение замыкания.

Мы будем использовать нагрузку лампы, мощность которой равна 40 Вт, таким образом:

$$R_{\text{НАГР}} = \frac{U_{\Phi}}{\frac{P}{U_{\Phi}}} = \frac{(U_{\Phi})^2}{P} = \frac{220^2}{40} = 1210 \text{ Ом.}$$

Для случая  $U_{\Phi} = U_C = 220 \text{ В}$  (при  $R_{\text{ЗАМ}} = 100 \text{ Ом}$  и  $R_{\text{НАГР}} = 1210 \text{ Ом}$ ):

$$R_{\text{ОБЩ}} = \frac{R_H \cdot (R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2}}{R_{h1} + R_{h2}})}{R_H + (R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2}}{R_{h1} + R_{h2}})}$$

$$= \frac{1210 \cdot (100 + \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000})}{1210 + (100 + \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000})} = 401,105 \text{ Ом}$$

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ОБЩ}}} = \frac{220}{401,105} = 0,548 \text{ А}$$

$$I_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ А}$$

$$I_{\text{ЗАМ}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{(\text{ЗАМ}+h1+h2)}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2}}{R_{h1} + R_{h2}}}$$

$$= \frac{220}{100 + \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000}} = 0,367 \text{ А}$$

$$U_{\text{ЗАМ}} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{\text{ЗАМ}} = 0,367 \cdot 100 = 36,7 \text{ В}$$

$$U_{h1} = U_{h2} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{(h1+h2)} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot \frac{R_{h1} \cdot R_{h2}}{R_{h1} + R_{h2}} = (1)$$

$$(1) = 0,367 \cdot \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000} = 183,333 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = U_{\Phi}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ В (повторное заземление не подключено)}$$

Случай 2: S16 – включён.

В данном случае при включённой нагрузке, при замыкании фазы на землю (в этом случае – фаза С) и с повторным заземлением рассчитаем напряжения прикосновения человека к корпусам электроприёмников, а также напряжение замыкания.

Для случая  $U_{\Phi} = U_C = 220$  В (при  $R_{\text{ПОВТ}} = 4$  Ом,  $R_{\text{ЗАМ}} = 100$  Ом и  $R_{\text{НАГР}} = 1210$  Ом):

$$R_{\text{ОБЩ}} = \frac{R_{\text{Н}} \cdot (R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}})}{R_{\text{Н}} + (R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}})} = (1)$$

$$(1) = \frac{1210 \cdot (100 + \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4})}{1210 + (100 + \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4})} = 767,140 \text{ Ом}$$

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ОБЩ}}} = \frac{220}{767,140} = 0,287 \text{ А}$$

$$I_{\text{ЗАМ}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{(\text{ЗАМ}+h1+h2+\text{ПОВТ})}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}}} = (2)$$

$$(2) = \frac{220}{100 + \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4}} = 0,105 \text{ А}$$

$$U_{\text{ЗАМ}} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{\text{ЗАМ}} = 0,105 \cdot 100 = 10,500 \text{ В}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = U_{h1} = U_{h2} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{(h1+h2+\text{ПОВТ})} = (3)$$

$$(3) = I_{\text{ЗАМ}} \cdot \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}} = 0,105 \cdot \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4} = 209,581 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = U_{\Phi}$$

### Вывод

При обрыве цепи нейтрали при замыкании фазы на землю человек находится в ещё большей опасности, причём без повторного заземления ситуации лучше (но всё равно СМЕРТЕЛЬНА). Это объясняется тем, что при замыкании на землю с повторным заземлением ток с фазы будет идти с меньшим сопротивлением к человеку (так как параллельно сопротивлению замыкания

будет меньшее сопротивление), что и увеличит напряжения прикосновения до примерно 210 В, то есть практически сравнивает его с фазным.

### **Выводы**

В результате лабораторной работы были исследованы режимы однофазного прикосновения человека:

Прямое однофазное прикосновения считается опасным из-за того, что напряжение при прикосновении определяется фазовым напряжением, т.к. сопротивление рабочего заземления нейтрали мало (4 Ом) и не зависит от сопротивлений относительно земли.

Ток проходит через рабочее заземление и человека, что создает опасные значения токов.

Если же мы замыкаем фазу на землю, то напряжение прикосновения становится больше фазного, что более опасно, чем при прямом соприкосновении.

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.

При замыкании фазы на корпус зануленного приемника ток протекает по контуру фаза-ноль и ток достигает максимального значения  $I_{\text{КЗ}}$ , что приводит к срабатыванию защиты и снятию напряжения со стенда.

При неправильно выбранной уставке срабатывания максимальной токовой защиты  $I_{\text{КЗ}}$  недостаточен и предохранитель не срабатывает: он не отключил поврежденный электроприемник, снятие напряжения не произошло (при этом напряжение на нулевом проводе и на всех корпусах неповрежденных

электроприемников большое). В этом случае прикосновение к нулевому проводу небезопасно.

В случае обрыва цепи заземления нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю напряжение на нулевом проводе и на всех корпусах неповрежденных электроприемников оказывается очень большим, что является опасным для человека, а при включении повторного заземления образуется контур фаза-земля- R повт -ноль, что приводит к уменьшению напряжения на нулевом проводе и фазах.

$$(1) = 0,367 \cdot \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000} = 183,333 \text{ В}$$

$$U_{\text{НАГР}} = U_{\Phi}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = 0 \text{ В (повторное заземление не подключено)}$$

Случай 2: S16 – включён.

В данном случае при включённой нагрузке, при замыкании фазы на землю (в этом случае – фаза С) и с повторным заземлением рассчитаем напряжения прикосновения человека к корпусам электроприёмников, а также напряжение замыкания.

Для случая  $U_{\Phi} = U_C = 220 \text{ В}$  (при  $R_{\text{ПОВТ}} = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{ЗАМ}} = 100 \text{ Ом}$  и  $R_{\text{НАГР}} = 1210 \text{ Ом}$ ):

$$R_{\text{ОБЩ}} = \frac{R_{\text{Н}} \cdot (R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}})}{R_{\text{Н}} + (R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}})} = (1)$$

$$(1) = \frac{1210 \cdot (100 + \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4})}{1210 + (100 + \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4})} = 767,140 \text{ Ом}$$

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ОБЩ}}} = \frac{220}{767,140} = 0,287 \text{ А}$$

*неверно*  $\left\{ \begin{aligned} I_{\text{ЗАМ}} &= \frac{U_{\Phi}}{R_{(\text{ЗАМ} + h1 + h2 + \text{ПОВТ})}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ЗАМ}} + \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}}} = (2) \\ (2) &= \frac{220}{100 + \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4}} = 0,105 \text{ А} \end{aligned} \right.$

*неверно*  $\left\{ \begin{aligned} &R_{h1+h2+ПОВТ} \\ &500 \cdot 4 = 3,969 \text{ Ом} \\ &3,969 + 100 = 103,969 \text{ Ом} \\ &I_{\text{ЗАМ}} = 2,116 \text{ А} \end{aligned} \right.$

$$U_{\text{ЗАМ}} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{\text{ЗАМ}} = 0,105 \cdot 100 = 10,500 \text{ В}$$

$$U_{\text{ПОВТ}} = U_{h1} = U_{h2} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{(h1+h2+\text{ПОВТ})} = (3)$$

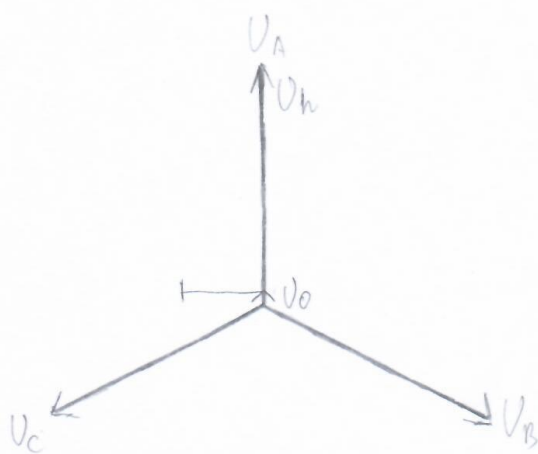
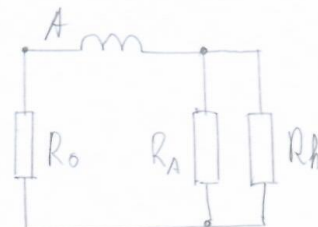
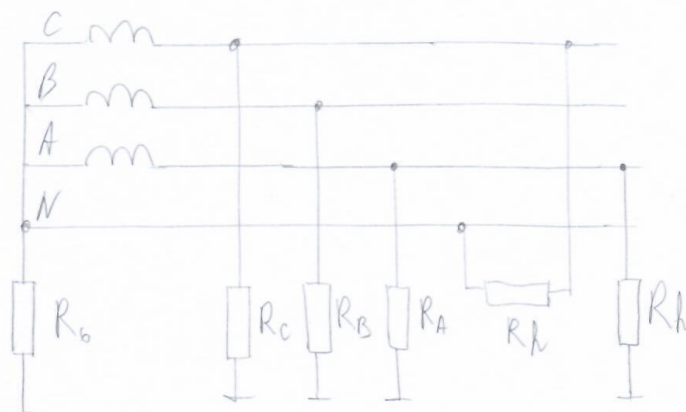
$$(3) = I_{\text{ЗАМ}} \cdot \frac{R_{h1} \cdot R_{h2} \cdot R_{\text{ПОВТ}}}{R_{h1} + R_{h2} + R_{\text{ПОВТ}}} = 0,105 \cdot \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 4}{1000 + 1000 + 4} = 209,581 \text{ В}$$

$U_{\text{ЗАМ}} = I_{\text{ЗАМ}} \cdot R_{\text{ЗАМ}} = 2,116 \text{ А} \cdot 100 = 211,6 \text{ В}$   
 $U_{\text{ПОВТ}} = U_{h1} = U_{h2} = 2,116 \cdot 3,969 = 8,398 \text{ В} \approx 10 \text{ В}$

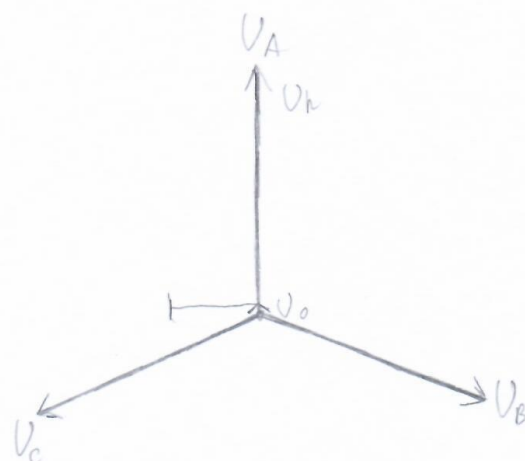
## 1.1 Прямое приложение

Для  $R_A = 5000 \text{ Ом}$ :  $V_{\text{ф}} = V_A = 220 \text{ В}$   $V_h = 218,940 \text{ В}$

Для  $R_A = 15000 \text{ Ом}$ :  $V_{\text{ф}} = V_A = 220 \text{ В}$   $V_h = 219,120 \text{ В}$

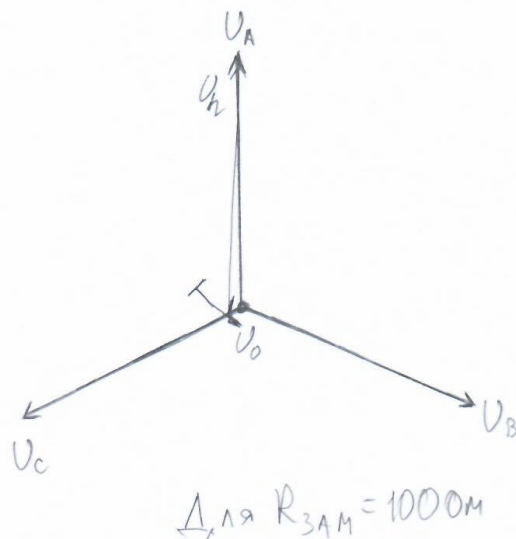
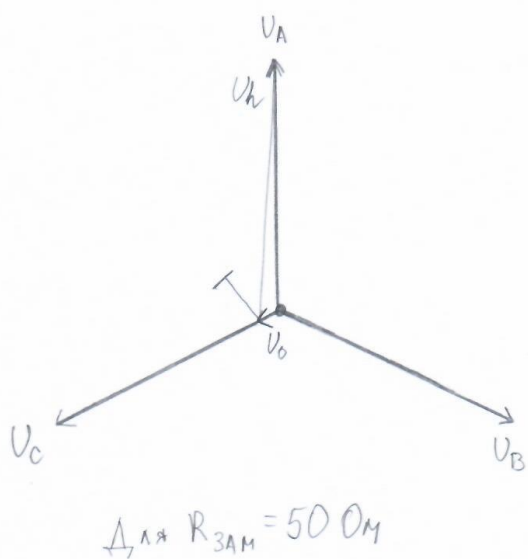
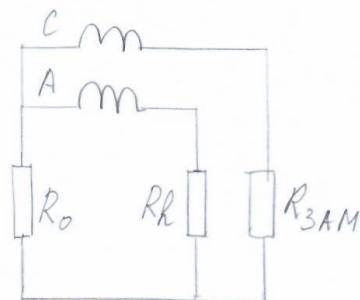
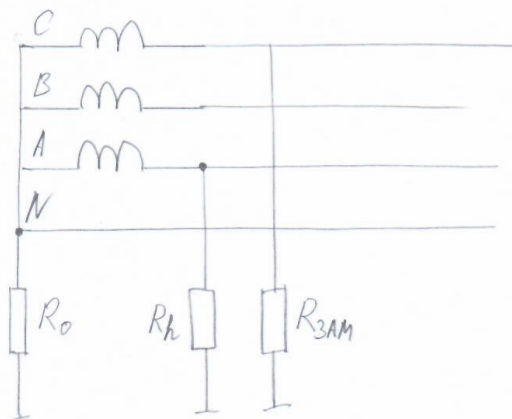


Для  $R_A = 5000 \text{ Ом}$



Для  $R_A = 15000 \text{ Ом}$

1. 2. Прямое прикосновение к фазе А при заземлённой фазе С  
 для  $R_{3AM} = 50 \text{ Ом}$ :  $U_{\phi} = 220 \text{ В} = U_A = U_C$   $U_0 = 16,3 \text{ В}$   $U_h = 235,4 \text{ В}$   
 для  $R_{3AM} = 100 \text{ Ом}$ :  $U_{\phi} = U_A = U_C = 220 \text{ В}$   $U_0 = 8,5 \text{ В}$   $U_h = 227 \text{ В}$

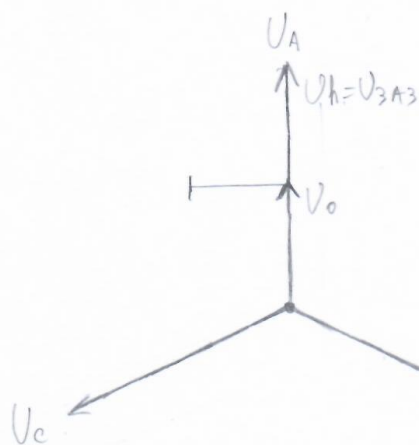
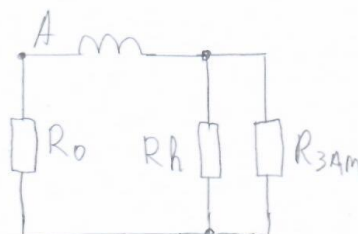
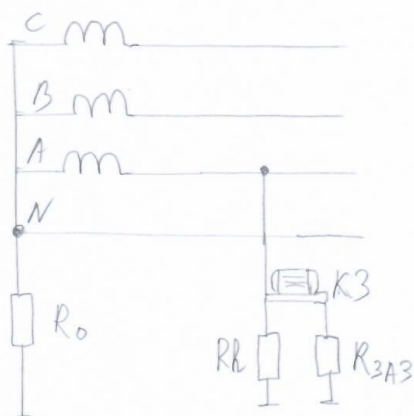




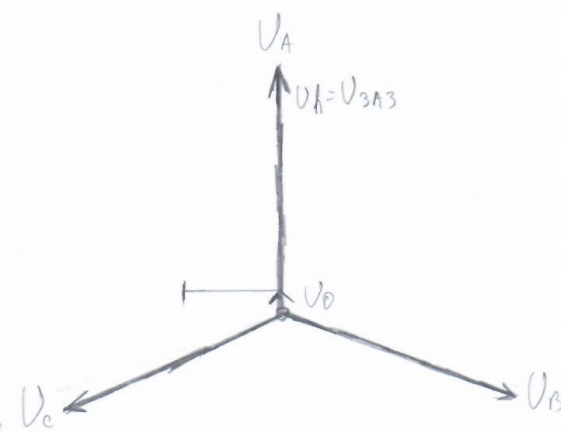
2. Оценка опасности заземления корпусов при непрямои прикосновении

Для  $R_{3A3} = 4 \text{ Ом}$  :  $U_{\phi} = U_A = 220 \text{ В}$   $U_h = U_{3A3} = 109,780 \text{ В}$   $U_o = 110,220 \text{ В}$

Для  $R_{3A3} = 100 \text{ Ом}$  :  $U_{\phi} = U_A = 220 \text{ В}$   $U_h = U_{3A3} = 210,728 \text{ В}$   $U_o = 9,272 \text{ В}$

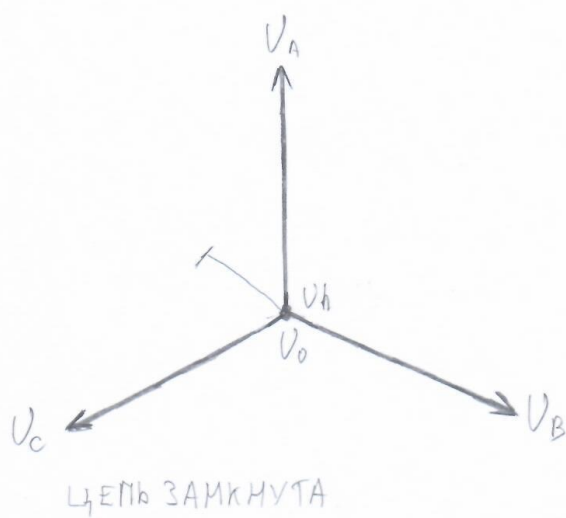
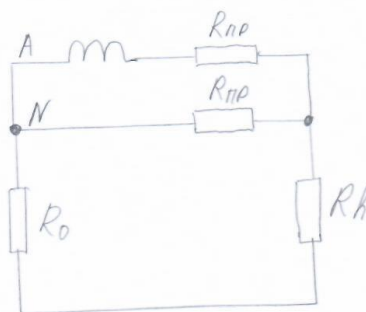
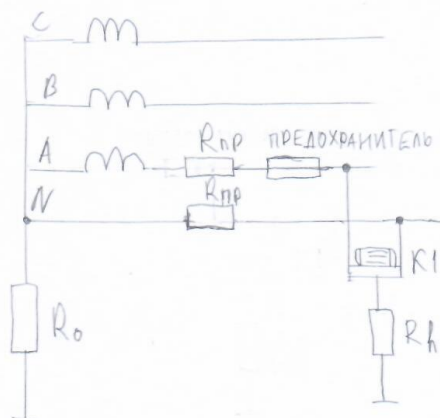


Для  $R_{3A3} = 4 \text{ Ом}$



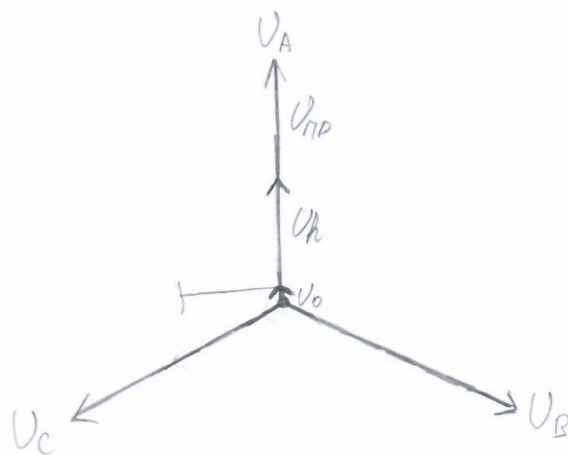
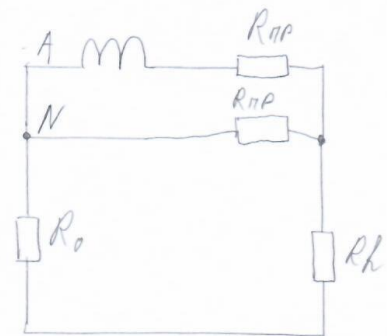
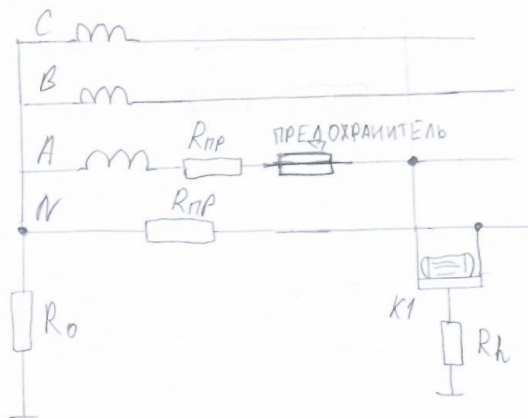
Для  $R_{3A3} = 100 \text{ Ом}$

### 3. Изучение принципа замыкания



4.1 Случай неправильно выбранной (завышенной) установки срабатывания максимальной токовой нагрузки.

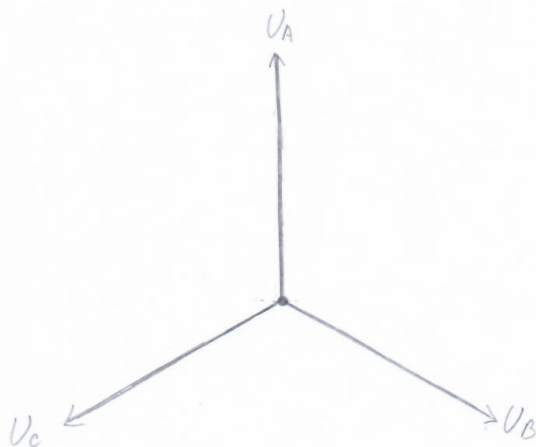
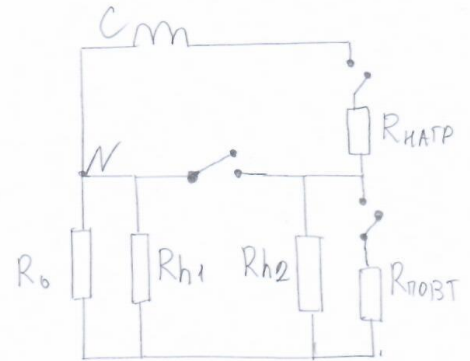
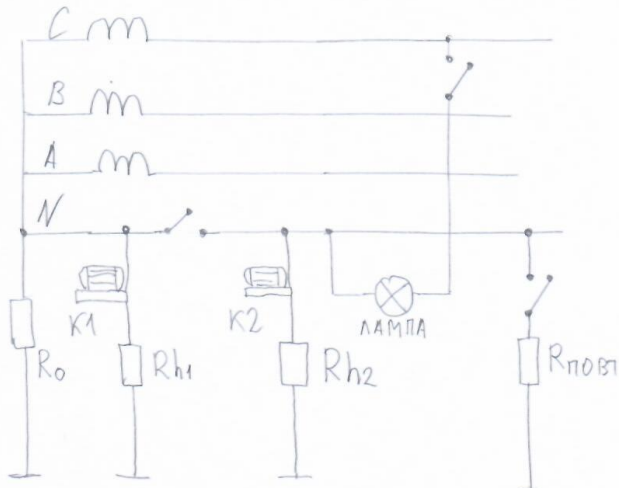
$$U_{\phi} = U_A = 220 \text{ В} \quad U_H = 110 \text{ В} \quad U_0 = 0,438 \text{ В}$$



4.2. Случай обрыва нулевого провода или неправильной установки в нём выключателя нагрузки

Случай 1: S10 - выключен, S16 - выключен

$$U_{\phi} = U_c = 220 \text{ В} \quad U_o = 0 \text{ В} \quad U_{h1} = 0 \text{ В} \quad U_{h2} = 0 \text{ В} \quad U_{\text{ПОБТ}} = 0 \text{ В} \quad U_{\text{НАТР}} = 0 \text{ В}$$

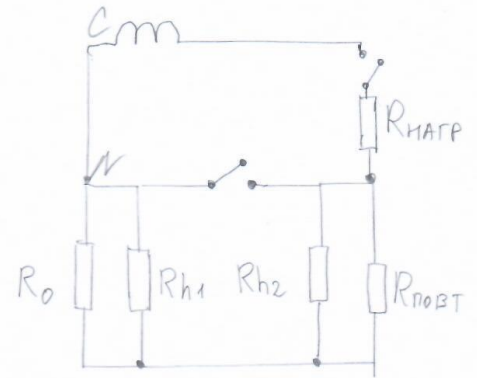
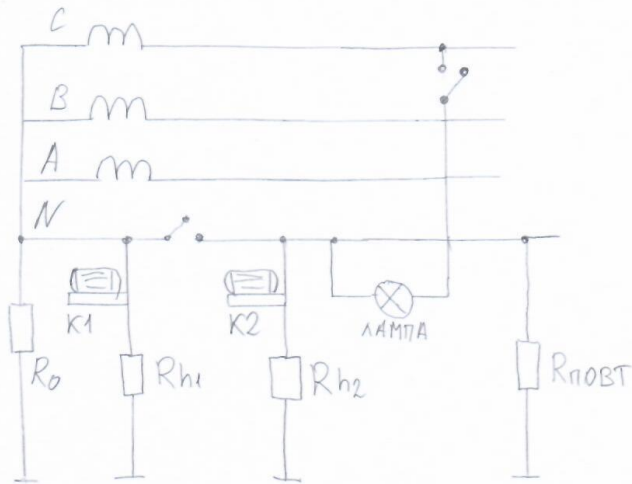


НАПРЯЖЕНИЯ НЕТ, ЦЕПЬ ЗАМКНУТА

4.2. Случай обрыва нулевого провода или неправильной установки в нем выключателя нагрузки.

Случай 2: S10 - выключен, S16 - включен

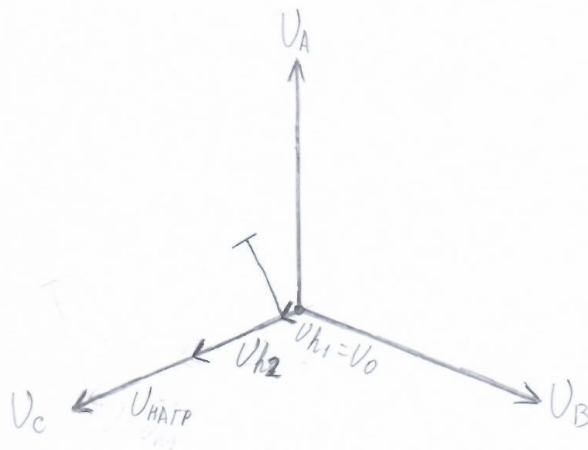
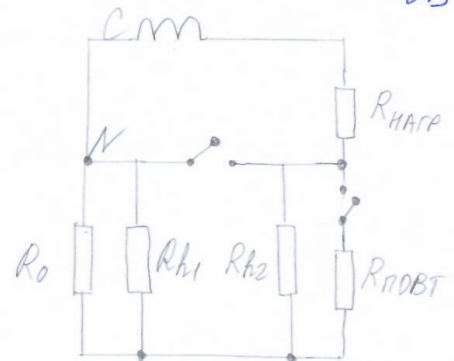
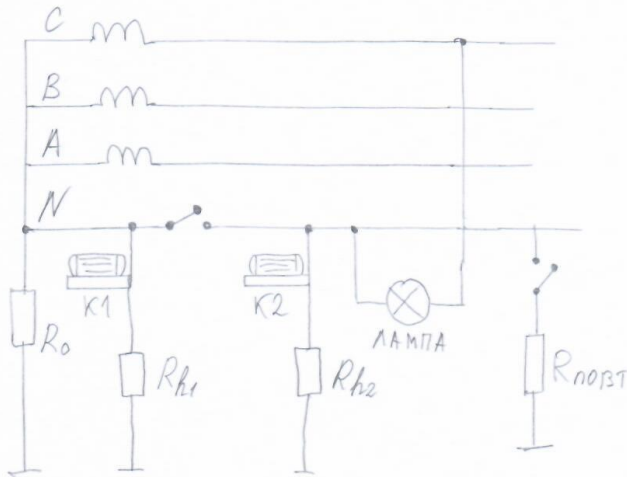
$$U_{\phi} = U_c = 220 \text{ В} \quad U_o = 0 \text{ В} \quad U_{h1} = 0 \text{ В} \quad U_{\text{ЛПВТ}} = 0 \text{ В} \quad U_{\text{НАГР}} = 0 \text{ В} \quad U_{h2} = 0 \text{ В}$$



4.2 Случай обрыва нулевого провода или неправильной установки в нем выключателя нагрузки

Случай 3: S10 - включен, S16 - выключен

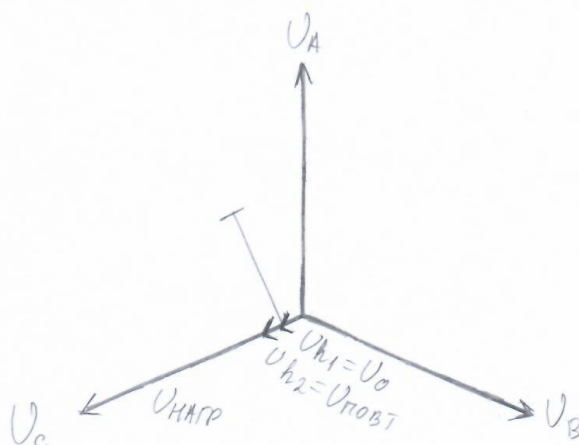
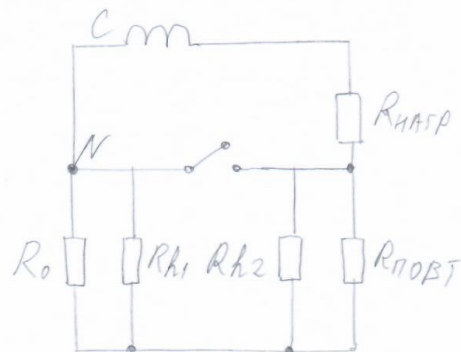
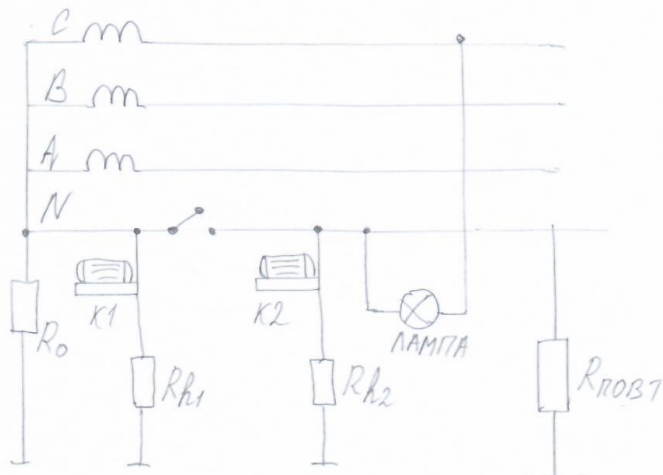
$$U_{\phi} = U_c = 220 \text{ В} \quad U_o = U_{h1} = 0,356 \text{ В} \quad U_{h2} = 99 \text{ В} \quad U_{\text{НАГР}} = 119,790 \text{ В} \quad U_{\text{ПОБТ}} = 0 \text{ В}$$



4.2 Сущность сбоя при повреждении провода или неправильной установки  
влияет на частоту нагрузки

Случай 4: S10-выключен, S16-выключен

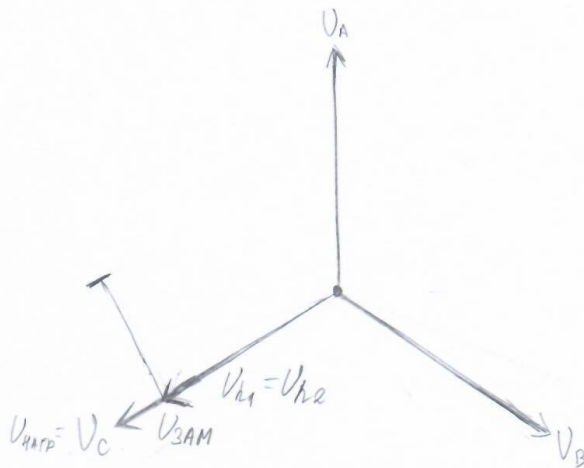
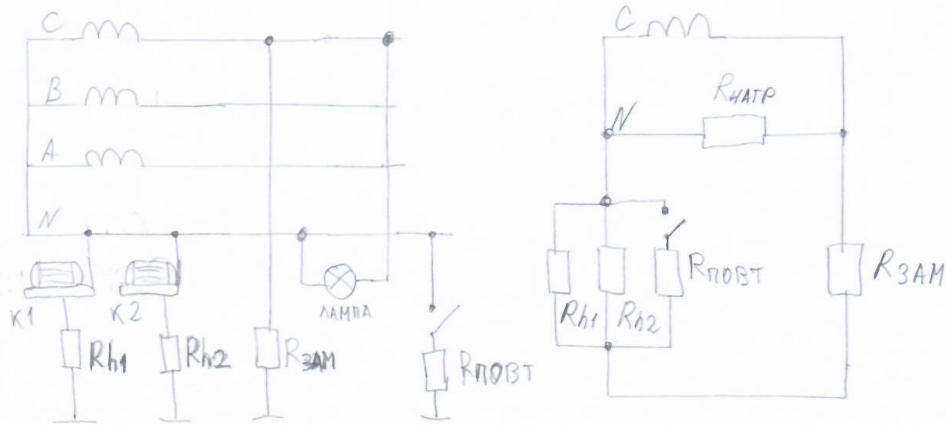
$$U_{\phi} = U_c = 220 \text{ В} \quad U_0 = U_{R1} = 0,721 \text{ В} \quad U_{\text{ПОБТ}} = U_{R2} = 0,721 \text{ В} \quad U_{\text{НАГР}} = 219,010 \text{ В}$$



4.3. Случай обрыва цепи нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю

Случай 1: S/6 - выключен

$$U_{\phi} = U_L = 220 \text{ В} \quad U_{\text{НАТР}} = U_{\phi} \quad U_{L1} = U_{L2} = 183,333 \text{ В} \quad U_{3AM} = 36,7 \text{ В}$$





4.3. Случай обрыва цепи нейтраль источника при наличии замы-  
кания фазы на землю

Случай 2: S16 - включён

$$U_{\phi} = U_c = 220 \text{ В} \quad U_{\text{НАГР}} = U_{\phi} \quad U_{h1} = U_{h2} = U_{\text{ПОВТ}} = 209,581 \text{ В}; \quad U_{3\text{AM}} = 10,500 \text{ В}$$

