

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Кафедра «Производственная безопасность, экология и химия»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ  
ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине БЖД  
для студентов всех специальностей

Нижний Новгород  
2014

1

Составители: И.В. Гейко, О.В. Маслеева

УДК 658.345.43

Исследование электробезопасности трехфазных сетей переменного тока напряжением до 1000 В: Метод. указания к лаб. работе по курсу БЖД для студентов всех специальностей /НГТУ; Сост.: И.В. Гейко, О.В. Маслеева. Н.Новгород, 2013. 14 с.

# 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценить опасность прямого прикосновения человека к фазным проводам электрических сетей напряжением до 1 кВ. Определить влияние активного сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли на опасность поражения человека электрическим током при нормальном и аварийном режимах работы сети с изолированной и глухозаземленной нейтралью.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Действие электрического тока на организм человека

Опасность электрического тока усугубляется тем, что человек не в состоянии без специальных приборов обнаружить напряжение электрического тока дистанционно. Опасность обнаруживается слишком поздно – когда человек уже поражен.

Условием поражения человека электрическим током является его прикосновение к двум точкам электрической цепи с разными потенциалами.

**Электротравма** – травма, вызванная воздействием электрического тока или электрической дуги.

**Электрический удар** – электротравма, проявляющаяся в возбуждении живых тканей организма протекающим через него электрическим током. При этом наступают судороги мышц или других тканей, шок, паралич дыхания, нарушение деятельности сердца и кровообращения.

Опасность поражения человека определяется величиной тока, проходящего через тело человека. В зависимости от реакции организма на ток можно выделить следующие его значения.

**Пороговый осязаемый ток** – наименьшее значение электрического тока, вызывающего при прохождении через организм осязаемые раздражения. Для тока промышленной частоты ( $f=50$  Гц) значение порогового осязаемого тока составляет 1 мА.

**Пороговый неотпускающий ток** – наименьшее значение электрического тока, вызывающего при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник. Человек при этом не может самостоятельно освободиться от проводника. Величина этого тока составляет 10 мА.

**Пороговый фибрилляционный ток** – наименьшее значение электрического тока, вызывающего при прохождении через органы человека фибрилляцию сердца. Кровообращение останавливается. Сердце человека самостоятельно выйти из этого состояния не может, через несколько минут наступает смерть. Величина этого тока составляет 50 мА.

Переменный ток свыше 100 мА считается **смертельным**.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от различных факторов:

- От сопротивления тела человека.

Электрическое сопротивление человека складывается из сопротивления кожи и внутренних органов. Кожа обладает большим сопротивлением и определяет общее сопротивление человека. При сухой и неповрежденной коже сопротивление тела человека составляет 2 000 - 2 000 000 Ом. При увлажненной, загрязненной и поврежденной коже сопротивление тела сокращается до 300-500 Ом, т.е. до сопротивления внутренних органов. При расчетах сопротивление человека принимается равным 1000 Ом.

- От величины напряжения, действующего на человека.
- От рода и частоты тока.

Постоянный ток безопаснее, чем переменный ток промышленной частоты (50 Гц) примерно в 4-5 раз. Это справедливо до напряжения 500 В, свыше 500 В постоянный ток становится опаснее.

- От продолжительности воздействия электрического тока.

При увеличении продолжительности воздействия электрического тока сопротивление тела человека падает вследствие усиления кровообращения участков кожи под электродами и потовыделения. При этом ток может возрасти до значения, способного вызвать остановку сердца. Допустимое время воздействия при напряжении 220В составляет 0,2сек.

- От условий внешней среды.

Параметры микроклимата в производственных помещениях влияют на сопротивление тела человека. Увеличение температуры, влажности, снижение подвижности воздуха приводят к снижению сопротивления кожных покровов.

- От индивидуальных свойств человека.

## **2.2. Анализ опасности поражения током в электрических сетях**

Степень опасности прикосновения человека к открытым незаземленным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением, зависит от вида прикосновения, вида электрической сети, режима работы сети (нормальный и аварийный).

Прикосновение может быть:

- однофазным, когда человек касается одной фазы электросети;
- двухфазным, когда человек касается двух фаз электросети.

Согласно ПУЭ (Правил устройства электроустановок) при напряжении до 1000 В применяют следующие виды электрических трехфазных сетей:

- трехпроводная с изолированной нейтралью (рис. 1, а);
- четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью (рис. 1, б).

Изолированной называется нейтраль генератора или трансформатора, не присоединенная к заземляющему устройству.

Глухозаземленной называется нейтраль генератора или трансформатора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через ма-

лое сопротивление  $r_0$ .

При нормальном режиме работа трехфазной сети с любым режимом нейтрали потенциал нулевой точки равен нулю. Между нулевой точкой (нейтралью -  $N$ ) и любым фазным проводом ( $A, B, C$ ) действует фазное напряжение  $U_\phi$ . Так как нулевой проводник  $O$  в системе с глухозаземленной нейтралью непосредственно соединен с нейтралью, то между ним и любой фазой также действует фазное напряжений. Между фазными проводами действует линейное напряжение  $U_\pi$ .

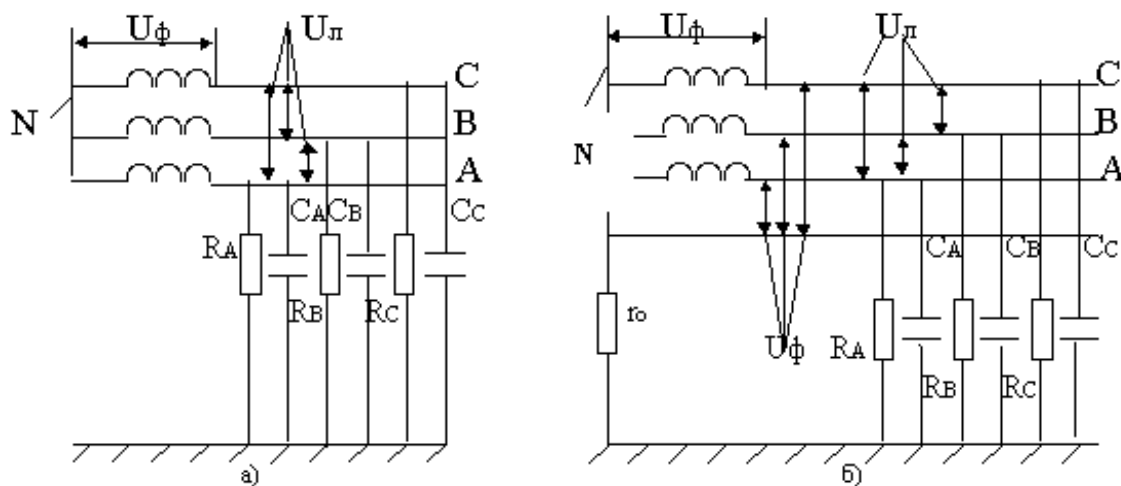


Рис. 1. Виды электрических трехфазных сетей:

*а* — трех проводная с изолированной нейтралью;

*б* — четырех проводная с глухозаземленной нейтралью;

$A, B, C$  — фазы;

$O$  — защитный нулевой проводник;

$N$ —нейтраль;

$U_\phi$ —фазное напряжение;

$U_\pi$ —линейное напряжение;

$R_A, R_B, R_C$  — активное сопротивление изоляции фаз ( не менее  $0,5\text{Мом}$ );

$C_A, C_B, C_C$  — емкости фаз относительно земли;

$r_0$  — сопротивление заземления нейтрали ( $4\text{ Ом}$ )

Наибольшее распространение получили трехфазные сети, у которых линейное напряжение  $U_\pi = 380\text{ В}$ , фазное  $U_\phi = 220\text{ В}$ , а между линейным и фазным напряжениями существует зависимость  $U_\pi = U_\phi \sqrt{3}$ .

Идеальной изоляции, т.е. такой, у которой сопротивление относительно земли бесконечно велико, в практике не существует. Поэтому на каждом участке длины провода изоляция имеет конечное активное сопротивление ( $R_A, R_B, R_C$ ) Кроме того, каждый участок провода имеет емкость относительно земли ( $C_A, C_B, C_C$ ).

### 2.2.1. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

В нормальном режиме работы при однофазном прикосновении (рис. 2а) величина тока, проходящего через человека (для случая симметричного сопротивления изоляция фаз, т.е.  $R_A=R_B=R_C=R$  и  $C_A=C_B=C_C=C$ ), определится выражением в комплексной форме

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + Z/3},$$

где  $R_h$  - сопротивление тела человека, Ом;

$Z$  - полное сопротивление одной фазы относительно земли, Ом.

$$Z = \frac{R_{из}}{(1 + j\omega CR_{из})}.$$

Здесь  $R_{из}$  - активное сопротивление изоляции, Ом;

$\omega$  - угловая частота;

$C$  - емкость провода относительно земли, Ф.

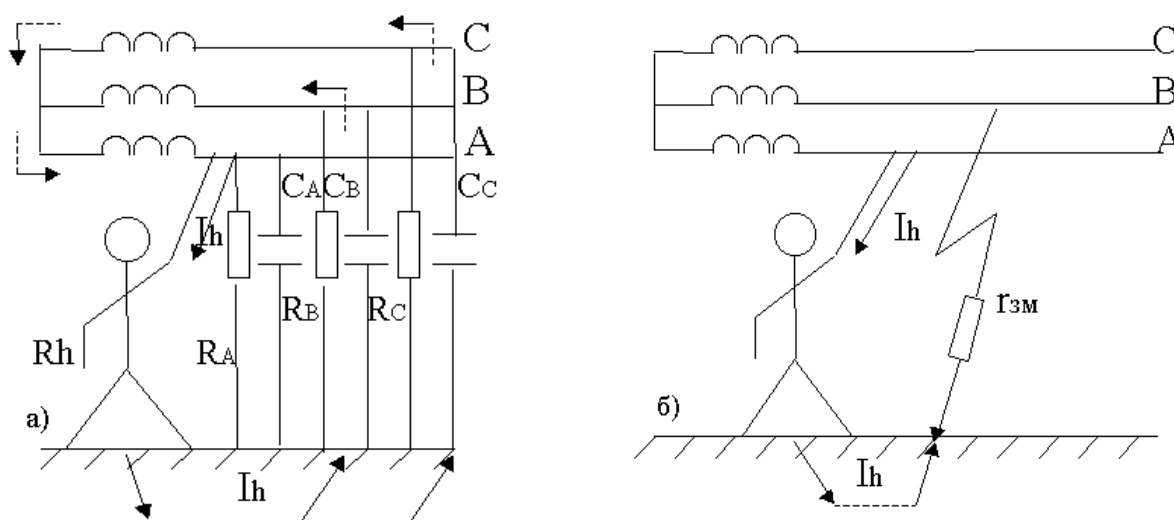


Рис. 2. Прикосновение человека к проводу трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью: а - нормальный режим; б - аварийный режим

Для воздушных сетей малой протяженности емкость проводов относительно земли незначительна ( $C=0$ ), тогда величина тока, протекающего через человека, выразится зависимостью:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + R_{из}/3}.$$

При  $U_\phi = 220$  В,  $R_h=1000$  Ом,  $R_{из} = 500\,000$  Ом сила тока через человека  $I_h=1$  мА, т.е. не опасна (пороговый ощутимый ток).

При использовании кабельных линий емкости проводов относительно земли и сопротивления изоляции имеют очень большое значение ( $C \neq 0$ ;  $R_{из} = \infty$ );

тогда сила тока, протекающего через человека,

$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + (X_c/3)^2}},$$

где  $X_c=1/\omega C$  - емкостное сопротивление изоляции проводов, Ом.

Из рассмотренных выражений следует, что величина тока, проходящего через человека, зависит от активного сопротивления изоляции (характерно для воздушных сетей) и емкостного сопротивления изоляции проводов (характерно для кабельных сетей).

В аварийном режиме, когда одна из фаз замкнута на землю через малое сопротивление  $r_{3M}$ , человек, прикасаясь к другой фазе, оказывается включенным между двух фаз (рис. 2, б).

Величина тока, проходящего через человека,

$$I_h = \frac{U_\phi \sqrt{3}}{R_h + r_{3M}}.$$

При  $U_\phi=220$  В,  $R_h = 1000$  Ом,  $r_{3M}=0$  величина тока через человека  $I_h=380$  мА, т.е. смертельна.

В аварийном режиме величина тока, проходящего через человека, резко возрастает, т.к. защитная роль сопротивлений изоляции сводится к нулю (т.к.  $r_{3M} \ll R_{из}$ ). Следовательно, в аварийном режиме значительно увеличивается опасность поражения электрическим током.

### 2.2.2. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью

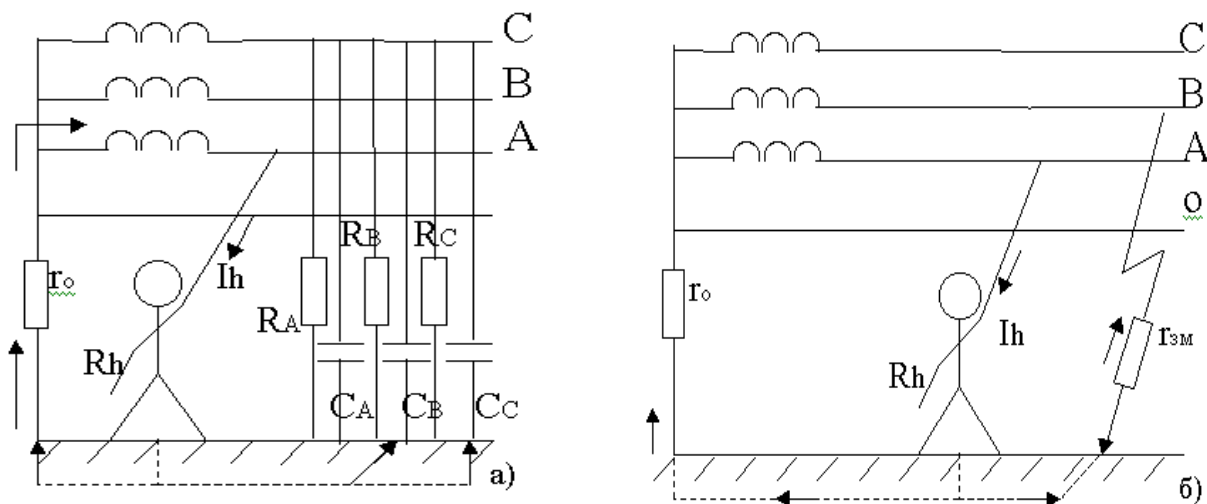


Рис. 3. Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью:  
а - нормальный режим; б - аварийный режим

В нормальном режиме при однофазном прикосновении (рис. 3, а) величина тока, проходящего через человека, определится выражением

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + r_0},$$

то есть величина тока через человека зависит только от сопротивления человека и не зависит от качества изоляции. При  $U_\phi=220$  В,  $R_h=1000$  Ом,  $r_0=4$  Ом величина тока через человека  $I_h=220$  мА, т.е. смертельна.

В аварийном режиме одна из фаз замкнута на землю через малое сопротивление  $r_{3M}$  (рис. 3, б).

Если величина  $r_{3M} \approx r_0$ , то величина тока, проходящего через человека,

$$I_h = \frac{U_\phi (r_{3M} + r_0 \sqrt{3})}{r_{3M} r_0 + R_h (Z_{3M} + r_0)} = \frac{U_\phi \cdot 1,35}{R_h}.$$

Возрастание тока повышает опасность сети с глухозаземленной нейтралью в аварийном режиме по сравнению с нормальным режимом работы.

### 2.2.3. Двухфазное прикосновение человека

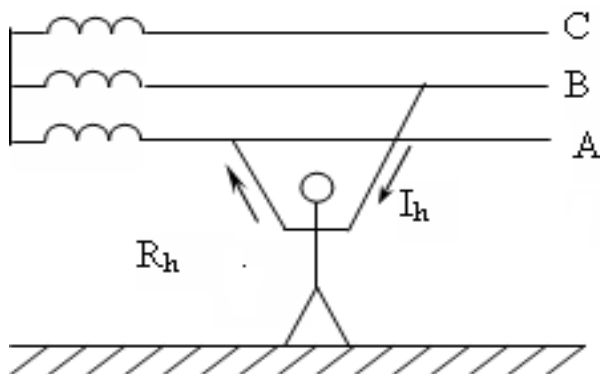


Рис.4. Двухфазное прикосновение человека

Величина тока через человека при двухфазном прикосновении не зависит от режима нейтрали и сопротивления изоляции, а определяется только линейным напряжением и сопротивлением человека:

$$I_h = \frac{U_L}{R_h}$$

При  $U_L=380$  В,  $R_h=1000$  Ом сила тока через человека  $I_h=380$  мА, т.е. смертельна.

### 2.4. Краткие выводы

Сравнительная оценка двух видов фазных сетей показывает следующее:

1. Однофазное прикосновение к сети с изолированной нейтралью с ма-



лой емкостью и высоким сопротивлением изоляции безопаснее, чем прикосновение к сети с глухозаземленной нейтралью.

2. Однофазное прикосновение в период аварийной работы сети с изолированной нейтралью значительно опаснее, чем в сети с глухозаземленной нейтралью, т.к. защитная роль изоляции сводится к нулю и резко возрастает ток через человека.

3. Опасность поражения при двухфазном прикосновении не зависит от режима нейтрали, и этот случай является наиболее опасным.

### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Стенд (рис. 5), на котором выполняется работа, позволяет моделировать трехфазные сети с изолированной нейтралью (тумблер В3 отключен) и глухозаземленной нейтралью (тумблер В3 включен).

Вместо реально существующих распределенных сопротивлений изоляции и емкости фаз на стенде предусмотрены сосредоточенные сопротивления изоляции  $R_A, R_B, R_C$  и емкости  $C_A, C_B, C_C$  меняя которые можно получить сети с различными параметрами.

Тело человека имитируется активным сопротивлением  $R_A$ ; переключателем П1 меняем фазу прикосновения к сети. Ток через человека измеряется миллиамперметром.

Стенд позволяет выполнить аварийный режим работы сети, включением тумблера В4, т.е. замыкание на землю одной фазы с помощью переключателя П2.

Положение тумблеров В3 и В4: вверх - «включено», вниз – «выключено».

Таблица 1 Основные величины элементов схемы

Сопротивление Изоляции фаз	Емкость фаз	Сопротивление тела человека
$R_1=R_4=R_7=1 \text{ кОм}$	$C_1=C_4=C_7=0,3\text{мкФ}$	$R_{10}=0,5\text{кОм}$
$R_2=R_5=R_6=3 \text{ кОм}$	$C_2=C_5=C_8=0,5\text{мкФ}$	$R_{11}=1\text{кОм}$
$R_3=R_6=R_9=5 \text{ кОм}$	$C_3=C_6=C_9=2,0\text{мкФ}$	$R_{12}=0 \text{ кОм}$

### 4. ОХРАНА ТРУДА

1. При выполнении данной лабораторной работы необходимо выполнять требования по технике безопасности, общие для лаборатории.

2. Внешним осмотром убедиться в исправности состояния испытательного стенда.

3. К стенду подведено напряжение 380/220 В, поэтому студенты должны внимательно изучить теоретическую часть лабораторной работы и включать стенд только с разрешения преподавателя или лаборанта.

4. При наличии неисправности испытательный стенд отключить от сети и поставить в известность преподавателя.

## 5. АДАННИЕ К РАБОТЕ

Таблица 2

№	Устанавливаемые величины	Варианты		
		1	2	3
1	$R_A=R_B=R_C$ , кОм $C_A=C_B=C_C$ , мкФ Человек касается фазы	1 0,3 А	4 0,3 В	1 0,3 С
2	$R_h$ , кОм Человек касается фазы $C_A=C_B=C_C$ , мкФ	0,5 А 0,3	1,0 В 0,3	0,5 С 0,3
3	$R_h$ , кОм Человек касается фазы $R_A=R_B=R_C$ , кОм	0,5 А 1	1,0 В 3	0,5 С 1
4	$R_A = R_B= R_C$ , кОм $C_A = C_B= C_C$ , мкФ $R_A$ , к Ом человек касается фазы аварийный режим фазы	1 0,3 0,5 А В	3 0,3 1,0 В С	1 0,6 0,5 С А

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**6.1. Анализ опасности поражения человека электрическим током при прикосновении к фазному проводу трехфазной сети при нормальном режиме работы сети в зависимости от сопротивления человека**

Включить стенд (загорается сигнальная лампа).

- включить заданные (таблица 2) активные сопротивления и емкости с помощью переключателей  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  и  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ;
- переключателем П1 имитировать подключение человека к заданной фазе;
- меняя переключателем  $R_h$  сопротивление человека, записать величину тока для системы с изолированной и глухозаземленной нейтралью.

**6.2. Анализ опасности поражения человека электрическим током при прикосновении к фазному проводу трехфазной сети при нормальном режиме работы сети в зависимости от активного сопротивления изоляции фазных проводов**

- включить заданные емкости фаз  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ;
- включить заданное сопротивление человека переключателем  $R_h$ ;
- переключателем П1 имитировать подключение человека к заданной фазе;

- симметрично увеличивая сопротивление изоляции (с помощью переключателей  $R_A, R_B, R_C$ ) фаз, записать величину тока через человека в системе с изолированной и глухозаземленной нейтралью

**6.3. Анализ опасности поражения человека электрическим током при прикосновении к фазному проводу трехфазной сети при нормальном режиме работы сети в зависимости от емкости фазных проводов относительно земли**

- включить заданные активные сопротивления изоляции переключателями  $R_A, R_B, R_C$  ;  
- включить заданное сопротивление человека переключателем  $R_h$ ;  
- переключателем П1 имитировать подключение человека к заданной фазе;  
- симметрично изменяя емкости фаз (с помощью переключателей  $C_A, C_B, C_C$ ), записать величину тока через человека в системе с изолированной и глухозаземленной нейтралью.

**6.4. Анализ опасности поражения человека электрическим током при прикосновении человека к фазному проводу трехфазной сети при аварийном режиме работы сети (замыкание одного из фазных проводов на землю)**

- включить заданные активные сопротивления и емкости с помощью переключателей  $R_A, R_B, R_C$  и  $C_A, C_B, C_C$ ;  
- включить заданное сопротивление человека переключателем  $R_h$ ;  
- переключателем П1 имитировать подключение человека к заданной фазе;  
- для нормального режима работы сети записать ток через человека в системе с изолированной и глухозаземленной нейтралью;  
- имитировать аварийный режим работы сети, включив тумблер В4.

Заданную фазу с помощью переключателя П2 замкнуть на землю. Для системы с изолированной и глухозаземленной нейтралью записать величину тока через человека.

Отключить стенд от сети.

Данные замеров занести в таблицу 3.

Таблица 3

	Параметр, влияющий на ток через человека	Ток через человека, мА, при режиме нейтрали	
		изолированная	глухозаземленная
1	Сопротивление человека R10= R11= R12=		
2	Активные сопротивления изоляции R1=R4=R7= R2=R5=R8= R3=R4=R9=		
3	C1=C4=C7= C2=C5=C8= C3=C6=C9=		
4	Режим работы сети Нормальный аварийный		

## 7. УКАЗАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен включать в себя:

- цель работы;
- полученные результаты в виде таблицы;
- графики зависимости величины тока через человека от
- ✓ сопротивления человека;
- ✓ активного сопротивления изоляции;
- ✓ емкости фаз;
- выводы об опасности поражения электрическим током в трехфазных сетях с изолированной и глухозаземленной нейтралью на основании анализа полученных результатов (рис.2а) ;
- схемы сетей с изолированной и глухозаземленной нейтралью (рис.3а).

## 8 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Князевский Б.А. и др. Охрана труда в электроустановках. -М: Энергоатомиздат, 1983. 240 с.
2. Охрана труда в машиностроении / Под ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова. –М.: Машиностроение, 1983. - 432 с.
3. Правила устройства электроустановок, введенные приказом Минтруд и соцзащиты № 328н от 24.07.2013 г.
4. Долин П.А. Электробезопасность. -М.: Гардарики, 2003. 215 с.

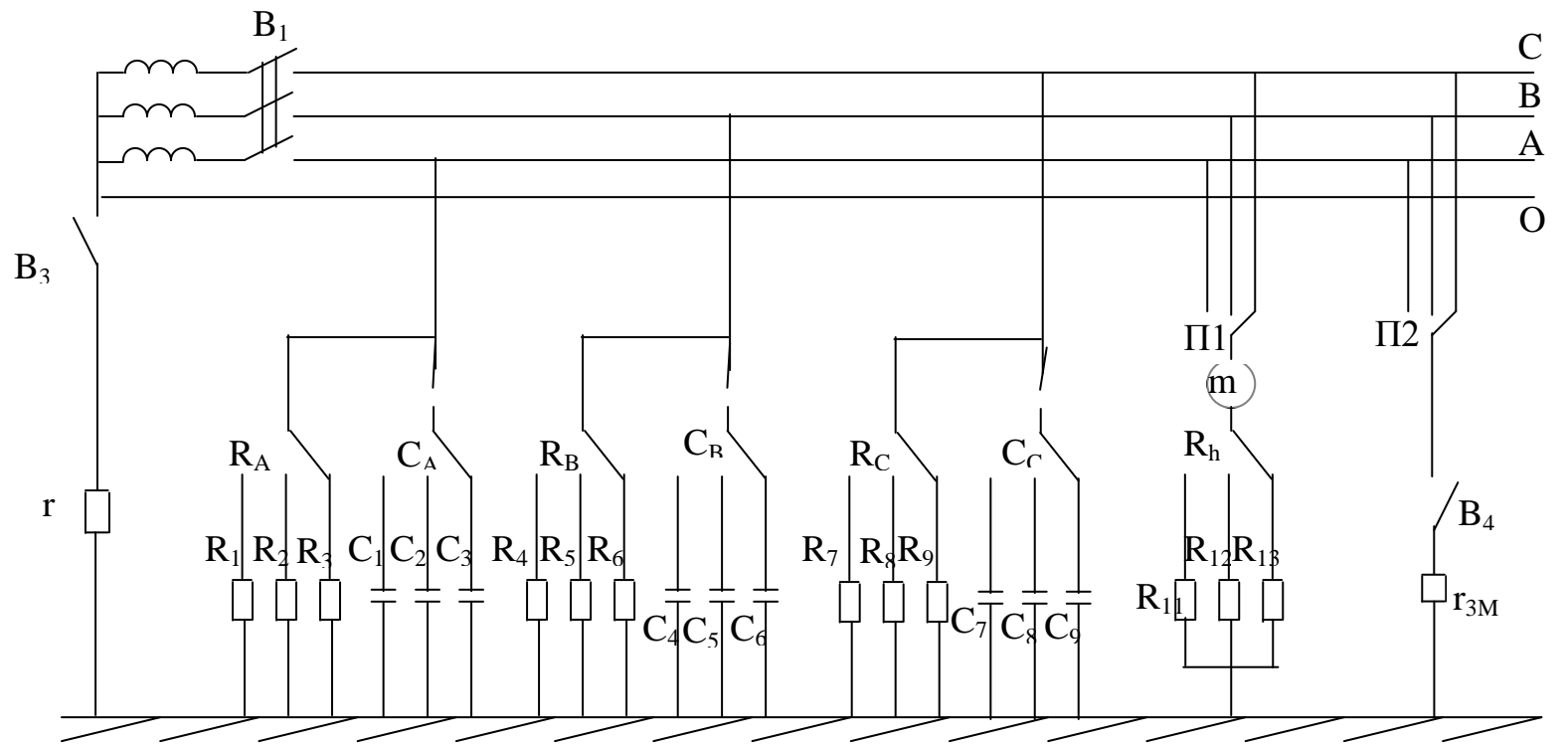


Рисунок 5