

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 *электротравмы* (рис.1).

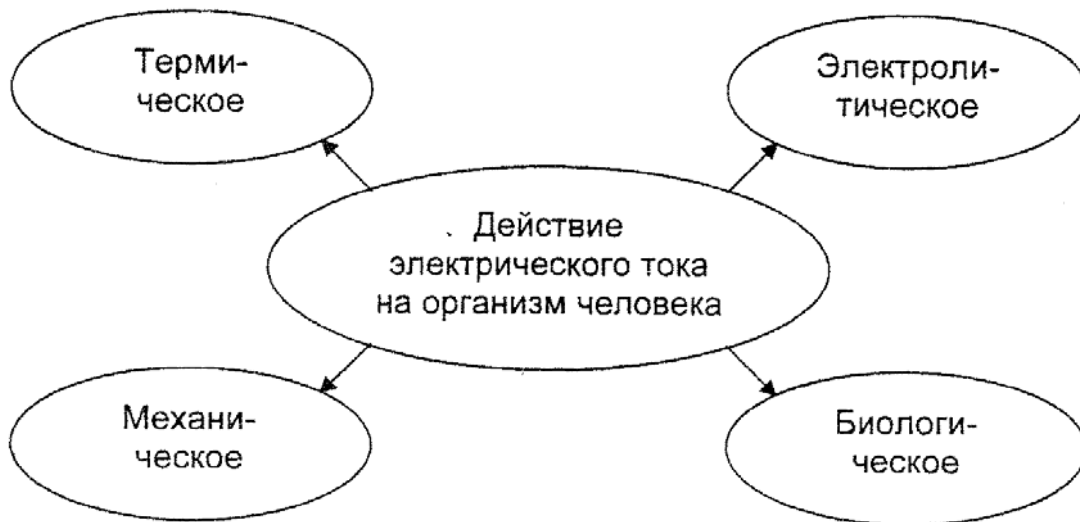


Рис. 1. Действие электрического тока на организм человека

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 нарушением 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 электротравмам** 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 (мнимой) смертью, 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*.

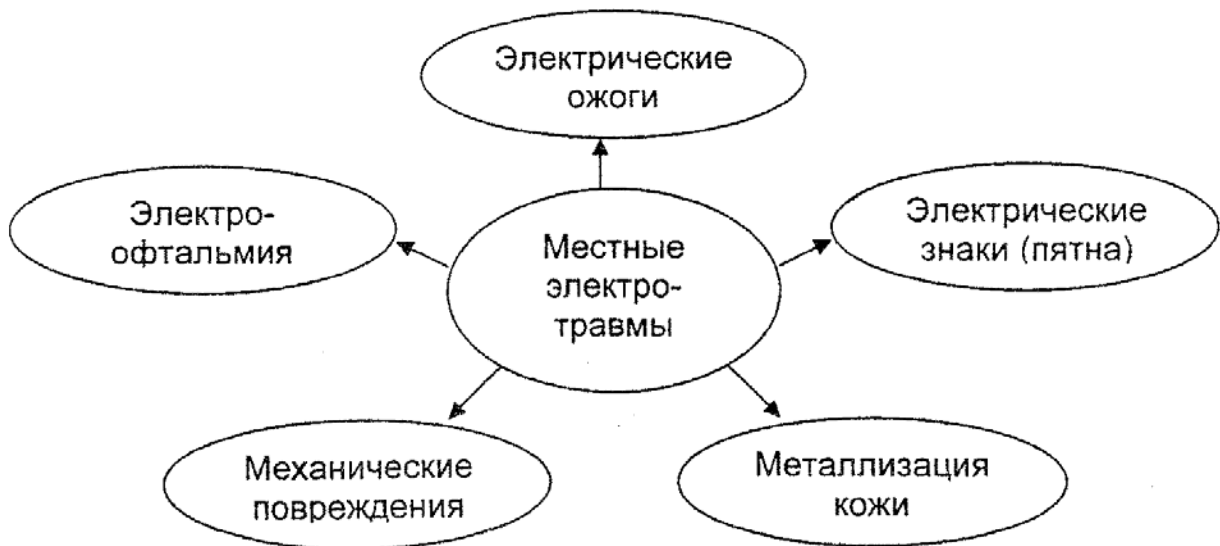


Рис.3. Классификация местных электротравм

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, сгорание 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, бородавок, кровоизлияний в кожу, мозолей и мелкоочечной 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. Пострадавший ощущает на пораженном участке напряжение кожи от присутствия в ней инородного тела, а в некоторых случаях испытывает боль от ожогов. Обычно с течением времени больная 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 профессионального 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);*
- *при переменном токе — от частоты колебаний;*
- *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.);*

- *индивидуальных качеств 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 ($I_{\text{чел}}$, А), условно определяют по закону Ома:

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

где $U_{\text{пр}}$ – приложенное напряжение (напряжение прикосновения), В;
 $R_{\text{чел}}$ – 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 сущест-

венной роли не играет.

На сопротивление организма воздействию электрического тока оказывает влияние физическое и психическое состояние человека. *Нездоровье, утомление, голод, опьянение, 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.

Таблица 1

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

Сила тока, мА	Переменный ток, 50 Гц	Постоянный ток
1	2	3
0,6...1,5	Начало ощущения – слабый зуд, пощипывание кожи под электродами.	Ощущений нет.
2...4	Ощущение тока распространяется и на запястье руки, слегка сводит руку.	
5...7	Болевые ощущения усиливаются во всей кисти руки, сопровождаясь судорогами; слабые боли ощущаются во всей руке, вплоть до предплечья. Руки, как правило, можно оторвать от электродов.	Начало ощущения. 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 ощущения 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 ощущения 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 ощущения нагрева кожи, возникновение ощущения 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.	Ощущение сильного нагрева, боли и судороги в руках. При отрыве рук от электродов возникают 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.	Ощущение 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 ($f = 50$ Гц), начинает ощущать протекающий через него ток, когда его значение достигает $0,6...1,5$ мА. Для *постоянного тока* это пороговое значение составляет $5...7$ 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 $10...15$ мА и более и *постоянный* уровнем $50...70$ мА (и более) называется **пороговым неотпускающим**. При действии этих токов у человека возникают непреодолимые и болезненные судорожные сокращения мышц рук при касании ими (захвате) токопроводящих частей или проводов; человек не может самостоятельно разжать руку и освободиться от воздействия тока. При повышении *переменного тока* промышленной частоты до $25...50$ мА затрудняется или даже прекращается процесс дыхания (при воздействии этого тока в течение нескольких минут).

При воздействии *переменного тока* промышленной частоты величина **порогового фибрилляционного тока** составляет 100 мА (при продолжительности воздействия более $0,5$ с), а для *постоянного тока* – 300 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 В, наиболее опасен постоянный ток, а при меньших напряжениях – переменный.

Переменный ток наибольшую опасность представляет при частотах 20...100 Гц. При частоте меньше 20 или больше 100 Гц опасность поражения током заметно снижается. Токи с частотой выше 500 000 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 , В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	I , мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Переменный частотой 400 Гц	U , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	I , мА												8
Постоянный	U , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	I , мА												15

В табл.2 приведены установленные ГОСТ 12.1.038-82 предельно допустимые значения напряжения 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.

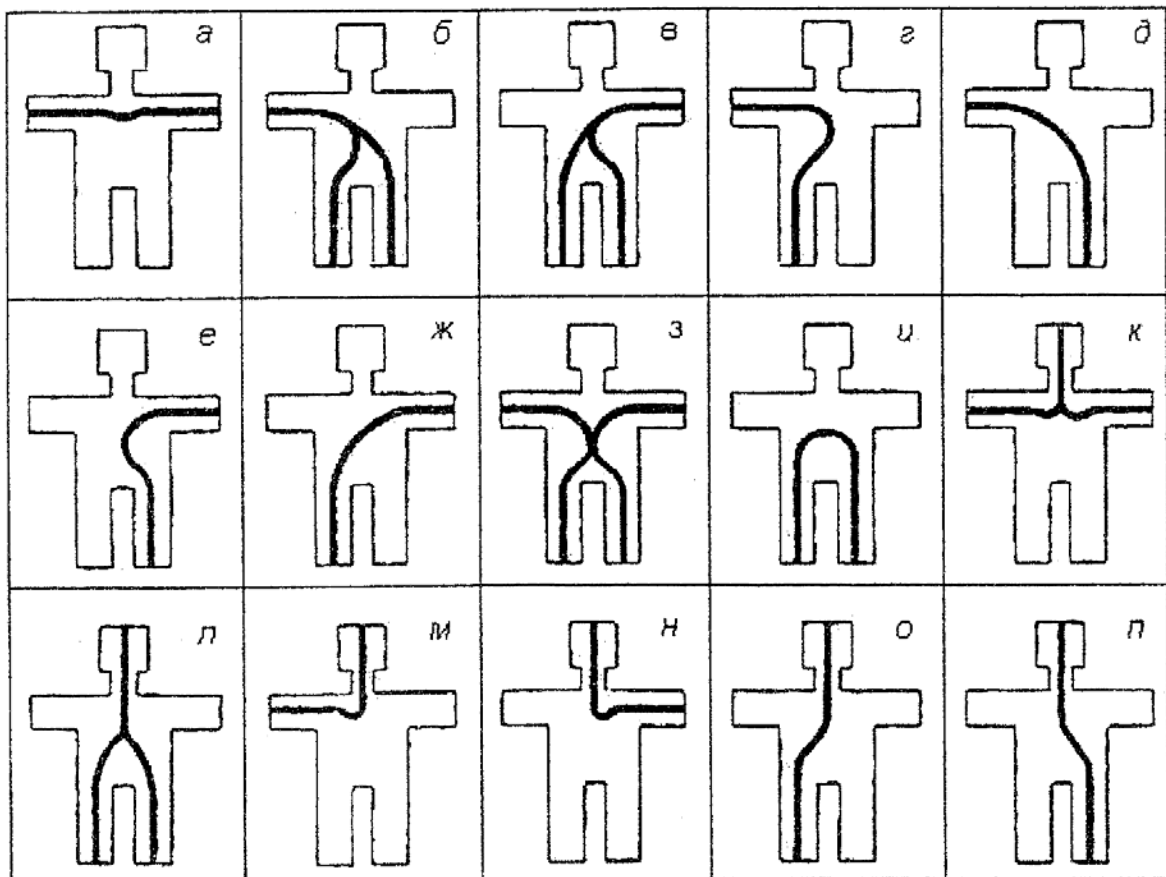


Рис.5. Характерные пути тока в теле человека:

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 тот, 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 токопроводящим 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.

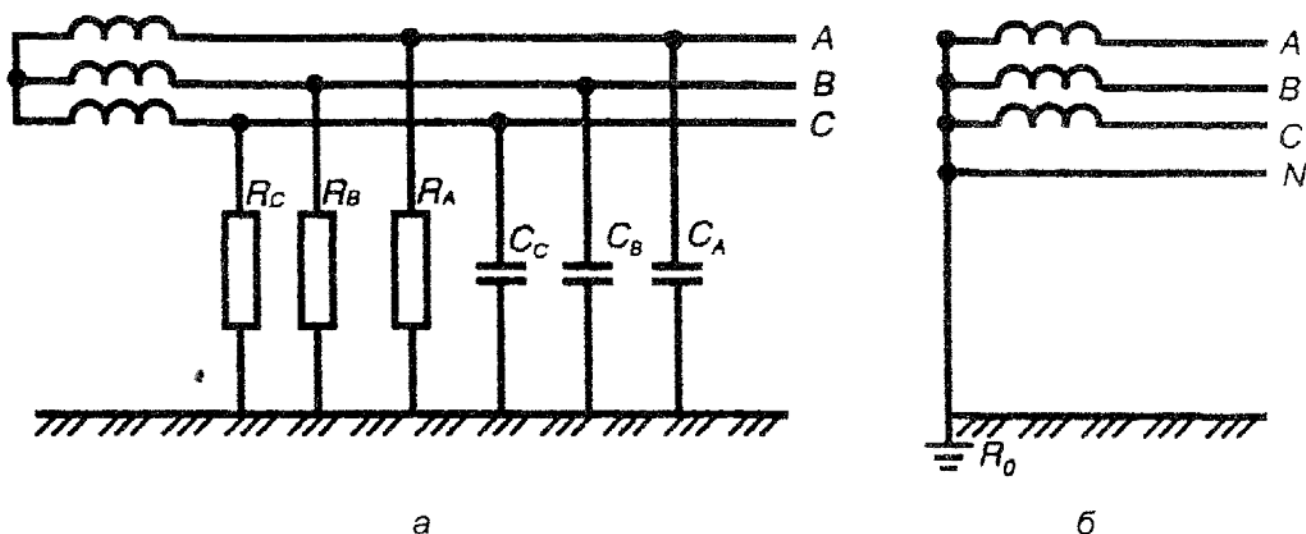


Рис.6. Схемы трехфазных сетей:
а – трехпроводная с изолированной нейтралью;
б – четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью

По технологическим требованиям предпочтение 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 токопроводящим частям.

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

- между двумя проводами;
- между одним проводом и землей.

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

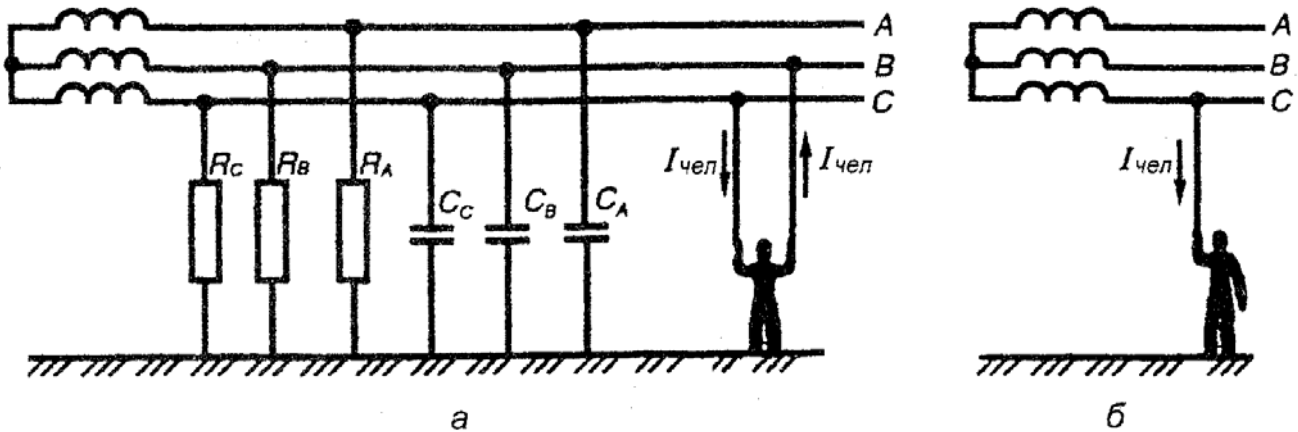


Рис. 7. Схемы включения человека

в трехфазную трехпроводную сеть с изолированной нейтралью:
 а – однофазное включение, б – двухфазное 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 $I_{чел}$. Ток, протекающий через тело человека, независимо от схемы сети, режима нейтрали (заземленная или изолированная) может быть рассчитан по закону Ома:

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

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

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

$R_{чел}$ – сопротивление тела человека, Ом ($R_{чел} = 1000$ 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 неизолированными 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) сопротивления 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:

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

где $U_{ф}$ – фазное напряжение, В;

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

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

C – емкость проводов относительно земли, Ф;

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

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

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

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

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

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 возникших неисправностей.

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

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

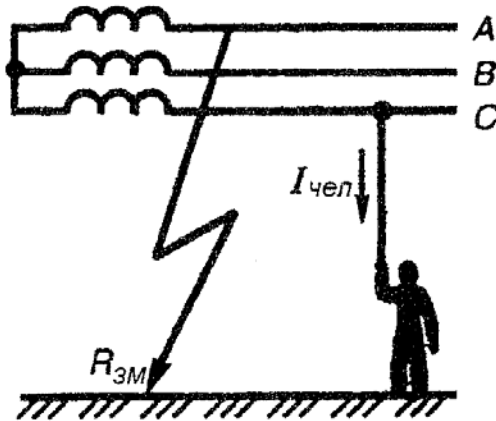
формула (5) сводится к

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

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 $R_{\text{зм}}$, напряжение $U_{\text{пр}}$ и ток $I_{\text{чел}}$ при касании человека

исправной фазы (фазы «С») определяются уравнениями



$$U_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}}{R_{\text{чел}} + R_{\text{зм}}} \cdot R_{\text{чел}}, \quad (10)$$

и

$$I_{\text{чел}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}}{R_{\text{чел}} + R_{\text{зм}}}. \quad (11)$$

Рис. 8. Однофазное включение при аварийном режиме работы сети

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

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

то есть человек окажется под действием линейного напряжения.

В действительности $R_{\text{зм}} > 0$, 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:

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

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

1.3.2. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью

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

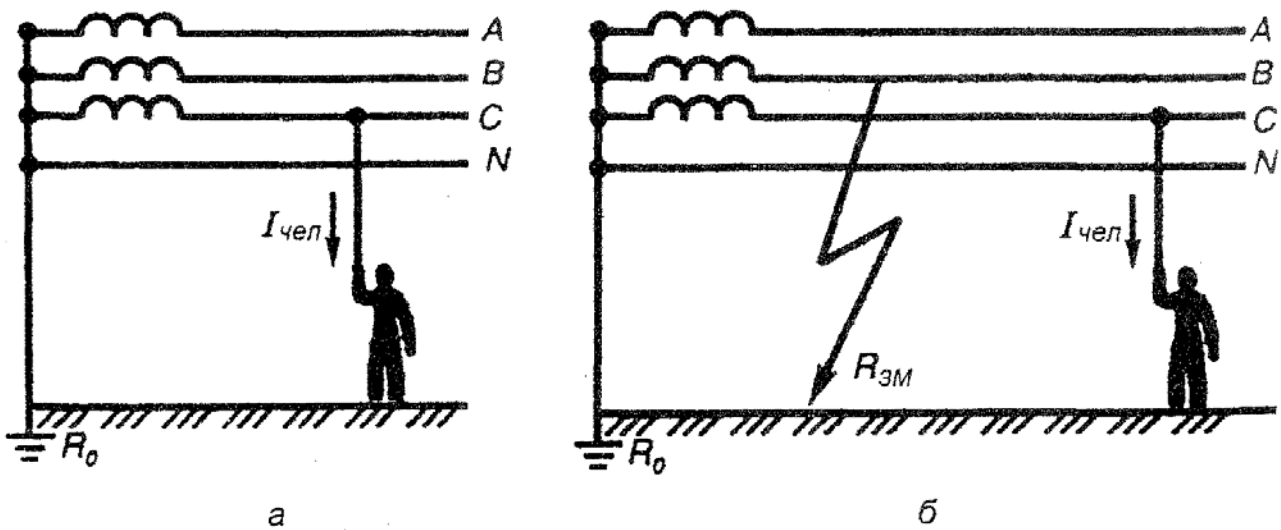


Рис. 9. Схемы однофазного включения человека

в трехфазную четырехпроводную сеть с глухозаземленной нейтралью:
 а – нормальный режим работы сети, б – аварийный режим работы сети

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

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

$R_{\text{чел}}$ – 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 $R_{\text{чел}}$, которое не опускается ниже нескольких сотен Ом, можно записать

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}}. \quad (16)$$

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

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 (фазе «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 нейтрали ($R_0 = 0$), то

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}}, \quad (20)$$

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

Однако в практических условиях сопротивления R_{3M} и R_0 всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается 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_{3M} (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 четырехпроводную с заземленной нейтралью.

Стенд включается автоматом S2 – положение переключателя автомата «/». При этом загораются индикаторы (желтого, зеленого и красного цветов), расположенные рядом с фазными проводами А, В, С.

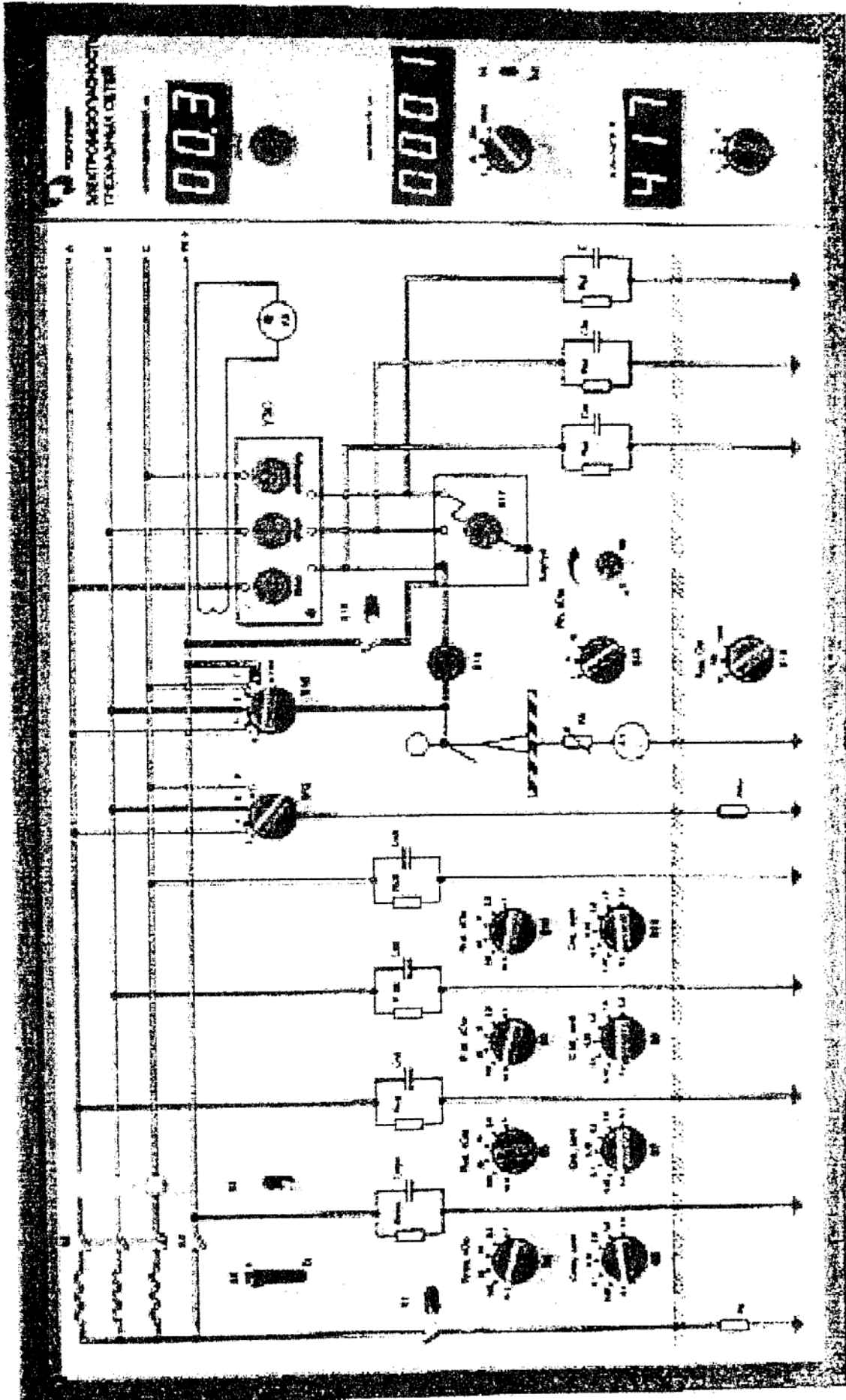


Рис. 10. Лицевая панель стенда БЖ 6/1

Значения активных сопротивлений (R_{AE} , R_{BE} , R_{CE} , R_{PEN}) и ёмкостей (C_{AE} , C_{BE} , C_{CE} , C_{PEN}) фазных проводов A , B , C и PEN -провода относительно земли задаются с помощью переключателей $S4... S11$.

Переключатель $S3$ предназначен для подключения / отключения PEN -провода: верхнее положение – подключен;
нижнее положение – отключен.

Переключатель $S1$ предназначен для изменения режима нейтрали исследуемой сети:

левое положение – изолированная нейтраль;
правое положение – заземленная нейтраль.

Значение сопротивления заземления нейтрали R_0 , установленного на стенде, – 4 Ом.

Переключатели $S12$, $S14$ предназначены для моделирования аварийных режимов работы исследуемых сетей:

положение «0» переключателя $S12$ соответствует нормальному режиму работы сети;

положения «А», «В», или «С» переключателя $S12$ соответствуют замыканию фазного провода A , B или C на землю; при этом сопротивление растеканию тока в месте замыкания на землю $R_{ЗМ}$ задается с помощью переключателя $S14$.

Тело человека имитируется в схеме стенда резистором R_h , который может подключаться к каждому проводу сети.

Переключатель $S15$ предназначен для моделирования прямого прикосновения человека к проводу исследуемой сети:

положение «0» – человек не касается фазного провода сети;

положения «А», «В», «С», «PEN» – человек касается соответственно фазных проводов A , B , C или PEN -провода.

Значение сопротивления цепи тела человека R_h может быть задано: дискретно (1; 5 и 10 кОм) с помощью переключателя $S13$;

плавно в пределах от 0 до 100 кОм с помощью переменного резистора R_h .

Установка значений R_h 1; 5; 10 кОм производится переключателем S_{13} при положении ручки резистора R_h – «0».

В правой части лицевой панели стенда размещены индикаторы цифровых приборов: амперметра и вольтметра.

Амперметр предназначен для измерения тока (мА) в цепи тела человека (положение «А1» переключателя амперметра). Амперметр имеет четыре предела измерения.

Вольтметр предназначен для измерения напряжений (В) фазных проводов А, В, С относительно земли; подключение вольтметра к фазным проводам осуществляется с помощью переключателя (положения «А», «В», «С» соответственно).

2.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется каждым студентом индивидуально в соответствии с вариантом задания (табл.3).

Таблица 3

Варианты индивидуальных заданий

№ вар.	$R_{из*}$, кОм	C^{**} , мкФ	R_h , кОм	$R_{зм}$, Ом	№ вар.	$R_{из*}$, кОм	C^{**} , мкФ	R_h , кОм	$R_{зм}$, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0	0,02	1	100	13	1,0	2,5	10	100
2	1,0	0,1	5	10	14	2,5	0	5	100
3	2,5	0,25	10	100	15	10	0,02	10	100
4	2,5	0,5	1	10	16	25	0,25	1	100
5	10	1,0	5	10	17	100	0,5	5	1000
6	10	2,5	10	10	18	∞	1,0	10	10
7	25	0	1	10	19	1,0	0,25	1	100
8	25	0,02	5	1000	20	2,5	0	5	1000
9	100	0,1	10	1000	21	10	0,02	10	10
10	100	0,5	1	1000	22	25	0,1	1	10
11	∞	0,25	5	10	23	100	0,25	5	10
12	∞	1,0	10	10	24	∞	0,5	10	100

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	1,0	1,0	5	1000	28	25	0,02	1	100
26	2,5	2,5	5	1000	29	100	0,25	5	100
27	10	0	10	10	30	∞	0,5	10	10

Примечание. * $R_A = R_B = R_C = R_{PEN} = R_{ИЗ}$.

** $C_A = C_B = C_C = C_{PEN} = C$.

2.2.1. Анализ опасности поражения человека электрическим током при прямом прикосновении к фазному проводу электрической сети

2.2.1.1. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы

1. *Изолировать нейтраль* – перевести переключатель $S1$ в левое положение.
2. *Отключить PEN-провод* – перевести переключатель $S3$ в нижнее положение.
3. *Установить нормальный режим работы сети* – перевести переключатель $S12$ в положение «0».
4. *Установить значения активных сопротивлений изоляции* (переключатели $S6, S8, S10$) и емкостей (переключатели $S7, S9, S11$) фазных проводов относительно земли.
5. *Установить значения сопротивления цепи тела человека R_h* переключателем $S13$. При этом ручка регулятора резистора R_h должна находиться в положении «0».
6. *Смоделировать ситуацию, когда человек не касается фазного провода сети* – установить переключатель $S15$ в положение «0».
7. *Включить стенд* – положение переключателя $S2$ – «1».
8. С помощью вольтметра произвести измерения напряжений

фазных проводов («А», «В», «С») относительно земли U_{ϕ} (переключатель вольтметра соответственно в положении «А», «В», «С».)

9. *Выключить стенд – положение S2 – «О».*
10. *Смоделировать прямое прикосновение человека к фазному проводу «А» – установить переключатель S15 в положение «А».*
11. *Включить стенд – положение переключателя S2 – «I».*
12. *С помощью вольтметра определить значение напряжения прикосновения $U_{пр}$ (переключатель вольтметра в положении «А»).*
13. *Произвести измерение тока I_{hA} в цепи тела человека с помощью амперметра, выбрав необходимый предел измерения. Положение переключателя амперметра – «A1».*
14. *Выключить стенд – положение S2 – «О».*

2.2.1.2. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью при аварийном режиме работы (замыкание одного из фазных проводов на землю)

1. *Смоделировать аварийный режим работы сети – замыкание фазного провода «В» на землю, для чего в дополнение к действиям позиций 1...10 п. 2.2.1.1 перевести переключатель S12 в положение «В».*
2. *С помощью переключателя S14 задать значение сопротивления в месте замыкания на землю $R_{зм}$.*
3. *Включить стенд – перевести S2 в положение «I».*
4. *С помощью вольтметра определить значение напряжения прикосновения $U_{пр}$ (переключатель вольтметра в положении «А»).*
5. *Произвести измерения токов в цепи тела человека I_{hA} с помощью амперметра, выбрав необходимый предел измерения. Положение переключателя амперметра – «A1».*
6. *Выключить стенд – положение S2 – «О».*

2.2.1.3. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью при нормальном режиме работы

1. *Заземлить нейтраль* – перевести переключатель $S1$ в правое положение.
2. *Подключить PEN-провод* – перевести переключатель $S3$ в верхнее положение.
3. *Установить нормальный режим* работы сети – перевести переключатель $S12$ в положение «0».
4. *Установить значения активных сопротивлений изоляции* (переключатели $S4, S6, S8, S10$) и емкостей (переключатели $S5, S7, S9, S11$) фазных проводов и PEN-провода относительно земли.
5. *Установить значение сопротивления цепи тела человека R_h* переключателем $S13$. При этом ручка регулятора резистора R_h должна находиться в положении «0».
6. *Смоделировать ситуацию, когда человек не касается фазного провода сети*, – установить переключатель $S15$ в положение «0».
7. *Включить стенд* – положение переключателя $S2$ – «1».
8. С помощью вольтметра произвести измерения напряжений фазных проводов («А», «В», «С») относительно земли U_ϕ (переключатель вольтметра соответственно в положении «А», «В», «С»).
9. *Выключить стенд* – положение $S2$ – «0».
10. *Смоделировать прямое прикосновение человека к фазному проводу «А»* – установить переключатель $S15$ в положение «А».
11. *Включить стенд* – положение переключателя $S2$ – «1».
12. С помощью вольтметра определить значение напряжения прикосновения $U_{пр}$ (переключатель вольтметра в положении «А»).
13. *Произвести измерение тока I_{hA}* в цепи тела человека с помощью амперметра, выбрав необходимый предел измерения. Положение переключателя амперметра – «А1».

14. *Выключить стенд* – положение S2 – «O».

2.2.1.4. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью при аварийном режиме работы (замыкание одного из фазных проводов на землю)

1. *Смоделировать аварийный режим работы сети – замыкание фазного провода «В» на землю*, для чего в дополнение к действиям позиций 1...10 п. 2.2.1.3 перевести переключатель S12 в положение «В».
2. С помощью переключателя S14 *задать значение $R_{зм}$* .
3. *Включить стенд* – перевести S2 в положение «I».
4. С помощью вольтметра *определить значение напряжения прикосновения $U_{пр}$* (переключатель вольтметра в положении «А»).
5. *Произвести измерение токов в цепи тела человека I_{hA} соответственно положению переключателя S15 – «А» с помощью амперметра, выбрав необходимый предел измерения. Положение переключателя амперметра – «А1».*
6. *Выключить стенд* – положение переключателя S2 – «O».

2.2.2. Анализ изменения силы тока, проходящего через цепь тела человека, при прямом прикосновении к фазному проводу трехфазной сети

2.2.2.1. Изменение силы тока в зависимости от активного сопротивления изоляции проводов относительно земли (при заданной емкости проводов относительно земли) при нормальном режиме работы сетей

Необходимо снять зависимость $I_{hA} = f(R_{из})$ при условии

$$\begin{cases} R_A = R_B = R_C = R_N = R_{из}, \\ C_A = C_B = C_C = C_N = C = \text{const.} \end{cases}$$

1. *Изолировать нейтраль* – перевести переключатель $S1$ в левое положение.
2. *Отключить PEN-провод* – перевести переключатель $S3$ в нижнее положение.
3. *Установить нормальный режим работы* – перевести переключатель $S12$ в положение «0».
4. *Смоделировать прямое прикосновение человека к фазному проводу «А»* – установить переключатель $S15$ в положение «А».
5. *Установить значение сопротивления цепи тела человека R_h* переключателем $S13$. При этом ручка регулятора резистора R_h должна находиться в положении «0».
6. *Установить значения емкостей проводов относительно земли* (переключателями $S7, S9, S11$).
7. *Включить стенд* – перевести $S2$ в положение «1».
8. *Произвести измерения тока I_{hA} в цепи тела человека с помощью амперметра, поочередно устанавливая с помощью переключателей $S6, S8, S10$ значения активных сопротивлений фазных проводов относительно земли $R_{из} \{1; 2,5; 10; 25; 100, \infty \text{ кОм}\}$. Положение переключателя амперметра при измерениях – «А1».*
9. *Выключить стенд* – перевести $S2$ в положение «0».
10. *Заземлить нейтраль* – перевести выключатель $S1$ в правое положение.
11. *Подключить PEN-провод* – перевести переключатель $S3$ в верхнее положение.
12. *Повторить действия 3...6, дополнительно выставив значения $C_{PEN} = C$* (переключатель $S5$).
13. *Включить стенд* – перевести переключатель $S2$ в положение «1».
14. *Произвести измерения тока I_{hA} в цепи тела человека с помощью амперметра, поочередно устанавливая с помощью переключателей $S4, S6, S8, S10$ значения активных сопротивле-*

ний фазных проводов и PEN-провода относительно земли $R_{из} \{1; 2,5; 10; 25; 100, \infty \text{ кОм}\}$.

15. *Отключить стенд* – положение переключателя S2 – «O».

2.2.2.2. Изменение силы тока в зависимости от емкости проводов относительно земли (при заданном активном сопротивлении изоляции проводов относительно земли) при нормальном режиме работы сетей

Необходимо снять зависимость $I_{hA} = f(C)$ при условии

$$\begin{cases} C_A = C_B = C_C = C_{PEN} = C, \\ R_A = R_B = R_C = R_{PEN} = R_{из} = \text{const.} \end{cases}$$

1. *Изолировать нейтраль* – перевести переключатель S1 в левое положение.
2. *Отключить PEN-провод* – перевести переключатель S3 в нижнее положение.
3. *Установить нормальный режим работы* – перевести переключатель S12 в положение «0».
4. *Смоделировать прямое прикосновение человека к фазному проводу «А»* – установить переключатель S15 в положение «А».
5. *Установить значение сопротивления цепи тела человека R_h* переключателем S13. При этом ручка регулятора резистора R_h должна находиться в положении «0».
6. *Установить значения активного сопротивления фазных проводов относительно земли $R_{из}$* (переключатели S6, S8, S10).
7. *Включить стенд* – перевести S2 в положение «1».
8. *Произвести измерения тока I_{hA}* в цепи тела человека с помощью амперметра, поочередно устанавливая с помощью переключателей S7, S9, S11 значения емкости фазных проводов относительно земли $C \{0; 0,02; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5 \text{ мкФ}\}$. Положение переключателя амперметра при измерениях – «A1».
9. *Выключить стенд* – перевести S2 в положение «O».

10. *Заземлить нейтраль* – перевести выключатель $S1$ в правое положение.
11. *Подключить PEN-провод* – перевести переключатель $S3$ в верхнее положение.
12. *Повторить действия 3... 6, дополнительно выставив значения $R_{PEN} = R_{из}$* (переключатель $S4$).
13. *Включить стенд* – перевести переключатель $S2$ в положение «I».
14. *Произвести измерения тока I_{HA} в цепи тела человека с помощью амперметра, поочередно устанавливая с помощью переключателей $S5, S7, S9, S11$ значения емкости фазных проводов и PEN-провода относительно земли $C \{0; 0,02; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5 \text{ мкФ}\}$.*
15. *Отключить стенд* – положение переключателя $S2$ – «O».

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет выполняется в тетради или на отдельных листах и должен содержать:

- 1) титульный лист по форме 1 (рис.11);
- 2) изложение цели работы;
- 3) порядок выполнения работы (в виде блок-схемы);
- 4) расчетные формулы (табл. 4) и шаблоны табл. 5...7;
- 5) результаты эксперимента, представленные в табл. 5...7 и на рис.12, 13. Все необходимые расчеты должны быть проведены в соответствии с правилами приближенных вычислений (прил.);
- 6) выводы.

Московский автомобильно-дорожный институт
(государственный технический университет)

Кафедра

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
по курсу «Безопасность жизнедеятельности»

Анализ электробезопасности
трехфазных сетей переменного тока
напряжением до 1000 В

Студент: Ф.И.О.
группа
Преподаватель: Ф.И.О.

Отметка о допуске _____ дата подпись преподавателя
Отметка о выполнении _____ дата подпись преподавателя
Отметка о защите _____ дата подпись преподавателя

Москва 20__ год

Рис. 11. Титульный лист по форме 1

Таблица 4

Анализ опасности прикосновения человека к исправному фазному проводу
 трехфазных сетей переменного тока напряжением до 1000 В
 (формулы для расчета напряжения прикосновения и тока поражения)

Режим нейтрали	Нормальный режим работы	
	Напряжение прикосновения $U_{пр}$ (формула для расчета)	Ток поражения $I_{чел}$ (формула для расчета)
Изолированная нейтраль		
Заземленная нейтраль		
Изолированная нейтраль	Аварийный режим работы (замыкание фазного провода на землю)	
Заземленная нейтраль		

Таблица 5

Анализ опасности прикосновения человека к исправному фазному проводу «А»
 трехфазных сетей переменного тока напряжением до 1000 В
 при нормальном и аварийном режиме работы сетей

R _{из} , кОм	C, мкФ	R _h , кОм	R _{зм} , Ом	U _ф , В (фазы А, В, С)	U _{пр} , В	I _{чел} , mA	
						расчет	эксперимент
						1. Сеть с изолированной нейтралью	
				U _ф (А) =	а) нормальный режим работы сети		
				U _ф (В) =			
				U _ф (С) =	б) аварийный режим работы сети (замыкание фазного провода «В» на землю)		
						2. Сеть с заземленной нейтралью	
				U _ф (А) =	а) нормальный режим работы сети		
				U _ф (В) =			
				U _ф (С) =	б) аварийный режим работы сети (замыкание фазного провода «В» на землю)		

Таблица 6

Влияние активного сопротивления изоляции проводов сетей переменного тока напряжением до 1000 В на опасность прикосновения человека к исправному фазному проводу при нормальном режиме работы

C, мкФ	R _h , кОм	U _ф , В (фаза А)	R _{из} , кОм	I _{цел} , мА		I _{цел} , мА	
				расчет сеть с изолированной нейтралью	эксперимент	расчет сеть с заземленной нейтралью	эксперимент
			1				
			2,5				
			10				
			25				
			100				
			∞				

Таблица 7

Влияние емкости проводов сетей переменного тока напряжением до 1000 В на опасность прикосновения человека к исправному фазному проводу при нормальном режиме работы

$R_{из}, \text{кОм}$	$R_h, \text{кОм}$	$U_{\phi}, \text{В}$ (фаза А)	$C, \text{мкФ}$	$I_{\text{чел}}, \text{мА}$		$I_{\text{чел}}, \text{мА}$	
				расчет сеть с изолированной нейтралью	эксперимент	расчет сеть с заземленной нейтралью	эксперимент
			0				
			0,02				
			0,1				
			0,25				
			0,5				
			1,0				
			2,5				

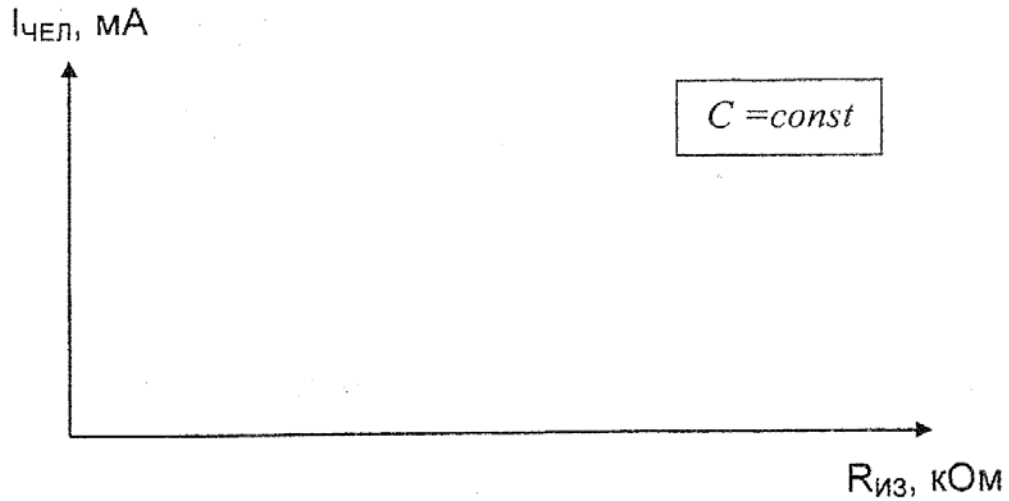


Рис.12. Зависимость тока поражения $I_{\text{ЧЕЛ}}$ при прямом прикосновении человека к фазному проводу сети от сопротивления изоляции фазных проводов относительно земли $R_{\text{ИЗ}}$ при нормальном режиме работы сети:

- — — — — трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью;
- - - - - трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью;

• 1 – эксперимент; 2 – расчет

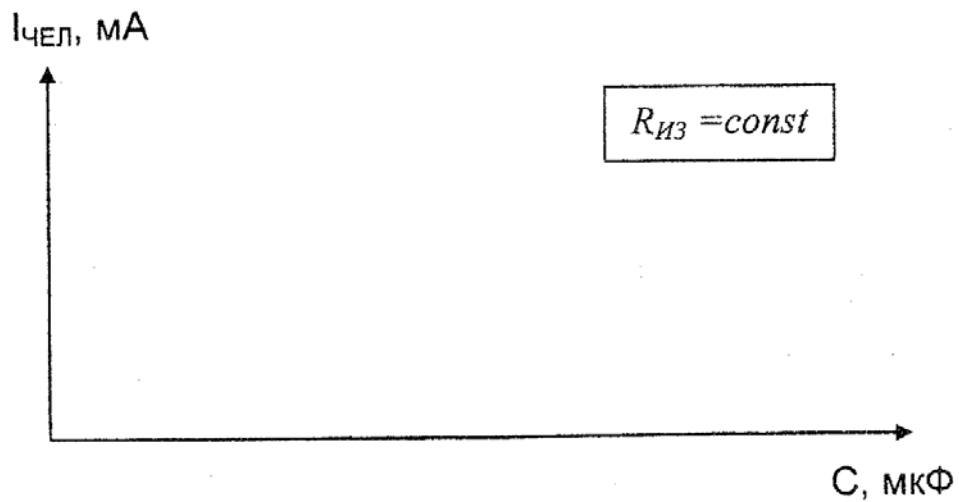


Рис.13. Зависимость тока поражения $I_{\text{ЧЕЛ}}$ при прямом прикосновении человека к фазному проводу сети от емкости фазных проводов относительно земли C при нормальном режиме работы сети:

- — — — — трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью;
- - - - - трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью;

1 – эксперимент; 2 – расчет

4. УСЛОВИЯ ДОПУСКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Наличие оформленных пп. 1... 4 отчета.
2. Успешное прохождение теста, определяющего подготовленность к выполнению работы.

5. УСЛОВИЕ ДОПУСКА К ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

Наличие полностью оформленного отчета с отметками преподавателя о допуске и выполнении работы.

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Безопасность – состояние объекта защиты, при котором воздействие на него всех потоков вещества, энергии и информации не превышает максимально допустимых значений.

Биологическая (истинная) смерть – необратимое явление, характеризующееся прекращением биологических процессов в клетках и тканях организма и распадом белковых структур; наступает по истечении периода *клинической смерти*.

Глухозаземленная нейтраль – *нейтраль* трансформатора или генератора, присоединенная к *заземляющему устройству* непосредственно или через малое сопротивление.

Заземляющее устройство – совокупность заземлителя (металлического проводника или группы соединенных между собой металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей) и заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части с заземлителем.

Изолированная нейтраль – *нейтраль* трансформатора или генератора, не присоединенная к *заземляющему устройству* или присоединенная к нему через большое сопротивление приборов сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных им устройств.

Клиническая (мнимая) смерть — переходный период от жизни к смерти, наступающий с момента прекращения работы сердца и органов дыхания. Длительность клинической смерти составляет в большинстве случаев 4...5 мин (в некоторых случаях 7...8 мин), определяется временем с момента прекращения сердечной деятельности и дыхания до начала гибели клеток коры головного мозга.

Линейное напряжение – напряжение между фазными проводами сети.

Местные электротравмы – четко выраженные местные повреждения тканей организма, вызванные воздействием *электрического тока* или *электрической дуги*.

Напряжение прикосновения – напряжение между двумя точками цепи, которых одновременно касается человек, иначе говоря, падение напряжения в сопротивлении тела человека

$$U_{\text{пр}} = I_{\text{чел}} \cdot R_{\text{чел}}$$

Нейтраль – общая (нейтральная) точка соединенных в звезду обмоток (элементов) электрооборудования, напряжения которой относительно внешних выводов обмотки одинаковы по абсолютному значению.

Неотпускающий ток – *электрический ток*, вызывающий при прохождении через организм человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник (электрод).

Опасность – негативное свойство живой и неживой материи, способное причинять ущерб самой материи: людям, природной среде, материальным ценностям. Опасности реализуются в виде потоков энергии, вещества и информации, они существуют в пространстве и во времени. Многие опасности носят скрытый (потенциальный) характер.

Ощутимый ток – *электрический ток*, вызывающий при прохождении через организм человека ощутимые раздражения.

Переменный ток – *электрический ток*, изменяющийся во времени по величине и/или направлению. В практике наиболее часто используют переменный синусоидальный ток.

Постоянный ток – *электрический ток*, не изменяющийся во времени.

Сила тока – количество электричества dq , проходящее через поперечное сечение проводника за бесконечно малый промежуток времени dt : За единицу силы тока в системе СИ принят ампер (А).

Термоэлектронная эмиссия – выход электронов из металла под

действием теплового движения (при нагреве).

Фазное напряжение – напряжение между началом и концом обмотки источника тока (трансформатора, генератора) или между фазным и нулевым проводами.

Фибрилляционный ток – *электрический ток*, вызывающий при прохождении через организм человека *фибрилляцию*.

Фибрилляция – хаотическое и разновременное сокращение отдельных волокон сердечной мышцы (фибрилл), в результате которого сердце теряет способность перекачивать кровь, в организме прекращаются процессы кровообращения и дыхания и наступает смерть.

Шаговое напряжение (напряжение шага) – напряжение между двумя точками цепи тока, находящимися на расстоянии шага (0,8...1,0 м), на которых одновременно стоит человек.

Электрическая дуга – длительный самостоятельный электрический разряд в газах, поддерживающийся за счет *термоэлектронной эмиссии* с отрицательно заряженного электрода (катода).

Электрический ток – направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц: электронов, ионов и др. Условно за направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов.

Электрический удар – электротравма, при которой процесс возбуждения живых тканей организма *электрическим током*, проходящим через него, сопровождается произвольными судорожными сокращениями мышц тела.

Электроустановка – совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии.