

**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, Ом</p>					<p>Напряжения фаз и корпусов относительно земли, В</p>					
	<p><math>R_A</math></p>	<p><math>R_B</math></p>	<p><math>R_C</math></p>	<p><math>R_{зам}</math></p>	<p><math>R_{заз}</math></p>	<p><math>U_{A01}</math></p>	<p><math>U_{B01}</math></p>	<p><math>U_{C01}</math></p>	<p><math>U_{K110}</math></p>	<p><math>U_{K3}</math></p>	<p><math>U_{K3U_1}</math></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	1000 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 Обвиненко 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.

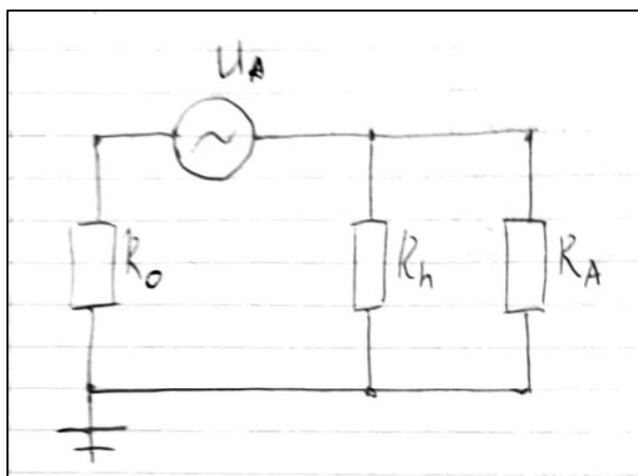


Рисунок 1 – Упрощенная схема прямого прикосновения в системе TN

Напряжение прикосновения определяется напряжением фазного напряжения  $U_\phi$  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.

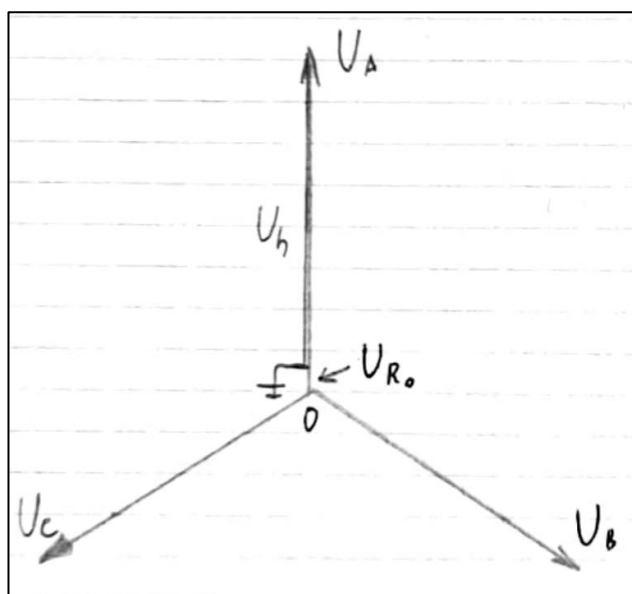


Рисунок 2 – Векторная диаграмма напряжений

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.

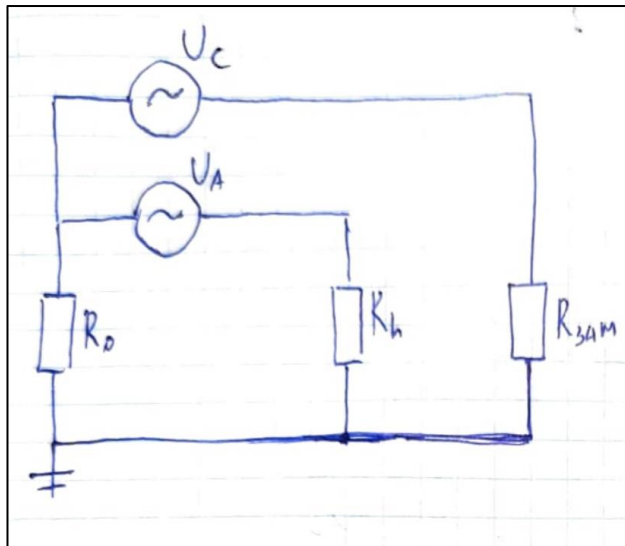


Рисунок 3 – Упрощенная схема рассматриваемой сети

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

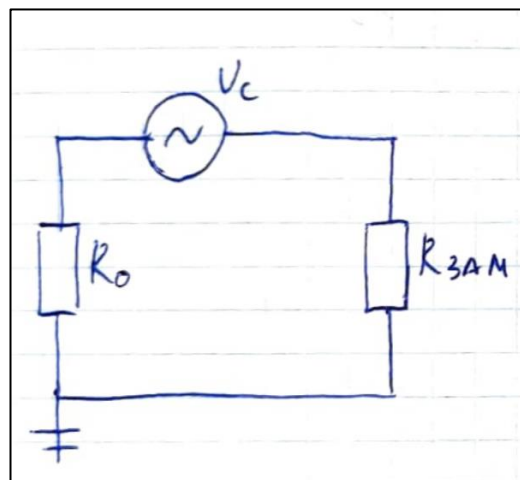


Рисунок 4 – Упрощенная схема контура фазы С

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  $100 \text{ Ом}$  соответственно.

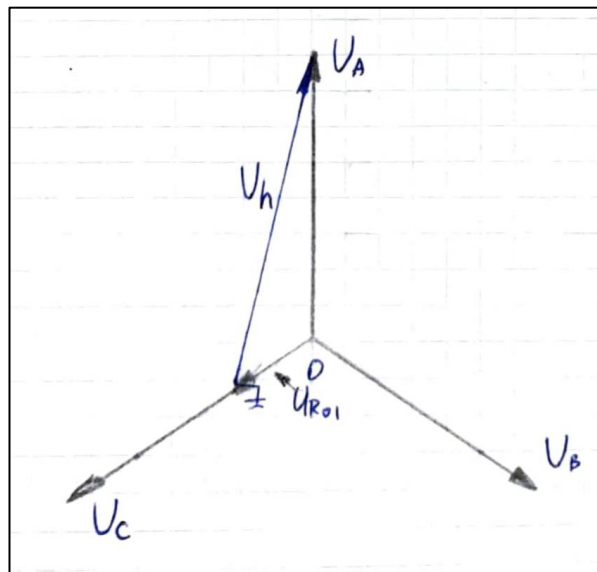


Рисунок 5 – Векторная диаграмма напряжений ( $R_0 = 50 \text{ Ом}$ )

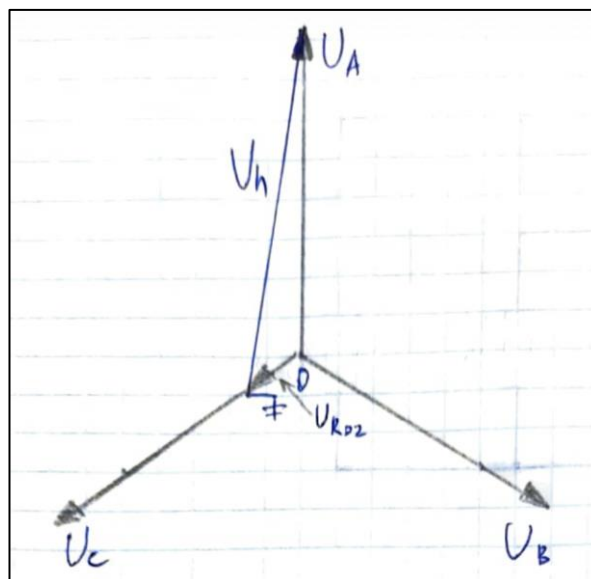


Рисунок 6 – Векторная диаграмма напряжений ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ )

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 К<sub>3</sub>, 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.

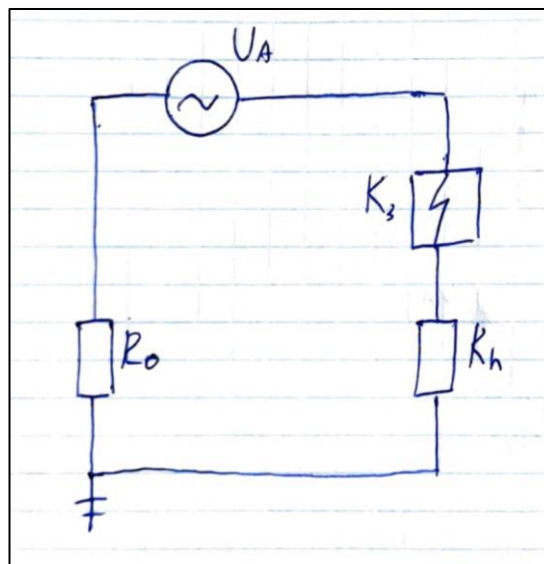


Рисунок 7 – Упрощенная схема сети

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.

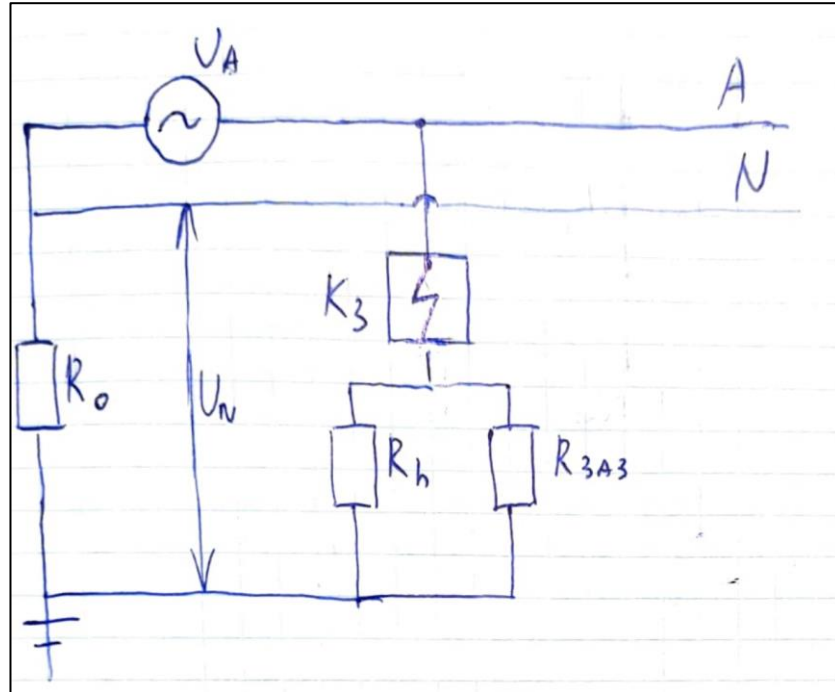


Рисунок 8 – Упрощенная схема сети

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.



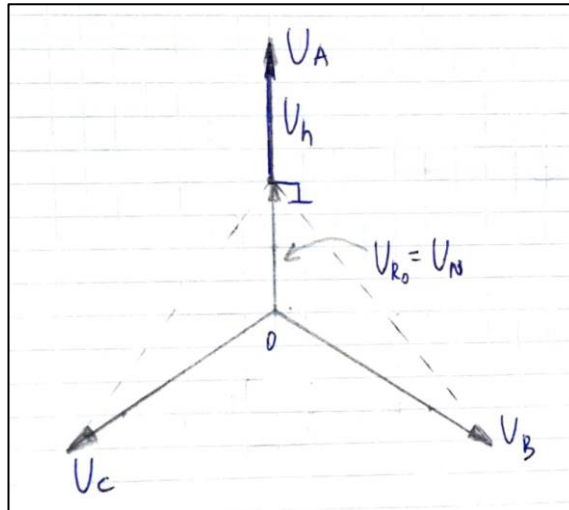


Рисунок 9 – Векторная диаграмма напряжений

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.

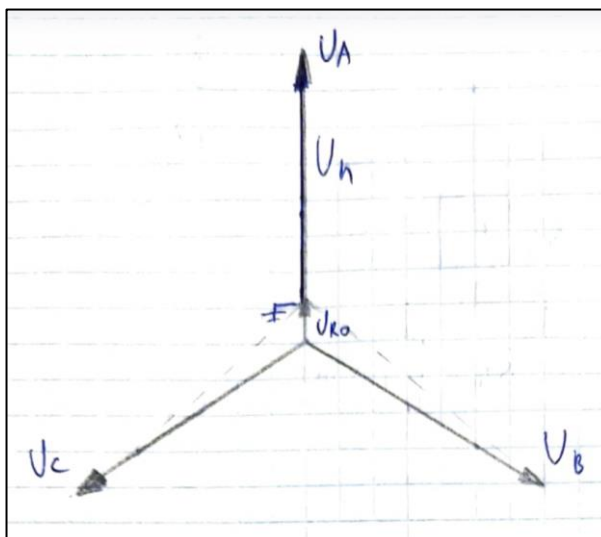


Рисунок 10 – Векторная диаграмма напряжений

### ***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.

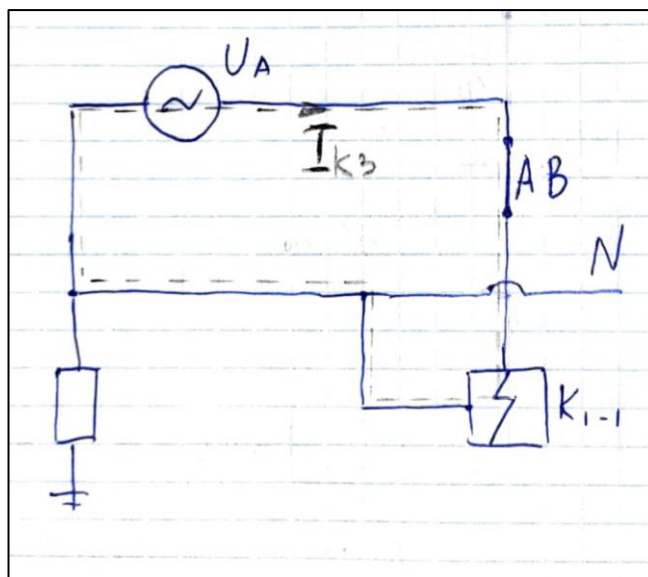


Рисунок 11 – Упрощенная схема сети

### ***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.

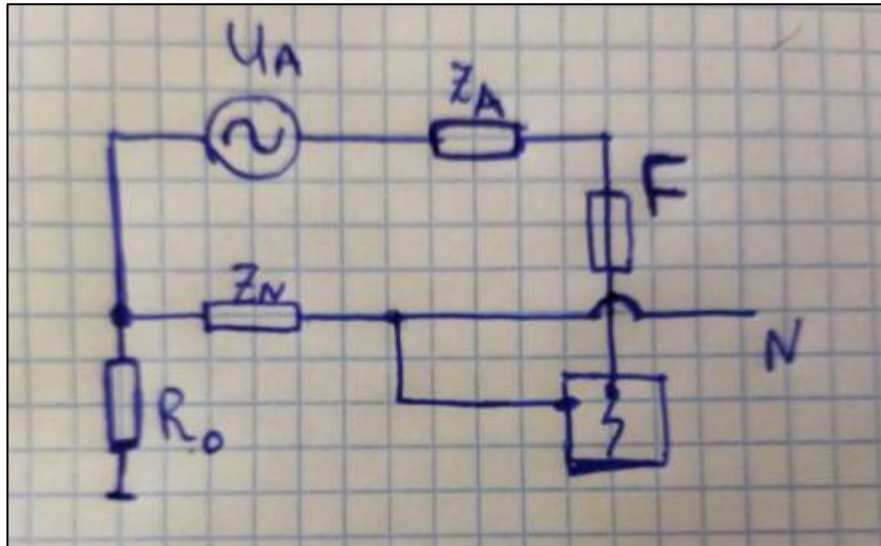


Рисунок 12 – упрощенная схема сети

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					
	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_{зам}$	$R_{зав}$	$U_{C01}$	$U_{B01}$	$U_{A01}$	$U_{K1}, U_0$	$U_{K2}$	$U_{K3}, U_h$
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 K<sub>2</sub>. 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

$$U_{R_0} = U_A \frac{z_N}{z_A + z_N} \approx \frac{1}{2} U_A$$

Векторная диаграмма напряжений приведена на рисунке 13.

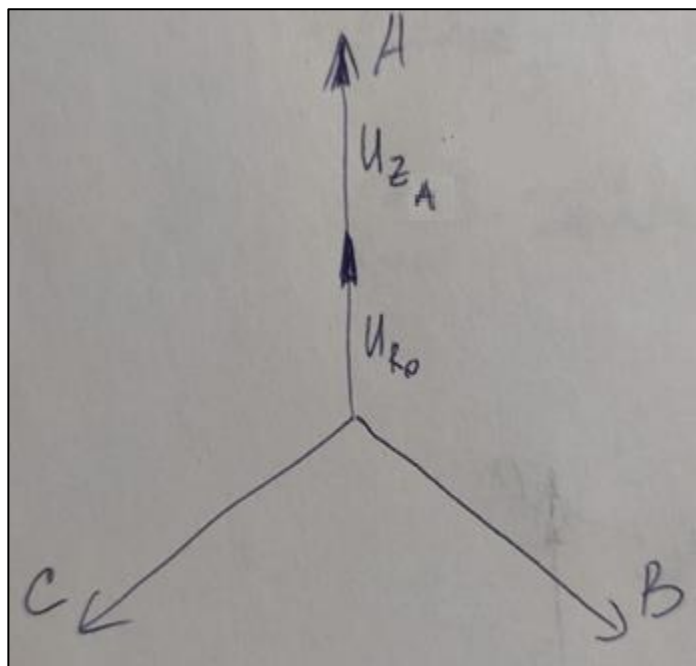
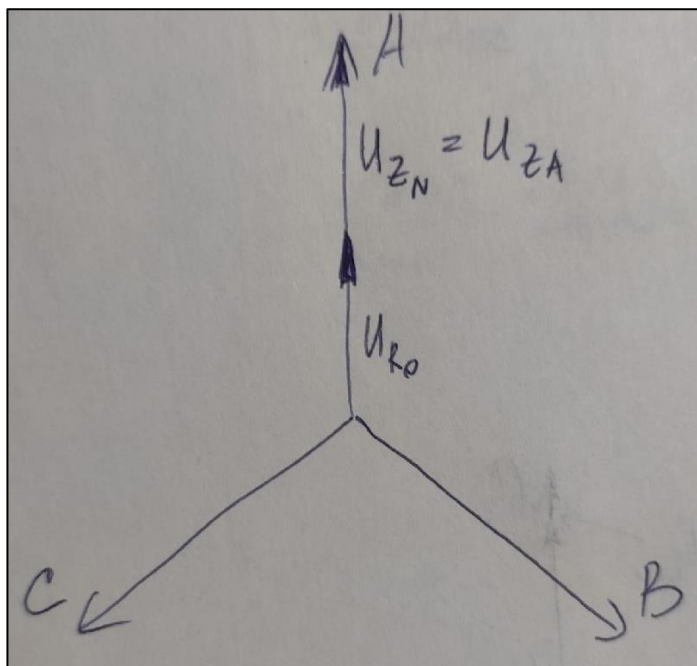


Рисунок 13 - векторная диаграмма напряжений (старая, новая)

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

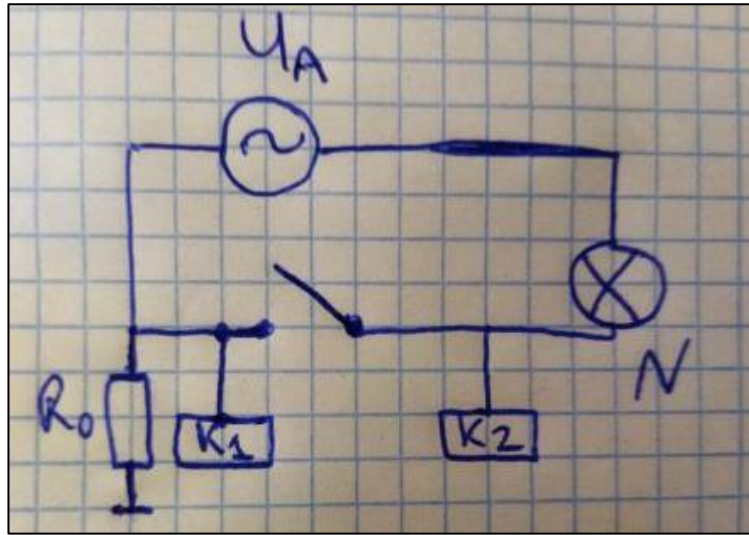


Рисунок 14 – схема сети с включённой световой нагрузкой

На рис. 15 приведена упрощенная схема замещения сети при прикосновении человека к корпусу  $K_2$  и включенной световой нагрузке.

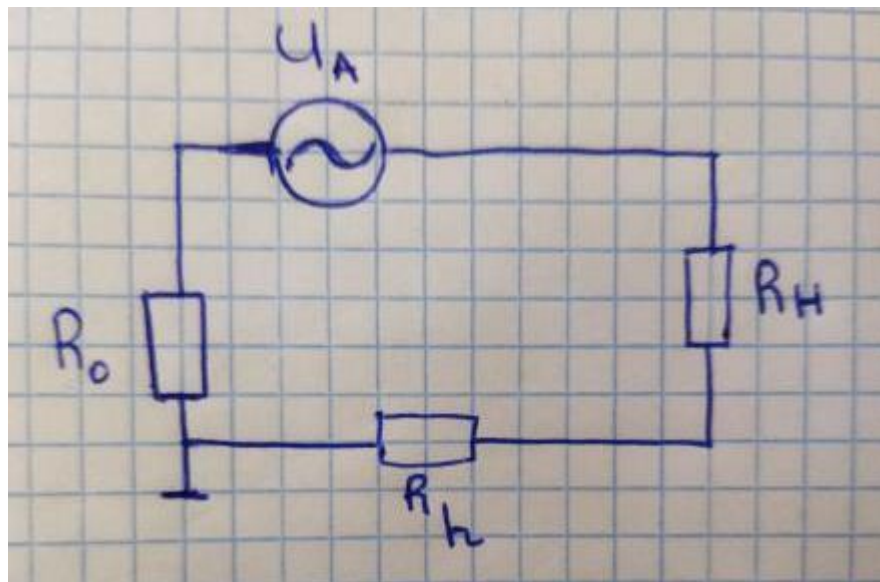


Рисунок 15 – упрощенная схема сети при прикосновении человека к  $K_2$  и включенной световой нагрузке

Напряжение в этом случае равны:

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

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

$$U_{R0} = U_A \frac{R_0}{R_0 + R_h + R_H}$$

Будем считать, что в качестве световой нагрузки используется лампа накаливания мощностью 60 Вт. Тогда сопротивление нагрузки при  $U_A = 220$  В равно

$$R_H = \frac{U_A^2}{P} = 807 \text{ Ом}$$

Напряжения в этом случае равны:

$$U_h = 121.5 \text{ В} - \text{напряжение прикосновения}$$

$$U_H = 98 \text{ В} - \text{напряжение на световой нагрузке}$$

$$U_{R_0} = 0.5 \text{ В} - \text{напряжение на } R_0$$

Векторная диаграмма напряжений приведена на рис. 16.

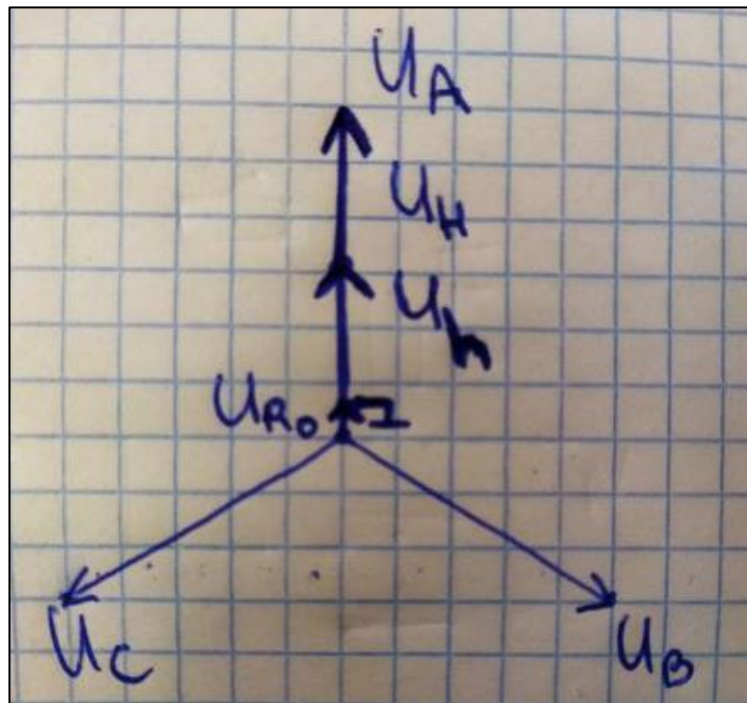


Рисунок 16 – векторная диаграмма напряжений

На рис. 17 приведена схема сети при отключенной световой нагрузке – схема разомкнута, и напряжения на нулевом проводнике (корпусах) и человеке равны нулю.



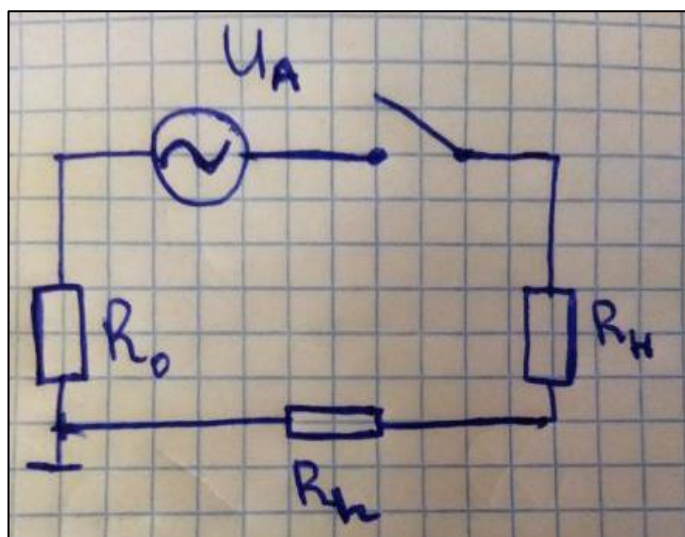


Рисунок 17 – упрощенная схема сети при отключенной световой нагрузке

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. 18 приведена упрощенная схема сети с повторным заземлением и включенной нагрузкой при прикосновении человека к корпусу  $K_2$ .

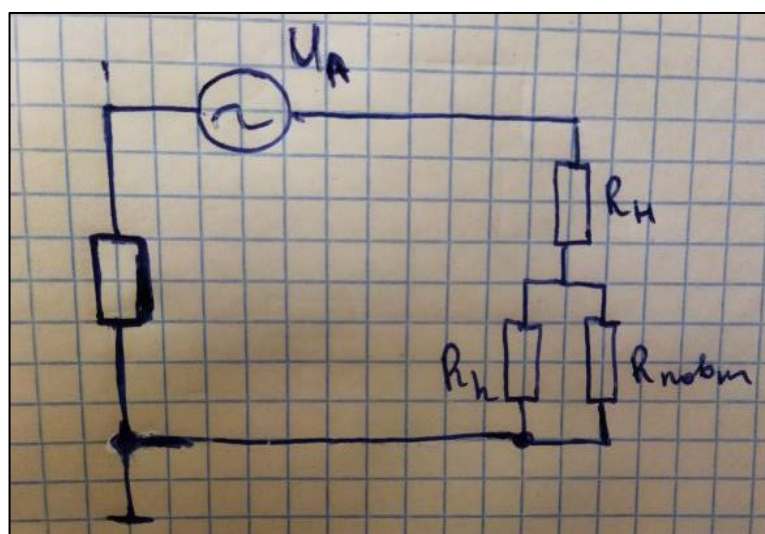


Рисунок 18 – упрощенная схема сети с повторным заземлением и включенной нагрузкой при прикосновении человека к  $K_2$ .

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. 19 приведена векторная диаграмма напряжений.

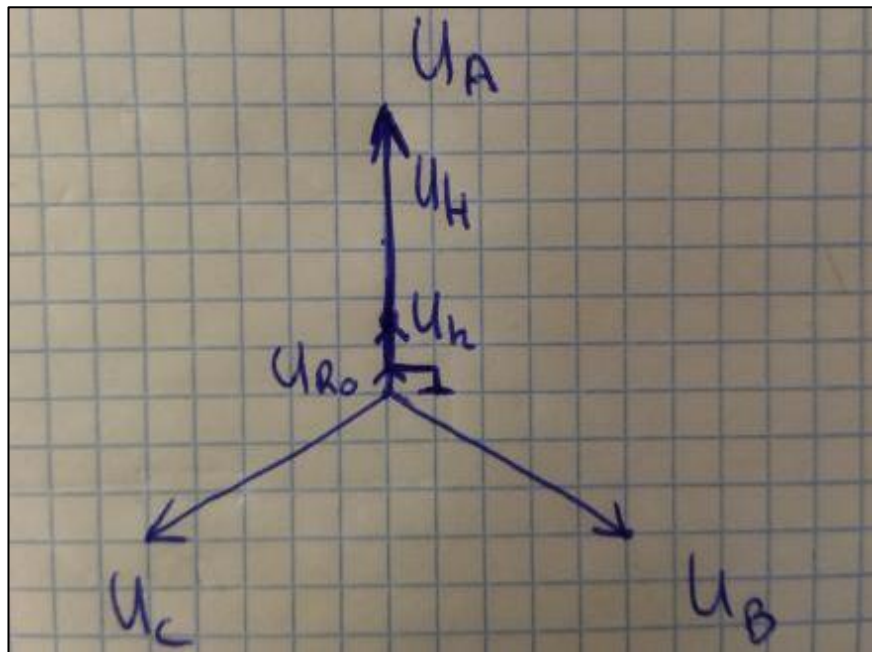


Рисунок 19 – векторная диаграмма напряжений

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					
	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_{\text{зам}}$	$R_{\text{заз}}$	$U_{C01}$	$U_{B01}$	$U_{A01}$	$U_{K1}, U_0$	$U_{K2}$	$U_{K3}, U_h$
1	150000	150000	150000	100	-	0	46	45	24	23	0
2	150000	150000	150000	100	-	19	30	29	3	3	0

На рис. 20 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.

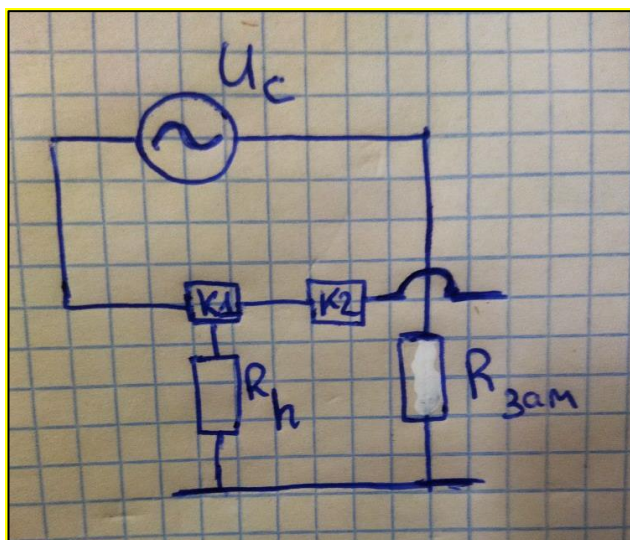


Рисунок 20 – упрощенная схема сети при отсутствии повторного заземления

На рис. 21 изображена векторная диаграмма напряжений сети.

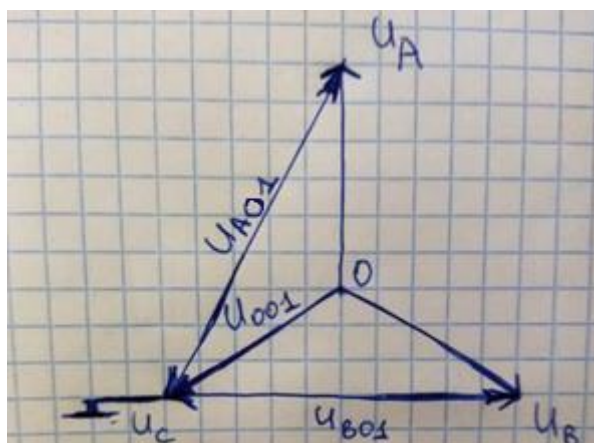


Рисунок 21 – векторная диаграмма напряжений сети

На рис. 22 изображена упрощенная схема сети при наличии повторного заземления нулевого проводника.

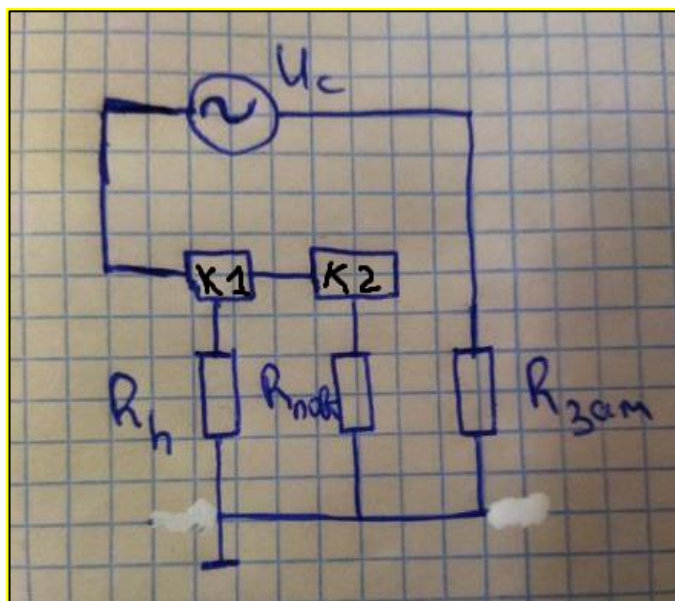


Рисунок 22 – Упрощенная схема сети при наличии повторного заземления нулевого проводника

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. 23 приведена векторная диаграмма напряжений.

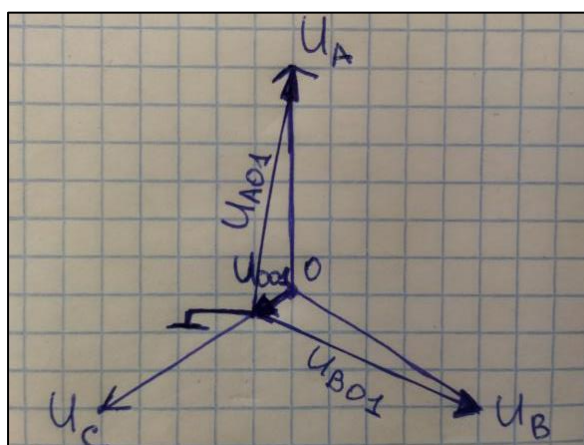
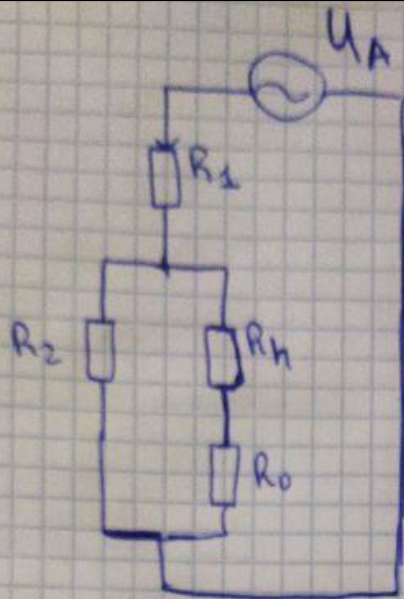


Рисунок 23 – векторная диаграмма напряжений  
Напряжение фаз А и В относительно земли немного больше фазного.



$$R_{\text{ges}} = \frac{R_2(R_h + R_o)}{R_h + R_o + R_2} + R_1$$

$$R_2 = \frac{\rho L}{S} = R_1$$

$$\rho = 0,0175 \frac{\text{Ohm mm}^2}{\text{m}}, L = 1000 \text{ m}, S = 7 \text{ mm}^2$$

$$R_1, R_2 = 2,5 \text{ Ohm} \Rightarrow R_{\text{ges}} = 5 \text{ Ohm}$$

$$U_h = \frac{U_A}{R_{\text{ges}}} \cdot \frac{(R_h + R_o) R_2}{R_h + R_o + R_2} \cdot \frac{R_h}{(R_h + R_o)} = \frac{U_A R_2 R_h}{R_{\text{ges}} (R_h + R_o + R_2)} = 109 \text{ V}$$

$$U_o = \frac{U_A R_o}{R_{\text{ges}} (R_h + R_o + R_2)} = 0,49 \text{ V}$$

$$U_{R_1} = \frac{U_A}{R_{\text{ges}}} \cdot R_1 = 110 \text{ V}$$

$$U_{R_2} = \frac{U_A}{R_{\text{ges}}} \cdot \frac{(R_h + R_o) R_2}{R_h + R_o + R_2} = 109,7 \text{ V}$$



