

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 безопасности в трехфазных сетях с
заземленной нейтралью

Студентка гр. 8383

Ишанина Л.Н.

Студент гр. 8383

Ларин А.

Студентка гр. 8383

Сырцова Е.А.

Преподаватель

Овдиенко Е.Н.

Санкт-Петербург

2021

Цель работы

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

Общие сведения

Схема, имитирующая трехфазную сеть, работающую в режиме с глухозаземленной нейтралью, представлена на рис. 1.

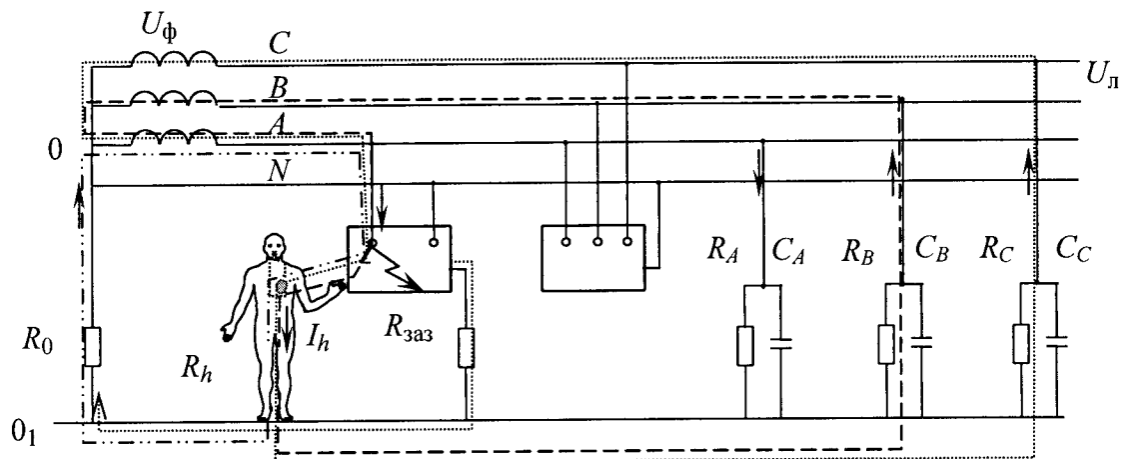


Рис. 1 – Электрическая схема сети для анализа безопасности с контурами возможных токов

Напряжение прямого однофазного прикосновения в такой схеме определяется в основном значением фазного напряжения U_ϕ из-за малого сопротивления рабочего заземления нейтрали R_0 и практически не зависит от сопротивлений и емкостей 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, например, фазы C, напряжение прикосновения становится больше фазного, но может быть скорее всего ближе к фазному, чем к линейному:

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

Здесь $a = e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}$ - оператор поворота (единичный вектор);
 $j = \sqrt{-1}$; $g_0 = \frac{1}{R_0}$, $g_{\text{зам}} = \frac{1}{R_{\text{зам}}}$, C_m ($C_m = 1/O_m$) – соответственно, активные проводимости относительно земли рабочего заземления и замыкания.

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

$$U_h = U_\phi \frac{R_{\text{заз}}}{R_0 + R_{\text{заз}}} = (0,5 - 0,96)U_\phi$$

Опасность использования защитного заземления в электроприемнике не ограничивается тем электроприемником, где оно применено. Гораздо более опасным оказывается прикосновение к правильно зануленным корпусам исправных электроприемников. При фазном напряжении 220 В на них появится напряжение (от осязаемого 9 В до опасного 110 В), которое определяется падением напряжения на рабочем заземлении R_0 :

$$U_{00} = U_\phi \frac{R_{\text{заз}}}{R_0 + R_{\text{заз}}} = (0,04 - 0,5)U_\phi$$

Обработка результатов

Анализ условий опасности прямого прикосновения в системе TN

Электрическая схема при прямом прикосновении в системе TN представлена на рис. 2, результаты измерения напряжений на фазах и корпусах при сопротивлениях фаз равных 5 и 150 кОм приведены в табл. 1.

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_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
1	5000	5000	5000	-	-	24	26	22	0	0	24
2	150000	150000	150000	-	-	24	26	22	0	0	24

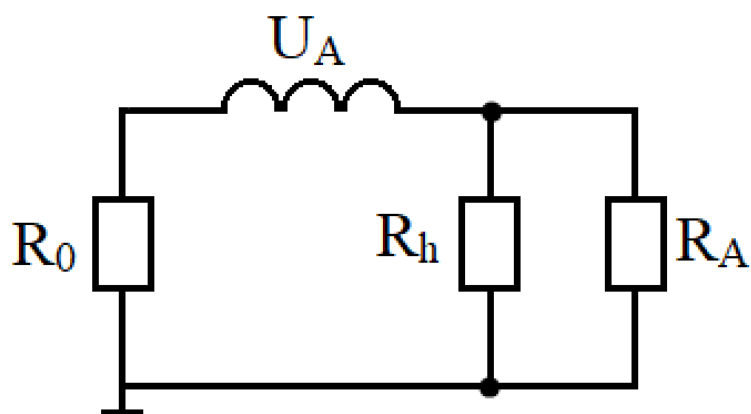


Рисунок 2 – Электрическая схема при прямом прикосновении в системе TN

При изменении сопротивления фаз их напряжение не меняется, т.к. сопротивление человека меньше фазного сопротивления в обоих опытах ($R_{\Phi} > R_h = 1 \text{ кОм}$). Тогда напряжение прикосновения равно:

$$U_h = U_{\Phi} \frac{R_h}{R_0 + R_h} = 220 \frac{1000}{4 + 1000} = 219,1 \text{ В} \approx U_{\Phi}$$

Независимо от сопротивления изоляции, на человека будет поступать одинаковое напряжение, потому что сопротивление человека много больше сопротивления заземления $R_0 = 4 \text{ Ом}$.

Векторная диаграмма представлена на рис. 3.

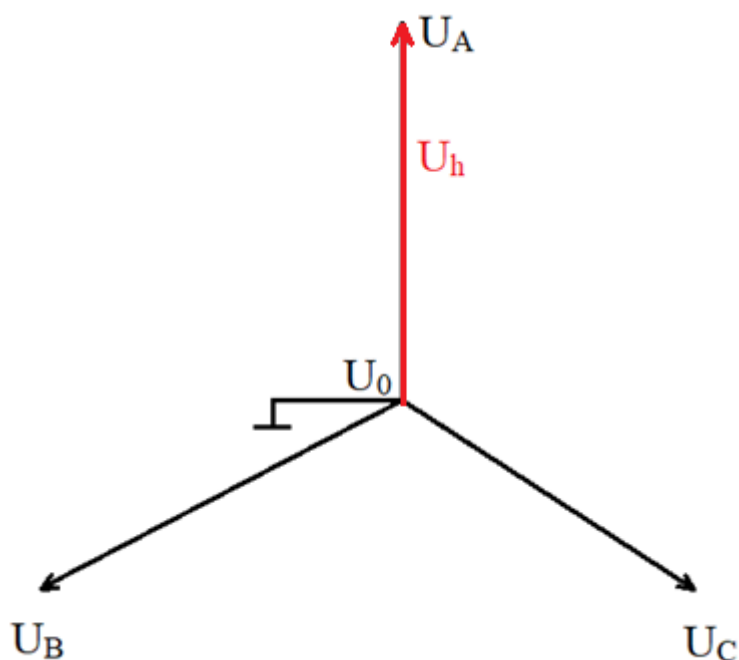


Рисунок 3 – Векторная диаграмма при прямом прикосновении

Электрическая схема при прямом прикосновении при замыкании фазы С на землю представлена на рис. 4, в табл. 2 приведены результаты измерения напряжений на фазах и корпусах при сопротивлениях замыкания 50 и 100 Ом. 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	$R_{зам}$	$R_{зав}$	U_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
3	150000	150000	150000	50	-	32	32	11	9	9	32
4	150000	150000	150000	100	-	25	26	20	1	1	24

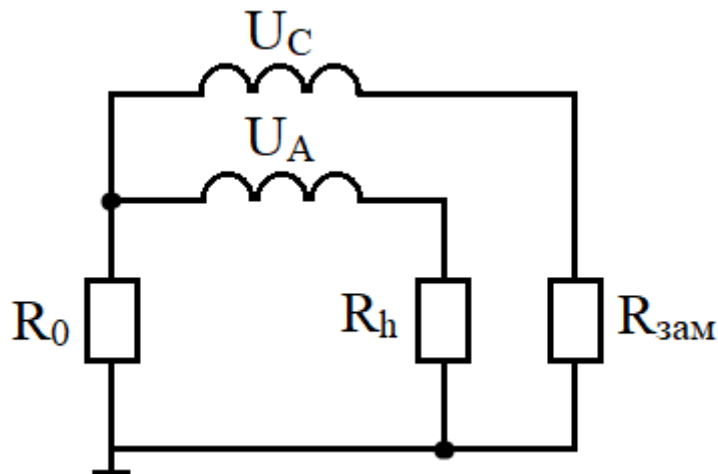


Рисунок 4 – Электрическая схема при прямом прикосновении при замыкании фазы С на землю

Весь ток пройдет через $R_{зам}$, так как $R_{зам} \ll R_C$. Тогда найдем напряжение на R_0 :

При $R_{зам} = 50$ Ом :

$$U_0 = U_C \frac{R_0}{R_0 + R_{зам}} = 220 \frac{4}{4 + 50} = 16,3 \text{ В}$$

При $R_{зам} = 100$ Ом :

$$U_0 = U_C \frac{R_0}{R_0 + R_{зам}} = 220 \frac{4}{4 + 100} = 8,5 \text{ В}$$

Появляется дополнительное напряжение на R_0 , тогда напряжение на человеке увеличится:

При $R_{зам} = 50$ Ом :

$$U_h = U_\Phi \frac{R_h}{R_0 + R_h} + U_0 = 219.1 + 16.3 = 235.6 \text{ В}$$

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

$$U_h = U_\Phi \frac{R_h}{R_0 + R_h} + U_0 = 219.1 + 8.5 = 227.8 \text{ В}$$

Векторные диаграммы представлены на рис. 5.

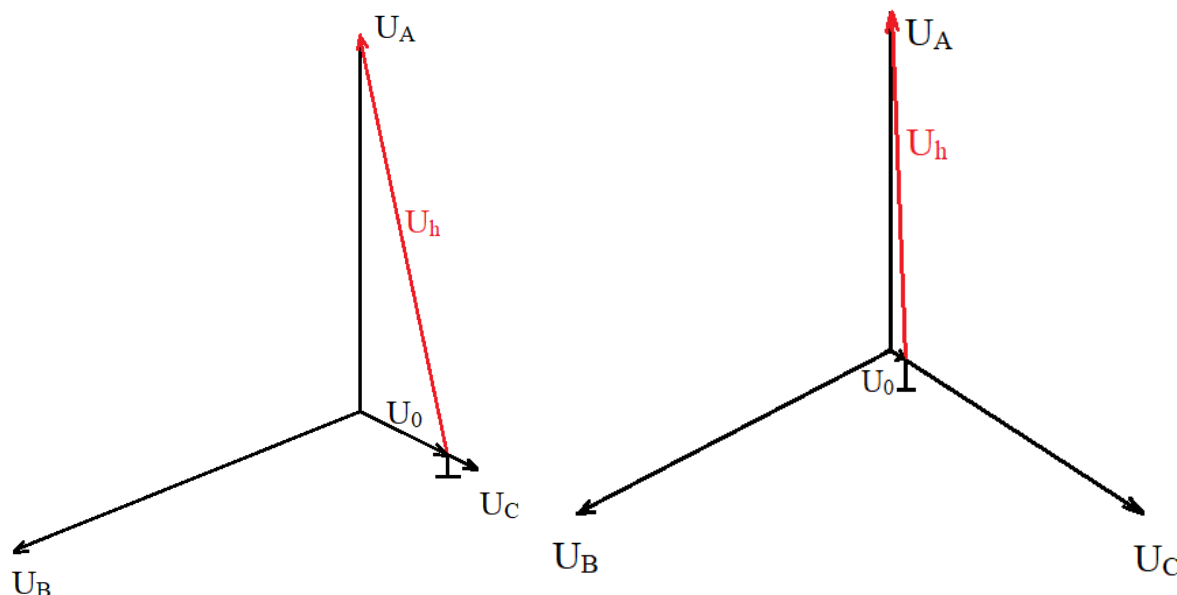


Рисунок 5 – Векторные диаграммы при прямом прикосновении при замыкании фазы С на землю ($R_{\text{зам}} 50$ и 100 Ом)

Вывод

При изменении сопротивления изоляции проводов напряжение прикосновения к фазе не меняется. При прямом прикосновении напряжение на человеке примерно равно фазному. При замыкании фазы С на землю происходит увеличение напряжения на человеке.

Оценка опасности заземления корпусов при непрямом прикосновении

Электрическая схема при непрямом прикосновении показана на рис. 6. Результаты измерений напряжений на фазах и корпусах приведены в табл. 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	$R_{\text{зам}}$	$R_{\text{заз}}$	U_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h

5	150000	150000	150000	-	-	25	26	22	0	0	24
6	150000	150000	150000	-	4	10	35	32	13	13	10
7	150000	150000	150000	-	100	22	27	23,5	2	2	22

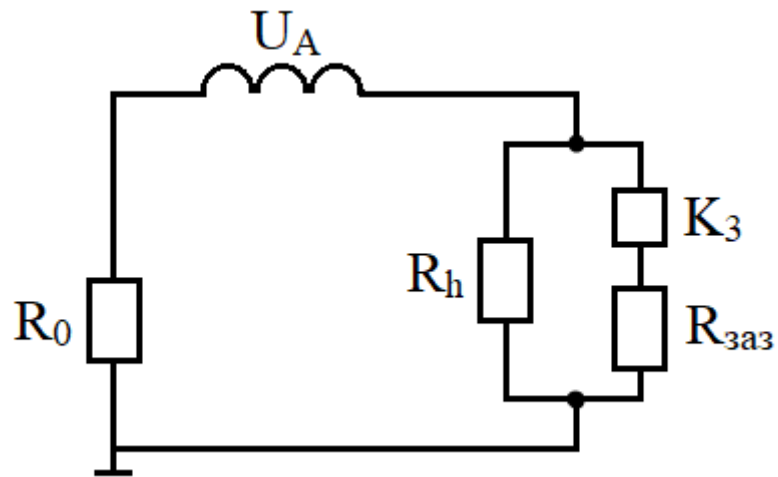


Рисунок 6 – Электрическая схема при непрямом прикосновении

При обрыве фазы *A* происходит перераспределение потенциала, при этом человек вместе с заземлением параллельно подключается к корпусу, т.е. падение напряжения на человеке будет зависеть от сопротивления заземления.

Для $R_{\text{заз}} = 4$ Ом напряжение на человеке будет:

$$U_h = U_{\Phi} \frac{R_{\text{заз}}}{R_{\text{заз}} + R_0} = 220 \frac{4}{4 + 4} = 110 \text{ В}$$

Для $R_{\text{заз}} = 100$ Ом напряжение на человеке будет:

$$U_h = U_{\Phi} \frac{R_{\text{заз}}}{R_{\text{заз}} + R_0} = 220 \frac{100}{100 + 4} = 211,5 \text{ В}$$

Векторные диаграммы представлены на рис. 7.

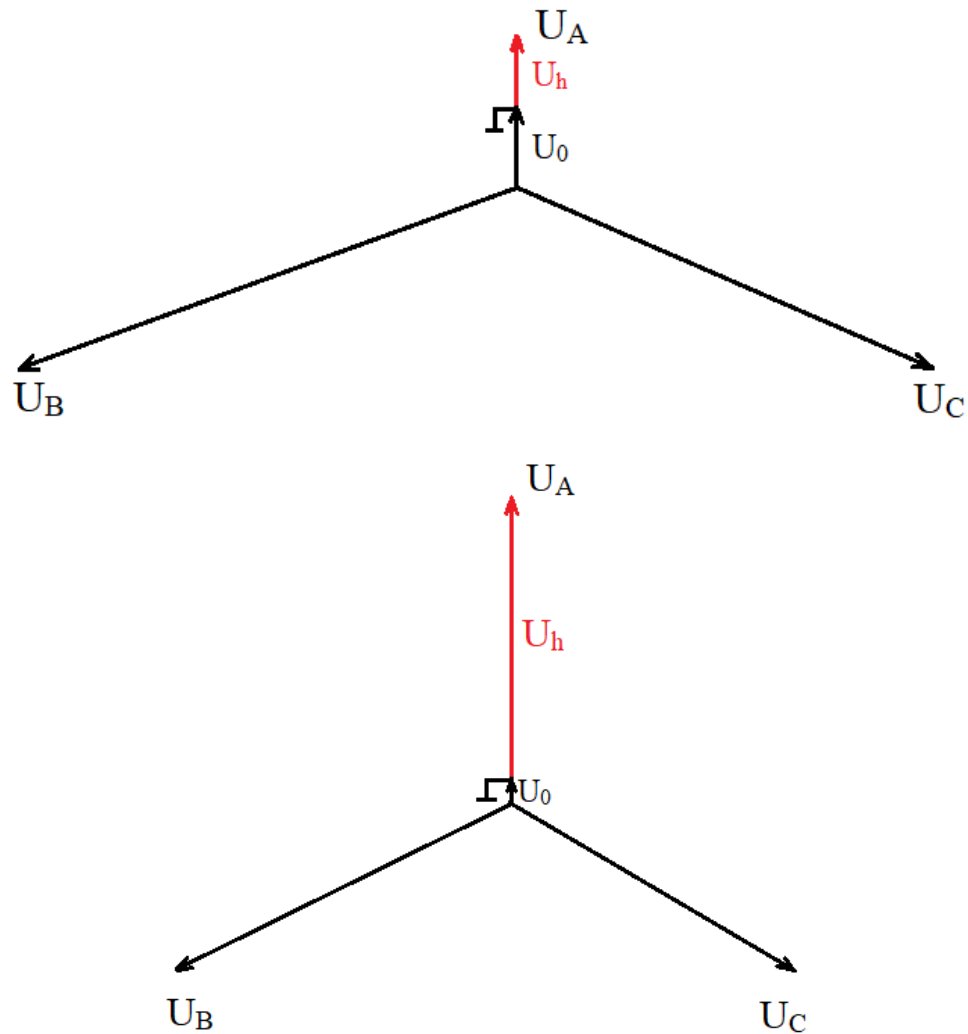


Рисунок 7 – Векторные диаграммы при непрямом прикосновении
($R_{\text{зaz}}$ 4 и 100 Ом)

Вывод

При заземлении установки происходит деление напряжения между R_0 и $R_{\text{зaz}}$, если они равны, то напряжение прикосновения становится равным половине фазного. При увеличении сопротивления заземления $R_{\text{зaz}}$ человек оказывается под напряжением, близким к фазному. Рассмотренная сеть в реальных условиях получается при заземлении корпусов на батареи, водопроводные трубы и другие элементы, электрически плохо связанные с землей. Из-за высокого напряжения непрямого прикосновения так заземлять корпуса запрещено.

Изучение принципа действия зануления

Электрическая схема с реализацией защитного зануления показана на рис. 8, измерение напряжений после замыкания на фазах и корпусах приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Напряжение 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	$R_{зам}$	$R_{зав}$	U_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
8	150000	150000	150000	-	-	0	0	0	0	0	0

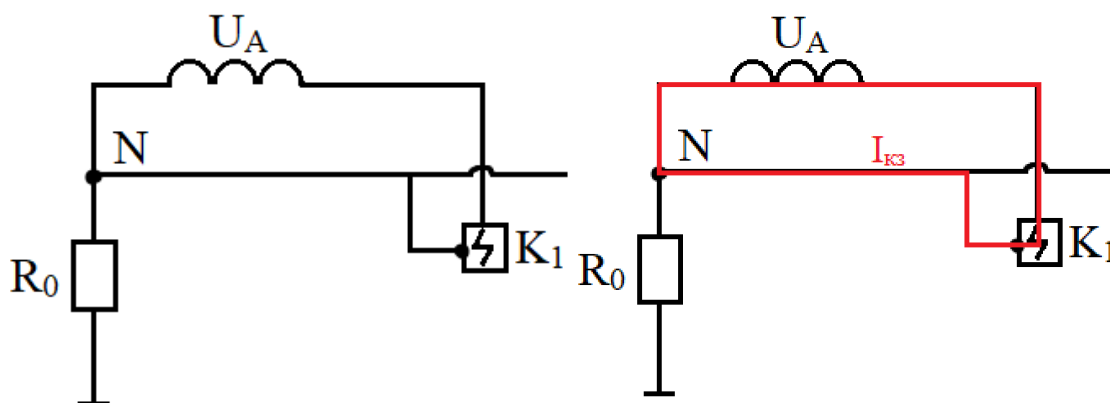


Рисунок 8 - Электрическая схема с реализацией защитного зануления
(красный – ток короткого замыкания)

Вывод

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

Оценка опасности зануления корпусов при непрямом прикосновении Случай неправильно выбранной (завышенной) установки срабатывания максимальной токовой защиты

Схема сети представлена на рис. 9, для отключения цепи используется предохранитель F, но ток замыкания недостаточен для его срабатывания.

Результаты измерения напряжений на фазах и корпусах представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Напряжение 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_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
9	150000	150000	150000	-	-	25	25	22	15	15	0

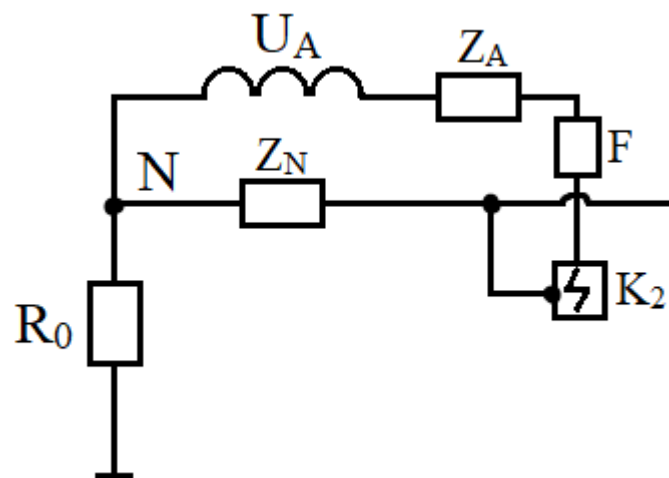


Рисунок 9 – Электрическая схема с неправильно выбранной установкой срабатывания максимальной токовой защиты

Замыкание фазы А привело к появлению напряжения на нулевом проводе и зануленном корпусе K_2 . $Z_N \approx Z_A$ – сопротивления нейтрального и фазного проводников. Тогда напряжение на нулевом проводе и зануленных корпусах равно $U_0 = U_K = U_A \frac{Z_N}{Z_A + Z_N} \approx \frac{1}{2} U_A$.

Вывод

При дополнительном сопротивлении в цепи ток не достигает значения, при котором срабатывает защита и напряжение со стенда не снимается.

Случай обрыва нулевого провода или неправильной установки в нем выключателя нагрузки

Схема сети представлена на рис. 10, результаты измерения напряжения в сети с выключенной и включенной осветительной нагрузкой представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Напряжение в сети при обрыве нулевого провода

№ п/п	Значение сопротивления, Ом					Напряжения фаз и корпусов относительно земли, В					
	R_A	R_B	R_C	$R_{зам}$	$R_{зав}$	U_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
10	150000	150000	150000	-	-	25	25	22	0	0	0
11	150000	150000	150000	-	-	25	25	22	0	22	0

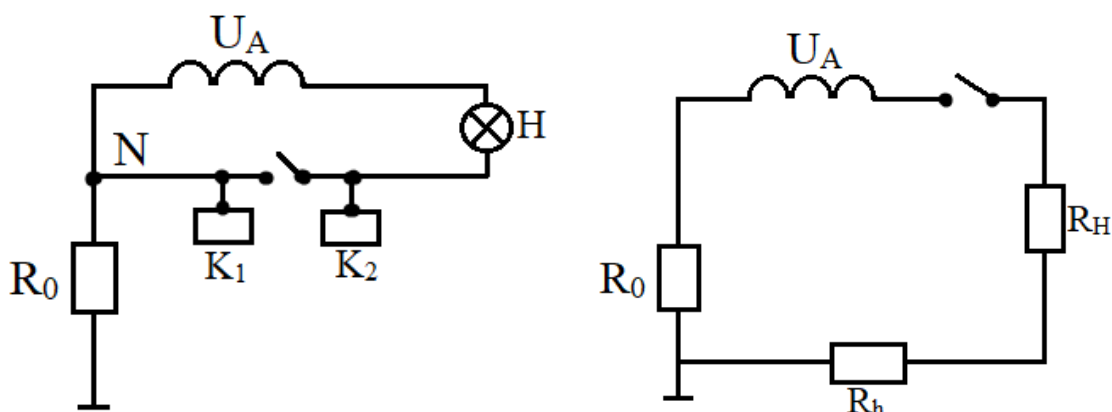


Рисунок 10 – Электрическая схема с включенной световой нагрузкой

Напряжение прикосновения при включенной световой нагрузке

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

Если в качестве световой нагрузки используется лампа накаливания мощностью 40 Вт, тогда $R_H = \frac{U_A^2}{P} = 1210 \text{ Ом}$, $U_h = 220 * \frac{1000}{4+1000+1210} = 99,4 \text{ В}$.

Векторная диаграмма представлена на рис. 11.

При отключенной световой нагрузке схема разомкнута, напряжение на нулевом проводнике и человеке равны нулю.

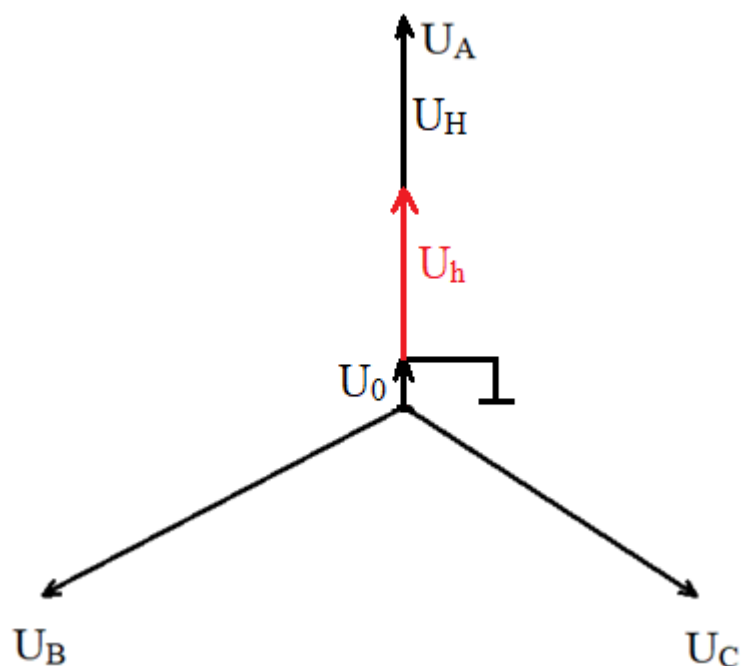


Рисунок 11 – Векторная диаграмма с включенной световой нагрузкой

Повторные измерения при включении заземления нулевого провода представлены в табл. 7, схема представлена на рис. 12.

Таблица 7 – Напряжение 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	$R_{\text{зам}}$	$R_{\text{зaz}}$	U_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
10	150000	150000	150000	-	-	25	25	22	0	0	0
11	150000	150000	150000	-	-	29	29	16	5	11	0

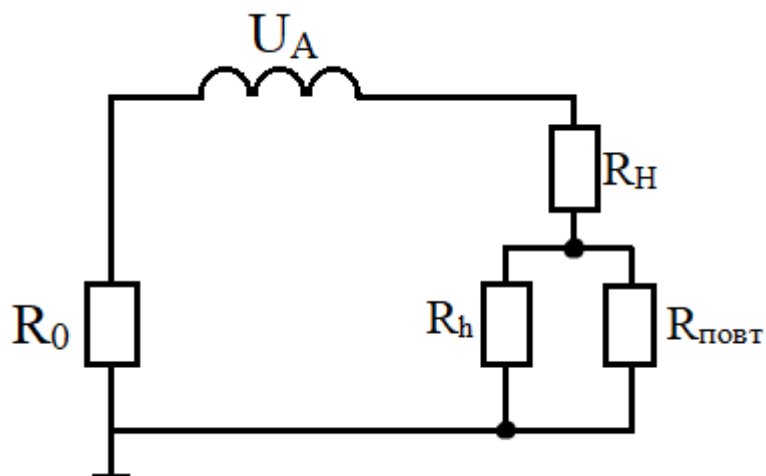


Рисунок 12 – Электрическая схема с повторным заземлением

Т.к. $R_{\text{повт}} = 10 \text{ Ом} \ll R_h, R_H = 1210 \text{ Ом}, U_A = 220 \text{ В}$, тогда напряжение прикосновения равно

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

Полученное значение значительно меньше, чем напряжение прикосновения без повторного заземления. Векторная диаграмма представлена на рис. 13.

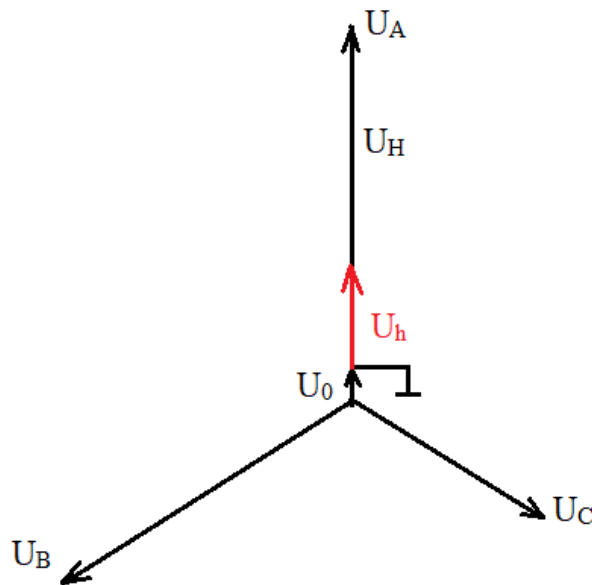


Рисунок 13 – Векторная диаграмма с повторным заземлением

Вывод

При выключенной нагрузке и обрыве нулевого провода, вне зависимости от того, включено или выключено повторное заземление нулевого провода, напряжение на обоих зануленных корпусах равно нулю. При включенной нагрузке и отсутствии повторного заземления напряжение на корпусе K_2 близко к фазному. При наличии повторного заземления напряжение на корпусе K_2 значительно ниже.

Случай обрыва цепи заземления нейтрали источника при наличии замыкания фазы на землю

Фаза С замыкается на землю и отключается рабочее заземление, измерения напряжений сети при отключенном и включенном повторном заземлении представлены в табл. 8. Упрощенная схема сети при отсутствии повторного заземления представлена на рис. 14.

Таблица 8 – Напряжение 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	$R_{зам}$	$R_{зав}$	U_{A01}	U_{B01}	U_{C01}	U_{K1}, U_0	U_{K2}	U_{K3}, U_h
12	150000	150000	150000	50	-	43	43	0	22	22	0
13	150000	150000	150000	50	-	36	36	7	14	14	0

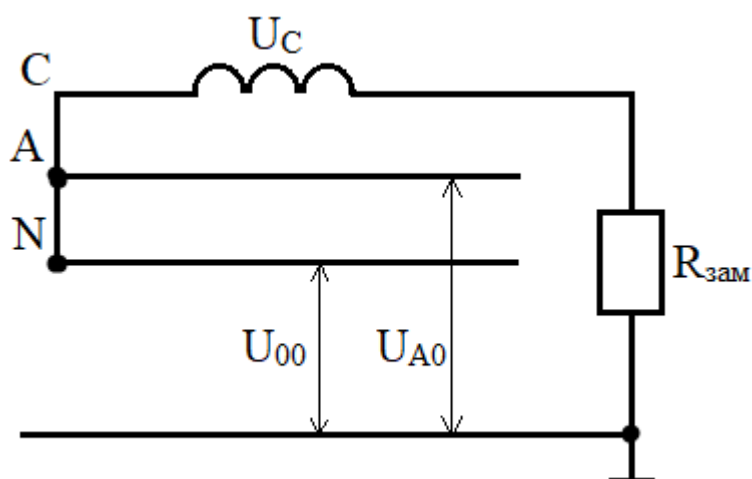


Рисунок 14 – Схема сети при отсутствии повторного заземления

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. Векторная диаграмма представлена на рис. 15.

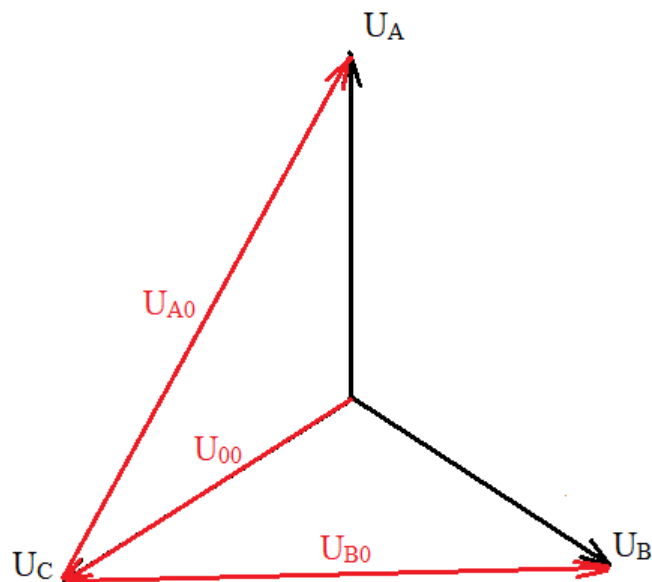


Рисунок 15 – Векторная диаграмма при отсутствии повторного заземления

Упрощенная схема сети при наличии повторного заземления нулевого проводника представлена на рис. 16.

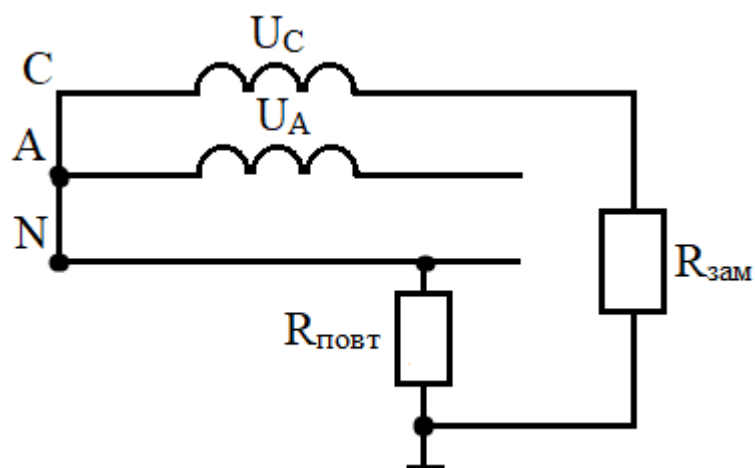


Рисунок 16 – Схема сети при наличии повторного заземления

Напряжение нулевого проводника относительно земли

$$U_{00} = U_C \frac{R_{\text{повт}}}{R_{\text{повт}} + R_{\text{зам}}} = 220 * \frac{10}{10 + 50} = 36.7 \text{ В}, U_h = U_C - U_{00} = 183.3 \text{ В}$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 17.

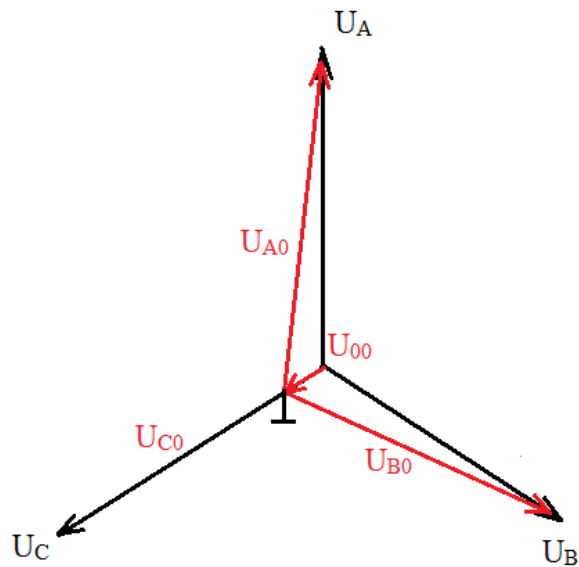


Рисунок 17 – Векторная диаграмма при наличии повторного заземления

Вывод

При выключенном повторном заземлении нулевого провода напряжение на обоих зануленных корпусах опасно и стремится к фазному, при включенном повторном заземлении нулевого провода напряжение на обоих зануленных корпусах опасно, но меньше фазного.