

Цена 21 руб.

913(7.5)  
Б-16

МОСКОВСКИЙ  
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ)



Н.А.ЕВСТИГНЕЕВА

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

Методические указания  
к лабораторной работе по курсу  
"Безопасность жизнедеятельности"

МОСКВА 2005

БЖБ/2

25.10.11 4808  
27.02.12 4302  
180912 180912

МОСКОВСКИЙ  
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра инженерной экологии

Утверждаю

Зав. кафедрой профессор  
*Григорьев В. Трофименко*

"19" марта 2005 г.

Н.А.ЕВСТИГНЕЕВА

# АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Методические указания  
к лабораторной работе по курсу  
"Безопасность жизнедеятельности"

Р К  
БИБЛИОТЕКИ  
МАДИ (ГТУ)

МОСКВА 2005

Настоящие методические указания содержат сведения о характере воздействия электрического тока на организм человека и факторах, определяющих исход такого воздействия. Изложена методика проведения лабораторной работы на стенде БЖ 6/1, обеспечивающей возможность моделирования трехфазных сетей переменного тока напряжением до 1000 В и их оценки по условиям электробезопасности.

Методические указания соответствуют программе курса «Безопасность жизнедеятельности» МАДИ (ГТУ) и предназначены для студентов всех специальностей.

© Московский автомобильно-дорожный институт (государственный технический университет), 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация основного и вспомогательного промышленного оборудования связана с применением опасной для человека электрической энергии. Одной из важных составляющих обеспечения безопасности на производстве является грамотный выбор схемы электрической сети, питающей силовую и осветительную нагрузки.

*Цель настоящей лабораторной работы* – закрепление на практике теоретических знаний, полученных студентами при изучении курса «Безопасность жизнедеятельности», об опасности поражения человека током в различных электрических сетях. Объектом изучения являются широко распространенные типы трехфазных сетей переменного тока напряжением до 1000 В:

- трехпроводная с изолированной нейтралью;
- четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью.

В ходе выполнения работы перед студентами ставятся следующие задачи:

- сравнить опасность прямого прикосновения человека к исправным фазным проводам электрических сетей при нормальном и аварийном режимах работы сетей;
- определить влияние активного сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли на опасность поражения человека электрическим током при нормальном режиме работы сетей.

Повысить активность студентов в выполнении работы позволит использование индивидуальных заданий для каждого учащегося с последующим контролем преподавателем.

# 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. Действие электрического тока на организм человека

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний и своеобразный характер. Электрический ток, проходя через организм человека, оказывает *термическое, электролитическое, механическое и биологическое* действия, вызывая *электролитравмы* (рис. 1).

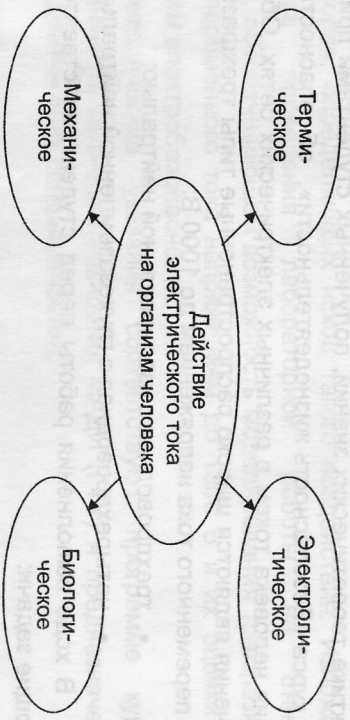


Рис. 1. Действие электрического тока на организм человека

**Термическое действие** тока проявляется *ожогами отдельных участков тела, нагревом до высокой температуры органов (кровеносных сосудов, нервов, сердца, мозга и др.), расположенных на пути тока, вызывая в них значительные функциональные расстройства*.

**Электролитическое действие** тока выражается в *разложении органической жидкости организма (крови, лимфы и др.) и нарушении ее физико-химического состава*.

**Механическое действие** тока приводит к *расслоению, разрыву тканей организма в результате электродинамического эффекта, а также мгновенного взрывоподобного образования пара из тканевой жидкости и крови*.

**Биологическое действие** тока проявляется *раздражением*

и возбуждением живых тканей организма, что сопровождается *непроизвольными судорожными сокращениями, а также нарушениями внутренних биологических процессов*.

На производстве число травм, вызванных электрическим током, относительно невелико и составляет 2...5 % их общего количества, однако из всех случаев травм со смертельным исходом на долю электротравм приходится наибольшее количество (порядка 40%). До 80% всех случаев поражения электрическим током со смертельным исходом приходится на электроустановки до 1000В (в первую очередь, работающие под напряжением 220...380 В).

**Электротравмы** условно разделяют на *общие и местные* (рис. 2).

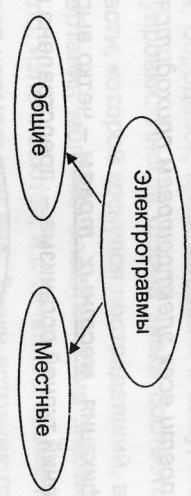


Рис. 2. Классификация электротравм

К **общим электро травмам** относятся *электрические удары, при которых процесс возбуждения различных групп мышц может привести к судорогам, остановке дыхания и сердечной деятельности. Остановка сердца связана с фибрилляцией — хаотическим и разновременным сокращением отдельных волокон сердечной мышцы (фибрилл), в результате которого сердце теряет способность перекачивать кровь, в организме прекращаются процессы кровообращения и дыхания и наступает смерть*.

**Общие электрические травмы, или электрические удары, по тяжести последствий бывают четырех степеней:**

- **I степень** характеризуется судорожным сокращением мышц без потери сознания;
- **II степень** — сокращением мышц с потерей сознания, но с со-

хранением дыхания и работы сердца;

• III степень — потерей сознания и нарушением сердечной деятельности или дыхания (или того и другого сразу);

• IV степень — клинической (минимой) смерти, то есть отсутствием дыхания и кровообращения (обычно 4...5 мин, иногда 7...8 мин). Человек не реагирует на болевые раздражители, а зрачки его глаз (резко расширенные) — на воздействие света. Длительность периода клинической смерти определяется временем с момента прекращения сердечной деятельности и дыхания до начала гибели клеток коры головного мозга. По истечении периода клинической смерти наступает биологическая (истинная) смерть, победить которую невозможно.

*Более трети всех электротравм приходится на электрические удары.*

Классификация местных травм — четко выраженных местных повреждений тканей организма — представлена на рис. 3.

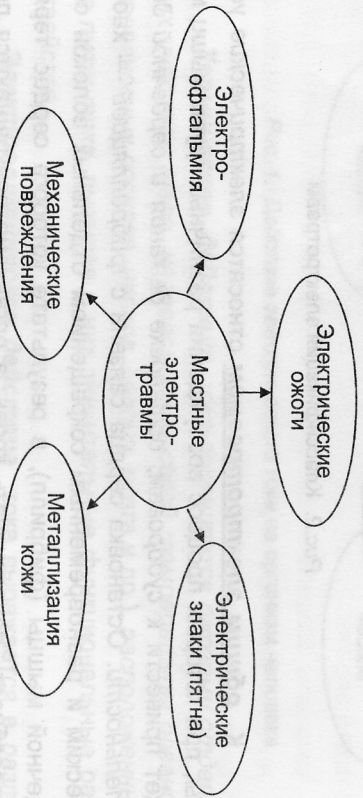


Рис. 3. Классификация местных электротравм

Электрические ожоги вызываются протеканием тока через тело человека, особенно при непосредственном контакте тела с электрическим проводом (токовый или контактный ожог), а также воздействием на тело человека электрической дуги (дуговой ожог),

температура которой достигает нескольких тысяч градусов. В первом случае ожог является сравнительно легким (покраснение кожи, образование пузырей). Ожоги, вызванные электрической дугой, носят, как правило, тяжелый характер (омертвление пораженного участка кожи, обугливание, сторание тканей). Приблизительно 2/3 всех электротравм сопровождается ожогами.

На коже в тех местах, где проходил электрический ток, появляются электрические знаки, представляющие собой уплотненные участки серого или бледно-желтого цвета. Обычно имеют круглую или овальную форму и размеры 1...5 мм с углублением в центре. Встречаются знаки и в виде царапин, небольших ран, как бы порезов или ушибов, бороздавок, кровоизлияний в кожу, мозолей и мелкоточечной татуировки. Иногда форма знака соответствует форме токоведущей части, которой коснулся пострадавший, а также может напоминать очертания молнии. Электрические знаки безболезненны и, как правило, излечиваются, и с течением времени пораженная кожа приобретает нормальный вид. Знаки встречаются примерно у каждого пятого, получившего электротравму.

Металлизация кожи связана с проникновением в нее мельчайших частиц металла при его расплавлении под влиянием чаще всего электрической дуги. Металл проникает неглубоко, задерживаясь в верхних слоях кожи. Пораженный участок кожи имеет шероховатую, жесткую поверхность. Иногда наблюдается покраснение кожи, вызванное ожогом за счет тепла металлических частиц. Пораждавший ощущает на пораженном участке напряжение кожи от присутствия в ней инородного тела, а в некоторых случаях испытывает боль от ожогов. Обычно с течением времени болящая кожа сходит, пораженный участок приобретает нормальный вид; исчезают болезненные ощущения. Лишь при поражении глаз лечение может оказаться длительным и сложным, а в некоторых случаях и безрезультатным. Металлизация кожи встречается приблизительно у каждого десятого пострадавшего, при этом в большинстве слу-

чаев одновременно с металлизацией происходит ожог электрической дугой.

Механические повреждения органов и тканей человеческого тела (разрывы кожи, кровеносных сосудов и нервов, вывихи суставов, переломы костей и др.) в результате судорожных сокращений мышц, вызываемых действием тока, возникают довольно редко. Как правило, это серьезные травмы, требующие длительного лечения.

Электроофтальмия – воспаление наружных слизистых оболочек глаз вследствие мощного ультрафиолетового излучения электрической дуги. Развивается спустя 2..6 ч после облучения. При этом имеют место покраснение и воспаление слизистых оболочек век, слезотечение, гнойные выделения из глаз, спазмы век и частичное ослепление. Пострадавший испытывает сильную головную боль и резкую боль в глазах, усиливающуюся на свету, то есть возникает так называемая светобоязнь. Обычно болезнь продолжается несколько дней, однако в ряде случаев лечение этого професионального заболевания сложно и длительно. Возможно повреждение роговой оболочки, что особенно опасно.

### 1.2. Факторы, определяющие тяжесть поражения человека электрическим током

Исход поражения человека электротоком зависит от многих факторов:

- силы тока (основной фактор);
- характеристики тока (переменный или постоянный);
- времени прохождения тока через организм;
- пути тока в теле человека;
- характеристики помещений и условий работы (наличие в помещении токопроводящих полов и пыли, повышенной влажности и температуры и др.);

- индивидуальной качества человека.

Физическим фактором, вызывающим тяжесть электротравмы, является сила тока. Ток, проходящий через тело человека, зависит от напряжения прикосновения, под которым оказался пострадавший, и электрического сопротивления тела человека. Величину тока, проходящего через тело человека ( $I_{чел}$ , А), условно определяют по закону Ома:

$$I_{чел} \approx \frac{U_{пр}}{R_{чел}}, \quad (1)$$

где  $U_{пр}$  – приложенное напряжение (напряжение прикосновения), В;  
 $R_{чел}$  – сопротивление тела человека, Ом.

Электрическое сопротивление тела человека представляет собой сумму сопротивлений кожи и внутренних тканей (рис. 4).

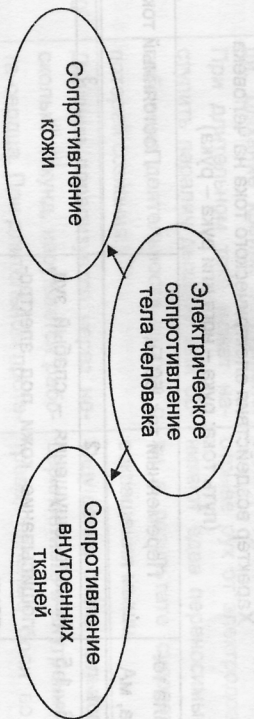


Рис. 4. Составляющие электрического сопротивления тела человека

Величина электрического сопротивления тела человека определяется в основном сопротивлением верхнего слоя кожи, называемого эпидермисом, толщиной 0,2 мм, состоящим из мертвых ороговевших клеток. При сухой чистой коже и отсутствии повреждений (порезов, царапин, ссадин и других микротравм) сопротивление тела человека составляет 2 000...2 000 000 Ом. В случае, если кожа повреждена, увлажнена или загрязнена токопроводящей пылью (металлической или углеродной), сопротивление тела человека падает до 1000 Ом и ниже (до 300...500 Ом).

Сопротивление нижних слоев кожи и внутренних тканей человека незначительно, не превышает нескольких сот Ом и существует

венной роли не играет.

На сопротивлении организма воздействию электрического тока оказывает влияние физическое и психическое состояние человека. Недороже, утомление, голод, ольнение, эмоциональное возбуждение приводят к снижению сопротивления.

При расчетах обычно принимают  $R_{чел} = 1000 \text{ Ом}$ .

Опасность поражения человека электрическим током оценивается значением тока  $I_{чел}$ , проходящего через тело человека, или же напряжением прикосновения  $U_{пр}$ .

Характер воздействия тока на человека в зависимости от силы и рода тока (переменный или постоянный) приведен в табл. 1.

Характер воздействия электрического тока на человека (путь тока: рука – нога или рука – рука)

Таблица 1

Сила тока, мА	Переменный ток, 50 Гц	Постоянный ток
1		3
0,6...1,5	Начало ошущения – слабый зуд, пощипывание кожи под электродами.	Ошущений нет.
2...4	Ошущение тока распространяется и на запястья руки, слегка сводит руку.	
5...7	Болевые ошущения усиливаются во всей кисти руки, сопровождаются судорогами; слабые боли ошущаются во всей руке, вплоть до предплечья. Руки, как правило, можно оторвать от электродов.	Начало ошущения. Впечатление нагрева кожи под электродом.
8...10	Сильные боли и судороги во всей руке, включая предплечье. Руки трудно, но в большинстве случаев еще можно оторвать от электродов.	Усиление ошущения нагрева.

Продолжение табл. 1

1	2	3
10...15	Едва переносимые боли во всей руке. Во многих случаях руки невозможно оторвать от электродов. С увеличением продолжительности протекания тока боли усиливаются.	Еще большее усиление ошущения нагрева – как под электродами, так и в прилегающих областях кожи.
20...25	Руки парализуются мгновенно, оторваться от электродов невозможно. Сильные боли, дыхание затруднено.	Еще большее усиление ошущения нагрева кожи, возникновение ошущения внутреннего нагрева. Незначительные сокращения мышц рук.
25...50	Очень сильная боль в руках и груди. Дыхание крайне затруднено. При длительном токе может наступить паралич дыхания или ослабление деятельности сердца с потерей сознания.	Ошущение сильного нагрева, боли и судороги в руках. При отрыве рук от электродов возникнут едва переносимые боли в результате судорожного сокращения мышц.
50...80	Дыхание парализуется через несколько секунд, нарушается работа сердца. При длительном протекании тока может наступить фибрилляция сердца.	Ошущение очень сильного поверхностного и внутреннего нагрева, сильные боли во всей руке и в области груди. Затруднение дыхания. Руки невозможно оторвать от электродов из-за сильных болей при нарушении контакта.
100	Фибрилляция сердца через 2...3 с, еще через несколько секунд – паралич дыхания.	Паралич дыхания при длительном протекании тока.
300	То же, за меньшее время.	Фибрилляция сердца через 2...3 с, еще через несколько секунд – паралич дыхания.
Более 5000	Дыхание парализуется немедленно – через доли секунды. Фибрилляция сердца, как правило, не наступает; возможна временная остановка сердца в период протекания тока. При длительном протекании тока (несколько секунд) – тяжелые ожоги, разрушение тканей.	

Принято различать три ступени воздействия тока на организм человека и соответствующие им три пороговых значения:

- ощутимое,
- неотпускающее,
- фибрилляционное.

Пока сила тока не достигла **порогового ощутимого** значения, человек не чувствует его воздействия. Человек, попавший под воздействие **переменного** тока промышленной частоты ( $f = 50 \text{ Гц}$ ), начинает ощущать протекающий через него ток, когда его значение достигает  $0,6...1,5 \text{ мА}$ . Для **постоянного** тока это пороговое значение составляет  $5...7 \text{ мА}$ . Ощутимый ток вызывает у человека малоболезненные (или безболезненные) раздражения, и человек может самостоятельно освободиться от провода и токоведущей части, находящейся под напряжением.

**Переменный ток** величиной  $10...15 \text{ мА}$  и более и **постоянный** уровнем  $50...70 \text{ мА}$  (и более) называется **пороговым неотпускающим**. При действии этих токов у человека возникают непреодолимые и болезненные судорожные сокращения мышц рук при касании ими (захвате) токоведущих частей или проводов; человек не может самостоятельно разжать руку и освободиться от воздействия тока. При повышении **переменного** тока промышленной частоты до  $25...50 \text{ мА}$  затрудняется или даже прекращается процесс дыхания (при действии этого тока в течение нескольких минут).

При воздействии **переменного** тока промышленной частоты величина **порогового фибрилляционного тока** составляет  $100 \text{ мА}$  (при продолжительности воздействия более  $0,5 \text{ с}$ ), а для **постоянного** тока –  $300 \text{ мА}$  аналогичной продолжительности.

**Допустимым** считается ток, при котором человек может самостоятельно освободиться от электрической цепи.

Степень поражения электрическим током зависит также **от рода и частоты тока**. Известно, что при напряжениях, превы-

шающих  $500 \text{ В}$ , наиболее опасен **постоянный ток**, а при меньших напряжениях – **переменный**.

**Переменный ток** наибольшую опасность представляет при частотах  $20...100 \text{ Гц}$ . При частоте меньше  $20$  или больше  $100 \text{ Гц}$  опасность поражения током заметно снижается. Токи с частотой выше  $500\,000 \text{ Гц}$  могут вызвать лишь термические ожоги и не оказывают раздражающего действия на ткани организма.

**Длительность протекания тока** через тело человека влияет на исход поражения, так как с течением времени резко возрастает сила тока вследствие уменьшения сопротивления тела за счет возникших изменений в коже и других тканях, а также потому, что в организме человека накапливаются отрицательные последствия воздействия тока. Таким образом, **чем больше время воздействия тока, тем сильнее будет поражение** и тем меньше вероятность восстановления жизненных функций организма.

Таблица 2  
Предельно допустимые значения напряжения прикосновения  $U$  и токов  $I$  при аварийном режиме производственных электроустановок (путь тока: рука – рука, рука – нога)

Род тока	Нормируемая величина	Значения $U$ и $I$ , не более.											
		при продолжительности воздействия тока $t$ , с											
		0,01...0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	св. 1,0
Переменный частотой 50 Гц	$U, \text{ В}$	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	$I, \text{ мА}$	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Переменный частотой 400 Гц	$U, \text{ В}$	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	$I, \text{ мА}$	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
Постоянный	$U, \text{ В}$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	$I, \text{ мА}$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

В табл. 2 приведены установленные ГОСТ 12.1.038-82 предельно допустимые значения напряжения  $U$  и токов при аварийном



режиме работы производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью в зависимости от продолжительности воздействия на организм.

Существенное влияние на тяжесть поражения человека электрическим током оказывает путь, по которому он распространяется в организме. Путь тока через тело человека зависит от места его прикосновения к оголенным проводам или токоведущим частям. Возможных путей протекания тока через тело человека очень много, однако в практике встречается обычно не более 15, представленных на рис.5. Наиболее характерны следующие цепи: рука – рука, руки – ноги и нога – нога.

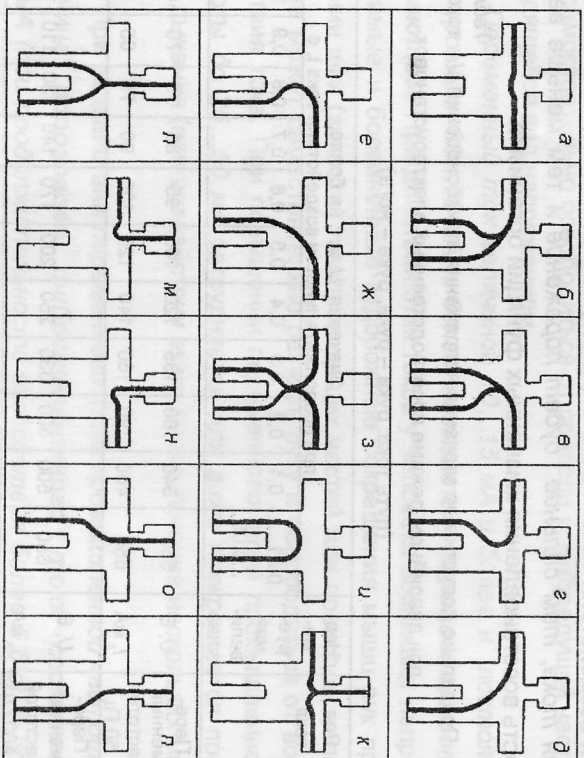


Рис.5. Характерные пути тока в теле человека.

а – рука – рука; б – правая рука – ноги; в – левая рука – ноги; г – правая рука – правая нога; д – правая рука – правая нога; е – левая рука – левая нога; ж – левая рука – правая нога; з – обе руки – обе ноги; и – нога – нога; к – голова – руки; л – голова – ноги; м – голова – правая рука; н – голова – левая рука; о – голова – правая нога; п – голова – левая нога

Из возможных путей протекания тока через тело человека наиболее опасен топ, при котором поражается головной мозг (голова – руки, голова – ноги), а также сердце и легкие (руки – ноги). Наименее опасным является путь нога – нога, который возникает при воздействии на человека так называемого шагового напряжения.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает следующие предельно допустимые напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека, для путей рука – рука и рука – нога при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки и продолжительности воздействия не более 10 мин. в сутки: для переменного тока частотой 50 Гц соответственно 2 В и 0,3 мА; для постоянного – 8 В и 1 мА.

Условия, в которых работает человек, могут увеличивать или уменьшать опасность его поражения электрическим током. К ним относятся влажность, температура воздуха, наличие в помещениях токопроводящих полов и пыли, химически активной или органической среды и др. Неблагоприятный микроклимат (повышенная температура, влажность) увеличивает опасность поражения током, так как влага (пот) понижает сопротивление кожных покровов. В связи с этим согласно ГОСТ12.1.038-82 для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25° С) и влажности (относительная влажность более 75%), значения предельно допустимых уровней напряжений и токов должны быть уменьшены в 3 раза.

Индивидуальные качества человека, в первую очередь состояние его здоровья, обученность правильной и безопасной работе на электроустановках (с присвоением соответствующей квалификации и группы) во многом определяют как саму возможность поражения, так и исход поражения человека электрическим током.

Практикой установлено, что вполне здоровые и физически крепкие люди легче переносят электрические удары, нежели больные и слабые. Повышенной восприимчивостью к электрическому

току обладают лица, страдающие рядом заболеваний, в первую очередь болезнями кожи, сердечно-сосудистой системы, органов внутренней секреции, легких, нервными болезнями и др. Имеют значение также степень внимания и сосредоточенности человека на процессе выполняемой им работы, степень утомления, моральное состояние и т.п.

Исход воздействия тока в значительной степени зависит от квалификации пострадавшего. Человек, далекий от электротехники, в случае попадания под напряжение оказывается, как правило, в более тяжелых условиях, чем опытный электротехник, умеющий правильно оценить степень возникшей опасности и применить рациональные приемы освобождения себя от действия тока.

### 1.3. Опасность поражения человека в трехфазных электрических сетях переменного тока

Опасность поражения человека электрическим током, оцениваемая значением тока  $I_{чел}$ , проходящего через тело человека, или же напряжением прикосновения  $U_{пр}$ , зависит от ряда факторов:

- **напряжения сети;**
  - **схемы включения человека в цепь;**
  - **схемы самой сети;**
  - **режима ее нейтрали;**
  - **степени изоляции токоведущих частей от земли;**
  - **емкости токоведущих частей относительно земли и др.**
- Значимость указанных факторов необходимо знать при оценке сети по условиям электробезопасности.

**Напряжение сети.** Все электрические установки условно делят на:

- работающие под напряжением до 1000 В;
- работающие под напряжением выше 1000 В.

Если установки работают под напряжением выше 1000 В, то прикосновение к токоведущим частям одинаково опасно в любых условиях, поэтому выбор схемы сети по условиям безопасности не производят.

При напряжении до 1000 В широкое распространение получили **две схемы трехфазных сетей (рис. 6):**

- трехпроводная с изолированной нейтралью;
- четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью.

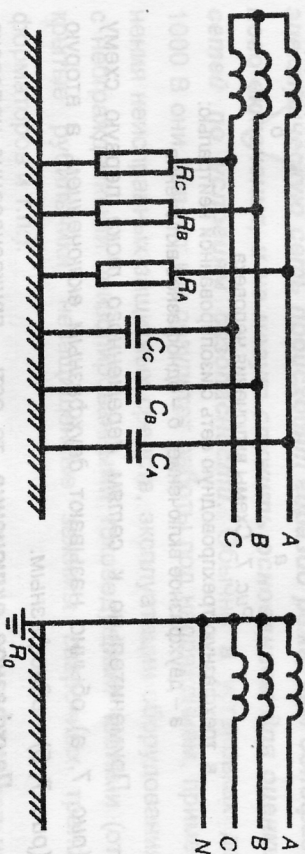


Рис. 6. Схемы трехфазных сетей:  
а – трехпроводная с изолированной нейтралью;  
б – четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью

По технологическим требованиям предпочтительнее часто отдается четырехпроводной сети, поскольку она позволяет использовать два рабочих напряжения: линейное и фазное. По условиям безопасности выбор одной из двух схем производится на основании анализа опасности поражения человека электрическим током в результате случайного прикосновения к токоведущим частям.

**Схемы включения человека в электрическую цепь** могут быть различными. Наиболее характерными являются две схемы включения человека в электрическую цепь (рис. 7):

- между двумя проводниками;
- между одним проводником и землей.

Во втором случае предполагается наличие электрической связи между сетью и землей.

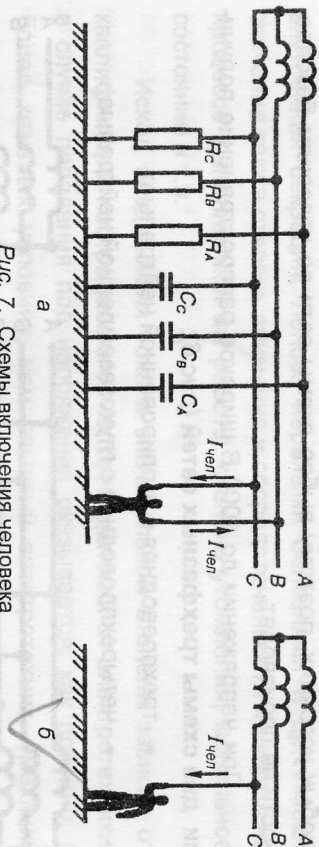


Рис. 7. Схемы включения человека в трехфазную трехпроводную сеть с изолированной нейтралью: а - двухфазное включение, б - однофазное включение

Применительно к сетям переменного тока первую схему (рис. 7, а) обычно называют **двухфазным включением**, а вторую (рис. 7, б) - **однофазным**.

**Двухфазное включение**, то есть **прикосновение** человека одновременно к **двум фазам** (рис. 7, а), как правило, **более опасно**. К телу человека прикладывается наибольшее в данной сети напряжение - линейное, и поэтому через тело человека идет **большой ток I<sub>чел</sub>**. А. Ток, протекающий через тело человека, **независимо от схемы сети, режима нейтрали** (заземленная или изолированная) **может быть рассчитан по закону Ома**:

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{лин}}}{R_{\text{чел}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}}{R_{\text{чел}}} \quad (2)$$

где  $U_{\text{лин}}$  - линейное напряжение, т. е. напряжение между фазными проводами сети, В,  $U_{\text{лин}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$ ;

$U_{\text{ф}}$  - фазное напряжение, т. е. напряжение между началом и концом одной обмотки источника тока (трансформатора, генератора) или между фазным и нулевым проводами, В;

$R_{\text{чел}}$  - сопротивление тела человека, Ом ( $R_{\text{чел}} = 1000 \text{ Ом}$ ).

При таком включении опасность поражения не уменьшается и

в том случае, если человек надежно изолирован от земли (резиновые галоши, боты, диэлектрический коврик, деревянный пол).

Для сети с линейным напряжением 380 В ток поражения составит:

$$I_{\text{чел}} = \frac{380 \text{ В}}{1000 \text{ Ом}} = 0,38 \text{ А} = 380 \text{ мА}$$

Этот ток, безусловно, смертелен для человека, так как превышает в несколько раз величину фибрилляционного тока (100 мА).

**На практике случаи двухфазного включения человека в электрическую сеть происходят гораздо реже, чем однофазного включения, и не могут служить основанием для оценки сетей по условиям безопасности.** Обычно в установках до 1000 В они бывают как результат работы под напряжением, применения неисправных защитных средств, эксплуатации оборудования с неогражденными незаизолированными токоведущими частями (открытые рубильники, незащищенные зажимы сварочных трансформаторов и т.п.).

**Однофазное включение** (рис. 7, б) происходит значительно чаще, чем двухфазное, но оно является менее опасным, поскольку напряжение  $U_{\text{пр}}$ , под которым оказывается человек, не превышает фазного  $U_{\text{ф}}$  ( $U_{\text{пр}} \leq U_{\text{ф}}$ ). Соответственно меньше оказывается ток  $I_{\text{чел}}$ , проходящий через тело человека (ток поражения).

**Поскольку однофазное включение является основной схемой, вызывающей поражение людей током в сетях любого напряжения, то именно оно служит основанием для оценки сетей по условиям безопасности.** В связи с этим в дальнейшем будет рассмотрена только эта схема включения человека в электрическую цепь тока.

В случае однофазного включения человека в электрическую цепь на величину  $I_{\text{чел}}$  влияют:

- режим нейтрали источника тока;
- сопротивление изоляции проводов относительно земли;
- емкость проводов относительно земли;

- сопротивление пола, на котором стоит человек;
- сопротивление его обуви и другие факторы.

В дальнейшем при рассмотрении электробезопасности наиболее распространенных сетей в целях упрощения примем:

- 1) сопротивление изоляции, а также емкости всех проводов относительно земли равны между собой:

$$\begin{cases} R_A = R_B = R_C = R_N = R_{из} \\ C_A = C_B = C_C = C_N = C; \end{cases} \quad (3)$$

- 2) тело человека обладает лишь активным сопротивлением, а сопротивление ног человека растеканию тока равно нулю.

### 1.3.1. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

При нормальном режиме работы сети напряжение прикосновения  $U_{пр}$ , под которым оказывается человек, прикоснувшийся к одной из фаз сети (рис. 7, б), можно определить следующим образом:

$$U_{пр} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{1 + \frac{R_{из} \cdot (R_{из} + 6 \cdot R_{чел})}{9 \cdot R_{чел}^2 \cdot (1 + R_{из}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)}}} \quad (4)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение, В;

$R_{чел}$  – сопротивление тела человека, Ом;

$R_{из}$  – сопротивление изоляции, Ом;

$C$  – емкость проводов относительно земли, Ф;

$\omega$  – угловая частота сети:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  ( $f$  – частота тока, Гц).

Ток поражения  $I_{чел}$  можно рассчитать по формуле

$$I_{чел} = \frac{U_{пр}}{R_{чел}} = \frac{U_{\phi}}{R_{чел} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_{из} \cdot (R_{из} + 6 \cdot R_{чел})}{9 \cdot R_{чел}^2 \cdot (1 + R_{из}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)}}} \quad (5)$$

Если сеть имеет небольшую протяженность, то емкостью проводов относительно земли можно пренебречь ( $C_A = C_B = C_C = 0$ ). В этом случае выражения (4) и (5) примут вид

$$U_{пр} = \frac{U_{\phi}}{1 + 3 \cdot R_{чел}} \quad (6) \quad \text{и} \quad I_{чел} = \frac{U_{\phi}}{R_{чел} + 3} \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что в сетях с изолированной нейтралью, обладающих незначительной емкостью относительно земли, роль изоляции проводов в обеспечении безопасности прикосновения чрезвычайно велика: изоляция проводов – одна из основных мер электрозащиты. Поэтому в таких сетях чрезвычайно важно обеспечивать высокое сопротивление изоляции и контролировать ее состояние для своевременного выявления и устранения возможных неисправностей.

При больших значениях сопротивлений изоляций по сравнению с емкостью проводов относительно земли (обычно имеет место в кабельных сетях), то есть при условии

$$\begin{cases} C_A = C_B = C_C = C, \\ R_A = R_B = R_C = \infty, \end{cases} \quad (8)$$

формула (5) сводится к

$$I_{чел} = \frac{U_{\phi} \cdot \omega \cdot C}{\sqrt{9 \cdot R_{чел}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + 1}} \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что в сетях с изолированной нейтралью, обладающих большой емкостью относительно земли, роль изоляции проводов в обеспечении безопасности прикосновения утрачивается.

При аварийном режиме работы сети (рис. 8), когда возникло замыкание одной из фаз (фазы «А») на землю через малое сопротивление  $R_{эм}$ , напряжение  $U_{пр}$  и ток  $I_{чел}$  при касании человека

исправной фазы (фазы «С») определяются уравнениями

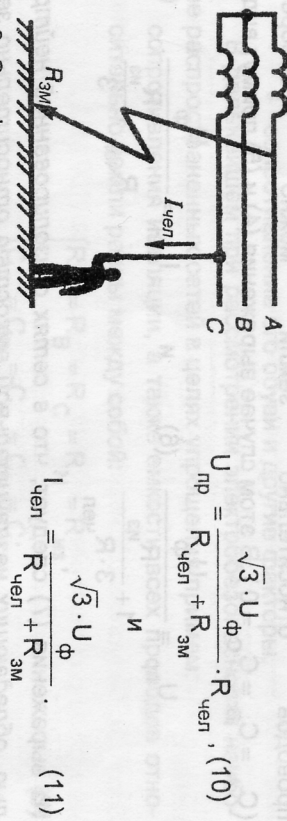


Рис. 8. Однофазное включение при аварийном режиме работы сети

Если принять, что  $R_{зм} = 0$ , или, по крайней мере, считать, что  $R_{зм} \ll R_{чел}$  (что обычно и бывает на практике), то согласно выражению (10)

$$U_{пр} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} = U_{\text{лин}} \quad (12)$$

то есть человек окажется под действием линейного напряжения.

В действительности  $R_{зм} > 0$ , поэтому напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправной фазе трехфазной сети с изолированной нейтралью, будет значительно больше фазного и несколько меньше линейного напряжения сети:

$$U_{\phi} \ll U_{пр} < U_{\text{лин}} \quad (13)$$

Таким образом, в сетях с изолированной нейтралью прикосновение человека к одной из исправных фаз в период аварийной работы наименее опасно прикосновения к той же фазе сети при нормальном режиме работы ( $\frac{R_{из}}{3} \gg R_{зм}$ ).

### 1.3.2. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью

При нормальном режиме работы сети (рис. 9, а) напряжение  $U_{пр}$  и ток  $I_{чел}$  в период касания человека одной из фаз определяются уравнениями

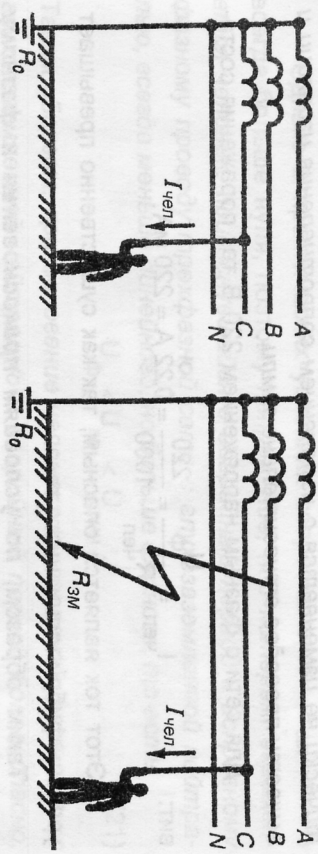


Рис. 9. Схемы однофазного включения человека в трехфазную четырехпроводную сеть с глухозаземленной нейтралью: а – нормальный режим работы сети, б – аварийный режим работы сети

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение, В;

$$U_{пр} = \frac{U_{\phi}}{R_{чел} + R_0} \cdot R_{чел} \quad (14) \quad \text{и} \quad I_{чел} = \frac{U_{\phi}}{R_{чел} + R_0} \quad (15)$$

$R_{чел}$  – сопротивление тела человека, Ом;  
 $R_0$  – сопротивление заземления нейтрали, Ом;

Трехфазные сети с глухозаземленной нейтралью обладают малым сопротивлением  $R_0$  между нейтралью и землей, которое согласно правилам устройства электроустановок не может превышать 10 Ом. Пренебрегая сопротивлением заземления нейтрали  $R_0$  по сравнению с сопротивлением тела человека  $R_{чел}$ , которое не опускается ниже нескольких сотен Ом, можно записать

$$U_{пр} = U_{\phi} \quad (16)$$

Таким образом, при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью человек оказывается практически под фазным напряжением  $U_{\phi}$ .

Из уравнения (15) вытекает еще один вывод: ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к фазе трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью в период ее нормальной работы, прак-

тически не изменяется с изменением сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

Для сети с фазным напряжением 220 В ток поражения составит:

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{чел}}} = \frac{220}{1000} = 0,22 \text{ А} = 220 \text{ мА.}$$

Этот ток является опасным, так как существенно превышает уровень фибрилляционного тока.

Таким образом, по условиям прикосновения к фазному проводу в период нормальной работы сети более безопасной является, как правило, сеть с изолированной нейтралью.

**При аварийном режиме работы сети** (рис. 9, б), когда одна из фаз сети (фаза «В») замкнута на землю через относительно малое сопротивление  $R_{\text{зм}}$ , напряжение, приложенное к телу человека, прикоснувшегося к исправной фазе (фаза «С»), определяют следующим образом:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \cdot R_{\text{чел}} \cdot \frac{R_{\text{зм}} + R_0 \cdot \sqrt{3}}{R_{\text{зм}} \cdot R_0 + R_{\text{чел}} \cdot (R_{\text{зм}} + R_0)} \quad (17)$$

Ток поражения может быть рассчитан по формуле

$$I_{\text{чел}} = U_{\text{ф}} \cdot \frac{R_{\text{зм}} + R_0 \cdot \sqrt{3}}{R_{\text{зм}} \cdot R_0 + R_{\text{чел}} \cdot (R_{\text{зм}} + R_0)} \quad (18)$$

**Если сопротивление замыкания провода на землю  $R_{\text{зм}}$  считать равным нулю ( $R_{\text{зм}} = 0$ ), то уравнение (17) примет вид**

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \cdot \sqrt{3} = U_{\text{лин}} \quad (19)$$

Следовательно, в данном случае человек окажется под воздействием линейного напряжения сети.

**Если принять равным нулю сопротивление заземления ней-**

**тралли ( $R_0 = 0$ ), то**  $U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}}$ , (20)

то есть напряжение, под которым окажется человек, будет равно фазному напряжению.

Однако в практических условиях сопротивления  $R_{\text{зм}}$  и  $R_0$  всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказываются человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, всегда меньше линейного, но больше фазного, то есть

$$U_{\text{ф}} < U_{\text{пр}} < U_{\text{лин}} \quad (21)$$

Таким образом, прикосновение человека к исправной фазе сети с глухозаземленной нейтралью в аварийный период более опасно, чем при нормальном режиме.

Вместе с тем по условиям прикосновения к исправной фазе сети в аварийный период ее работы менее опасной является, как правило, сеть с глухозаземленной нейтралью, поскольку в ряде случаев  $R_0$  мало по сравнению  $R_{\text{зм}}$  (см. уравнения (11) и (18)).

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.1. Описание лабораторного стенда БЖ 6/1

Стенд позволяет изучать опасность поражения человека электрическим током в трехфазных сетях переменного тока с напряжением до 1000 В. Лицевая панель стенда представлена на рис. 10.

Стенд позволяет моделировать:

- источник питания сети;
- два типа сетей:

трехфазную трехпроводную с изолированной нейтралью; трехфазную четырёхпроводную с заземленной нейтралью.

Стенд включает автомат S2 – положение переключателя

автомата «I». При этом загораются индикаторы (желтого, зеленого и красного цветов), расположенные рядом с фазными проводами А, В, С.