

38

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Кафедра охраны труда

Н. Н. СКОЛОТНЕВ, М. П. ФИЛИПЧЕНКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ
УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Методические указания
к учебно-исследовательской
лабораторной работе № 14

Москва — 1983

Кафедра охраны труда

Н. Н. СКОЛОТНЕВ, М. П. ФИЛИПЧЕНКО

Утверждено
редакционно-издательским
советом института

ИССЛЕДОВАНИЕ
УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Методические указания
к учебно-исследовательской
лабораторной работе № 14

по дисциплине
«ОХРАНА ТРУДА»

Москва — 1983

Цель работы — изучить влияние параметров сети с изолированной нейтралью на условия электробезопасности, а также ознакомиться с мерами по предупреждению поражения человека электрическим током в аварийном режиме работы электроустановки.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Критерии электробезопасности. Вследствие случайного прикосновения человека к токоведущим частям или повреждения электроустановки возможно протекание электрического тока по телу человека, что может явиться причиной электротравмы. Электрический ток, в зависимости от его величины, протекая по телу человека, вызывает различные ответные реакции организма. В соответствии с ними установлена следующая классификация токов:

- ощутимый;
- неотпускающий;
- фибрилляционный.

Пороговым значением, соответствующим определенным ответным реакциям, принято считать наименьшее значение этого тока, величины которых имеют случайный характер. На рис. 1, 2 и 3 представлены функции распределения пороговых токов.

В общем случае характер воздействия и исход поражения зависят от величины тока, пути протекания, длительности воздействия, рода тока, частоты и других факторов.

Для пути протекания тока «рука—рука» установлены следующие значения допустимых токов и напряжений прикосновения для электроустановок переменного тока частотой 50 Гц:

неощутимый ток и напряжение прикосновения при продолжительности воздействия не более 10 мин — 0,6 мА, 4 В;

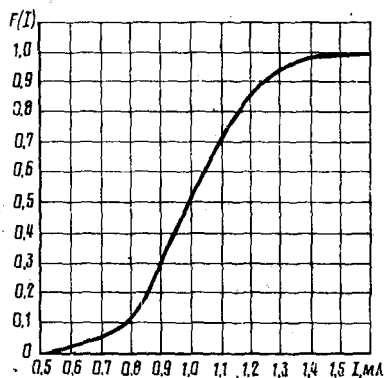


Рис. 1. Функция распределения
ощутимых токов

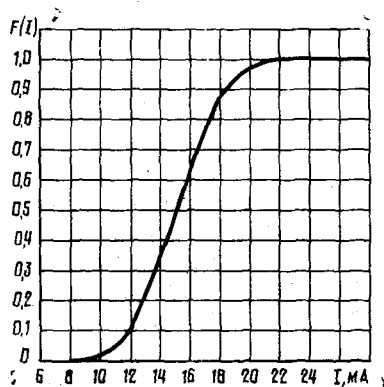


Рис. 2. Функция распределения
неотпускающих токов

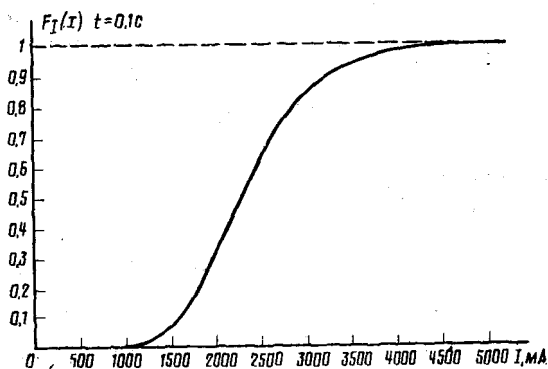


Рис. 3. Функция распределения пороговых
фибрилляционных токов при $t = 0,1$ с

отпускающий ток и напряжение прикосновения при продолжительности воздействия до 30 с — 6 мА, 36 В;
нефибрилляционный ток и напряжение прикосновения в зависимости от продолжительности воздействия до 1 с. (табл. 1).

Таблица 1

Значения нефибрилляционных токов и напряжений прикосновения в зависимости от продолжительности воздействия

Нормируемая величина	Продолжительность воздействия t , с					
	0,01 ÷ 0,08	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0
I , мА	650	500	250	100	65	50
U , В	650	500	250	100	65	50

Таким образом, при оценке опасности поражения обслуживающего персонала и разработке соответствующих защитных мероприятий необходимо знать величину тока и длительность его протекания.

1.2. Однофазное прикосновение человека к трехфазной сети с изолированной нейтралью. При однофазном прикосновении ток через тело человека может протекать только при наличии проводимости между фазами сети и землей. Во-первых, в силу несовершенства изоляции между фазами и землей имеет место активная проводимость g . Если на единицу длины исправной линии активная проводимость равна g_0 , то при длине линии l активная проводимость одного провода относительно земли будет равна $g = g_0 \cdot l$. Во-вторых, существует реактивная проводимость фаз, обусловленная емкостью проводов относительно земли, величина которой на единицу длины составляет C_0 . Тогда при длине линии l реактивная проводимость фазы относительно земли будет равна $b_c = \omega C = \omega \cdot l \cdot C_0$.

В табл. 2 представлены удельные значения проводимости и емкости линии в зависимости от вида и исполнения сети.

Таким образом, ток, протекающий через тело человека, будет зависеть от состояния изоляции проводов и протяженности сети.

Если обозначить через $Y_i = g_i + jb_i$ — общую проводимость « i » фазы относительно земли, то величину тока через тело человека, коснувшегося фазы 1 (рис. 4), можно найти

$$I_4 = U \cdot g_4 \frac{Y_2(1 - a^2) + Y_3(1 - a)}{g_4 + Y_1 + Y_2 + Y_3}, \quad (1)$$

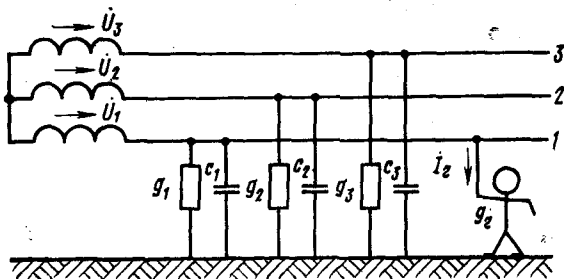


Рис. 4. Схема однофазного прикосновения человека в сети с изолированной нейтралью

где U — фазное напряжение сети, В;
 a — фазный множитель, равный e^{j120° ;
 $g_ч$ — проводимость тела человека, См.

Таблица 2

Удельные составляющие активной и емкостной проводимостей электропроводок¹

Электропроводки	Активная составляющая проводимости изоляции g_0 , См/м	Емкость фазы C_0 , мкФ/м
Кабель СШТ	$12 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Кабель КРПТ	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Кабель ШРПС	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Воздушная линия с горизонтальным расположением проводов до 1000 В		$0,1 \cdot 10^{-4}$
Воздушная линия с горизонтальным расположением проводов выше 1000 В		$0,08 \cdot 10^{-4}$

¹ Значения пунктов 1—3 даны по И. Д. Равиковичу [3].

Учитывая, что протяженность фаз трехфазной сети практически одинакова, можно принять $C_1 = C_2 = C_3 = C$, тогда величина тока, проходящего через тело человека (его модуль), выразится

$$I_{\text{ч}} = \sqrt{3} U \cdot g_{\text{ч}} \sqrt{\frac{g_2^2 + g_3^2 + g_2 \cdot g_3 + \sqrt{3} \omega C (g_2 - g_3) + 3 \omega^2 C^2}{(g_1 + g_2 + g_3 + g_{\text{ч}})^2 + 9 \omega^2 C^2}}. \quad (2)$$

В случае воздушной линии незначительной протяженности емкостью сети можно пренебречь ($C_1 = C_2 = C_3 = 0$), тогда

$$I_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot g_{\text{ч}} \sqrt{g_2^2 + g_3^2 + g_2 \cdot g_3}}{g_1 + g_2 + g_3 + g_{\text{ч}}}. \quad (3)$$

При равенстве сопротивлений изоляции $g_1 = g_2 = g_3 = \frac{1}{R_{\text{из}}}$ выражение (3) примет вид

$$I_{\text{ч}} = \frac{3U}{R_{\text{из}} + 3R_{\text{ч}}}. \quad (4)$$

Из данного выражения можно найти критическое значение сопротивления изоляции $R_{\text{из}} = R_{\text{кр}}$, при котором ток через тело человека достигает предельно-допустимого значения

$$R_{\text{кр}} = \frac{3U}{I_{\text{ч доп}}} - 3R_{\text{ч}}, \quad (5)$$

где U (В), $I_{\text{ч}}$ (мА) и R (кОм).

В случае идеальной изоляции $g_1 = g_2 = g_3 = 0$ и наличии емкости величина тока, проходящего через тело человека, составит

$$I_{\text{ч}} = \frac{3U\omega C}{\sqrt{1 + 9\omega^2 R_{\text{ч}}^2 C^2}}. \quad (6)$$

Тогда, принимая U (В), $R_{\text{ч}}$ (кОм) и $I_{\text{ч}}$ (мА), для частоты $f = 50$ Гц получим значение емкости C (мкФ), соответствующей заданному току через человека

$$C = \frac{I_{\text{ч}}}{0,942 \sqrt{U^2 - I_{\text{ч}}^2 R_{\text{ч}}^2}}. \quad (7)$$

Рассматривая реальную линию с конечными значениями активной и емкостной проводимостями и когда $g_1 = g_2 = g_3 = \frac{1}{R_{из}}$; $C_1 = C_2 = C_3 = C$, получаем

$$I_ч = 3U \sqrt{\frac{1 + \omega^2 C^2 R_{из}^2}{(3R_ч + R_{из})^2 + 9\omega^2 C^2 R_{из}^2 R_ч^2}} \quad (8)$$

Если в выражение (8) подставить I (мА), U (В), R (кОм), C (мкФ), то для $f = 50$ Гц оно приводится к виду

$$I_ч \approx 3U \sqrt{\frac{1 + 0,1C^2 R_{из}^2}{(3R_ч + R_{из})^2 + 0,9C^2 R_{из}^2 R_ч^2}} \quad (9)$$

Из представленных выражений тока через тело человека, коснувшегося токоведущих частей электроустановки, видно, что тяжесть электротравмы определяется параметрами сети — напряжением, сопротивлением изоляции и емкостью сети относительно земли.

1.3. Защитное заземление. Металлические части электрических установок, нормально изолированные от токоведущих частей, при повреждении изоляции оказываются под напряжением относительно «земли». В этих аварийных условиях прикосновение человека к нетоковедущим частям установок (рис. 5) равноценно прикосновению к токоведущим частям ($I_3 = I_ч$) и исход электротравмы в сетях с изолированной нейтралью определяется параметрами сети.

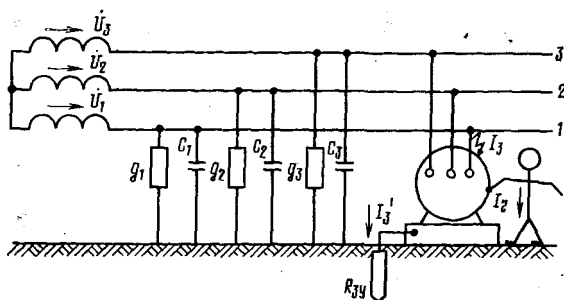


Рис. 5. Схема прикосновения человека к заземленному корпусу электроустановки

Для защиты человека при переходе напряжения на нетоковедущие части установок применяют защитное заземление.

Защитным заземлением называется преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Защитное заземление осуществляется с помощью специальных заземляющих устройств (ЗУ).

Назначение ЗУ заключается в том, чтобы создать между корпусом и землей соединение с достаточно малым сопротивлением. Согласно ПУЭ в электроустановках напряжением до 1000 В сопротивление ЗУ $R_{зу}$ не должно превышать 4 Ом. При мощности источника 100 кВА и менее сопротивление ЗУ может быть увеличено до 10 Ом.

В электроустановках напряжением выше 1000 В сопротивление ЗУ нормируется в зависимости от величины однофазного тока замыкания на землю I_3 . При токах $I_3 \geq 500$ А,

$$R_{зу} \leq 0,5 \text{ Ом}; \text{ при } I_3 \leq 500 \text{ А}, R_{зу} \leq \frac{250}{I_3}, \text{ но не более } 10 \text{ Ом}.$$

Так как сопротивление человека значительно больше сопротивления ЗУ и включено параллельно ему, то можно считать, что $I_3 = I_3'$ (см. рис. 5), а ток, проходящий через тело человека, определять по формуле

$$I_ч = I_3 \frac{R_{зу}}{R_ч}. \quad (10)$$

Ток замыкания находят по выражениям (2)—(4), (6), (8), (9), в которых вместо величины сопротивления тела человека фигурирует сопротивление ЗУ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Ознакомиться с руководством, со всеми элементами управления и измерительными приборами стенда, моделирующего электрическую сеть с изолированной нейтралью (указания на рабочем месте лабораторной работы).

2.2. Определить критические сопротивления изоляции фаз короткой воздушной линии ($C = 0$) для заданных условий электробезопасности. Условия электробезопасности задаются

преподавателем по вероятности возникновения одной из ответных реакций организма человека на электрический ток. Из рис. 1, 2 или 3 исследователь находит допустимый для человека ток в мА.

Преподавателем задается также напряжение сети и сопротивление изоляции фазы R_1 , которой касается человек (от 1 до 100 кОм).

Изменяя параметры изоляции двух других фаз, добиться значения тока I_q , равного найденному допустимому. Таким образом найти 5—6 соотношений различных уровней сопротивлений изоляции. Полученные значения занести в табл. 3.

Таблица 3

Критические сопротивления изоляции фаз для $I_q =$ мА

кОм $R_1 =$	Номер эксперимента	R_2 , кОм	R_3 , кОм
		1	
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		

Для получения вывода об условиях электробезопасности данной сети преобразовать сопротивление изоляции в проводимость фаз $g_i = \frac{1}{R_i}$, где g_i (мСм), R_i (кОм). Вычислить

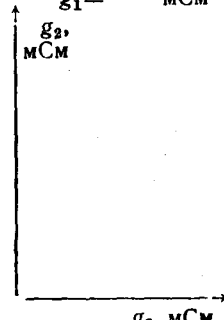
суммарную проводимость фаз, которых не касается человек $\Sigma g_{2,3} = g_2 + g_3$, а также установить среднюю суммарную проводимость по всем экспериментам $\Sigma g_{2,3 \text{ ср}}$. Данные этих расчетов представить в виде табл. 4 и графика критических проводимостей фаз.

Таблица 4

График критических проводимостей фаз для
 $I_q = \text{мА}$;
 $g_1 = \text{мСм}$

Критические проводимости фаз для $I_q = \text{мА}$

мСм $g_1 =$	Номер эксперимента	$g_2, \text{мСм}$	$g_3, \text{мСм}$	$\Sigma g_{2,3}, \text{мСм}$	мСм $\Sigma g_{2,3} \text{ ср} =$
		1			
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				



Вывод: _____

2.3. Определить длину кабельной линии по критическим емкостям фаз. На стенде собирают схему замещения кабельной линии, т. е.

$$g_1 = g_2 = g_3 = 0; C_1 = C_2 = C_3 = C.$$

Изменяя емкость C , снимают несколько значений тока I_q . При этом в диапазон изменения величины тока, проходящего через тело человека, должно войти значение допустимого тока по заданным условиям электробезопасности.

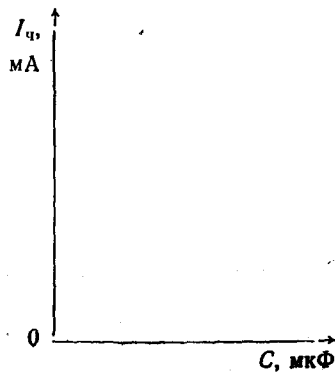
Данные эксперимента представить в табл. 5 и построить график $I_q = f(C)$.

Таблица 5

График зависимости
 $I_q = f(C)$ при $U = \text{В}$

Зависимость тока через тело человека от емкости сети

Номер эксперимента	$C_1 = C_2 = C_3 = C, \text{мкФ}$	$I_q, \text{мА}$
1		
2		
3		
4		
5		



Из полученного графика для $I_{\text{ч}}$, равного допустимому, определить критическую емкость и сравнить ее с расчетной, вычисленной по формуле (7).

Из соотношения $C = C_0 \cdot l$ и данных табл. 1 определить критическую длину кабельной линии для заданных условий электробезопасности.

Вывод: _____

2.4. Изучить принцип действия защитного заземления. На стенде смоделировать замыкание фазы сети на корпус электроустановки, которой касается человек. Параметры сети $R_{\text{из}}$ и C установить критические, полученные в 2.2 и 2.3. По формуле (9) рассчитать значение тока через тело человека и сравнить его с полученными в опыте.

Включить сопротивление защитного заземления и снять зависимости $I_3 = f(R_{\text{ЗУ}})$ и $I_{\text{ч}} = f(R_{\text{ЗУ}})$. Данные занести в табл. 6.

Таблица 6

Зависимость тока через тело человека от сопротивления заземления

Номер эксперимента	$R_{\text{ЗУ}}, \text{Ом}$	$I_3, \text{мА}$	$I_{\text{ч}}, \text{мА}$
1	∞		
2			
3			
4			
5			
6			

Построить графики $I_3, I_{\text{ч}} = f(R_{\text{ЗУ}})$ и сделать выводы.

Выводы: _____

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какая величина сопротивления тела человека является расчетной при оценке условий электробезопасности?
2. Какова зависимость тока через тело человека от сопротивления заземляющего устройства при касании корпуса поврежденного электрооборудования?
3. Как определяется ток замыкания на землю?
4. Какие факторы определяют ток через тело человека при однофазном прикосновении в трехфазной сети с изолированной нейтралью?
5. В каких сетях с изолированной нейтралью емкостная проводимость является определяющей условия электробезопасности?
6. Какая часть тока замыкания на землю пройдет через тело человека при $R_{3y} = 100$ Ом?
7. Поясните, почему в реальной линии с конечными параметрами активной и емкостной проводимостями при $R_{кр}$ и $C_{кр}$ ток через тело человека превысит допустимый ток, по величине которого определялись отдельно критическое сопротивление изоляции воздушной линии и критическую емкость кабельной линии?
8. Какова роль защитного заземления оборудования в сетях с изолированной нейтралью?
9. Какими условиями определяется уровень изоляции электроустановок?
10. От каких параметров сети зависит ток замыкания на землю; на корпус заземленного оборудования?
11. Дать оценку току через человека в 10; 20; 50; 100 мА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергия, 1979, 408 с.
2. Найфельд М. Р. Заземление и защитные меры безопасности. М.: Энергия, 1971, 311 с.
3. Равикович И. Д. Техника безопасности в передвижных электроустановках. М.: Энергия, 1976, 144 с.
4. Сколотнев Н. Н., Свиридов В. Л. Некоторые вопросы электробезопасности в сетях с изолированной нейтралью. М.: Тр. МИИТа, вып. 411, 1972, с. 132—138.