

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

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

Студент гр. 8383	_____	Киреев К.А.
Студент гр. 8383	_____	Муковский Д.В
Студент гр. 8383	_____	Сосновский Д.Н.
Преподаватель	_____	Овдиенко Е.Н.

Санкт-Петербург
2021

Протокол

<p>Д/полюс к лабораторной работе №2</p>											
<p>№ п/п</p>	<p>Значения сопротивлений</p>					<p>Напряжения фаз и корпусов относительно земли, В</p>					
	<p>R_A</p>	<p>R_B</p>	<p>R_C</p>	<p>$R_{зам}$</p>	<p>$R_{заз}$</p>	<p>U_{A01}</p>	<p>U_{B01}</p>	<p>U_{C01}</p>	<p>U_{K110}</p>	<p>U_{K3}</p>	<p>U_{K3U_1}</p>
1						23	27	27	0	0	0
2 (1.2)	5	5	5			23	27	27	0	0	26,5
3 (1.3)	150	150	150			23	27	27	0	0	26,5
4 (1.4)	150	150	150	50		20	28,5	28,5	2	1,5	28
5 (1.4.2)	150	150	150	100		21,5	28	28	1	1	27
6 (2.1)	150	150	150			23	27,5	27	0	0	26
7 (2.2)	150	150	150		4 Ом	30	34	16	9	9	15
8 (2.3)	150	150	150		100 Ом	25	29	24,5	1,5	1,5	24
9 (3.1)	150	150	150			0	0	0	0	0	0
10 (4.1)	150	150	150			23	27	27	12,5	12,5	0
10-бук 11 (4.2)	150	150	150			23	27	27	0	0	0
10-бук 12 (4.2.2)	150	150	150			23	27	27	0	23	0
10-бук 16 бук 3 (4.2.3)	150	150	150			23	27	27	0	0	0
10-бук 16 бук 4 (4.2.4)	150	150	150			22	28	28	0	2	0
16-бук 15 (4.3.1)	150	150	150	1000 Ом		0	46	45	24	23	0
16-бук 16 (4.3.2)	150	150	150	100 Ом		19	30	29	3	3	0
<p>Выполнили студенты гр 8385 Сосновский Д.Н., Рязанов К.А., Мухомов В.В. 14.10.21 преподаватель Обзирин Е.Н.</p>											

Цели работы

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

Выполнение работы

Анализ условий опасности прямого прикосновения в системе TN

Установлен режим прямого прикосновения человека к фазе А. В таблице 1 приведены результаты измерения напряжений на фазах и корпусах при сопротивлениях фаз, равных $R_A^{(1)} = R_B^{(1)} = R_C^{(1)} = 5000 \text{ Ом}$ и $R_A^{(2)} = R_B^{(2)} = R_C^{(2)} = 150000 \text{ Ом}$.

Таблица 1 – Напряжения при прямом прикосновении человека к фазе

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	5000	5000	5000	-	-	23	27	27	0	0	26.5
2	150000	150000	150000	-	-	23	27	27	0	0	26.5

На рис. 1 приведена упрощенная схема исследуемой прямого прикосновения в системе TN.

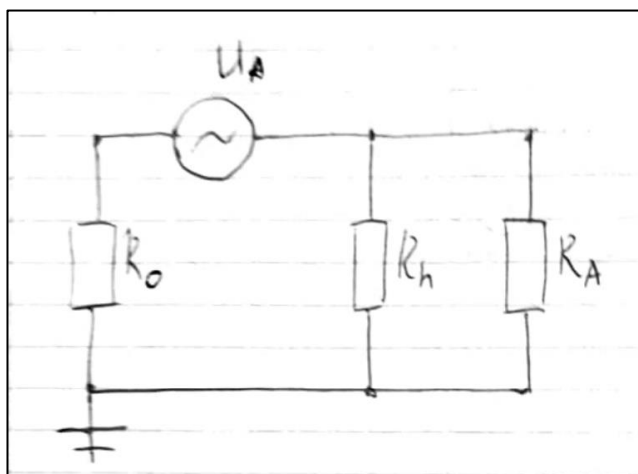


Рисунок 1 – Упрощенная схема прямого прикосновения в системе TN

Напряжение прикосновения определяется напряжением фазного напряжения U_ϕ из-за малого сопротивления рабочего заземления нейтрали R_0 и практически не зависит от сопротивлений и емкостей фаз относительно земли. По формуле делителя напряжения напряжение прикосновения U_h равно

$$U_h = U_\phi \frac{R_h}{R_0 + R_h} = 219.1 \text{ В} \approx U_\phi$$

При $U_\phi = 220 \text{ В}$, $R_h = 1000 \text{ Ом}$, $R_0 = 4 \text{ Ом}$.

На рис. 2 приведена векторная диаграмма напряжений для данной сети.

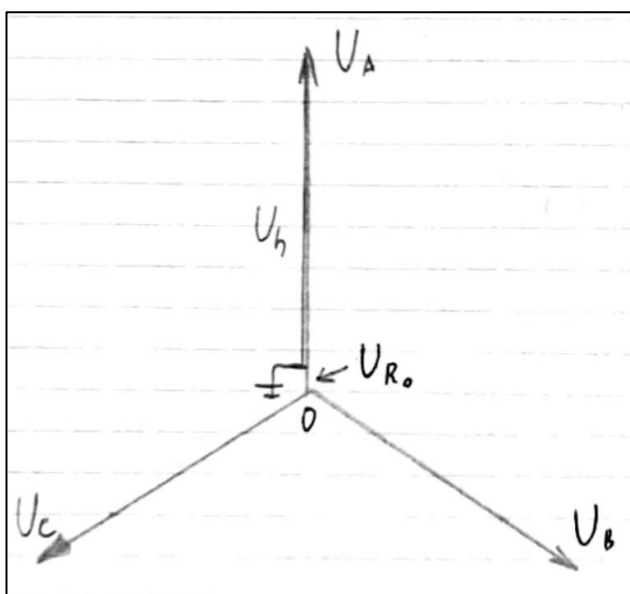


Рисунок 2 – Векторная диаграмма напряжений

Далее было установлено замыкание фазы С на землю. В таблице 2 приведены результаты измерения напряжений на фазах и корпусах при разных сопротивлениях замыкания.

Таблица 2 – Напряжение прямого прикосновения при замыкании фазы на землю

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	150000	150000	150000	50	-	20	28.5	28.5	2	1.5	28
2	150000	150000	150000	100	-	21.5	28	28	1	1	27

На рис. 3 приведена упрощенная схема сети. Так как сопротивления фаз относительно земли R_A и R_C очень велики по сравнению с сопротивлениями R_h и $R_{зам}$, то ими можно пренебречь.

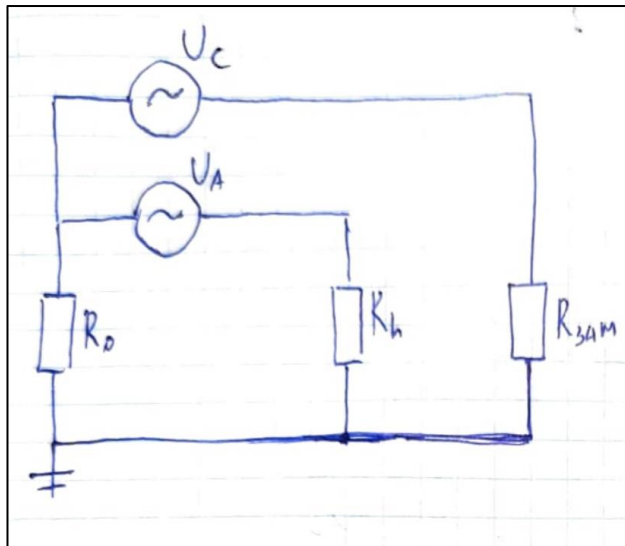


Рисунок 3 – Упрощенная схема рассматриваемой сети

На рис. 4 приведена схема, содержащая только контур фазы С с замыканием на землю – нейтраль.

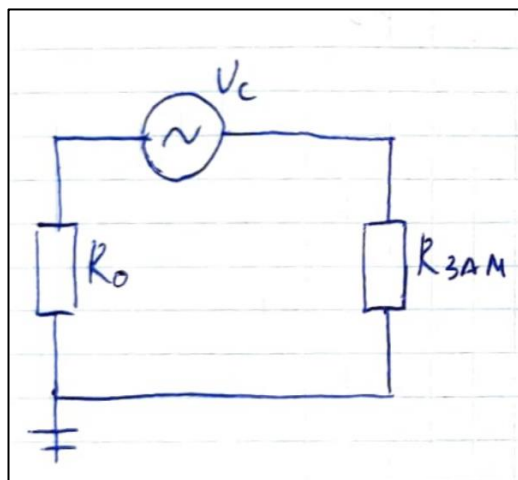


Рисунок 4 – Упрощенная схема контура фазы С

Рассчитаем дополнительное напряжение на R_0 :

При $R_{зам} = 50 \text{ Ом}$:

$$U_{R_{01}} = U_C \frac{R_0}{R_{зам} + R_0} = 16.3 \text{ В}$$

При $R_{зам} = 100 \text{ Ом}$:

$$U_{R_{02}} = U_C \frac{R_0}{R_{зам} + R_0} = 8.5 \text{ В}$$

Далее вычислим напряжения, падающие на человека в данной схеме, оно будет примерно равно фазному напряжению, увеличенному на U_{R_0} по второму правилу Кирхгофа.

$$U_h = U_A \frac{R_h}{R_0 + R_h} = 219.1 \text{ В}$$

$$U_{h1} = U_h + U_{R_{01}} = 219.1 + 16.3 = 235.4 \text{ В}$$

$$U_{h2} = U_h + U_{R_{02}} = 219.1 + 8.5 = 227.6 \text{ В}$$

На рис. 5, 6 приведены векторная диаграмма напряжений в сети с напряжением на $R_0 = 50 \text{ Ом}$ и 100 Ом соответственно.

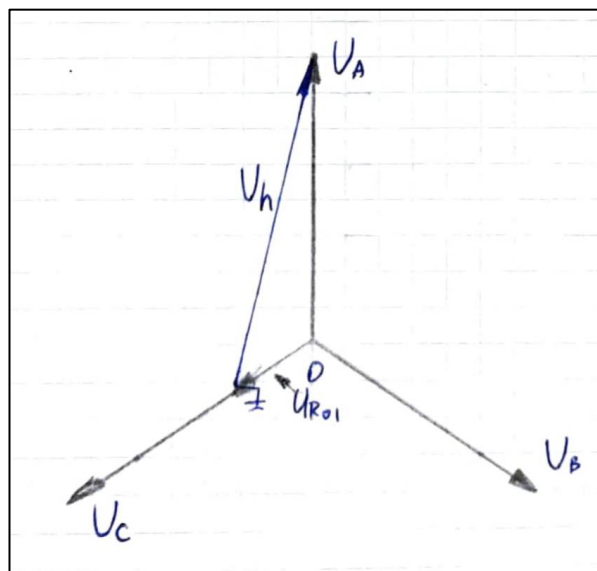


Рисунок 5 – Векторная диаграмма напряжений ($R_0 = 50 \text{ Ом}$)

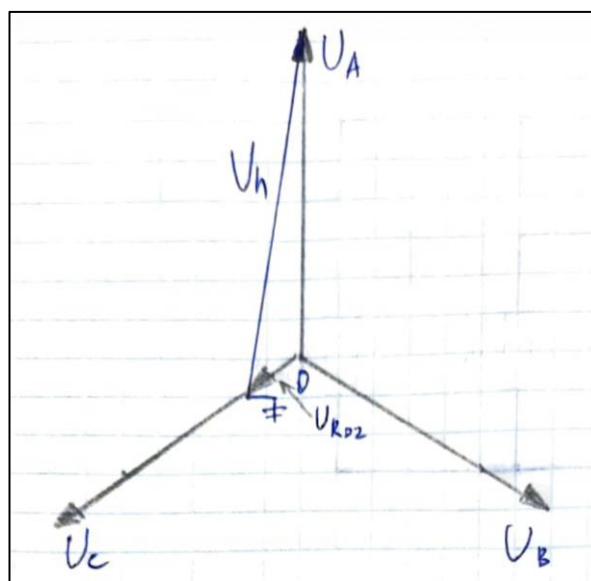


Рисунок 6 – Векторная диаграмма напряжений ($R_0 = 100 \text{ Ом}$)

По полученным результатам можно сделать вывод, что напряжение на человека при прямом прикосновении фазы А с замыканием фазы С землю становится больше фазного, причем чем меньше сопротивление замыкания, тем больше напряжение прикосновения.

Оценка опасности заземления корпусов при непрямом прикосновении

Был установлен режим прикосновения человека к корпусу К₃, фаза А замкнута на корпус. Измерены напряжения на фазах и корпусах, результаты измерений приведены в строке 1 таблицы 3.

Таблица 3 – Напряжение непрямого прикосновения к заземленному корпусу

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	150000	150000	150000	-	-	23	27.5	27	0	0	26
2	150000	150000	150000	-	4	30	34	16	9	9	15
3	150000	150000	150000	-	100	25	29	24.5	1.5	1.5	24

На рис. 7 приведена упрощенная схема полученной сети.

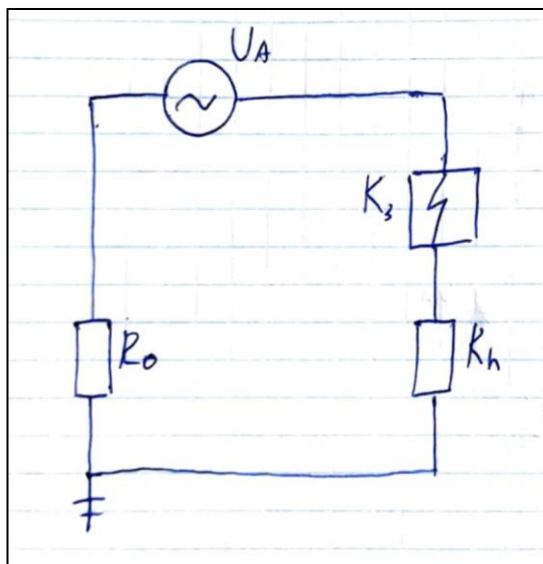


Рисунок 7 – Упрощенная схема сети

Напряжение непрямого прикосновения к незаземленному корпусу в этой сети равно:

$$U_h = U_A \frac{R_h}{R_h + R_0} \approx U_A \quad (R_h \gg R_0).$$

То есть напряжение непрямого прикосновения равно напряжению прямого прикосновения к фазе.

Корпус заземляется сопротивлением $R_{\text{зaz}} = 4 \text{ Ом}$. На рис. 8 приведена упрощенная схема сети.

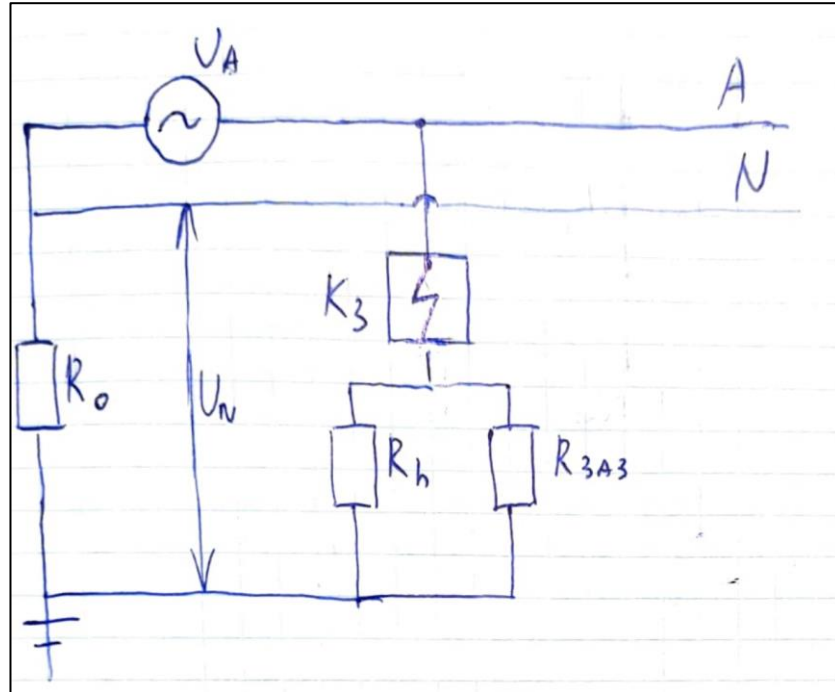


Рисунок 8 – Упрощенная схема сети

Напряжение прикосновения при $R_{\text{зaz}} = 4 \text{ Ом}$ и $U_A = 220 \text{ В}$ равно

$$U_h = U_A \frac{\left(\frac{R_h R_{\text{зaz}}}{R_h + R_{\text{зaz}}} \right)}{\frac{R_h R_{\text{зaz}}}{R_h + R_{\text{зaz}}} + R_0} \approx U_A \frac{R_{\text{зaz}}}{R_{\text{зaz}} + R_0} = \frac{U_A}{2} = 110 \text{ В}$$

Напряжение на нулевом проводнике и на зануленных корпусах при этом будет равно

$$U_{00_1} \approx U_A \frac{R_0}{R_{\text{зaz}} + R_0} = 110 \text{ В}$$

На рис. 9 приведена векторная диаграмма напряжений для рассматриваемой сети.

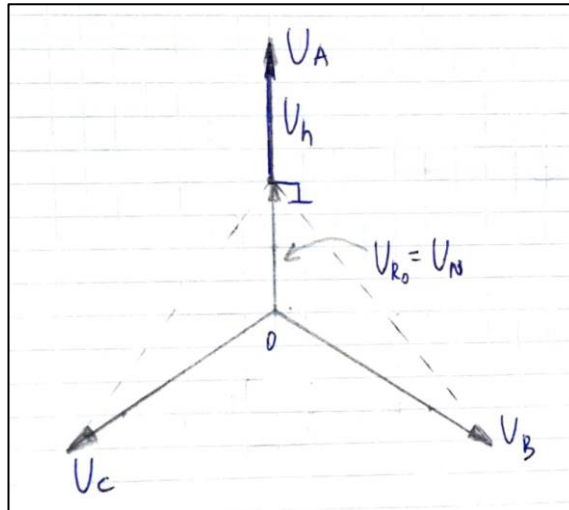


Рисунок 9 – Векторная диаграмма напряжений

Установлено сопротивление заземления $R_{\text{зaz}} = 100 \text{ Ом}$ и измерены напряжения на фазах и корпусах. Напряжение прикосновения при $U_A = 220 \text{ В}$ равно

$$U_h \approx U_A \frac{R_{\text{зaz}}}{R_{\text{зaz}} + R_0} = 211.5 \text{ В}$$

Полученное напряжение прикосновения близко к фазному.

Напряжение на нулевом проводнике и на зануленных корпусах в рассматриваемой сети равно

$$U_{00_1} \approx U_A \frac{R_0}{R_{\text{зaz}} + R_0} = 8.5 \text{ В}$$

На рис. 10 приведена векторная диаграмма напряжений сети.

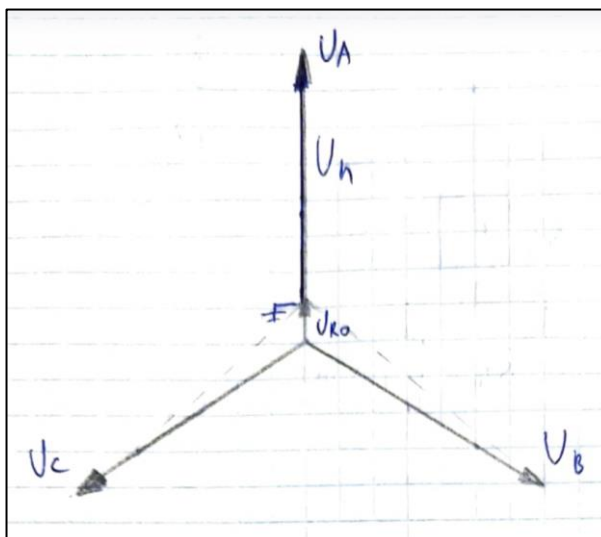


Рисунок 10 – Векторная диаграмма напряжений

Изучение принципа действия зануления

Корпус K_{1-1} занулен, в сеть устройство подключается через автоматический выключатель. Фаза А замыкается на корпус K_{1-1} . После замыкания проведено измерение напряжений на фазах и корпусах, результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Напряжения в сети с автоматическим выключателем при замыкании фазы на зануленный корпус

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	150000	150000	150000	-	-	0	0	0	0	0	0

Как видно из таблицы, автоматический выключатель снял напряжение со стенда. На рис. 11 приведена схема режима и изображен контур тока короткого замыкания.

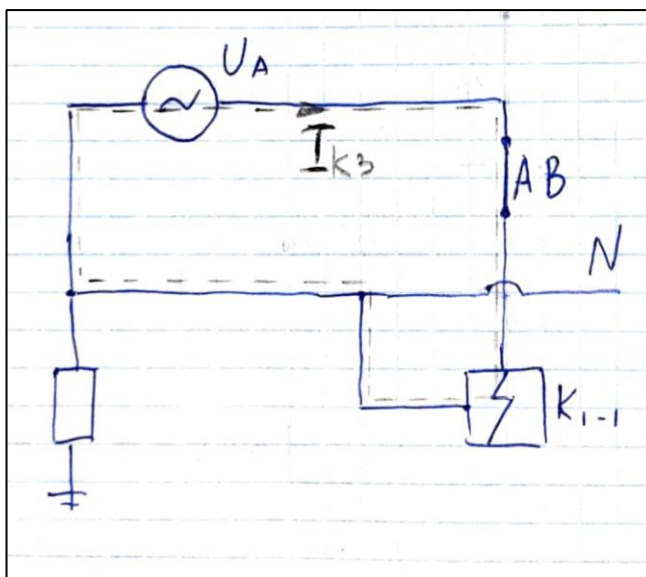


Рисунок 11 – Упрощенная схема сети

Оценка опасности зануления корпусов при непрямом прикосновении

1. Случай неправильно выбранной (завышенной) установки срабатывания максимальной токовой защиты

Фаза А была замкнута на зануленный корпус K_{1-2} . Упрощенная схема сети изображена на рис. 12.

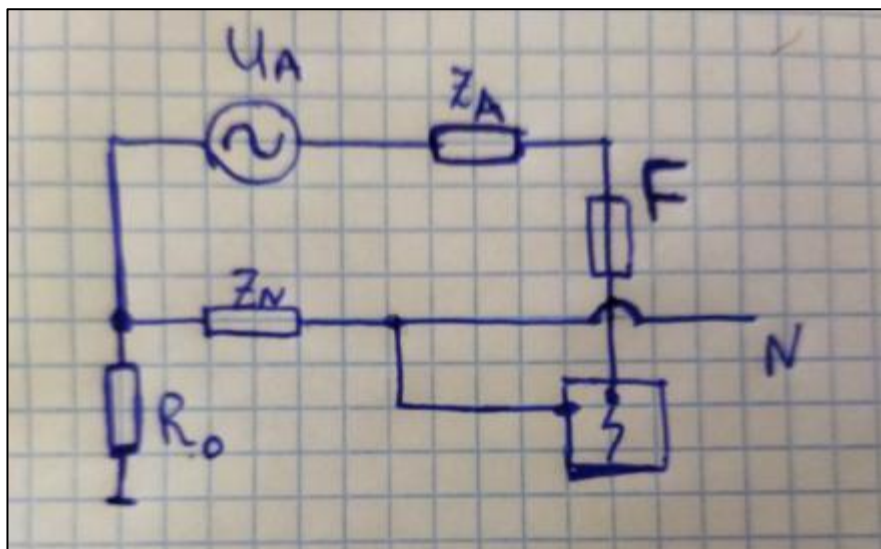


Рисунок 12 – упрощенная схема сети

В этой сети для отключения цепи используется предохранитель F, но ток замыкания недостаточен для его срабатывания, поэтому снятие напряжение со стенда не произошло автоматически. В таблице 5 приведены результаты измерения напряжений на фазах и корпусах.

Таблица 5 – Напряжения в сети с предохранителем при замыкании фазы на зануленный корпус

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	150000	150000	150000	-	-	23	27	27	12.5	12.5	0

Замыкание фазы на корпус привело к появлению большого напряжения на нулевом проводе и зануленном корпусе K₂. На рисунке 11 z_A и z_N – сопротивления фазного и нейтрального проводников, причем $z_A \approx z_N$. Тогда напряжение на нулевом проводе и на зануленных корпусах равно

$$U_{00_1} = U_A \frac{z_N}{z_A + z_N} \approx \frac{1}{2} U_A$$

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

Был смоделирован обрыв нулевого провода. Были измерены напряжения в сети с выключенной (табл. 6 строка 1) и включенной (табл. 6 строка 2) осветительной нагрузкой.

Таблица 6 – Напряжения в сети при обрыве нулевого провода

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	150000	150000	150000	-	-	23	27	27	0	0	0
2	150000	150000	150000	-	-	23	27	27	0	23	0

На рис. 13 приведена схема сети с включенной световой нагрузкой. Напряжение на корпусе K_1 равно нулю, так как обрыв нулевого проводника произошел между корпусом и нагрузкой.

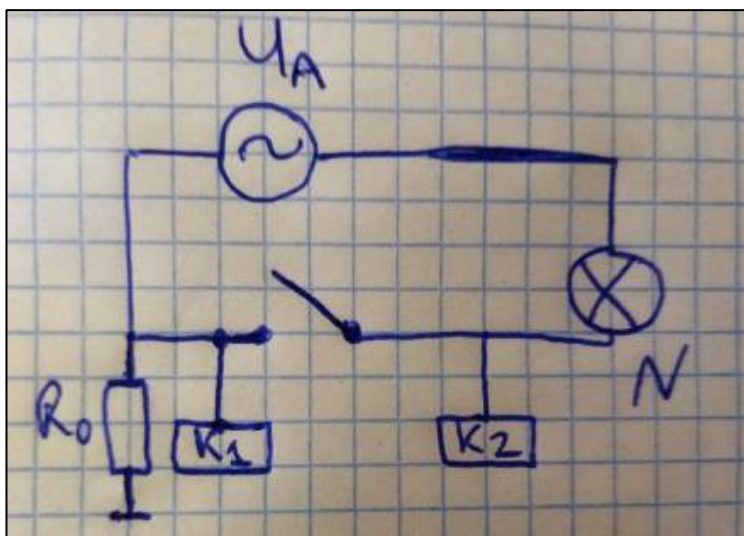


Рисунок 13 – схема сети с включённой световой нагрузкой

На рис. 14 приведена упрощенная схема замещения сети при прикосновении человека к корпусу K_2 и включенной световой нагрузке.

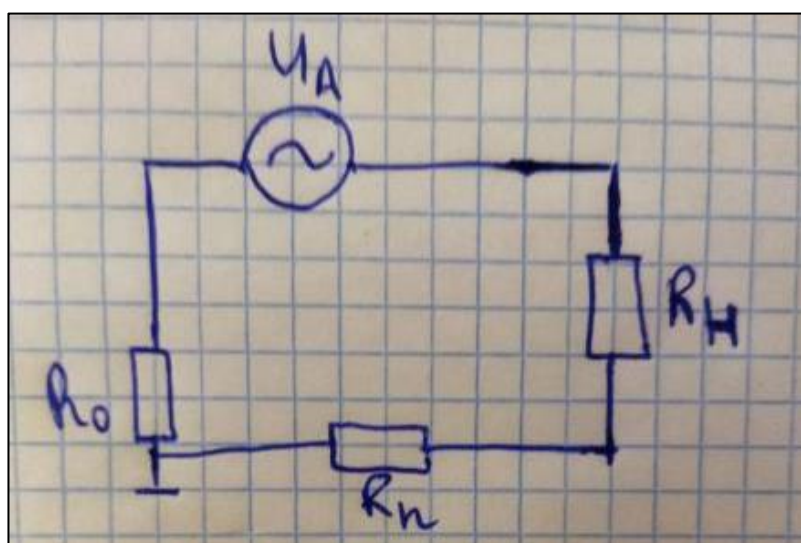


Рисунок 14 – упрощенная схема сети при прикосновении человека к K_2 и включенной световой нагрузке

Напряжение прикосновения в этом случае равно

$$U_h = U_A \frac{R_h}{R_0 + R_h + R_H}$$

Будем считать, что в качестве световой нагрузки используется лампа накаливания мощностью 40 Вт. Тогда сопротивление нагрузки при $U_A = 220$ В равно

$$R_H = \frac{U_A^2}{P} = 1210 \text{ Ом}$$

Напряжение прикосновения в этом случае равно

$$U_h = 99.4 \text{ В}$$

Векторная диаграмма напряжений приведена на рис. 15.

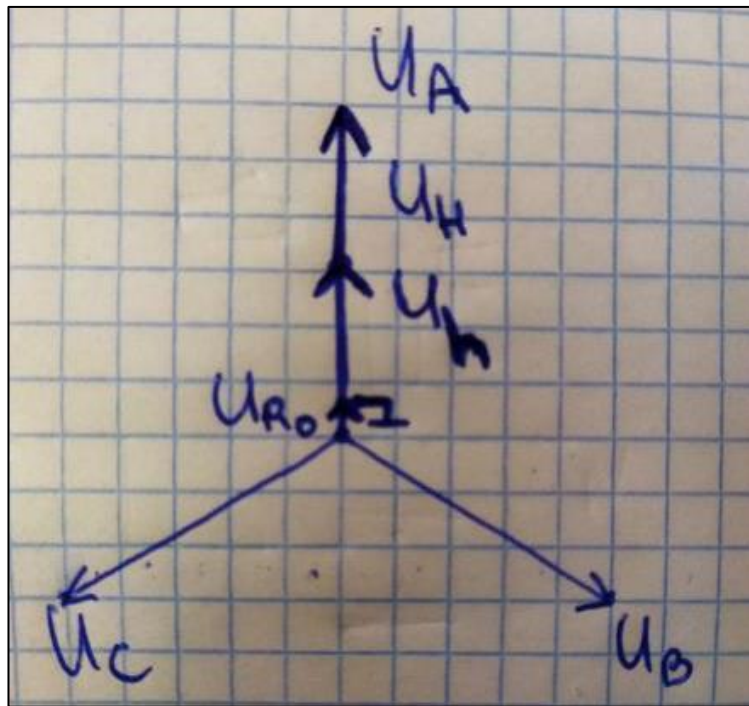


Рисунок 15 – векторная диаграмма напряжений

На рис. 16 приведена схема сети при отключенной световой нагрузке – схема разомкнута, и напряжения на нулевом проводнике (корпусах) и человеке равны нулю.

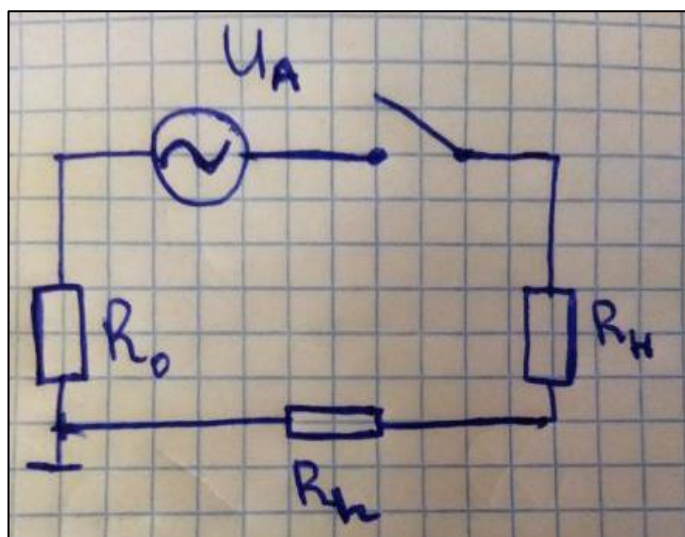


Рисунок 16 – упрощенная схема сети при отключенной световой нагрузке

Далее было подключено повторное заземление нулевого провода. Повторные изменения приведены в таблице 7 (1 строка осветительная нагрузка выключена, вторая – включена).

Таблица 7 – Напряжения в сети при обрыве нулевого провода и повторном заземлении

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения 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
1	150000	150000	150000	-	-	23	27	27	0	0	0
2	150000	150000	150000	-	-	22	28	28	0	2	0

На рис. 17 приведена упрощенная схема сети с повторным заземлением и включенной нагрузкой при прикосновении человека к корпусу К₂.

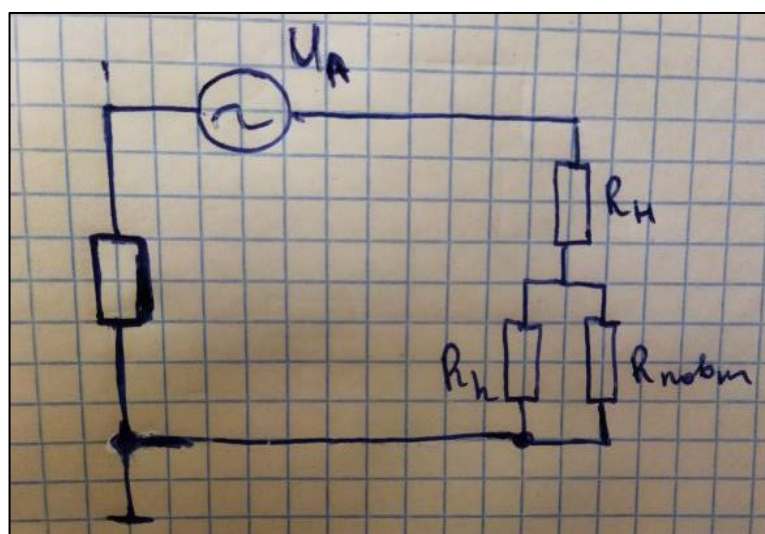


Рисунок 17 – упрощенная схема сети с повторным заземлением и включенной нагрузкой при прикосновении человека к К₂.

При $R_{\text{повт}} = 10 \text{ Ом} \ll R_h$, $R_H = 1210 \text{ Ом}$ и $U_A = 220 \text{ В}$ напряжение прикосновения равно

$$U_h = U_A \frac{\left(\frac{R_h R_{\text{повт}}}{R_h + R_{\text{повт}}} \right)}{\frac{R_h R_{\text{повт}}}{R_h + R_{\text{повт}}} + R_0 + R_H} \approx U_A \frac{R_{\text{повт}}}{R_{\text{повт}} + R_0 + R_H} = 1.8 \text{ В}$$

Полученное напряжение значительно меньше, чем напряжение прикосновения без повторного заземления.

На рис. 18 приведена векторная диаграмма напряжений.

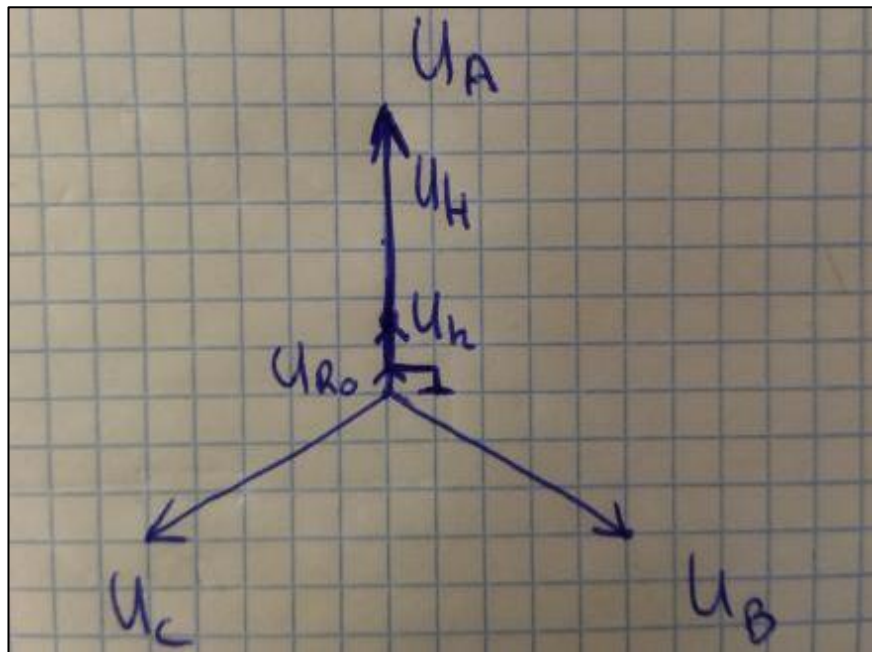


Рисунок 18 – векторная диаграмма напряжений

Таким образом, опасное напряжение на корпусах зануленных приборов можно снизить при помощи повторного заземления.

3. *Случай обрыва в цепи заземления нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю*

Фаза С замыкается на землю, отключается рабочее заземление. Измеряются напряжения в сети при отключенном и включенном повторном заземлении. Результаты занесены в таблицу 8.

Таблица 8 – Напряжения в сети при отсутствии рабочего заземления и замыкании фазы на землю

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_A	R_B	R_C	$R_{\text{зам}}$	$R_{\text{зaz}}$	U_{C01}	U_{B01}	U_{A01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
1	150000	150000	150000	100	-	0	46	45	24	23	0
2	150000	150000	150000	100	-	19	30	29	3	3	0

На рис. 19 приведена упрощенная схема сети при отсутствии повторного заземления.

Замыкание фазы на землю приводит к уравниванию потенциалов между этой фазой и землей. Тогда напряжение неповрежденных фаз относительно земли будет равно линейному, а напряжение нулевого проводника относительно земли и, следовательно, напряжения на зануленных корпусах, будет равно фазному напряжению.

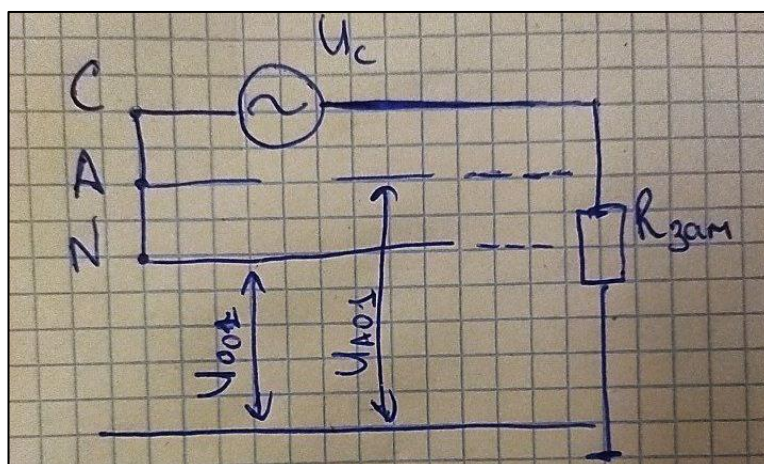


Рисунок 19 – упрощенная схема сети при отсутствии повторного заземления
На рис. 20 изображена векторная диаграмма напряжений сети.

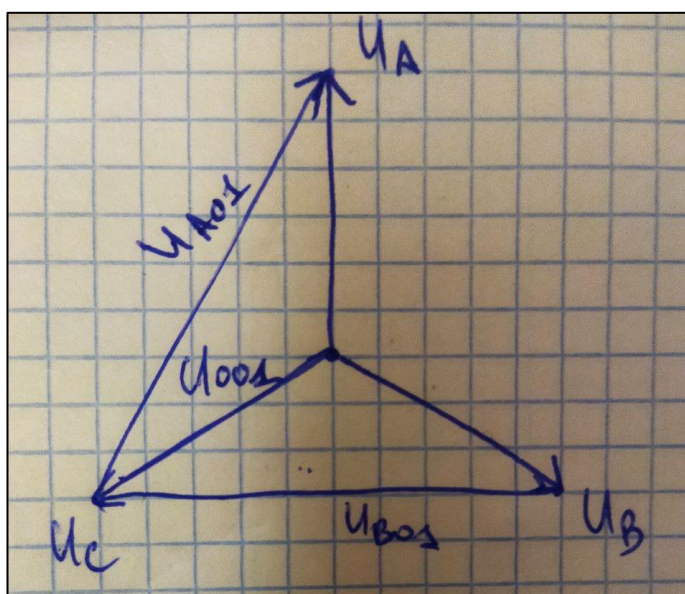


Рисунок 20 – векторная диаграмма напряжений сети

На рис. 21 изображена упрощенная схема сети при наличии повторного заземления нулевого проводника.

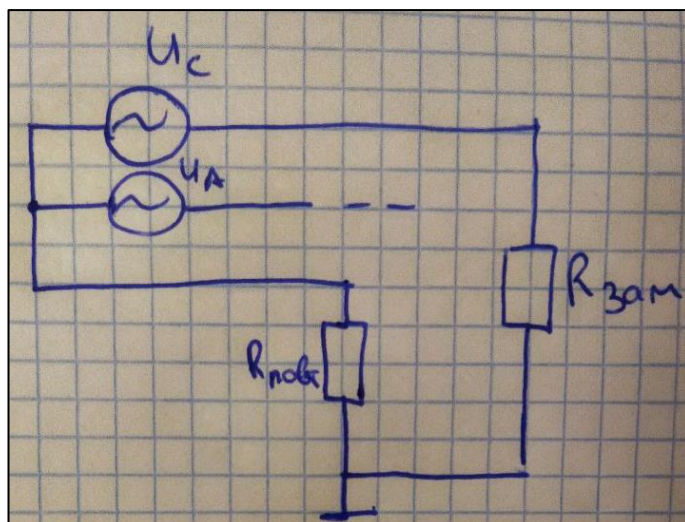


Рисунок 21 – упрощенная схема сети при наличии повторного заземления нулевого проводника

При повторном заземлении нулевого проводника в сети возникает контур «фаза С – замыкание на землю – повторное заземление – нулевой проводник». Тогда по формуле делителя напряжения при $U_C = 220$ В напряжение нулевого проводника относительно земли равно

$$U_{00_1} = U_C \frac{R_{\text{повт}}}{R_{\text{повт}} + R_{\text{зам}}} = 0.1 U_C = 22 \text{ В}$$

На рис. 22 приведена векторная диаграмма напряжений.

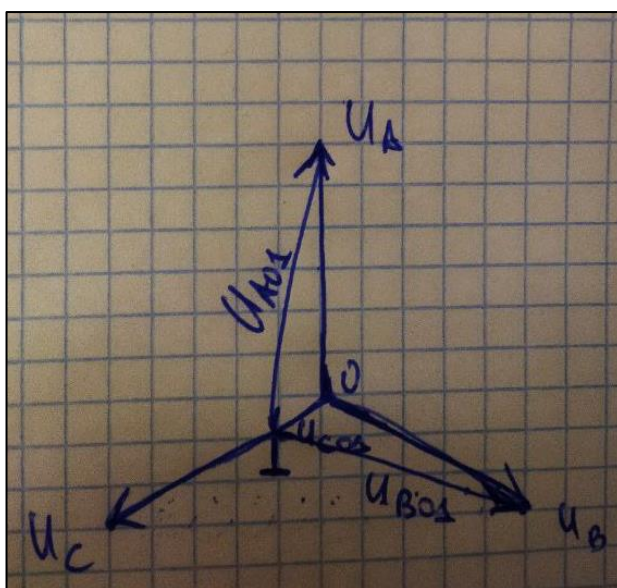


Рисунок 22 – векторная диаграмма напряжений

Напряжение фаз А и В относительно земли немного больше фазного.