

***В.И. Миндрин***

---

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ**

---

Нижний Новгород 2002

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет

**В.И. Миндрин**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

*Рекомендовано Ученым советом Нижегородского технического государственного университета в качестве учебного пособия для студентов специальностей 100200, 100400, 180400, 180500, 180900, 200400*

Нижний Новгород 2002

УДК 568.382.3: 621.31  
ББК 31  
М 615

**Электрическая безопасность:** Учеб. пособие /В.И. Миндрин; Нижегород. гос. техн. у-т. Нижний Новгород, 2002. 80 с.

ISBN 5-93272-183-9

Содержит сведения, необходимые студентам для освоения раздела «Электрическая безопасность» в курсе «Безопасность жизнедеятельности» и для дальнейшего использования этих знаний в практической деятельности при организации работ на производстве. Рассмотрены параметры электрического тока и механизм действия его на человека. Дан анализ опасностей поражения человека в трёхфазных и однофазных сетях. Рассмотрены технические средства защиты человека от поражения электрическим током в сетях до и выше 1000 В.

Пособие может быть использовано студентами-дипломниками при выполнении раздела дипломного проекта «Безопасность и экологичность проекта».

Рис. 50. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Рецензенты: Е.М.Бурда, А.Ф.Борисов

УДК 568.382.3: 621.31  
ББК 31

ISBN 5-93272-183-9

© Миндрин В.И., 2002

# Глава 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

## 1.1. СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМЕ

По отрицательному воздействию на человека электрический ток прочно занимает первое место среди других опасных факторов.

Электрический ток как опасный фактор есть «коварный и невидимый мститель», который никогда никому не прощает ошибок. Проходя через организм человека, он раздражает живые ткани и, начиная с определённой величины, вызывает в них отрицательную реакцию. Наиболее опасно поражение центральной нервной системы и сердечной мышцы человека.

Анализ несчастных случаев (НС) показал, что в период стабильной работы промышленности за 1980-1985 гг. на территории СССР число НС, связанных с электрическим током, от общего числа НС составляло 1% в промышленности и 3,5% в электроэнергетике. Из них число смертельных НС: 40% в промышленности и 60% в электроэнергетике. При этом около 80% всех НС, связанных с электрическим током, происходили на электроустановках (ЭУ) напряжением до 1000 В. Общее число смертельных НС от электрического тока в стране в указанный период составляло около 1500 чел. в год [3, с. 57].

В настоящий период в условиях стихийного перехода к рыночным отношениям нарушена единая техническая политика охраны труда на производстве. По данным государственной инспекции по охране труда в период с 1992 по 1998 гг. в России ежегодно травмировалось более 400 тыс. чел., из них 17-18 тыс. становились инвалидами, а около 8 тыс. чел. погибли [6, 7]. Основной процент всех НС приходится на связанные с электрическим током. От электрического тока на производстве в России ежегодно погибают около 4,5 тыс. чел. Причины высокого электротравматизма в современных условиях на производстве:

- низкая производственная, трудовая и исполнительная дисциплины;
- низкий уровень организации работ, в частности, выполнение работ без снятия напряжения и установки переносных заземлений;
- низкий уровень знаний «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» у специалистов организаторов производства;
- снижение качества изоляции электрических сетей и оборудования;
- отсутствие единых мероприятий по безопасности работ на предприятиях с разными формами собственности;

- снижение эффективности инспекторской деятельности и ответственности руководителей за техническую безопасность на приватизированных предприятиях;
- сокращение инженерных служб и охраны труда, ответственных за безопасность труда на производстве [8,9].

В выводах государственной инспекции по охране труда особо подчёркивается, что неудовлетворительное состояние безопасности труда, высокий уровень травматизма в значительной мере объясняется необразованностью, некомпетентностью, отсутствием фундаментальных знаний по охране труда у руководителей, специалистов предприятий, окончивших учебные заведения высшего и профессионального образования в последние годы.

### **1.2. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА**

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает на него:

- термическое действие – ожоги тела (1,2,3,4-й степени) при прохождении значительных токов и нагрева тканей до температуры 60-70 °С;
- механическое действие – разрыв и расслоение мышечных тканей, кровеносных сосудов и других органов от перегрева крови током;
- биологическое действие – сокращение тканей мышц и сухожилий в организме под действием тока;
- электролитическое действие – разложение молекул крови на заряженные частицы-ионы с изменением в них физико-химического состава;
- комплексное действие вызывает общее поражение организма.

### **1.3. ВИДЫ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ, СВЯЗАННЫХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

Многообразие действий электрического тока на организм человека приводит к следующим электрическим травмам:

- ожоги 1-2-й степени, преимущественно возникающие в электросетях с напряжением до 1000 В (это самый распространенный НС на производстве – 65%);
- ожоги 3-4-й степени, преимущественно возникающие в электросетях напряжением выше 1000 В;
- металлизация кожи – проникновение в кожу человека частиц металла вследствие разбрызгивания его под действием тока при горении дуги;
- электрические знаки – пятна на коже человека серо-желтого цвета диаметром 3-5 мм, возникающие при контакте с токоведущими частями;

- механические повреждения – ушибы, переломы при падении с высоты в результате действия электрического тока;
- электрический удар – действие тока на нервную систему и мышцы тела - может вызвать паралич дыхательных путей и остановку сердца;
- электрофтальмия – поражение сетчатки глаза под действием мощного ультрафиолетового излучения.
- 80-85% всех смертельных случаев электропоражений происходит от электрических ударов.

Персоналу, находящемуся в зоне смертельного НС, необходимо срочно оказать пострадавшему первую медицинскую помощь: искусственное дыхание «рот в рот» и наружный массаж сердца, технология которых рассматривается самостоятельно [1, с.52-70], [2, с.324-325].

## **1.4. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЧЕЛОВЕКА**

### **1.4.1. Сила тока через человека $I_h$**

Сила тока  $I_h$  или количество электричества, проходящее через тело человека, – основной параметр, определяющий исход поражения. Действия переменного и постоянного тока и соответствующие величины тока представлены в табл.1.1.

**Таблица 1.1**

**Действие электрического тока на человека**

<b>Действие электрического тока</b>	<b>Переменный ток <math>f=50</math> Гц, <math>U \approx 220</math> В, <math>\tau=2</math> с</b>	<b>Постоянный ток</b>
Пороговый осязаемый уровень, мА	0.6 ÷ 1.5	5 – 7
Пороговый неотпускающий, мА	10 ÷ 15	50 – 70
Фибрилляционный, мА	50	–
Смертельный, мА	100	300

Из приведенных данных следует, что переменный ток промышленной частоты  $f = 50$  Гц напряжением до 250 В опаснее постоянного тока. За одинаковое время действия переменный ток многократно отрицательно воздействует на ткани организма человека.

**Величина переменного тока  $I_h=100$  мА является смертельной для человека.**

### 1.4.2. Сопротивление тела человека $R_h$

Электрическое сопротивление тела человека можно представить в виде эквивалентной схемы (рис.1.1).

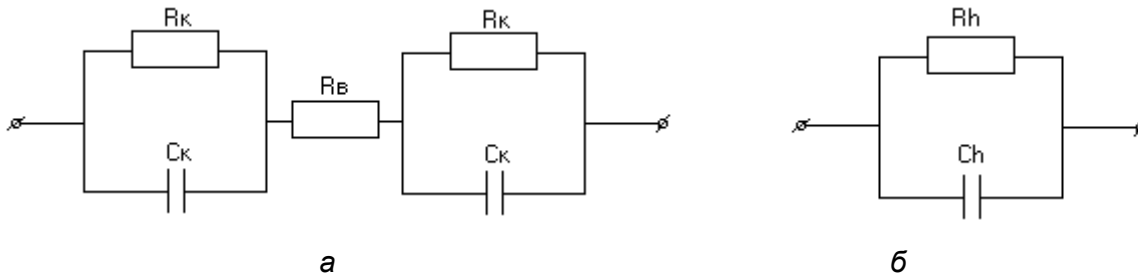


Рис. 1.1. Эквивалентная схема сопротивления тела человека:

*a* - полная эквивалентная схема; *б* - упрощённая;  $R_k$  – активное сопротивление верхнего слоя кожи человека – эпидермиса, Ом;  $C_k$  – емкость кожи человека, Ф;  $R_b$  – активное сопротивление внутренних тканей тела человека;  $R_h, C_h$ , – активное сопротивление и емкость тела человека

Полное сопротивление верхнего слоя кожи  $Z_k$  состоит из активного  $R_k$  и емкостного  $X_c$  сопротивлений, включенных параллельно. Емкостное сопротивление  $X_c = 1/\omega C_k$ , где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота электрического тока, рад/с.

Емкость эпидермиса зависит от толщины наружного слоя кожи (0,05 – 0,2 мм), от площади тела человека, температуры кожи и наличия в ней влаги и др. Как показывают опыты, емкость  $C_k$  величина небольшая и колеблется от нескольких сотен пикофарад до нескольких микрофарад. Поэтому сопротивление тела человека  $R_h$  можно условно считать состоящим из трех последовательно включенных активных сопротивлений: двух одинаковых сопротивлений наружного слоя кожи  $R_k$  и одного сопротивления внутренних тканей тела человека  $R_b$ , т. е.  $R_h = 2R_k + R_b$ . Активное сопротивление  $R_b$  практически у всех людей одинаково и составляет небольшую величину 300 – 500 Ом.

Приравняв незначительные по величине емкости  $C_k$  и  $C_h$  можно упростить основную эквивалентную схему сопротивлений, показанную на рис. 1.1, и представить ее как параллельное соединение активного сопротивления тела человека  $R_h$  и емкости тела человека  $C_h$  (рис. 1.1, б).

Следует сделать вывод: сопротивление тела человека  $R_h$  зависит главным образом от состояния кожи, самочувствия человека и в действительности изменяется в широких преде-

лах от 3 до 100 КОм. Кроме того,  $R_h$  зависит от величины тока  $I_h$ , приложенного напряжения  $U$  и длительности прохождения тока  $\tau$ , т.е.  $R_h = f(I_h, U, \tau)$ .

Рассмотрим эти зависимости:

### **Сопротивление $R_h=f(I_h)$**

Электрическое сопротивление тела человека  $R_h$  уменьшается под действием протекающего через него тока. На рис. 1.2 представлены в упрощенном виде два участка кровеносного сосуда без воздействия и под воздействием электрического тока.

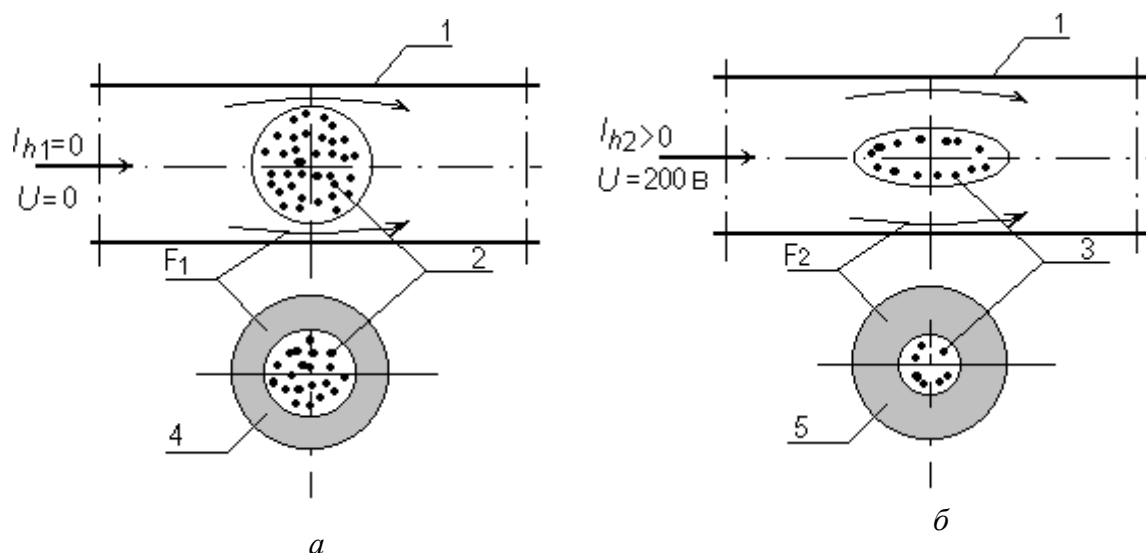


Рис. 1.2. Действие тока на кровеносный сосуд:

$a$  – при отсутствии тока,  $I_{h1} = 0$ ;  $b$  – под действием тока,  $I_{h2} > 0$ ; 1-кровеносный сосуд; 2-пузырек воздуха до деформации,  $I_h=0$ ; 3-пузырек воздуха, деформированный под действием тока,  $I_{h2}>0$ ; 4-сечение  $F_1$  для прохождения крови при  $I_{h1}=0$ ; 5-сечение  $F_2$  для прохождения крови и тока при  $I_{h2}>0$

Из рис. 1.2 следует, что под действием электрического тока ( $I_{h2}>0$ ,  $U =200\text{ В.}$ ) в кровеносном сосуде 1 деформируется газообразное диэлектрическое тело (в данном примере в виде пузырька воздуха), шарообразная форма 2 которого при  $I_{h1}=0$  превращается в сфероидную форму при  $I_{h2}>0$  и  $U=200\text{ В}$ . В результате живое сечение для прохождения крови и электротока в канале кровеносного сосуда увеличивается, т.е.  $F_2>F_1$ . Следовательно, электрическое сопротивление отдельных кровеносных каналов и в целом тела человека с  $R_h$  уменьшается под действием электрического тока.

### **Сопротивление $R_h=f(U)$**

С увеличением приложенного напряжения сопротивление тела человека  $R_h$  падает в первые две секунды ( $\tau=2\text{ с.}$ ) до следующих значений:

- если  $U=10\text{ В}$ , то  $R_h=40\text{ кОм}$ ;
- если  $U=110\text{ В}$ , то  $R_h=10\text{ кОм}$ ;



- если  $U=2000$  В, то  $R_h=200$  Ом.

Пояснения приведены в предыдущем случае с помощью рис.1.2.

### **Сопротивление $R_h=f(\tau)$**

Зависимости  $R_h=f(\tau)$  на переменном и постоянном токе представлены в виде графиков на рис. 1.3.

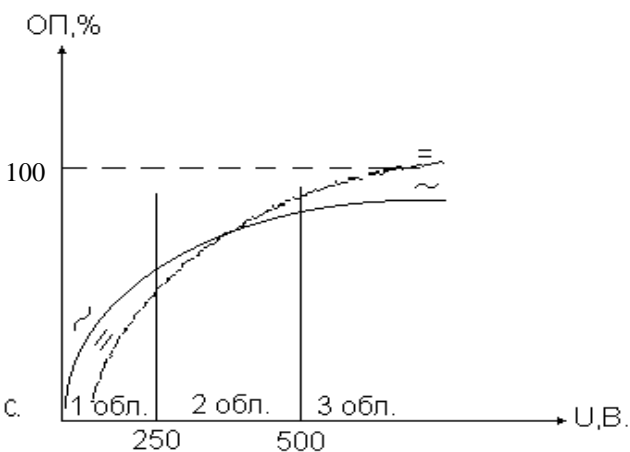
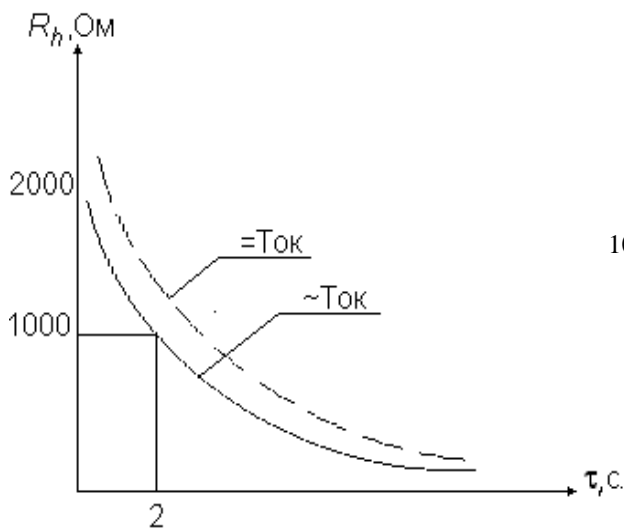


Рис.1.3. Сопротивление тела человека  $R_h=f(\tau)$

Рис. 1.4. Влияние рода тока на опасность поражения

На рис. 1.3 видно, что сопротивление тела человека  $R_h$ , находящегося под действием переменного или постоянного тока, быстро снижается, особенно в первые секунды (доли секунды) времени  $\tau$ .

Международной электротехнической комиссией (МЭК) в качестве расчетного сопротивления тела человека принято сопротивление  $R_h^{рас} = 1000$  Ом, за время действия тока  $\tau = 2$  с.

### **1.4.3. Род тока: постоянный и переменный**

Опасность поражения (ОП) человека от действия на него переменного или постоянного тока зависит от величины напряжения электрической сети. Влияния рода тока на опасность поражения представлено в виде графиков на рис. 1.4.

На рис. 1.4 видно, что характер действия постоянного и переменного тока на организм человека меняется, при этом можно выделить три области в зависимости от величины напряжения сети:

*1-я область.* Напряжение сети  $U < 250$  В. В этой области опасность поражения больше от переменного тока, чем от постоянного, т.к. он многократно пересекает тело человека, вызывая повышенное раздражение тканей. Кроме того, на постоянном токе при напряжении

$U < 250$  В опасность поражения меньше из-за отсутствия пробоя кожи и высокого емкостного сопротивления тела человека  $X_c$ .

*2-я область.* Напряжение  $250 \leq U \leq 500$  В. В этой области действие переменного и постоянного тока считается одинаковым. Сопротивление тела человека  $R_h$  выравнивается на обоих родах тока из-за пробоя эпидермиса током более высокого напряжения.

*3-я область.* Напряжение сети  $U > 500$  В. В этой области, особенно в сетях линий электропередач высокого (35 кВ) и сверхвысокого напряжений (330 кВ), опасность поражения больше от постоянного тока.

При больших напряжениях сопротивление тела человека падает из-за пробоя эпидермиса постоянным током. Кроме того, на переменном токе в сетях больших напряжений возникают дополнительные реактивные сопротивления [3].

#### **1.4.4. Частота переменного тока $f$**

Как показывает статистика электротравматизма, а также исследования, проведенные в нашей стране и за рубежом, влияние частоты переменного тока на организм человека имеет не однозначный характер.

Опасность поражения человека (ОП%) в зависимости от частоты тока  $f$ , Гц, выражена графиком на рис. 1.5.

Из рис. 1.5 следует, что при увеличении частоты переменного тока, например, с 10 до 60 Гц опасность поражения человека электрическим током увеличивается, достигая максимального значения при частоте  $f=60$  Гц (зоны *a* и *б*). Это происходит, во-первых, из-за роста числа раздражений в молекулярных тканях тела человека, во-вторых, в зоне частот 10÷60 Гц амплитудные величины тока соизмеримы с размерами молекулярных структур тела человека. В результате поражается весь объем молекулы и нарушается ее функционирование. Отрицательные процессы становятся в них необратимыми.

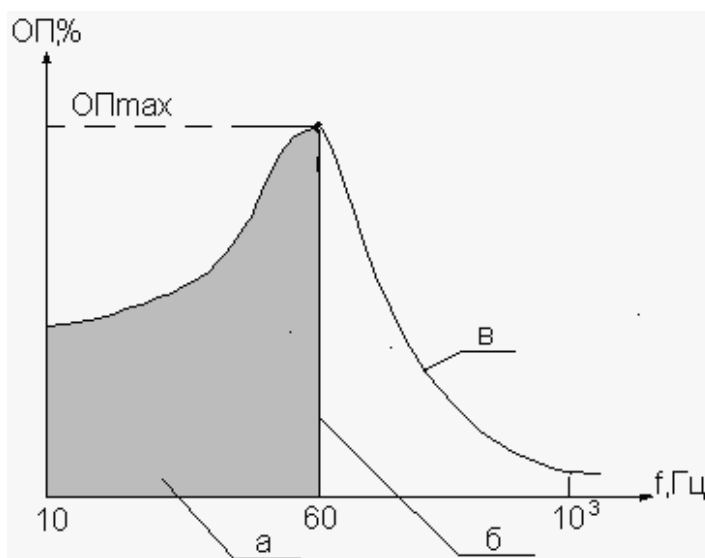


Рис. 1.5. Влияние частоты тока на опасность поражения человека:  
*a* – опасность высокая при  $f < 60$  Гц; *б* – опасность максимальная при  $f = 60$  Гц; *в* – опасность уменьшается при  $f > 60$

С последующим увеличением частоты переменного тока, например до 1000 Гц, опасность поражения человека резко уменьшается (рис. 1.5, зона в). Увеличение частоты тока в этой зоне сопровождается дальнейшим уменьшением амплитуды тока, в результате поражаются меньший объем молекулярных структур в теле человека. В незатронутых током областях обратимые процессы восстанавливают нормальное функционирование отдельных тканевых структур и всего организма человека.

При дальнейшем увеличении частоты тока, например до 500 кГц и более, опасность поражения человека непосредственно от электролитического влияния переменного тока значительно уменьшается, но остается опасность термического ожога.

В производственной практике в сборочных цехах, электронагревательных установках, электроинструменте и в другом оборудовании по технико-экономическим соображениям и условиям техники безопасности широко применяется переменный ток частотой  $f = 300 \div 500$  Гц. С увеличением  $f$  тока уменьшаются массогабариты электрооборудования.

В табл. 1.1, согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ “Электробезопасность. Предельные уровни напряжения и токов”, приведены значения нормированных кратковременно допустимых величин параметров электрического тока: напряжение прикосновения  $U_{пр}$ , сила тока  $I_h$  при частотах переменного тока  $f=50$  и 400 Гц и времени его действия на человека  $\tau$ , с.

**Таблица 1.2**

**Значения кратковременно допустимых напряжений прикосновения и токов в помещениях I и II классов по электрической опасности**

Характеристика электроустановки	Нормируемая величина	Продолжительность воздействия, с						
		0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	3,0	От 3 до 10
Частота $f=50$ Гц Напряжение до 1000 В с изолированной и заземленной нейтралью	$U_{пр}$ В	500	250	100	75	50	36	36*
	$I_h$ , мА	300	250	100	75	50	6	6
То же при частоте 400 Гц	$U_{пр}$ В	-	500	200	140	100	36	36**
	$I_h$ , мА	-	500	200	140	100	8	8
Постоянный ток	$U_{пр}$ В	500	400	250	200	150	100	100***
	$I_h$ , мА	500	400	200	150	150	50	50

**Примечание.** В особо опасных помещениях III класса и вне помещения при  $\tau$  от 3 до 10 с:

\* при частоте  $f=50$  Гц  $U_{пр}=12$  В;

\*\* при частоте  $f=400$  Гц  $U_{пр}=24$  В;

\*\*\* на постоянном токе  $U_{пр}=50$  В  $I_h=25$  мА.

Из табл. 1.2 видно, что допустимые значения напряжения прикосновения  $U_{пр}$  и тока  $I_h$ , протекающего через человека при частоте  $f=400$  Гц за время действия  $\tau$  от 0,2 до 1 с по сравнению с  $U_{пр}$  и  $I_h$  частотой  $f=50$  Гц, увеличены в два раза. На постоянном токе напряжением до 1000 В допустимые значения  $U_{пр}$  и  $I_h$  также увеличены по сравнению с теми же значениями на переменном токе.

При кратковременном действии тока ( $\tau \leq 10$  с) в организме человека при допустимых параметрах  $U_{пр}$  и  $I_h$  не возникают судороги и сокращения мышц. Паралич дыхания и фибриляция сердца наступают при длительном действии ( $\tau=15\div 30$  с) указанных значений напряжения и тока.

Кроме рассмотренных параметров, на исход поражения человека электрическим током оказывают влияние следующие факторы: путь тока в теле человека, его физическое состояние, а также параметры микроклимата. Путь тока в теле человека существенно влияет на исход поражения. Опасность поражения увеличивается, если на пути тока оказываются жизненно важные органы - сердце, легкие, головной мозг. Наиболее опасно распространение тока в теле пострадавшего от руки к руке, от левой руки к ногам, менее опасен путь тока нога - нога.

Физически здоровые люди имеют большое электрическое сопротивление и легче переносят электрические травмы, чем люди больные и слабые. В случае заболеваний кожи, сердечно-сосудистой системы, легких и других органов людей не допускают к работе на электроустановках.

При наличии в производственном помещении повышенной влажности, высокой температуры окружающей среды и низкого парциального давления воздуха опасность поражения человека электрическим током увеличивается.

### **1.5. РАСТЕКАНИЕ ТОКА В ЗЕМЛЕ**

Растекание тока в земле происходит от случайного или преднамеренного проводника-заземлителя.

Нам необходимо знать, от чего зависит потенциал на поверхности земли и как он изменяется с увеличением или уменьшением расстояния.

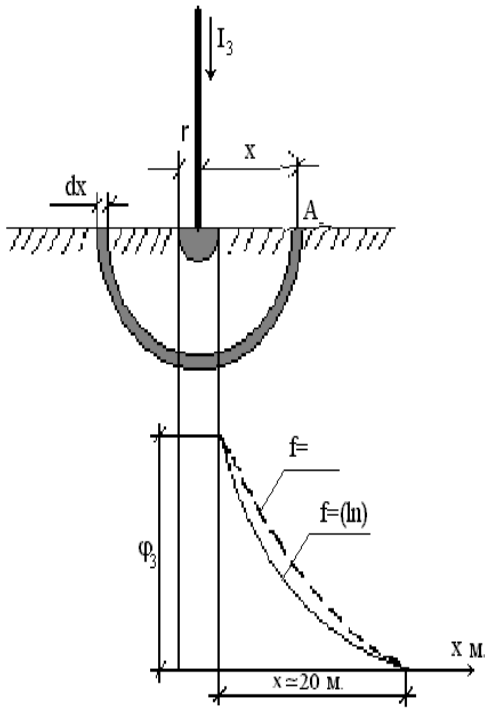


Рис. 1.6. Растекание тока от полусферического заземлителя

### 1.5.1. Растекание тока от полусферического заземлителя

Дано:

$I_3$  – ток через заземлитель А;

$\rho_r$  – удельное сопротивление грунта, Ом м;

$r$  – радиус полусферического заземлителя, м;

Определить:

$\varphi_x$  – потенциал в любой точке на поверхности земли, В;

$\varphi_3$  – потенциал на заземлителе, В.

На поверхности земли выбираем произвольную точку А на расстоянии  $x$ , как на рис. 1.6, с элементарным участком толщиной  $dx$ .

Потенциал в точке А при растекании тока  $I_3$  через полусферический заземлитель определяется интегрированием напряженности электрического поля на участке от  $x$  до  $\infty$ .

$\varphi_A = \int_x^{\infty} E_A dx$ , здесь  $E_A$  – напряженность электрического поля в точке А, определяемая по

формуле  $E_A = j_A \rho_r$ , В/м. Плотность тока  $j_A$  в точке А находится из выражения  $j_A = \frac{I_3}{2\pi x^2}$ ,  $\frac{A}{m^2}$ .

Подставим  $E_A$  и  $j_A$  в исходное выражение, получим  $\varphi_A = \int_x^{\infty} \frac{I_3 \rho_r}{2\pi x^2} \cdot dx = \frac{I_3 \rho_r}{2\pi} \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2}$ . Решение

определенного интеграла  $\int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2}$  дает величину  $1/x$ . Следовательно, потенциал в точке А

$\varphi_A = I_3 \rho_r / 2\pi x$ . Если примем  $\varphi_A = \varphi_x$ , то потенциал на поверхности земли в любой точке определится аналогично:

$$\varphi_x = I_3 \rho_r / 2\pi x, \text{ В.} \quad (1.1)$$

При замене  $x$  на радиус  $r$  определим потенциал на самом полусферическом заземлителе

$$\varphi_3 = I_3 \rho_r / 2\pi r, \text{ В.} \quad (1.2)$$

Из формул (1.1) и (1.2) следует  $\varphi_x \cdot x = \varphi_3 \cdot r$ , откуда получим выражение

$$\varphi_x = \varphi_3 \frac{r}{x}. \quad (1.3)$$

Из значений (1.2) и (1.3) можно сделать выводы:

- потенциал на самом полусферическом заземлителе  $\Phi_3$  зависит от удельного сопротивления грунта  $\rho_r$ , радиуса полусферы  $r$  и величины стекаемого в землю тока  $I_3$ ;
- потенциал на поверхности земли зависит от расстояния  $x$  и изменяется по закону гиперболы  $1/x$  и уменьшается по мере удаления от заземлителя от максимального значения  $\Phi_3$  до практически нулевого значения на расстоянии  $X \approx 20$  м (рис. 1.6).

### 1.5.2. Растекание тока от стержневого вертикального заземлителя

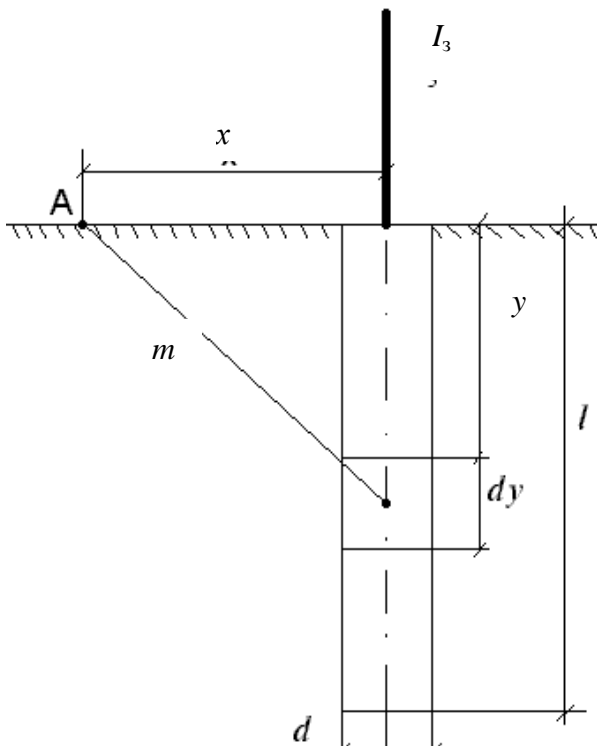


Рис. 1.7. Растекание тока от стержневого вертикального заземлителя

треугольника с катетами  $x$  и  $y$ :  $m = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Величину элементарного тока  $dI_3$  вычислим

по формуле  $dI_3 = \frac{I_3}{2\pi l} dy$ , А.

Подставляя величины  $m$  и  $dI_3$  в исходное выражение получим  $d\Phi_A = \frac{I_3 \rho_r dy}{2\pi l \sqrt{x^2 + y^2}}$

Далее, интегрируем по длине стержня от 0 до  $l$ .

Дано:

$\rho_r, I_3, d, l$ , - удельное сопротивление грунта, ток через стержневой заземлитель, диаметр и длина заземлителя.

Определить:

$\Phi_x$  и  $\Phi_3$  - потенциалы в любой точке на поверхности земли и на самом заземлителе, В.

Разбиваем длину заземлителя  $l$  на бесконечно малые участки длиной  $dy$ .

Потенциал в произвольной точке  $A$  на поверхности земли, отстоящей от оси стержневого заземлителя на расстоянии  $x$ , создаваемый элементом  $dy$ , определяется как

$$d\Phi_A = dI_3 \rho_r / 2\pi m, \text{ В.}$$

Расстояние  $m$  от элемента  $dy$  до точки  $A$  определяется как гипотенуза прямоугольного

$$\varphi_A = \frac{I_3 \rho_{\Gamma}}{2\pi l} \int_0^l \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad \text{интеграл} \quad \int_0^1 \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}.$$

При условии  $\varphi_x = \varphi_A$  получим величину потенциала в любой точке на поверхности земли:

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho_{\Gamma}}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}, \text{ В.} \quad (1.4)$$

Если принять  $x=0,5d=r$ , при этом  $r$  значительно меньше  $l$ , т.е.  $r \ll l$ , то можно определить потенциал на самом вертикальном заземлителе:

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho_{\Gamma}}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r}, \text{ В.} \quad (1.5)$$

Из выражений (1.4) и (1.5) следуют выводы:

- Потенциал на самом стержневом вертикальном заземлителе  $\varphi_3$  зависит от величины стекаемого тока  $I_3$ , удельного сопротивления грунта  $\rho_{\Gamma}$ , длины заземлителя  $l$  и его радиуса  $r$ . Причем с увеличением длины потенциал  $\varphi_3$  на стержневом заземлителе уменьшается более значительно, чем с увеличением радиуса.
- Потенциал на поверхности земли  $\varphi_x$  вокруг стержневого заземлителя изменяется по логарифмическому закону  $f=(\ln)$ . На начальном участке потенциальная кривая  $f(\ln)$  изменяется более круче по сравнению с изменением потенциала по гиперболе  $f=(1/x)$  от полусферического заземлителя (рис. 1.6).

### 1.6. НАПРЯЖЕНИЕ ШАГА $U_{\text{ш}}$

Напряжением шага называется разность потенциалов между двумя точками на поверхности земли, на которых одновременно стоит человек.

Рассмотрим пример с полусферическим заземлением (рис. 1.8).

Напряжение шага  $U_{\text{ш}}$  в общем виде с учетом формулы (1.3) можно выразить

$$U_{\text{ш}} = \varphi_3 \frac{r}{x} - \varphi_3 \frac{r}{x+a}, \text{ В. Преобразуя эту зависимость, получим}$$

$$U_{\text{ш}} = \varphi_3 \left( \frac{r}{x} - \frac{r}{x+a} \right) = \varphi_3 \frac{ra}{x(x+a)}. \quad (1.6)$$

Здесь выражение  $\beta = \frac{ra}{x(x+a)}$  называется коэффициентом шага.

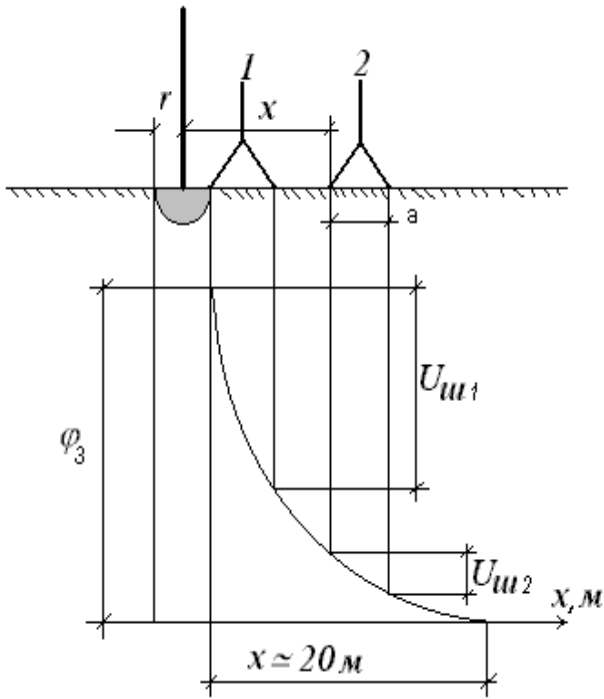


Рис. 1.8. Напряжение шага от полусферического заземлителя:

$x$  – расстояние от ступни человека до центра заземлителя;  $r$  – радиус заземлителя;  $a$  – длина шага человека, принимаемая в расчетах 0,8 м;  $\varphi_3$  – потенциал на полусферном заземлителе, В  
стоянии  $x \geq 20$  от заземлителя отсутствует.

Если длина шага  $a=0$  (ступни ног вместе), то параметры  $U_{ш}$  и  $\beta$  также обращаются в ноль и опасность поражения отсутствует. Если человек стоит на эквипотенциальной кривой

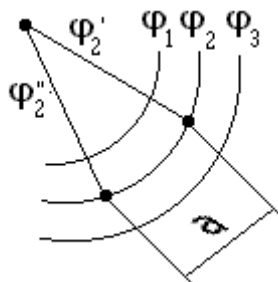


Рис. 1.9. Эквипотенциальные кривые на поверхности земли от полусферического заземлителя

– линии равного потенциала, то потенциалы в обоих ступнях равны между собой  $\varphi_2' = \varphi_2''$  (рис. 1.9). Поэтому напряжение шага  $U_{ш}$  в таком положении ступней человека равно нулю:

$$U_{ш} = \varphi_2' - \varphi_2'' = 0$$

Если человек находится вблизи протяженного заземлителя, то необходимо стоять посередине заземлителя перпендикулярно продольной оси по сечению АА (рис. 1.10), где плотность распространения потенциальных кривых меньше по сравнению с плотностью кривых по концам заземлителя. По этой причине положение П1 - менее опасно по сравнению с положением с П2.

Напряжение шага в общем виде можно выразить

$$U_{ш} = \varphi_3 \beta. \quad (1.7)$$

Проанализируем формулы (1.6) и (1.7) и сделаем выводы.

Если расстояние  $x = r$ , то параметры  $\beta$  и  $U_{ш}$  принимают максимальные значения:

$$\beta^{\max} = \frac{a}{r + a}, \quad (1.8)$$

$$U_{ш}^{\max} = \varphi_3 \beta^{\max}. \quad (1.9)$$

Опасность поражения человека в положении 1 на рис. 1.8 максимальная, когда одна ступня человека находится на заземлителе, а другая на расстоянии шага  $a$ .

Если расстояние  $x \geq 20$  м (что равнозначно при  $x = \infty$ ), то значения параметров  $U_{ш}$  и  $\beta$  становятся равными нулю. Опасность поражения человека от напряжения шага на расстоянии  $x \geq 20$  от заземлителя отсутствует.



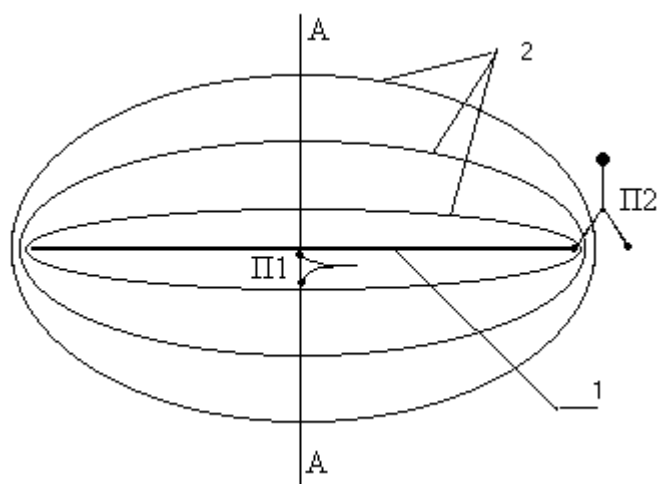


Рис. 1.10. Эквипотенциальные кривые от протяженного заземлителя:  
 1 – заземлитель протяженный; 2 – эквипотенциальные кривые;  
 П1, П2 – менее и более опасное положения человека

### 1.6.1. Меры защиты от напряжения шага

Максимальная опасность от напряжения шага возникает, когда одна ступня человека находится на самом заземлителе, а другая - на расстоянии шага  $a$ .

Высока опасность вблизи заземлителя на расстоянии  $X \ll 20$  м. В зоне действия напряжения шага ступни ног необходимо держать вместе и удаляться из нее следует, перемещая ступни ног и не отрывая их друг от друга (“гусиным шагом”) или прыжками, остерегаясь от падения. По отношению к заземлителю необходимо располагаться “фронтом”, т. е. грудью или спиной, и в случае протяженного заземлителя (упавший с опор проводник, металлическая труба, оказавшаяся под напряжением и др.) находиться в середине его длины.

Опасность отсутствует при нахождении человека на расстоянии от заземлителя  $X \Rightarrow 20$  м.

Максимальное значение напряжения шага в случае вертикального заземлителя определяется разностью выражений (1.5) и (1.4), в результате получаем формулу

$$U_{\text{ш}}^{\text{max}} = \frac{I_3 \rho_{\Gamma}}{2 \pi l} \ln \frac{a}{r}, \quad (1.10)$$

## 1.7. НАПРЯЖЕНИЕ ПРИКОСНОВЕНИЯ $U_{пр}$

Напряжением прикосновения называется разность потенциалов между двумя точками цепи тока: корпусом электроустановки и основанием, на котором стоит человек.

Рассмотрим на примере трех заземленных электроустановок (ЭУ), расположенных на разном удалении от вертикального стержневого заземлителя, (рис. 1.11).

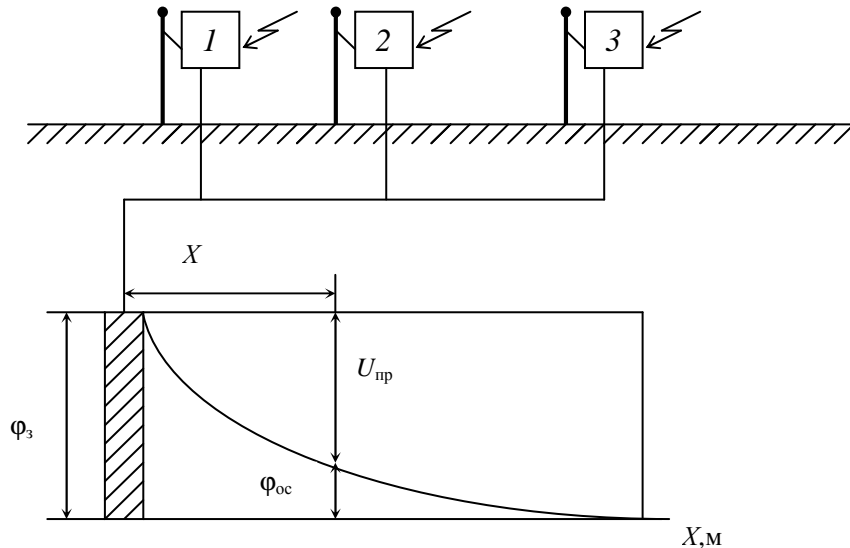


Рис. 1.11. Напряжение прикосновения при вертикальном заземлителе:  
 1,2,3 – корпуса ЭУ, замкнутые на фазный проводник и соединенные с человеком;  $U_{пр}$  –  
 напряжение прикосновения человека, соединенного с ЭУ-2;  $\varphi_з$  – потенциал вертикального  
 заземлителя;  $\varphi_{ос}$  – потенциал основания, на котором стоит человек

При замыкании фазного проводника на корпус любой электроустановки 1,2 или 3, например, при повреждении изоляции в результате вибрации на корпусе возникает потенциал  $\varphi_к$ , близкий по значению к потенциалу на заземлителе  $\varphi_з$ , ввиду малого сопротивления заземляющих проводников и самого заземлителя, т. е.  $\varphi_к = \varphi_з$ . При растекании тока от заземлителя на поверхности земли (на основании) образуется потенциал  $\varphi_{ос}$ , зависящий от формы потенциальной кривой и расстояния  $X$ , (рис. 1.11).

Определим напряжение прикосновения в общем виде:

$$U_{пр} = \varphi_з - \varphi_{ос} = \varphi_з \left(1 - \frac{\varphi_{ос}}{\varphi_з}\right).$$

Величина в скобках есть коэффициент прикосновения

$$\alpha = \left(1 - \frac{\varphi_{ос}}{\varphi_з}\right), \quad (1.11)$$

тогда

$$U_{пр} = \varphi_з \alpha. \quad (1.12)$$

Анализ формул (1.11) и (1.12) приводит к следующим выводам:

- если расстояние  $X \geq 20$  м (положение 3 на рис. 1.11), то  $\varphi_{oc} = 0$ ,  $\alpha = 1$  и напряжение прикосновения принимает максимальное значение, равное потенциалу заземлителя,  $U_{пр}^{max} = \varphi_3$ , т. е. есть с удалением от заземлителя напряжение прикосновения увеличивается (положения 2 и 3) и становится максимальным при  $X \geq 20$  м;
- если расстояние  $X = 0$  (положение 1), то  $\varphi_{oc} = \varphi_3$ ,  $\alpha = 0$  и напряжение прикосновения равно нулю,  $U_{пр} = 0$ , т. е. при нахождении человека непосредственно над заземлителем опасность поражения человека от напряжения прикосновения отсутствует, так как потенциалы на корпусе ЭУ и на основании равны между собой.

Сравнительный анализ опасностей поражения человека от напряжения шага и прикосновения показывает:

1. Опасность поражения от напряжения шага и прикосновения в зависимости от нахождения человека относительно заземлителя прямо противоположная. Максимальная опасность от напряжения шага – вблизи заземлителя, а от напряжения прикосновения – вдали от заземлителя.

2. Максимальное напряжение прикосновения без дополнительных сопротивлений в цепи человека всегда опаснее напряжения шага, так как, во-первых, максимальное значение коэффициента прикосновения  $\alpha^{max} = 1$ , в то время как  $\beta^{max}$  всегда меньше единицы; во-вторых, протекание тока по пути “рука – нога” или “рука – рука” от напряжения прикосновения опаснее, чем по пути “нога – нога” от напряжения шага.

3. Для снижения опасности поражения человека от напряжения прикосновения в производственных помещениях заземлители должны устанавливаться по возможности ближе к ЭУ с учетом расположения рабочих мест.

### **1.7.1. Меры защиты от напряжения прикосновения и шага**

В производственных помещениях при перемещении людей по всей площади, для устранения опасности поражения и от напряжения прикосновения и от напряжения шага применяется техническая мера защиты – выравнивание потенциала основания. Для чего используется контурное заземление с установкой группового заземлителя в виде сетки. Вертикальные заземлители располагаются на расстоянии друг от друга равном или меньше их длины, т. е.  $S \leq l$ . Схема контурного заземления представлена на рис. 1.12.

При замыкании фазного проводника на корпус ЭУ, соединенной с групповым заземлителем, происходит растекание тока от каждого заземлителя по взаимно пересекающимся потенциальным кривым  $I$  (рис. 1.12), потенциалы которых, складываясь, образуют суммарный

групповой потенциал 2. В результате на основании помещения появляется более или менее одинаковый во всех точках потенциал 3, равный потенциалу на корпусе ЭУ, т. е.  $\phi_{oc} = \phi_k$ .

Следовательно, напряжение прикосновения и шага становятся близкими к нулевым значениям:  $U_{пр} \approx 0$ ,  $U_{ш} \approx 0$ .

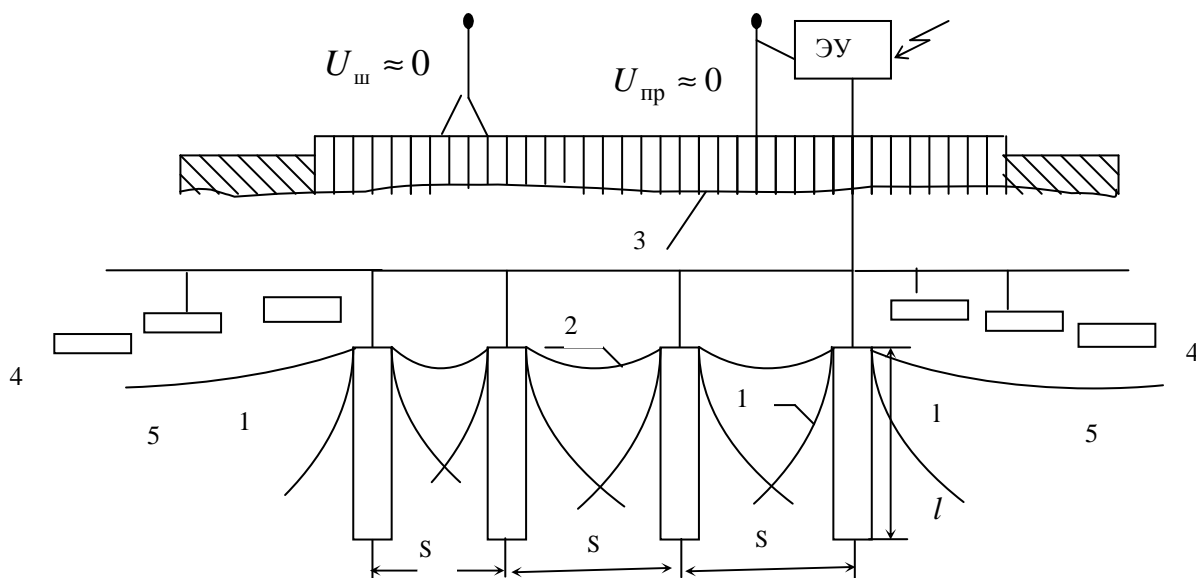


Рис. 1.12. Контурное заземление с групповым заземлителем:

1 – естественные потенциальные кривые; 2 – суммарный групповой потенциал  $\phi_{гр}$ ;  
 3 – эпюра потенциалов на основании помещения и вне его; 4 – дополнительные  
 металлические полосы; 5 – пологие потенциальные кривые вне помещения;  $l$  – длина  
 заземлителей;  $S$  – расстояние между ними, м

Чтобы уменьшить напряжение шага за пределами контура заземления, вне территории здания, вдоль проходов или проездов, в грунт закладываются дополнительные металлические полосы 4, соединенные с заземлителями, как показано на рис. 1.12, благодаря чему спад потенциала на поверхности происходит по более пологой кривой 5 и напряжение шага вблизи контура заземления принимает безопасное значение.

## Глава 2. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

На опасность поражения человека в электрических сетях влияют следующие основные факторы: схема электрической сети; схема прикосновения к ней; сопротивление изоляции проводников сети и человека. Рассмотрим каждый из них.

### *Схема электрической сети*

В электрических сетях и установках получили распространение однофазные сети – одно- и двухпроводные, и трехфазные сети – трех-, четырех- и пятипроводные с изолированной и глухозаземленной нейтралью. Принципиальные схемы однофазных сетей приведены на рис. 2.1, 2.2 и 2.3.

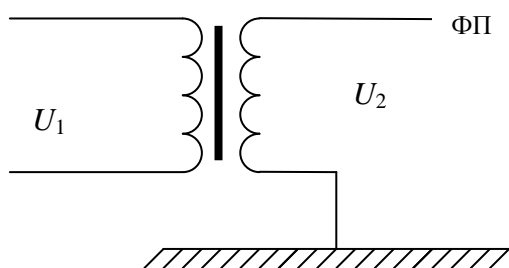


Рис. 2.1. Однофазная однопроводная сеть:  
ФП – фазный проводник

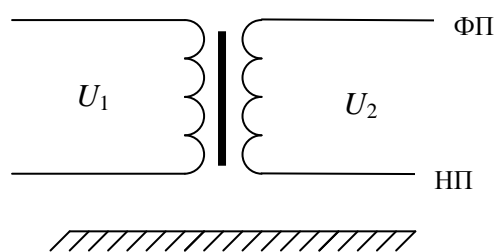


Рис. 2.2. Однофазная двухпроводная сеть  
изолированная от земли:  
НП – нулевой проводник

Сеть, представленная на рис. 2.1, применяется в электрофицированном транспорте, испытательных стендах и других подобных установках, а на рис. 2.2 сеть используется в электроустановках напряжением до 1000 В для питания электрического инструмента, осветительных приборов и т.п. с высоким сопротивлением изоляции фазных и нулевых рабочих проводников.

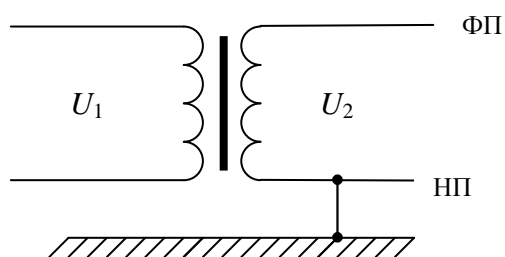


Рис. 2.3. Однофазная двухпроводная  
сеть, соединенная с землей

Однофазная двухпроводная сеть, соединенная с землей (рис. 2.3), применяется в схемах с релейной защитой и автоматическим отключением электроустановок, при их повреждениях.

Принципиальные схемы трехфазных электрических сетей приведены на рис. 2.4 – 2.7.

Схема, изображенная на рис. 2.4, распространена в сетях напряжением до 1000 В с силовыми нагрузками, защитным заземлением, например на судах водного транспорта. Схема, приведенная на рис. 2.5, применяется в сетях с таким же напряжением (например в передвижных ЭУ) и в сетях выше 1000 В с большими токами замыкания на землю.

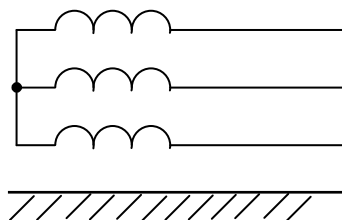


Рис. 2.4. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

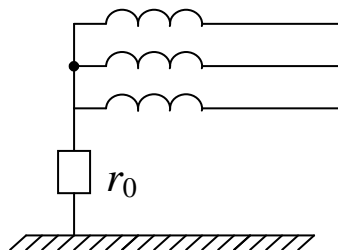


Рис. 2.5. Трехфазная трехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью:  
 $r_0$  – сопротивление глухозаземленной нейтрали

В стационарных установках не применяется из-за невозможности обеспечения безопасности при замыкании фазного проводника на корпус ЭУ при наличии защитного заземления.

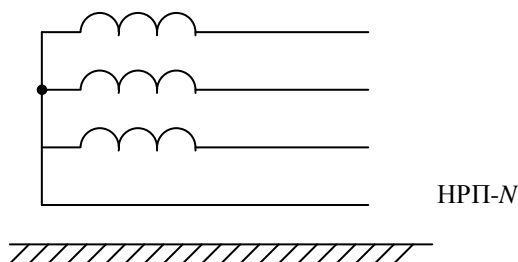


Рис. 2.6. Трехфазная четырехпроводная сеть с изолированной нейтралью:  
НРП – нулевой рабочий проводник  $N$

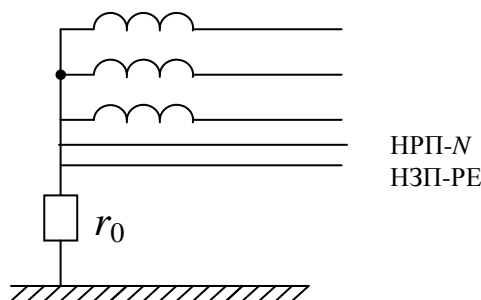


Рис. 2.7. Трехфазная четырех- или пятипроводная сеть с глухозаземленной нейтралью:  
НЗП - нулевой защитный проводник РЕ

Схема на рис. 2.6 используется в сетях до 1000 В в силовых и осветительных нагрузках с высоким сопротивлением изоляции фазных проводников, не применяется в сетях с занулением корпусов ЭУ. Трехфазная четырех- или пятипроводная сеть с глухозаземленной нейтралью распространена в схемах до 1000 В с силовыми и осветительными нагрузками при наличии схемы зануления корпусов ЭУ. Схемы на рис. 2.6 и 2.7 при больших напряжениях (выше 1000 В) на линиях электропередач (ЛЭП) не применяются, так как в четвертом проводнике нет необходимости.

### Схема прикосновения человека к электрической сети

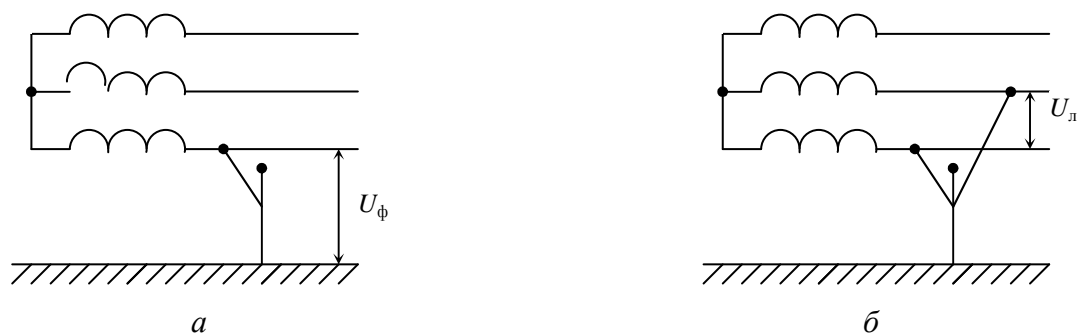


Рис. 2.8. Прикосновение человека к электрической сети:  
*a* - однофазное прикосновение; *б* - двухфазное прикосновение;  
 $U_{\phi}, U_{л}$  – фазное и линейное напряжения

### Сопротивление изоляции проводников электрической сети

В сетях напряжением до 1000 В допустимое активное сопротивление изоляции проводников в производственных помещениях должно быть не менее 0,5 МОм,  $R_{из} = 0,5$  МОм.

В сетях напряжением выше 1000 В допустимое сопротивление внутрицеховой изоляции и цепей релейной защиты должны быть не менее 1 МОм,  $R_{из} = 1$  МОм. Допустимые сопротивления изоляции устанавливаются в соответствии с правилами устройств (ПУЭ) в зависимости от напряжения сети, назначения и условий работы электрического оборудования.

### Режим нейтралей

Нейтраль (нейтральная точка) имеется в источниках или потребителях электрической энергии, обмотки которых соединены звездой. Нейтраль отсутствует при соединении обмоток электроустановок трехфазного тока треугольником.

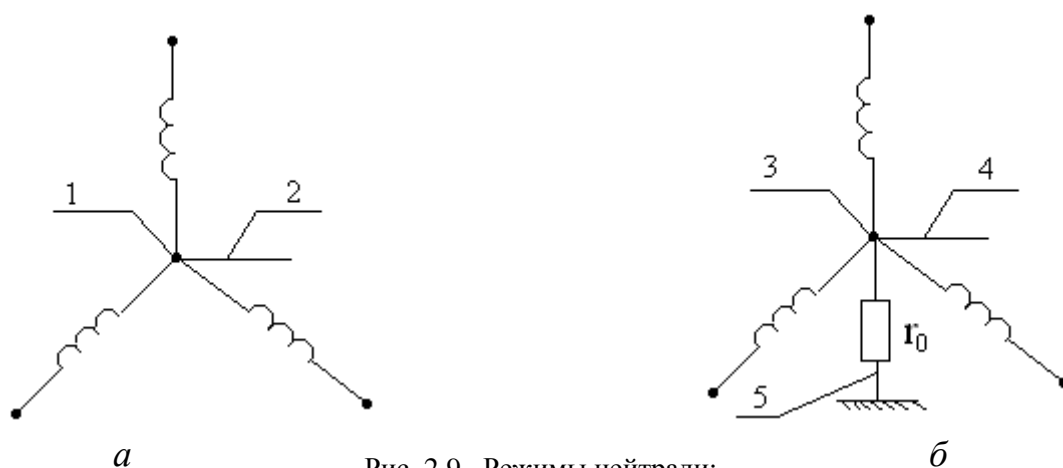


Рис. 2.9. Режимы нейтралей:  
*a* – изолированный; *б* – заземленный;  
 1 – нейтральная точка – изолированная нейтраль; 2 – нейтральный проводник; 3 – нулевая точка; 4 – нулевой проводник; 5 – глухозаземленная нейтраль с сопротивлением  $r_0$

Согласно ПУЭ, по условиям техники безопасности при эксплуатации электрических сетей существует два режима нейтрали: изолированный и глухозаземленный. По техническим условиям работы в электрических сетях используются пять режимов нейтрали, принцип работы которых рассматривается самостоятельно [3, с.302-308].

### **Режимы работы электрической сети**

Различают нормальный режим работы электросети, в том числе и при замыкании фазного проводника на корпус электроустановки, и аварийный - при замыкании фазных проводников на землю.

### **Сопротивление человека $R_h$**

В расчетах сопротивление человека принимается равным 1000 Ом ( $R_h \text{ расч} = 1000 \text{ Ом}$ ).

## **2.1. ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ОДНОФАЗНЫХ ДВУХПРОВОДНЫХ СЕТЯХ, ИЗОЛИРОВАННЫХ ОТ ЗЕМЛИ**

### **Нормальный режим работы сети**

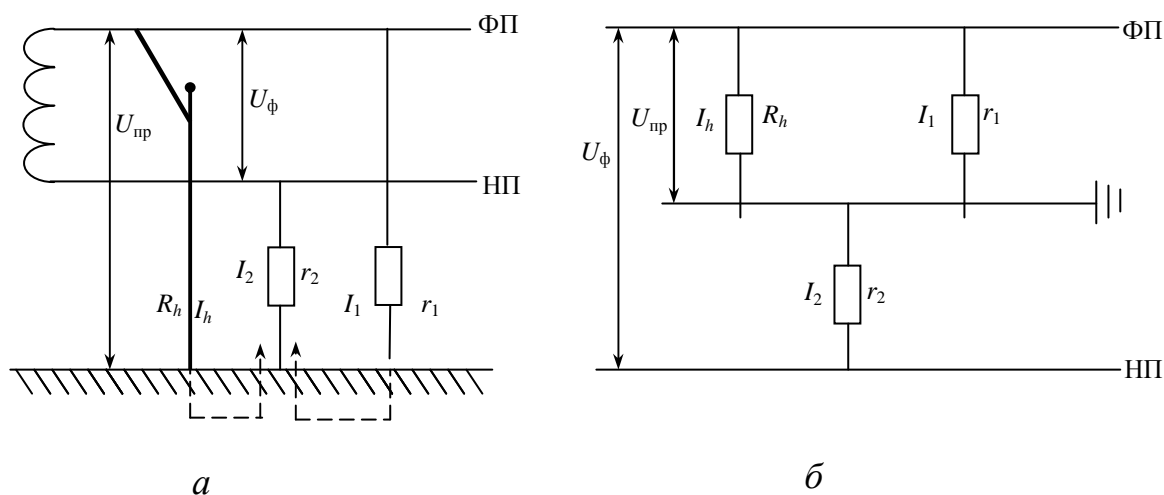


Рис. 2.10. Прикосновение человека к фазному проводнику в нормальном режиме: *а* - схема прикосновения; *б* - схема замещения;  $r_1, r_2$  - условные изображения сопротивлений изоляции фазного (ФП) и нулевого проводников (НП), Ом;  $I_h, R_h$  - ток и сопротивление тела человека, А, Ом;  $I_1, I_2$  - токи утечки через сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ , соответственно

Определим величины  $U_{пр}$  и  $I_h$  из схемы замещения (рис.2.10, б):

$$I_h = U_{пр}/R_h; \quad U_{\phi} = U_{пр} + I_2 r_2; \quad I_2 = I_h + I_1; \quad I_1 = U_{пр}/r_1.$$

Подставляя значения получим

$$U_{\phi} = U_{пр} + \left( \frac{U_{пр}}{R_h} + \frac{U_{пр}}{r_1} \right) r_2;$$



Далее,

$$U_{\phi} = U_{\text{пр}} \left( 1 + \frac{r_2}{R_h} + \frac{r_2}{r_1} \right) = U_{\text{пр}} \left( \frac{R_h r_1 + R_h r_2 + r_1 r_2}{R_h r_1} \right).$$

Отсюда искомое напряжение прикосновения

$$U_{\text{пр}} = \frac{U_{\phi} R_h r_1}{R_h r_1 + R_h r_2 + r_1 r_2}.$$

Ток через человека определится формулой

$$I_h = \frac{U_{\phi} r_1}{R_h r_1 + R_h r_2 + r_1 r_2}, \text{ A} \quad (2.1)$$

Таким образом, ток, проходящий через тело человека, в случае его прикосновения к фазному проводнику в двухпроводной сети определяется формулой (2.1).

В том случае, когда сопротивление изоляции фазного и нулевого проводников равны между собой, т.е.  $r_1 = r_2 = r_{\text{из}}$ , формула (2.1) упрощается и принимает следующий вид:

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{2R_h + r_{\text{из}}}, \text{ A} \quad (2.2)$$

Анализируя полученные формулы (2.1) и (2.2), можно сделать следующие выводы:

- опасность поражения человека в однофазных двухпроводных сетях при условии неравенства сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  повышается с увеличением сопротивления изоляции фазного проводника  $r_1$ ;
- опасность поражения в случае равенства сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  уменьшается с увеличением сопротивления изоляции обоих проводников  $r_{\text{из}}$ ;
- для снижения опасности поражения человека электротоком в однофазных двухпроводных сетях фазные и нулевые проводники следует монтировать с одинаковыми и возможно большими сопротивлениями изоляции  $r_{\text{из}}$ .

#### *Пример 1*

Определить величину тока  $I_h$  при прикосновении человека к фазному проводнику в однофазной двухпроводной сети, изолированной от земли, при этом  $r_1=r_2=r_{\text{из}}$ . Сопротивление  $r_{\text{из}}$  принимаем равным нормированному значению 0,5 МОм или  $5 \cdot 10^5$  Ом,  $R_h=1000$  Ом,  $U_{\phi}=220$  В.

Решение. По формуле (2.2) определим

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{2R_h + r_{\text{из}}} = \frac{220 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^5} = 0,44 \text{ мА}.$$

Полученный результат меньше величины ощутимого порогового тока, равного 0,6÷1,5 мА.

### *Аварийный режим работы сети*

Ток, проходящий через человека при однофазном замыкании в однофазной сети в аварийном режиме, определится:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + r_{3M}}, A. \quad (2.3)$$

Опасность поражения человека в этом случае (рис. 2.11) очень высокая, т.к. сопротивление  $r_{3M}$  обычно имеет малое значение, а сопротивление тела человека  $R_h$  в расчетах принимается равным 1000 Ом.

#### *Пример 2*

Определить величину тока  $I_h$  при прикосновении человека к фазному проводнику в аварийном режиме при замыкании нулевого проводника на землю (рис. 2.11).

Дано:  $U_\phi=220$  В,  $R_h=1000$  Ом, сопротивление замыкания проводника на землю  $r_{3M}= 10$  Ом принимаем.

Решение. По формуле (2.3) находим величину тока через человека, мА:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + r_{3M}} = \frac{220 \cdot 10^3}{1000 + 10} = 218 \text{ мА}.$$

Полученный результат превышает величину смертельного тока, равного 100 мА.

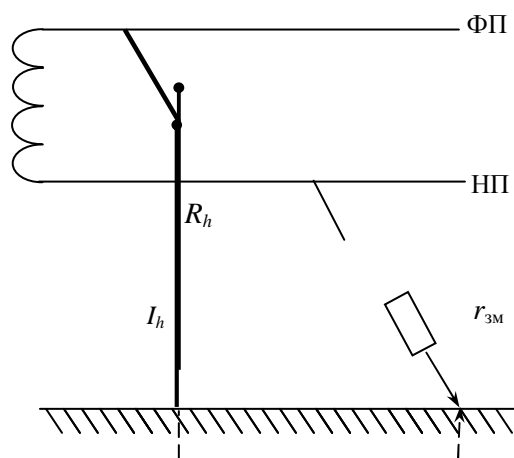


Рис. 2.11. Прикосновение человека к фазному проводнику в аварийном режиме  $r_{3M}$  – сопротивление замыкания нулевого проводника, Ом

## **2.2. ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Оценка опасности поражения человека в трехфазных сетях сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека. Величина тока  $I_h$  зависит от режима нейтрали источника питания, фазы которого соединены в звезду, параметров трехфазной сети и схемы прикосновения человека к токоведущим проводникам или частям электроустановки.

*Изолированной нейтралью* называется нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через аппараты, имеющие большое сопротивление.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через устройство, имеющее малое сопротивление.

### 2.2.1. Сеть с изолированной нейтралью

#### Нормальный режим работы

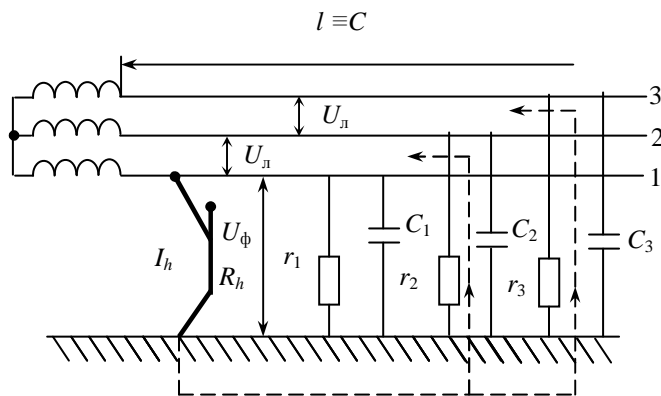


Рис.2.12. Прикосновение человека к проводнику в трехфазной сети с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы:  
 $r_1, r_2, r_3$  – активные сопротивления изоляции фазных проводников, Ом;  $C_1, C_2, C_3$  – емкости фазных проводников, Ф;  $U_\phi$  – фазное напряжение, В;  $U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi$  – линейное напряжение;  $l$  – длина проводников, м, определяющая полную емкость проводников  $C$

Активные сопротивления изоляции  $r_{1,2,3}$  и емкости  $C_{1,2,3}$  распределены по всей длине проводников, но для расчета тока через тело человека  $I_h$  распределенные сопротивления и емкости можно условно считать сосредоточенными, как показано на рис. 2.12.

Путь тока через человека, прикоснувшегося к первому фазному проводнику, проходит через основание, на котором стоит человек, и замыкается на втором и третьем проводниках через сопротивления  $r_2$  и  $r_3$  и емкости  $C_1$  и  $C_2$ . Замыкания тока  $I_h$  на первый фазный проводник не будет происходить из-за отсутствия перепада напряжения в цепи тока через человека.

Ток, проходящий через человека при однофазном прикосновении к проводнику, в рассматриваемой схеме (рис. 2.12) выражается зависимостью:

$$I_h = \frac{3U_\phi}{3R_h + Z}, \quad \text{или} \quad I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{Z}{3}}, A,$$

где  $z$  – комплекс полного сопротивления фазных проводников, которое в трехфазных сетях определяется через сумму проводимостей  $Y$  отдельных сопротивлений:

$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{1/r_{из} + j\omega C}$ , где  $1/r_{из}$  - активная проводимость изоляции фазных проводников, см;  $j\omega C$  - емкостная проводимость изоляции фазных проводников, см;  $j = \sqrt{-1}$  - показатель взаимного смещения активной и емкостной проводимостей на  $90^\circ$ .

Рассмотрим возможные случаи:

- Короткие электрические сети ( $l \leq 250$  м).

В этом случае принимаем  $C_1 = C_2 = C_3 \approx 0$  и  $x_c \approx \infty$ ,  $r_1 = r_2 = r_3 = r_{из}$ , следовательно,  $z = r_{из}$ .

Тогда

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{r_{из}}{3}}, \text{ А.} \quad (2.4)$$

- Протяженные электрические сети  $l \gg 250$  м.

В этом случае принимаем  $C_1 = C_2 = C_3 = C$ , а  $r_1 = r_2 = r_3 \approx \infty$ , следовательно,  $Z = 1/j\omega C = x_c$ .

Тогда

$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{x_c}{3}\right)^2}}, \text{ А.} \quad (2.5)$$

Поскольку проводимости активных и емкостных токов смешены относительно друг друга на  $90^\circ$ , полное сопротивление определяется через гипотенузу треугольника.

Для оценки опасности поражения человека в рассмотренной схеме на рис. 2.12 решим пример.

### Пример 3

Человек прикоснулся к фазному проводнику в трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью, при этом  $U_\phi = 380$  В,  $R_h = 1000$  Ом. Определить ток  $I_h$  для двух случаев:

- при  $C_1 = C_2 = C_3 = 0$  и  $r_1 = r_2 = r_3 = r_{из} = 500000$  Ом;
- при  $C_1 = C_2 = C_3 = C = 0,1$  мкФ ( $\sim 400$  м) и  $r_1 = r_2 = r_3 \approx \infty$ .

Решение. В первом случае ток  $I_h$  найдем по формуле (2.4), в которой  $r_{из} = 500000$  Ом,

$$\text{а } U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В и } I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{r_{из}}{3}} = \frac{220 \cdot 10^3}{10^3 + \frac{5 \cdot 10^5}{3}} = 1,3 \text{ мА.}$$

Значение  $I_h = 1,3$  мА - есть пороговый ощутимый ток.

Во втором случае ток  $I_h$  вычислим по формуле (2.5), в которой  $C = 10^{-7}$  Ф, а сопротивление  $x_c = 1/\omega C = 10^7 / 314 = 32 \cdot 10^3$  Ом.

Тогда

$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{x_c}{3}\right)^2}} = \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{1000^2 + \left(\frac{32 \cdot 10^3}{3}\right)^2}} = 20 \text{ мА.}$$

Значение  $I_h = 20$  мА превышает значение порогового неотпускающего тока, равного  $10 \div 15$  мА.

Из приведенного примера и формул (2.4) и (2.5) следует вывод: в трехфазных сетях с изолированной нейтралью опасность поражения человека, прикоснувшегося к одному проводнику в период нормальной работы короткой сети, зависит от сопротивления изоляции проводников относительно земли, причем с увеличением сопротивления опасность уменьшается. При работе в протяженных сетях ЛЭП (кабельных сетях) опасность поражения увеличивается.

Появление цифры 3 в знаменателях формул (2.4) и (2.5) объясняется не количеством фазных проводников, как иногда принято считать, а тем, что соотношение между фазными

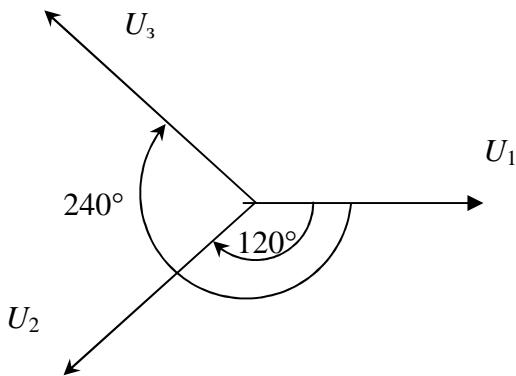


Рис. 2.13. Векторная диаграмма напряжений в переменном трехфазном токе:  $U_1, U_2, U_3$  – фазные напряжения в симметричной трехфазной системе

напряжениями в трехфазных сетях переменного тока выражается в комплексной форме. Для пояснения рассмотрим векторную диаграмму напряжений на рис. 2.13.

Известно, если  $U_1 = U_\phi$ , то  $U_2 = U_\phi a$ ,  $U_3 = U_\phi a^2$ , где  $a$  и  $a^2$  фазные операторы, учитывающие сдвиг фазных напряжений соответственно на  $120^\circ$  и  $240^\circ$ . В комплексной форме они

$$\text{имеют вид } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Здесь  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица, означаю-

щий поворот действительного числа  $\sqrt{3}/2$  на угол  $90^\circ$ .

При выводе формул (2.4) и (2.5), выполняя в числителе действие  $(1 - a^2 + 1 - a)$ , получим

$$1 + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 3.$$

В результате будем иметь ранее написанные выражения:

$$I_n = \frac{3U_\phi}{3R_n + Z} \quad \text{или} \quad I_n = \frac{U_\phi}{R_n + Z/3}.$$

### Аварийный режим работы

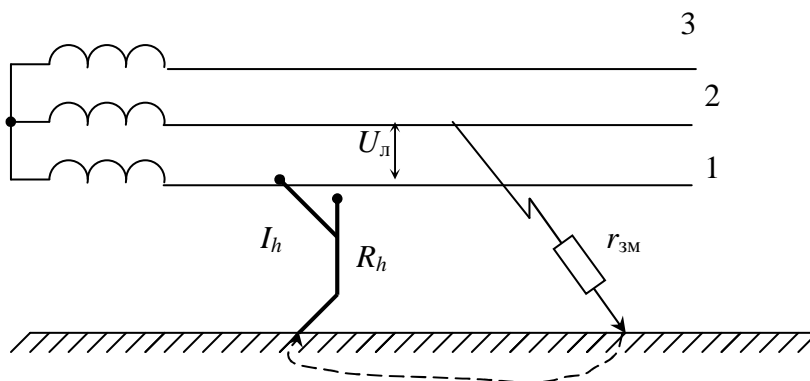


Рис. 2.14. Прикосновение человека к проводнику в сети с изолированной нейтралью в аварийном режиме работы:  
 $r_{3M}$  – сопротивление замыкания фазного проводника 2 на землю

В аварийном режиме работы сети при замыкании фазного проводника на землю ток через человека при его прикосновении к другому проводнику будет

$$I_n = \frac{U_\text{л}}{R_h + r_{3M}}, \text{ А.} \quad (2.6)$$

В этом случае опасность поражения человека электрическим током без учета сопротивления основания, на котором стоит человек, и при отсутствии средств защиты, например, резиновой обуви или коврика, очень высокая, так как сопротивление замыкания  $r_{3M}$  обычно мало, а человек оказывается под линейным напряжением  $U_\text{л}$ .

#### Пример 4

Человек прикоснулся к проводнику в трехфазной трехпроводной сети напряжением  $U_\text{л} = 380$  В с изолированной нейтралью в период, когда другой проводник был замкнут на землю через сопротивление  $r_{3M} = 100$  Ом,  $R_n = 1000$  Ом, (рис. 2.14).

Решение. Ток  $I_n$  определяется по формуле (2.6)

$$I_h = \frac{U_\text{л}}{R_h + r_{3M}} = \frac{380 \cdot 10^3}{1000 + 100} = 345 \text{ м А.}$$

Величина тока  $I_n = 345$  мА значительно превышает величину смертельного тока через человека, равного 100 мА.

Здесь и далее во всех рассматриваемых схемах прикосновения человека к токоведущим проводникам (частям), с целью выявления наибольшей опасности, сопротивление основания, на котором стоит человек (грунт, пол и др.), не учитывается. Не учитывается также сопротивление его обуви. В реальных условиях, при наличии перечисленных или других сопротивлений в основании ток, проходящий через тело человека, будет соответственно иметь меньшее значение и тогда безопасность обслуживания ЭУ повысится.

### 2.2.2. Сеть с глухозаземленной нейтралью

#### Нормальный режим работы

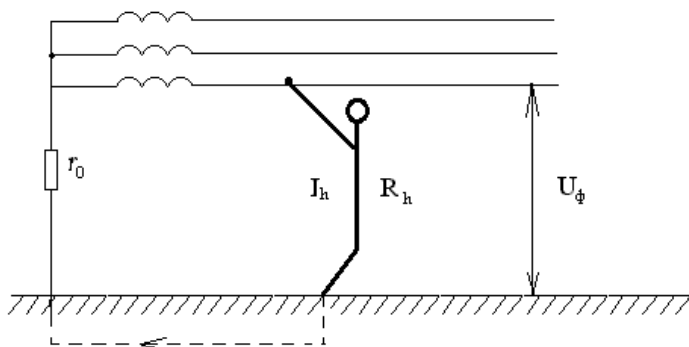


Рис. 2.15. Прикосновение человека к сети с глухозаземленной нейтралью в нормальном режиме работы:  
 $r_0$  – сопротивление глухозаземленной нейтрали

Согласно ПУЭ, сопротивление  $r_0$  в зависимости от напряжения сети имеет следующие значения:  
 $r_0 = 2$  Ом при  $U = 660/380$  В;  
 $r_0 = 4$  Ом при  $U = 380/220$  В;  
 $r_0 = 8$  Ом при  $U = 220/127$  В.

В рассматриваемой схеме ток через человека при однофазном прикосновении к проводнику будем

$$I_n = \frac{U_\phi}{R_n + r_0}, \text{ А.} \quad (2.7)$$

Если человек находится на токопроводящем основании при отсутствии средств защиты, как и в предыдущем примере, опасность его поражения электрическим током высока.

#### Пример 5

Человек прикоснулся к проводнику в трехфазной трехпроводной сети напряжением  $U_\phi = 220$  В с глухозаземленной нейтралью сопротивлением  $r_0 = 4$  Ом,  $R_n = 1000$  Ом.

Решение. Ток  $I_n$  определится по формуле (2.7)

$$I_n = \frac{U_\phi}{R_n + r_0} = \frac{220 \cdot 10^3}{1000 + 4} \approx 220 \text{ мА} > 100 \text{ мА}.$$

#### Аварийный режим работы

В электрической схеме, представленной на рис. 2.16, ток через человека в общем виде определится зависимостью  $I_n = U_{\text{пр}}/R_n$ .

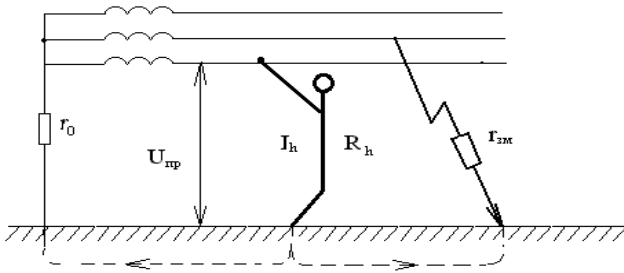


Рис. 2.16. Прикосновение человека к проводнику в сети с глухозаземленной нейтралью в аварийном режиме:  
 $U_{пр}$  – напряжение прикосновения

Напряжение прикосновения  $U_{пр}$  в действительной форме выражается формулой

$$U_{пр} = U_{\phi} R_n \left[ \frac{r_{3м} + r_0 \sqrt{3}}{r_{3м} r_0 + R_h (r_{3м} + r_0)} \right], В.$$

Если последнее выражение подставим в предыдущее, то получим

$$I_h = U_{\phi} \left[ \frac{r_{3м} + r_0 \sqrt{3}}{r_{3м} r_0 + R_h (r_{3м} + r_0)} \right], А. \quad (2.8)$$

Анализ формулы (2.8) показывает следующее:

- если  $r_{3м} = 0$ , то  $I_h = U_{\phi} \sqrt{3} / R_h$ , мА. Это очень опасный случай, человек оказывается под линейным напряжением;
- если  $r_0 = 0$ , то  $I_h = U_{\phi} / R_h$  - человек оказывается под фазным напряжением.

Обычно  $r_{3м} \neq 0$  и  $r_0 \neq 0$ , тогда  $U_{\phi} < U_{пр} < U_{л}$ . В этом случае напряжение, под которым оказался человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводнику трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, всегда меньше линейного, но больше фазного.

Таким образом, прикосновение человека к проводнику в сети с глухозаземленной нейтралью в аварийный период более опасно, чем при нормальном режиме, но менее опасно, чем в сети с изолированной нейтралью в аварийном режиме. По условиям безопасности последнее обстоятельство является определяющим при выборе режима нейтрали электрических схем в производственных помещениях, в которых возможны глухие замыкания фазных проводников на землю.

### 2.2.3. Двухфазное прикосновение человека к проводникам

Двухфазное прикосновение происходит во время работы под напряжением в электроустановках преимущественно до 1000 В – на щитах, сборках, воздушных линиях электропередач, например, при замене сгоревших предохранителей, при использовании проколотых или разорванных диэлектрических перчаток, монтерского инструмента с поврежденной изоляцией рукояток, при эксплуатации оборудования с не огражденными частями (открытые



рубильники, поврежденные штепсельные розетки, провода с поврежденной изоляцией, незащищенные зажимы сварочных трансформаторов и т.п.).

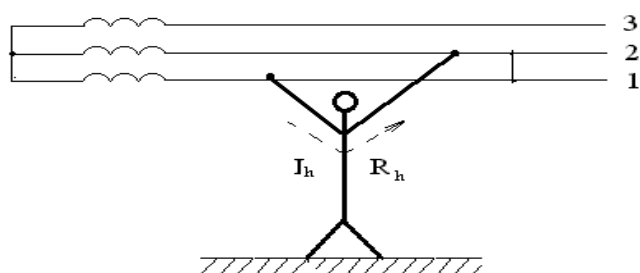


Рис. 2.17. Двухфазное прикосновение человека к проводникам в трехфазной электрической сети:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}} - \text{линейное напряжение}$$

Величина тока, проходящего через тело человека, определяется формулой

$$I_h = \frac{U_{\text{л}}}{R_h}, \text{ A} \quad (2.9)$$

Двухфазное прикосновение - самый опасный случай, поскольку путь тока "рука - сердце - рука", при этом к телу человека прикладывается

наибольшее в данной сети линейное напряжение. Ток, проходящий через человека, не зависит от схемы сети, режима нейтрали и других факторов и имеет величину, превышающую величину смертельного тока.

#### Пример 6

Определить величину тока  $I_h$  при двухфазном прикосновении человека к разным проводникам в трехфазной трехпроводной электрической сети напряжением 380 В. Сопротивление человека  $R_h$  принимается равным 1000 Ом.

Решение. Согласно формуле (2.9),

$$I_h = U_{\text{л}} / R_h = 380 \cdot 10^3 / 1000 = 380 \text{ mA} \gg 100 \text{ mA} .$$

Действие персонала для оказания помощи пострадавшему при двухфазном прикосновении:

1. Обесточить электрическую сеть или отключить ЭУ, если известно место нахождения ближайшего отключающего аппарата – рубильника, выключателя, штепсельного соединения и т.п. Если пострадавший находится на высоте, то необходимо применять меры, предохраняющие его от падения.

2. Отсоединить одну руку пострадавшего от электрического проводника или установки, взявшись за сухую одежду, например, рукав пальто или пиджака, действуя одной рукой, держа вторую в кармане или за спиной. При этом произойдет перевод двухфазного соединения в однофазное, при котором изменится путь тока  $I_h$  и уменьшится его величина, (см. рис. 2.12 и 2.17 и формулы 2.4 и 2.9). Подобное действие особенно эффективно в электрических схемах с изолированной нейтралью.

3. Отсоединить вторую руку пострадавшего от электрического проводника или установки, действуя также одной рукой при помощи сухой одежды или изолирующих предметов – сухой доски, резиновой ткани или коврика.

В сетях выше 1000 В все действия по освобождению пострадавшего от электрического тока необходимо проводить в диэлектрических перчатках, стоя на изолирующем основании – диэлектрическом коврике, используя при этом изолирующую штангу.

4. Оказать первую медицинскую помощь пострадавшему – открытый массаж сердца и искусственное дыхание (в зависимости от состояния) и вызвать медицинский персонал.

Иногда освобождение пострадавшего, находящегося в контакте с токоведущими частями, от действия тока может быть достигнуто автоматическим отключением сети или ЭУ, преднамеренным замыканием накоротко, или заземлением фазных проводников. Этот способ эффективен в сетях и установках выше 1000 В, поскольку они всегда оснащаются надежной и быстродействующей релейной защитой.

### **2.3. ВЫБОР РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ**

Режим нейтрали источника питания вместе со схемой сети выбирается по технологическим требованиям, а также по условиям безопасности.

#### **Выбор режима нейтрали в сетях напряжением до 1000 В**

В нашей стране распространение получили две схемы трехфазных сетей: трехпроводная с изолированной нейтралью и четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью. В ПУЭ-2002 г. предусматриваются пятипроводные эл. сети  $U < 1000$  В, в которых проводники N и PE – разделены.

По технологическим требованиям предпочтение отдается четырех- и пятипроводным сетям, поскольку они позволяют использовать два рабочих напряжения: линейное - для питания силовых нагрузок и фазное - для питания осветительных установок, не требующих в этом случае дополнительных трансформаторов.

По условиям безопасности выбор режима нейтрали зависит:

- от напряженности производства и возможности возникновения аварийных режимов в электрических сетях;
- от класса помещения по электрической опасности;
- от протяженности электрической сети.

В помещениях без повышенной опасности I класса с нормальным режимом работы, в которых поддерживается высокий уровень изоляции проводников с незначительной емко-

стью относительно земли (короткие сети), применяются сети с изолированной нейтралью. В помещениях с повышенной опасностью II класса и в особо опасных III класса, а также в наружных установках и взрывоопасных помещениях, в которых возможны аварийные режимы, используются в сети с глухозаземленной нейтралью.

### **Выбор режима нейтрали в сетях напряжением выше 1000 В**

По техническим требованиям режим нейтрали выбирается из условия возникновения опасного перенапряжения и больших токов утечки в аварийных режимах при дуговом замыкании одной фазы на землю. При этом в системе с изолированной нейтралью на исправных фазных проводниках в случае возникновения перенапряжения фазное напряжение в них увеличивается в 3-4 раза и может произойти замыкание этих проводников между собой.

В сетях напряжения выше 1000 В выбирается глухозаземленный режим нейтрали, при котором в случае замыкания одной или двух фаз на землю, напряжение неповрежденных фаз относительно земли в месте замыкания не превышает  $1,4 U_{\phi}$ . Кроме того, схемы с заземленной нейтралью позволяют применять релейную защиту для быстрого поиска и отключения поврежденного участка.

По условиям безопасности в сетях напряжением выше 1000 В заземленная нейтраль также предпочтительнее. В протяженных сетях ЛЭП вследствие большой емкости проводников относительно земли защитная роль изоляции полностью утрачивается и прикосновения к проводнику (корпусу) одинаково опасны как в сетях с изолированной, так и с глухозаземленной нейтралью. Ток замыкается через малое емкостное сопротивление проводников. Этим обстоятельством объясняется отсутствие активной изоляции на проводниках воздушных линий электропередач.

В сетях выше 1000 В с изолированной нейтралью при замыкании фазы на землю вокруг места замыкания возникают и длительно существуют высокие потенциалы и разности потенциалов, т. е. большие напряжения шага и прикосновения, опасные для людей. А в сети с заземленной нейтралью произойдет быстрое отключение поврежденного участка релейной защитой и будет устранена возникшая опасность.

## **2.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

Состояние окружающей среды может усилить или ослабить опасность поражения человека электрическим током. Сырость, токопроводящая пыль, пары и газы разрушающе действуют на изоляцию ЭУ, резко снижая ее сопротивление. При этих условиях, а также при высокой температуре окружающего воздуха понижается электрическое сопротивление тела человека, что еще более увеличивает опасность поражения его током.

Воздействие тока на человека усугубляется также наличием токопроводящих полов и близко расположенного электрооборудования к металлическим заземленным установкам, т. к. одновременное прикосновение человека к этим установкам и к корпусу электрооборудования, оказавшемуся под напряжением, или непосредственно к токопроводящей части, находящейся под напряжением, будет сопровождаться прохождением через человека тока, превышающего пороговое значение.

В зависимости от тех или иных условий разным помещениям присуща различная степень опасности поражения током. По действующим правилам все помещения по электрической опасности делятся на три класса: I класс - без повышенной опасности, II класс – с повышенной опасностью и III класс – особо опасные.

К помещениям I класса относятся сухие помещения с относительной влажностью воздуха не более 60%, беспыльные с нормальной температурой воздуха, с изолирующими полами, например, деревянными. Примером помещений без повышенной опасности могут служить обычные жилые комнаты, конторы, некоторые лаборатории, аудитории и т.п.

К помещениям II класса с повышенной опасностью относятся помещения сырые, в которых относительная влажность воздуха длительно превышает 75%; жаркие, т.е. где температура воздуха превышает постоянно или периодически 35°С; помещения пыльные с токопроводящей пылью (угольной, металлической и др.), выделяющейся в таком количестве, что она может оседать на проводниках и проникать внутрь машин или аппаратов; помещения с токопроводящими полами – металлическими, земляными, железобетонными, кирпичными и т.п., в которых возможно прикосновение человека к металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам или механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой. Примером помещений с повышенной опасностью могут служить склады деталей и материалов, цеха и мастерские по механической обработке металла или дерева и т.п.

К помещениям III класса относятся: особо сырые помещения с относительной влажностью воздуха, близкой к 100% (поверхности стен и потолка покрыты влагой); помещения с химически активной средой, в которых постоянно выделяются агрессивные пары, газы, жидкости, действующие разрушающе на изоляцию проводников и токопроводящие части электрооборудования. Примерами особо опасных помещений служат все цеха электростанций; помещения аккумуляторных и электролизерных установок, кабельные этажи и т. п. Территории с размещенными на них наружными ЭУ в отношении опасности поражения током приравнены к особо опасным помещениям III класса.

### **Глава 3. МЕРЫ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

Согласно ГОСТ 12.1.019 – 79 ССБТ “Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защит” и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», для защиты человека от поражения электрическим током применяются следующие меры защиты:

- *технические средства защиты;*
- *организационно-технические мероприятия;*
- *организационные.*

#### **К техническим средствам защиты относятся:**

- малые напряжения;
- двойная изоляция;
- контроль изоляции электрических проводников;
- электрическое разделение сетей;
- компенсация емкостных токов замыкания на землю;
- защита от перетока высокого напряжения в цепь низкого напряжения;
- выравнивание потенциалов основания;
- защитное заземление;
- зануление;
- защитное отключение.

#### **К организационно-техническим мероприятиям относятся:**

- применение электрозщитных средств: диэлектрических перчаток, галош, бот и ковриков, а также измерительных штанг, клещей, указателей напряжения и др.;
- применение предохранительных средств индивидуальной защиты (СИЗ): защитных костюмов, очков, щитков, защитных касок, противогазов, монтерских поясов, когтей, страховочных канатов и др.;
- применение предупредительных плакатов, цепей и замков;
- применение электрических и механических блокировок, конечных выключателей, ограждений, щитов и экранов для защиты от прикосновения к токоведущим частям;
- расположение токоведущих частей на недоступной высоте или в недоступном месте;
- использование переносных заземлений и закороток.

#### **К организационным мероприятиям относятся:**

- высокий уровень производственной дисциплины, организации работ и большая ответственность всего электротехнического персонала на предприятиях;
- строгое выполнение нарядной системы и правильное оформление работ по распоряжениям;
- высокий уровень знаний, обучение персонала по электрической безопасности в квалификационных группах II – V;
- выполнение требований “Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей” и других нормативных документов;
- постоянный контроль за выполнением работ.

Рассмотрим технические средства защиты человека от поражения электрическим током.

### 3.1. ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Малое напряжение – это номинальное напряжение между фазными проводниками относительно земли не более 12, 24, 36 и 42 В. В целях уменьшения опасности поражения электрическим током в помещениях с повышенной опасностью применяется малое напряжение 36 В, а в особо опасных помещениях 12 В.

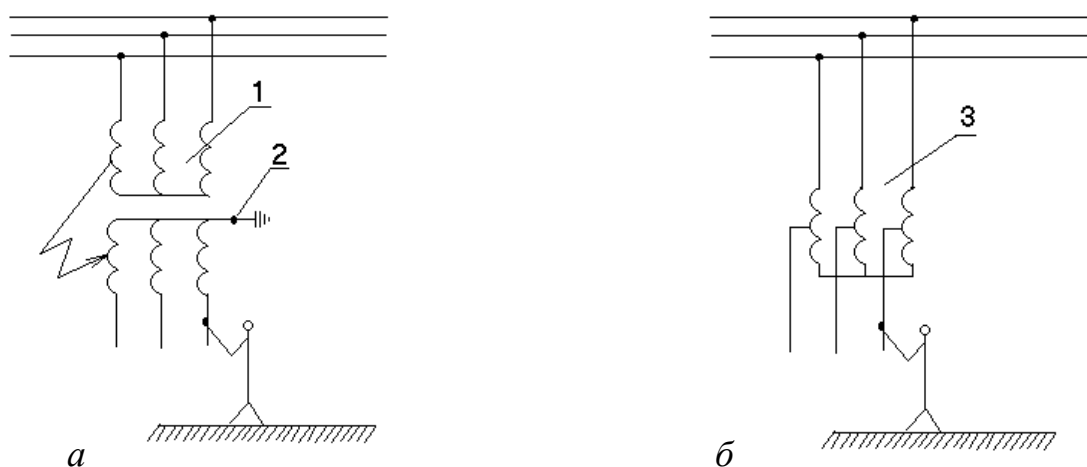


Рис. 3.1. Схема прикосновения человека к сети малого напряжения:

*а* – схема с понижающим трансформатором; *б* – схема с автотрансформатором;  
 1 – понижающий трансформатор; ⚡ – замыкание между обмотками; 2 – заземление вторичных обмоток; 3 – автотрансформатор

В качестве источников малого напряжения в промышленности наиболее часто применяются понижающие трансформаторы, которые от других источников (гальванических элементов, аккумуляторов, выпрямительных установок, автотрансформаторов) отличаются простотой конструкции и большой надежностью. Недостатком понижающих трансформаторов

является возможность перехода высокого напряжения в цепь низкого при межобмоточном замыкании в нем. Для уменьшения опасности при переходе высокого напряжения на сторону малого напряжения вторичные обмотки трансформаторов должны заземляться или зануляться, как показано на рис. 3.1, а.

Применение в качестве источника малого напряжения автотрансформаторов запрещается, так как сеть малого напряжения в этом случае всегда оказывается связанной с сетью высокого напряжения, как видно из рис. 3.1, б.

В помещениях с повышенной опасностью II класса и в особо опасных III класса использование малых напряжений 36 В и 12 В соответственно ограничивает применение электрофицированного инструмента, ручных переносных ламп и ламп местного освещения.

### **3.2. ПРИМЕНЕНИЕ ДВОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Двойная изоляция применяется для защиты человека в случае прикосновения его к корпусу (устройству) электроустановки, который может оказаться под напряжением. Двойная изоляция состоит из рабочей (основной) и дополнительной изоляции. Рабочая изоляция токоведущих частей электроустановки обеспечивает ее нормальную работу и защиту человека от поражения электрическим током, дополнительная предусматривается для защиты людей в случае повреждения рабочей изоляции. Двойная изоляция осуществляется путем покрытия металлических корпусов и рукояток электрооборудования слоем электроизоляционного материала. Однако при разрушении этого слоя металлические части могут оказаться под напряжением.

Более совершенный способ применения двойной изоляции – изготовление корпусов электроустановок из токонепроводящих материалов. Примером может служить электрическая дрель с корпусом из пластмассы. Однако из-за недостаточной механической прочности, надежности соединения с металлом, ухудшения механических свойств по мере старения, область применения двойной изоляции из пластмассовых корпусов ограничивается электрооборудованием небольшой мощности – электрофицированным ручным инструментом, некоторыми переносными устройствами, бытовыми приборами и ручными электрическими лампами.

Согласно “Правил устройства электроустановок” корпуса ЭУ, выполненные с двойной изоляцией, не требуют защитного заземления или зануления. Двойная изоляция не может применяться там, где она подвергается нагреву из-за малой термической стойкости пластмасс.

Условное обозначение двойной изоляции – двойной квадрат



### **3.3. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ**

Надежность работы оборудования и безопасность эксплуатации электроустановок в значительной степени определяются надежностью электрической изоляции. От сопротивления изоляции проводников в сетях с изолированной нейтралью зависит величина тока, проходящего через человека (§2.2.1). При заземленной нейтрали ток через человека не зависит от сопротивления изоляции (§2.2.2), но в этом случае при плохом состоянии изоляции происходит ее повреждение, что приводит к замыканиям на землю (корпус) или к межфазным коротким замыканиям. На исправное содержание и удовлетворительное состояние изоляции в процессе эксплуатации электроустановок влияют следующие факторы:

- правильный выбор типа изоляции на стадии проектирования;
- учет эксплуатационных параметров: температуры и влажности окружающей среды, наличие ЛВЖ, наличие агрессивных и вредных газов;
- учет взрывопожарного состояния в производственных помещениях;
- своевременное и качественное проведение контроля и технических испытаний изоляции проводников электроустановок.

На всех электроэнергетических предприятиях в течение всего периода эксплуатации ЭУ осуществляется периодический и постоянный контроль изоляции проводников.

Периодический контроль изоляции проводников – измерение ее сопротивления – проводится при приемке ЭУ после монтажа, ремонта или в случае обнаружения дефектов, а также в плановые сроки через 3, 6, 12 месяцев, согласно «Правил». Такой контроль изоляции проводится на отключенных от сети отдельных участках электрической схемы с целью определения величины активного сопротивления изоляции и сравнения полученных данных с нормативными значениями из ПУЭ. Например, в сетях напряжением до 1000 В сопротивление изоляции каждого участка должно быть не ниже 0,5 МОм на фазу. Для электрических аппаратов и машин нормы другие, поэтому они отключаются от сети и измерение их изоляции проводится отдельно. Контроль изоляции ведется с помощью «мегаомметра» напряжением не ниже номинального напряжения в сети или несколько большим для проверки электрической прочности изоляции. В результате таких измерений выявляются участки с дефектной изоляцией и предупреждаются возможные замыкания фаз на землю или короткие межфазные замыкания.

Для оценки безопасности работы всей сети, а не только отдельных ее участков, проводится измерение сопротивления изоляции сети с подключенными источниками и потреби-



телями тока под рабочим напряжением. Такой контроль изоляции возможен лишь в сетях с изолированной нейтралью, потому что в сетях с глухозаземленной нейтралью постоянный ток мегаомметра замыкается через малое сопротивление заземления нейтрали и прибор показывает нуль. Этим способом можно измерить только сопротивление изоляции фаз относительно земли, т. к. сопротивление межфазной изоляции в работающей сети шунтируется источником питания и нагрузкой сети – электроприемниками, сопротивление которых постоянному току очень мало.

Схема измерения сопротивления изоляции сети под рабочим напряжением представлена на рис. 3.2.

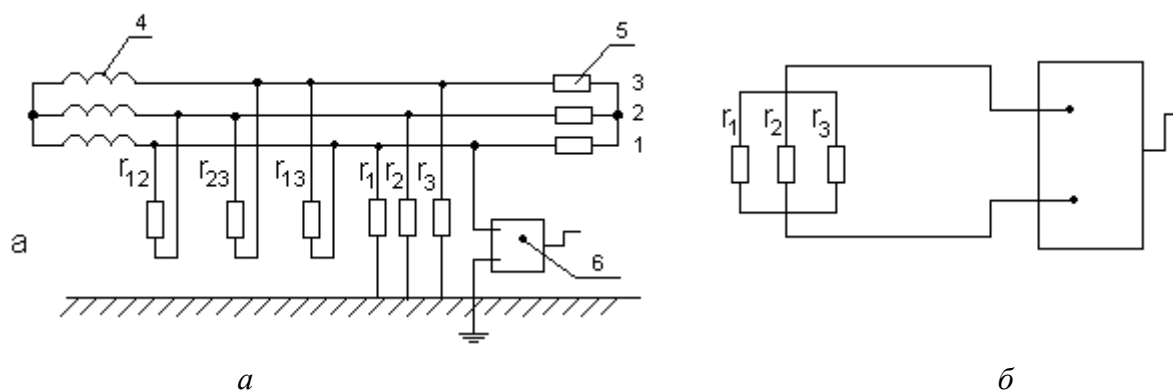


Рис. 3.2. Схема измерения сопротивления изоляции фаз под рабочим напряжением:  
*а* – схема подключения измерительного прибора; *б* – схема замещения;  
 4 – источник; 5 – нагрузка; 6 – мегаомметр

Из схемы замещения следует, что прибор показывает сопротивление изоляции всей сети  $R$ , независимо от того, к какой фазе он подключен.

$$R = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3}, \text{ Ом.} \quad (3.1)$$

В данном случае нормы, приведенные в ПУЭ (0,5; 1 МОм), не могут служить критерием исправности изоляции, т. к. они заданы не для всей сети, а только для отдельных участков.

Судить об исправности или о появлении дефектов изоляции по результатам измерений под напряжением можно лишь путем сравнения полученных данных с данными предыдущих измерений. Если результаты совпадают, изоляция исправна, если обнаружено снижение сопротивления изоляции по сравнению с данными предыдущих измерений, то это указывает на наличие в ней дефектов. При контроле изоляции под рабочим напряжением происходит сложение напряжений сети и прибора, поэтому измерения должны выполняться прибором с небольшим измерительным напряжением 20÷30 В.

Постоянный контроль изоляции осуществляется в течение всего времени работы электрической сети под рабочим напряжением с пульта управления энергопредприятия. В практике получили распространение две схемы измерения: вентильная схема контроля изоляции и схема трех вольтметров в сетях с изолированными режимами нейтралей. Рассмотрим действие этих схем.

Вентильная схема контроля изоляции измеряет сопротивление изоляции выпрямленным током. На рис. 3.3 показана простейшая вентильная схема – схема 3 В (три вентиля).

При положительной полуволне напряжения фазы 1 ток проходит через вентиль Д1, прибор  $\Omega$ , указывающий сопротивление, заземлитель и активные сопротивления изоляции двух других фаз  $r_2$  и  $r_3$  и далее к источнику.

Полярность фаз в переменном токе рывно меняется, поэтому пройденный поочередно через вентили  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$  постоянный ток суммируется в указывающем приборе, который отградуирован в килоомах. Показания прибора зависят от общего сопротивления изоляции  $R$ , определяемого по формуле (3.1).

Достоинством вентильной схемы является фиксация симметричного и несимметричного изменения сопротивления изоляции фазных проводников. Приборы контроля изоляции, собранные по вентильной схеме, компактны и просты по устройству, однако они имеют недостатки: не осуществляют самоконтроля, т.к. при неисправностях внутренних цепей стрелка прибора  $\Omega$  показывает  $\infty$ , т. е. исправную изоляцию. При глухом замыкании на землю, например фазы 1, как показано на рис. 3.3, несмотря на то, что напряжение на замкнутой фазе становится равным нулю, стрелка прибора также покажет  $\infty$ . В этом случае, как и при обрыве в цепи прибора, выпрямленный постоянный ток через вентили  $VD_1$ ,  $VD_2$  и  $VD_3$  не идет. Показание стрелки прибора на  $\infty$  не соответствует аварийному режиму – глухому замыканию фазного проводника на землю.

Наиболее простая схема контроля изоляции – схема трех вольтметров, которые включаются «звездой» с заземленной общей нулевой точкой (рис. 3.4). В этой схеме каждый вольтметр показывает напряжение той фазы, к которой он подключен относительно нулевой точки, соединенной с землей.

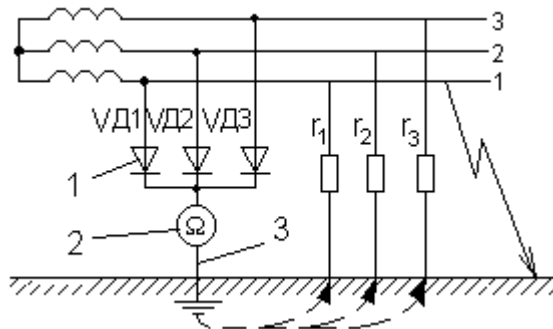


Рис. 3.3. Вентильная схема контроля изоляции:

1 – вентили  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$ , соединенные «звездой»; 2- прибор омметр; 3 - заземление

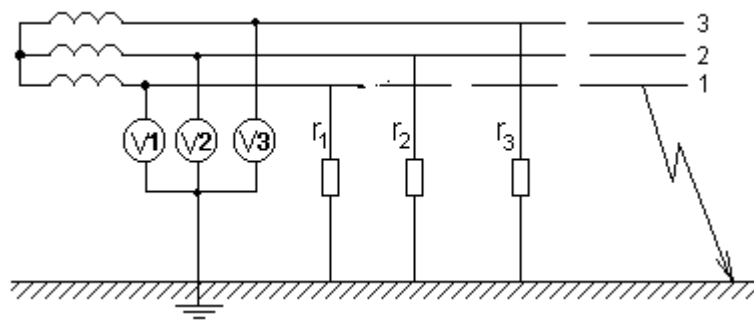


Рис. 3.4. Схема трех вольтметров

При равенстве лений изоляции фаз или метричном ухудшении ции, вплоть до короткого межфазного замыкания, показания всех вольтметров V1, V2, и V3 не изменятся и будут равны фазному напряжению. Это объясняется тем, что потенци-

ал заземленной нулевой точки всегда остается равным нулю, как бы не изменялись фазные и межфазные утечки тока через изоляцию. Это основной недостаток схемы трех вольтметров. Но в аварийном режиме при замыкании фаз на землю, например фазы 1, как на рис. 3.4, показание вольтметра V1 будет равно нулю, а показания вольтметров V2 и V3 исправных фаз будут близкими к линейному напряжению  $\sqrt{3}U_{\phi}$ . Отсюда следует, что схема трех вольтметров не измеряет сопротивление изоляции и не осуществляет контроль изоляции, а только обнаруживает замыкание конкретной фазы на землю.

При появлении дефекта внутри вольтметра, стрелка данного прибора покажет нуль, а два других вольтметра будут показывать фазное напряжение  $U_{\phi}$ , что и является способностью схемы осуществлять самоконтроль.

Постоянный контроль изоляции под рабочим напряжением в действующих сетях с глухозаземленной нейтралью невозможен, т.к. сеть соединена с землей через малое сопротивление заземления нейтрали и при снижении изоляции или при замыкании фазы на землю напряжения между фазами и землей мало изменяются. Для обнаружения замыкания фазы на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью используется прибор, реагирующий на ток нулевой последовательности  $I_0$ , равной сумме токов утечки через изоляцию отдельных фаз:  $I_0=I_1+I_2+I_3$ .

Действие защиты, реагирующей на ток нулевой последовательности, рассматривается в § 3.10.4.

### 3.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СЕТЕЙ

Разветвленная электрическая сеть большой протяженности имеет значительную емкость и небольшое емкостное сопротивление изоляции относительно земли. Как показано в § 2.2.1, ток замыкания на землю в такой сети может быть значительным и однофазное прикос-

новение в сети даже с изолированной нейтралью является опасным. Если единую протяженную сеть с большой емкостью и малым сопротивлением изоляции разделить на ряд коротких сетей с небольшой емкостью и высоким сопротивлением изоляции, опасность поражения человека резко снижается.

Электрическое разделение протяженных сетей на несколько гальванически не связанных коротких участков осуществляется постановкой разделительных трансформаторов, как это показано на рис. 3.5.

В разделительных трансформаторах, предназначенных для электрического разделения сетей, не происходит преобразование энергии, т.к. число витков и величины напряжений в первичных и вторичных обмотках равны между собой, т.е. коэффициент трансформации  $K_T$  равен единице.

В представленной на рис. 3.5 схеме установка двух разделительных трансформаторов РТ1 и РТ2 сократила протяженность отдельных участков по сравнению с общей длиной сети в три раза. Соответственно произошло уменьшение емкости и повышение общего сопротивления сети, а следовательно, повышение безопасности ее эксплуатации.

На практике распространение получила схема питания отдельных электроприемников от разветвленной сети через разделительные трансформаторы (рис.3.6).

Защита с помощью разделительных трансформаторов используется для отделения электроприемников от общей сети напряжением 380, 220 и 127 В, в которой могут произойти повреждения изоляции и замыкания на корпус, вызывающие повышенную опасность для человека.

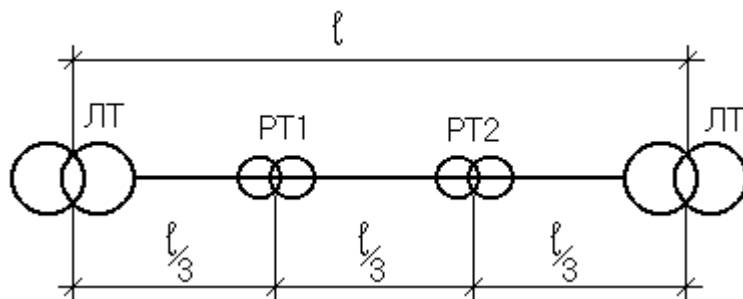


Рис. 3.5. Электрическое разделение сети:  
ЛТ – линейные трансформаторы; РТ1, РТ2 – разделительные трансформаторы;  $l$  – протяженность сети, км;  
 $l/3$  – протяженность отдельных участков, км

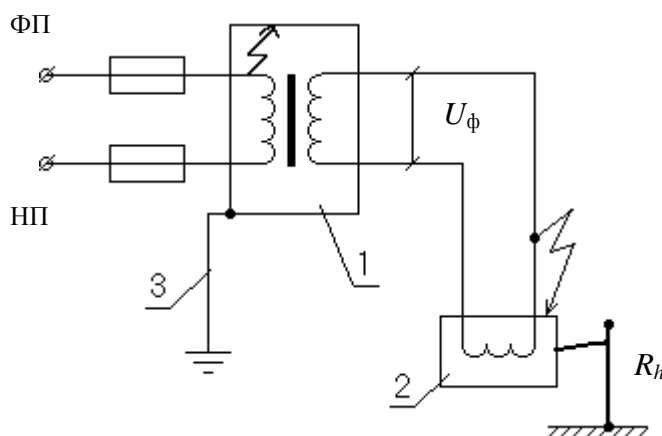


Рис. 3.6. Схема электрической сети с разделительным трансформатором:  
1 – разделительный трансформатор;  
2 – электроприемник (электродрель); 3 – заземление корпуса трансформатора

На рис. 3.6 изображена двухпроводная электрическая сеть с разделительным трансформатором 1, от которого, согласно «Правил», должен питаться только один электроприемник 2. При этом сеть, связывающая трансформатор с электроприемником, (например с электродрелью), как правило, является непротяженной. В этих условиях при прикосновении человека ( $R_h$ ) к корпусу электроприемника, замкнутого на фазу, через его тело потечет ток, значение которого определяется известной из § 2.1 формулой (2.2):

$$I_n = U_{\phi} / 2R_h + r_{из}, \text{А.}$$

Если принять сопротивление тела человека  $R_h=1000$  Ом, а сопротивление изоляции участка сети за разделительным трансформатором  $r_{из}=500$  кОм, то при фазном напряжении  $U_{\phi}=220$  В значение тока  $I_h$  будет менее 0,5 мА. Такое значение тока является безопасным, т. к. находится ниже порогового ощутимого тока.

В случае подсоединения второго электроприемника к разделительному трансформатору опасность поражения человека возрастает в связи с тем, что на обеих установках может произойти замыкание на корпус или пробой изоляции одновременно. При этом одна из установок будет связана с землей напрямую через сверло электродрели, и заземлённым изделием. И в том случае, если вторая установка связана с землей, то ток  $I_h$  будет определяться полным напряжением сети и сопротивлением человека  $R_h$ .

Опасность поражения в данном случае высокая, поэтому в применяемых схемах с разделительными трансформаторами при напряжениях 380, 220 и 127 В заземление корпусов электроприемников не допускается. Корпус самого разделительного трансформатора необходимо заземлять. Это объясняется тем, что при пробое изоляции первичной обмотки на корпус трансформатора и при отсутствии заземления ток через человека, прикоснувшегося к корпусу, замыкается через небольшое емкостное сопротивление протяженной первичной сети. Значение этого тока будет опасным. Установка предохранителей в рассматриваемой схеме объясняется необходимостью отключения электроприемника в случаях замыкания фазы на корпус установки, соединенной с землей, и повреждения изоляции на другой фазе, а также при межфазном коротком замыкании.

### **3.5. КОМПЕНСАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ**

Ток замыкания на землю, а следовательно, и ток через человека в случае прикосновения к фазному проводнику в протяженной сети с изолированной нейтралью зависит не столько от сопротивления изоляции, сколько от величины ёмкости сети относительно земли

.При значительной емкости, например  $C \geq 0,1$  мкФ, ток через человека достигает опасных значений (см. § 2.2.1). Емкость фазных проводников воздушных линий электропередач и относительно земли не зависит от каких-либо дефектов в изолированных участках сети. Она определяется главным образом протяженностью сети и геометрическими параметрами: диаметром самих проводников, расстоянием между ними и высотой подвеса от земли. Поэтому емкость сети в процессе эксплуатации может изменяться лишь за счет отключения или включения отдельных участков, что определяется требованиями электроснабжения потребителей

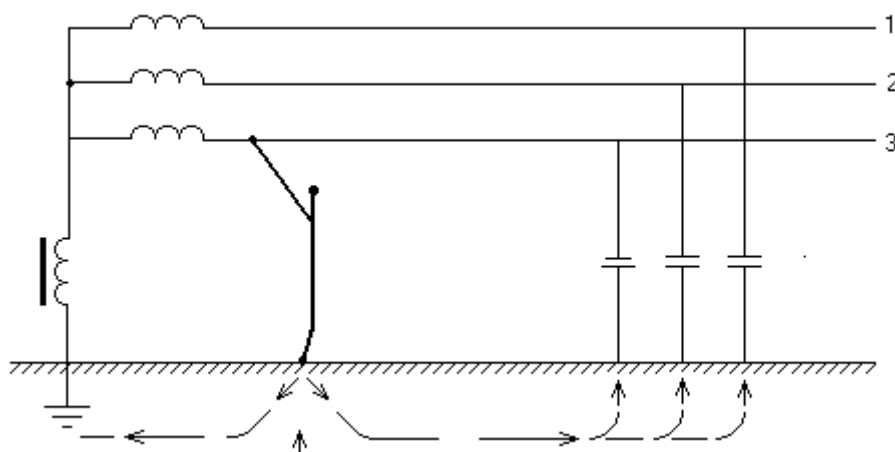


Рис. 3.7. Компенсация емкостных токов утечки:

$L$  – индуктивность дросселя;  $I_h$  – индуктивный ток;  $I_c$  – емкостной ток;  $I_h$  – ток через человека, мА;  $C_1=C_2=C_3=C_\phi$  – емкость фазных проводников, мкФ

Поскольку невозможно уменьшить емкость всей сети, снижение тока замыкания на землю достигается компенсацией емкостной составляющей индуктивным полем. Для этого в трехфазной сети между нейтралью и землей устанавливается компенсационная катушка: реактор или дроссель (рис. 3.7). Величина индуктивности  $L$  в компенсирующем дросселе выбирается из условий резонанса:  $\omega L = 1/\omega C_\phi$ , отсюда,  $L = 1/3\omega^2 C_\phi$ , Гн.

Емкостная и индуктивная составляющие токов  $I_L$  и  $I_c$  находятся в противофазе и при настройке в резонанс взаимно уничтожаются. При этом ток замыкания на землю (ток через человека  $I_h$ ) уменьшается и повышается безопасность обслуживания электрических сетей. В случае недокомпенсации или перекомпенсации емкости сети полный ток замыкания на землю или ток через человека также снижается. Компенсация емкостной составляющей применяется в сетях напряжением выше 1000 В для уменьшения емкостных токов утечки и снижения возникающих при этом перенапряжений. Правила устройства электроустановок предпри-

сывают компенсацию, если ток замыкания на землю превышает в сетях напряжение 35 кВ – 10 А, 20 кВ – 15 А, 10 кВ – 20 А и 6,3 кВ – 30А.

В схемах энергоблоков с генераторами-трансформаторами напряжением 6,3÷20 кВ компенсация обязательна при токе замыкания на землю более 5 А. При токе замыкания на землю 50 А и более устанавливаются две компенсирующие катушки параллельно.

В сетях напряжением до 1000 В компенсация емкостной составляющей тока замыкания на землю применяется лишь в особо опасных помещениях, наружных установках, в подземных сетях шахт и рудников. В этом случае компенсирующая катушка присоединяется к искусственной нулевой точке специального трансформатора.

### 3.6. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЬ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

При повреждении изоляции в самом трансформаторе может произойти замыкание не только на корпус, но и между обмотками разных напряжений. В этом случае произойдет переток высокого напряжения в сеть низкого напряжения, на которое эта сеть не рассчитана. Последствиями этого случая могут быть: повреждение изоляции проводников; замыкание на корпус ЭУ; появление опасных напряжений прикосновения и шага. Во всех случаях переток высокого напряжения в цепь низкого – явление опасное.

В трехфазных сетях снижение опасности достигается применением глухозаземленной нейтрали во вторичных обмотках трансформатора.

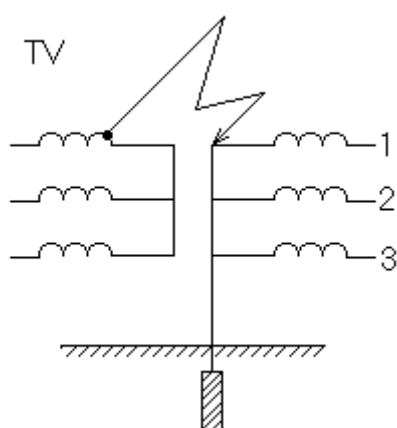


Рис. 3.8. Переток высшего напряжения в сеть низшего с глухозаземленной нейтралью

На рис. 3.8 показано замыкание между обмотками трансформатора TV 6500/380 В, причём сеть низкого напряжения работает с глухозаземленной нейтралью. Если нейтраль с низшей стороны заземлена, как показано на рис. 3.8, то при контакте между обмотками первой фазы происходит замыкание на землю. Ток замыкания на землю определяется фазным напряжением в первичных обмотках трансформатора и проводимостью фазных проводников во вторичной сети. Согласно ПУЭ, сопротивление глухозаземленной нейтрали при  $U > 1000$  В должно быть равным  $r_o \leq 125 / I_{зм}$ .

Это означает, что падение напряжения на заземлителе  $r_o$ , а следовательно, и напряжение нейтрали относительно земле не превышает 125 В. Расчеты показывают, что напряжение

фазы *I* в сети 380 В в этом случае становятся равными 345 В, а напряжения в фазах 2 и 3 принимают линейное значение 380 В.

Если трехфазная сеть низшего напряжения работает с изолированной нейтралью, то опасность перетока высокого напряжения устраняется постановкой пробивного предохранителя (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Схемы подключения пробивного предохранителя:  
*а* - в нейтраль обмоток, соединенных в звезду; *б* - на фазу при соединении обмоток в треугольник

На рис. 3.9 видно, что в случае соединения вторичных обмоток трансформатора TV 6500/380В с низшей стороны в звезду пробивной предохранитель Пр 0,4 кВ устанавливается в нейтраль, а в случае соединения вторичных обмоток в треугольник пробивной предохранитель Пр 0,4кВ устанавливается на фазный проводник, например, на фазу 3.

Пробивной предохранитель состоит из двух электродов, разделённых слюдяной прокладкой с отверстиями. При переходе напряжения с высшей стороны на низшую пробивной предохранитель оказывается под высоким напряжением. Воздушные промежутки в отверстиях слюдяной прокладки пробиваются, электроды замыкаются и нейтраль или фаза оказываются заземленными. Тем самым исключается появление во вторичной сети напряжения, передаваемого от высоковольтной первичной обмотки, через место повреждения изоляции во вторичную сеть.

При низких напряжениях меньше 300 В пробивной предохранитель не срабатывает, поэтому вторичные обмотки трансформаторов, например, для питания электроинструмента или различных ламп низкого напряжения заземляют или зануляют.

Для защиты от перетока высокого напряжения в цепь низкого напряжения, кроме описанных методов, применяется заземленный экран, который располагается в трансформаторе так, чтобы при повреждении изоляции обмотка высшего напряжения могла иметь контакт только с заземленным экраном. Обмотка низшего напряжения при этом остается изолированной и переток напряжения с высшей стороны на низшую в трансформаторе невозможен.



### 3.7. ВЫРАВНИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ОСНОВАНИЯ

Для снижения опасности поражения человека от напряжения прикосновения и напряжения шага в производственных помещениях и на территориях занятых электрооборудованием применяется техническая мера защиты – выравнивание потенциала основания на площадке, на которой находятся и перемещаются люди. Для этой цели, например, на территориях подстанций или открытых распределительных устройствах применяются контурные заземляющие устройства с использованием групповых заземлителей, как показано на рис. 1.12 (см. § 1.7.1).

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что электроды размещаются внутри и по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование. Такое размещение вертикальных электродов – заземлителей и горизонтальных соединительных полос обеспечивает относительно полное выравнивание потенциалов на площадке, где расположены ЭУ на которых возможны замыкания фазных проводников на корпус. Вертикальные электроды длиной до 4 м располагаются в земле примерно на таком же расстоянии между собой. Соединяющие их продольные горизонтальные проводники, выполняются из полосовой стали шириной 30÷60 мм и прокладываются на глубине 0,5-0,7 м вдоль электрооборудования со стороны обслуживания, на расстоянии 0,8÷1 м от его фундамента или основания.

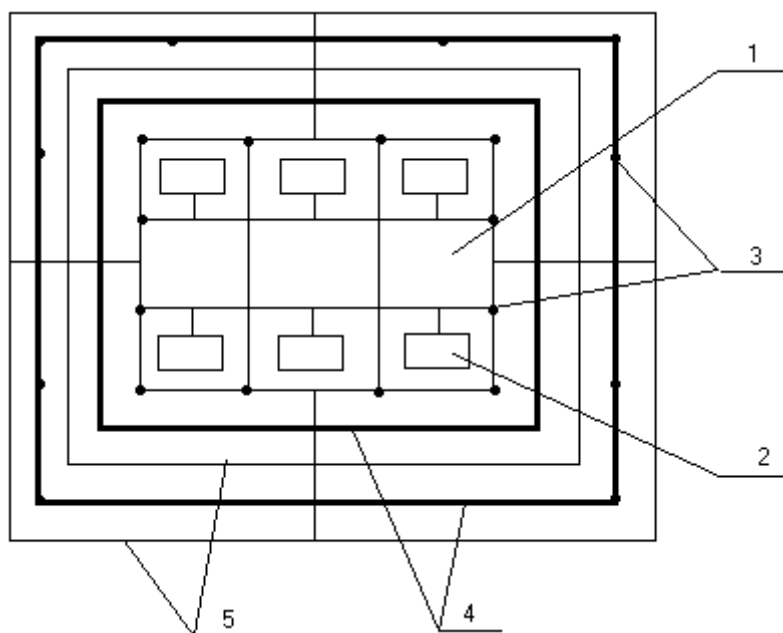


Рис. 3.10. Контурное заземление подстанции:  
1 – территория подстанции  $U > 1000$  В; 2 – заземленное электрооборудование;  
3 – вертикальные электроды заземлители; 4 – соединительные полосы;  
5 – дополнительные полосы

Чтобы уменьшить напряжение шага за пределами защищаемой территории, по ее краям по всему периметру прокладываются на разной глубине, но не менее 1 м продольные стальные полосы, соединенные с вертикальными заземлителями (рис. 1.12). Растекание тока при этом будет происходить по более пологой кривой. Следовательно, напряжение шага будет безопасным. На рис. 3.10 показан пример выполнения контурного заземления на подстанции напряжением более 1000 В.

### **3.8. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ**

ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ “Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.” регламентирует защитное заземление. Защитное заземление - наиболее простая и эффективная мера защиты человека от поражения током при появлении напряжения на металлических нетоковедущих частях ЭУ.

Защитным заземлением называется преднамеренное соединение нетоковедущих металлических корпусов ЭУ с землей или ее эквивалентом (водой реки, озера или моря, каменным углем, скальными породами и др.).

Металлические нетоковедущие корпуса ЭУ могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции электрических проводников или падения их на металлические части либо в результате индуктивного влияния соседних токоведущих частей или разряда молнии. Назначение защитного заземления – устранение опасности поражения человека при замыкании на корпус ЭУ или при других причинах посредством уменьшения напряжения прикосновения за счет снижения потенциала на корпусе ЭУ и повышения потенциала основания, на котором стоит человек.

#### **Область применения защитного заземления**

Согласно “Правил устройства электроустановок”, защитное заземление применяется:

- в помещениях без повышенной опасности I класса при номинальном напряжении 380 В и выше на переменном (~) токе и при напряжении 440 В и выше на постоянном (=) токе;
- в помещениях с повышенной опасностью II класса и в особо опасных помещениях III класса при номинальном напряжении 42 В и выше на переменном токе и при напряжении 110 В на постоянном токе;
- во взрывопожароопасных помещениях и зонах, в электросварочных установках, независимо от величины напряжения и рода тока;
- в трехфазных сетях напряжением до 1000 В защитное заземление должно применяться с изолированным режимом нейтрали источника тока;

- в сетях напряжением выше 1000 В с любым режимом нейтрали;
- однофазные двухпроводные сети должны быть изолированы от земли.

Рассмотрим действие защитного заземления, принципиальная схема которого показана на рис. 3.11.

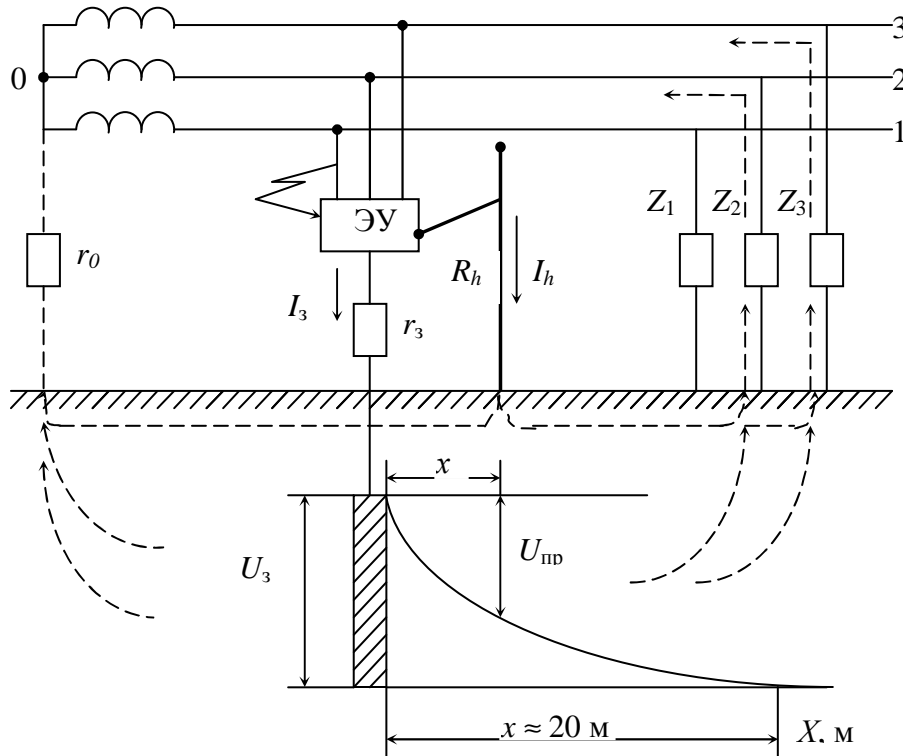


Рис. 3.11. Принципиальная схема защитного заземления в сетях трехфазного тока:

$I_h$  – ток через человека, А;  $R_h$  – сопротивление человека, Ом;  $I_3$  – ток через заземлитель;  $r_3$  – сопротивление защитного заземления;  $r_0$  – сопротивление глухозаземленной нейтрали;  $Z_1, Z_2, Z_3$  – полное сопротивление фазных проводников;  $U_{пр}$  – напряжение прикосновения, В;  $U_3$  – напряжение на заземлителе, В

Наметим пути токов, проходящих через человека  $I_h$  и заземлитель  $I_3$ , после замыкания фазного проводника  $I$  на корпус ЭУ. На рис. 3.11 пути тока показаны пунктирными линиями. Оба тока  $I_h$  и  $I_3$  после их растекания в земле возвратятся в исходную нулевую (нейтральную) точку 0 вторичных обмоток трансформатора либо через полные сопротивления фазных проводников  $Z_1$  и  $Z_2$  при изолированном режиме нейтрали, либо через сопротивление нейтрали  $r_0$  при ее глухозаземленном режиме.

Ток, проходящий через человека  $I_h$ , в общем виде выразится известной зависимостью:  $I_h = U_{пр} / R_h, А$ . Напряжение прикосновения  $U_{пр}$  определится по формуле  $U_{пр} = U_3 \alpha, В$ , где  $\alpha$  - коэффициент прикосновения. Напряжение на заземлителе  $U_3$  будет:  $U_3 = I_3 r_3$ .

Согласно “Правил устройства электроустановок”, наибольшее допустимое сопротивление защитного заземления  $r_3$ , принимается равным:

- в установках до 1000 В  $r_3 = 4$  Ом при суммарной мощности  $S$  источника тока равной или превышающей 100 кВА, при  $S$  меньшей 100 кВА сопротивление  $r_3$  принимается равным 10 Ом;
- в установках выше 1000 В  $r_3 \leq 250/I_{3\text{М}} \leq 10$  Ом – сетях с изолированной нейтралью с малыми токами замыкания на землю  $I_{3\text{М}}$  (менее 500 А, сети 6, 10 и 35 кВ) при условии, что заземлитель используется только для ЭУ выше 1000 В.

Если заземлитель в таких сетях применяется одновременно и для установок напряжением до 1000 В, то  $r_3 \leq 125/I_{3\text{М}} \leq 4$  Ом или  $\leq 10$  Ом – в зависимости от норм на защитное заземление  $r_3$  для ЭУ до 1000 В. Здесь величины 250 и 125 В – допускаемые напряжения в фазном проводнике относительно земли при его замыкании на землю;  $r_3 = 0,5$  Ом сопротивление в сетях с эффективно заземленной нейтралью с большими токами замыкания на землю (более 500 А в сетях с напряжением 110 кВ и более).

Далее, подставляя величину  $U_3$  в исходную зависимость ток через человека, в общем виде определится

$$I_h = I_3 r_3 \alpha / R_h, \text{ А.} \quad (3.2)$$

Коэффициент прикосновения  $\alpha$  изменяется от нуля до единицы в зависимости от расстояния между заземлителем и основанием, на котором стоит человек (расстояние  $x$  на рис. 3.11).

Определим величину тока  $I_h$  при различных режимах работы нейтрали.

**Сеть с изолированной нейтралью.** Определим величину тока, проходящего через заземлитель, используя выводы, в § 2.2.1:  $I_3 = \frac{U_\phi}{r_3 + r_{\text{из}}/3}$ , А. Принимаем полное сопротивление изоляции фазных проводников равным активным сопротивлениям, т.е.  $r_1=r_2=r_3=r_{\text{из}}$ .

Подставляя  $I_3$  в выражение (3.2), получим величину тока  $I_h$ , проходящего через человека при замыкании на корпус электроустановки с защитным заземлением в сети с изолированной нейтралью:

$$I_h = \frac{U_\phi r_3 \alpha}{(r_3 + \frac{r_{\text{из}}}{3}) R_h}, \text{ А.} \quad (3.3)$$

Для оценки опасности поражения человека в указанном случае рассмотрим пример.

*Пример 7.* Принимаем фазное напряжение в сети  $U_\phi = 220$  В, сопротивление защитного заземления  $r_3 = 4$  Ом. Полное сопротивление фазных проводников в короткой сети принима-

ем равным активному сопротивлению изоляции проводников  $r_{из} = 5 \cdot 10^5$  Ом, расчетное сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом, коэффициент прикосновения  $\alpha = 1$ .

Решение. Подставляя в формулу (3.3) принятые величины, получим

$$I_h = \frac{220 \cdot 10^3 \cdot 4}{(4 + \frac{5 \cdot 10^5}{3})10^3} = \frac{880 \cdot 10^3}{167 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ мА.}$$

Полученный результат меньше порогового осязаемого тока, равного 0,6 мА.

**Сеть с глухозаземленной нейтралью.** Заземление нейтрали сопротивлением  $r_o$  на рис. 3.11 показано пунктирными линиями. Величины допустимых сопротивлений  $r_o$  приведены в § 2.2.2.

Ток через заземлитель  $I_3$  в этом случае определится так:

$$I_3 = \frac{U_\phi}{r_3 + r_o}, \text{ А.}$$

Подставляя  $I_3$  в выражение (3.2), выразим величину тока  $I_h$  в сети с глухозаземленной нейтралью при замыкании фазного проводника на заземленной корпус ЭУ:

$$I_h = \frac{U_\phi r_3 \alpha}{(r_3 + r_o) R_h}, \text{ А.} \quad (3.4)$$

Опасность поражения человека оценим, выполнив пример.

*Пример 8.* Величины  $U_\phi$ ,  $r_3$ ,  $R_h$  и  $\alpha$  принимаем из предыдущего примера 7. Сопротивление нейтрали  $r_o$  в сетях 380/220 В принимаем равным 4 Ом.

Решение. Подставляем в формулу (3.4) известные величины:

$$I_h = \frac{220 \cdot 10^3 \cdot 4}{(4 + 4)10^3} = \frac{880 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^3} = 110 \text{ мА.}$$

Величина  $I_h = 110$  мА превышает смертельную величину тока 100 мА. Анализируя полученные формулы (3.3) и (3.4), можно сделать следующие выводы:

- эффективность действия защитного заземления с целью устранения опасности поражения человека током при появлении напряжения на корпусе электроустановки достигается: во-первых, при работе в сетях с изолированной нейтралью; во-вторых, при высоком активном сопротивлении изоляции фазных проводников  $r_{из}$ ; в-третьих, при малых значениях сопротивления защитного заземления  $r_3$ ;
- защитное заземление в сетях до 1000 В с заземленной нейтралью не эффективно, т.к. сопротивление глухозаземленной нейтрали  $r_o$  существенно меньше активного сопротивления изоляции фазных проводников  $r_{из}$ .

По этой причине защитное заземление, как уже отмечалось, в сетях напряжением до 1000 В применяется с изолированной нейтралью источника тока, а в сетях напряжением выше 1000 В (стандартизированные напряжения 6,5 – 10 – 35 – 110 кВ и выше) как с изолированной, так и с заземленной нейтралью.

В протяженных сетях утрачивается защитная роль изоляции, т.к. замыкание тока происходит на малое емкостное сопротивление, т.е. большую емкостную проводимость. В сетях напряжением выше 1000 В с большими токами замыкания прикосновения к замкнутому корпусу ЭУ несомненно опасно, но в таких ЭУ обязательно используется дополнительная защита в виде зануления или защитного отключения. Кроме того, в сетях  $U > 1000$  В при замыкании на корпус или на землю сработает быстродействующая релейная защита и поврежденная установка или линия электропередачи будет отключена.

Для эффективного действия защитного заземления и принятия необходимых мер безопасности от напряжения прикосновения и шага важно знать не только величину сопротивления заземляющего устройства и количество заземлителей (расчет защитного заземления подробно изложен в [1, с. 200 – 218]). Необходимо также выбрать тип заземляющего устройства и правильно расположить заземлители относительно заземляемого оборудования в производственных помещениях и территориях.

Распространение получили искусственные заземлители, предназначенные исключительно для целей заземления, и естественные металлические объекты, находящиеся в земле и предназначенные для иных целей (металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, водопроводные трубы, свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле, металлические опоры воздушных линий электропередачи и т.п.). Естественные заземлители, как правило, обладают малым сопротивлением растеканию тока, их можно использовать без искусственных, если они обеспечивают требуемое ПТЭ сопротивление. Недостатками естественных заземлителей является доступность к ним неэлектротехнического персонала и возможность нарушения непрерывности в соединениях протяженных заземлителей, например, при ремонтных работах.

Искусственные заземлители применяются обычно в виде вертикальных или горизонтальных электродов. В качестве вертикальных электродов используются стальные трубы длиной 2,5 – 4 м, диаметром 25 – 50 мм с толщиной стенки не менее 3 мм или угловую сталь размером 40x40 или 60x60 мм. Вертикальные электроды заземлителей соединяют заземляющими проводниками стальными полосами сечением не менее 12x4 мм, которые приваривают к каждому заземлителю. Совокупность заземлителей и заземляющих проводников называется *заземляющим устройством*.

В зависимости от места размещения заземлителей относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: контурное и выносное.

Контурное защитное заземляющее устройство характеризуется тем, что вертикальные электроды размещаются по контуру площади (периметру) и внутри площади, на котором находится заземляемое оборудование (контурное защитное заземление описано в § 3.7). В выносном заземляющем устройстве заземлитель вынесен за пределы производственного помещения или сосредоточен на отдельной его части (рис. 3.12).

Выносное заземляющее устройство применяется, если производственное помещение (открытая территория) размещено на скальном грунте с большим удельным сопротивлением либо под ним проложены разветвленные кабельные сети или трубопроводные трассы, что делает установку заземлителей внутри помещения технологически невозможной.

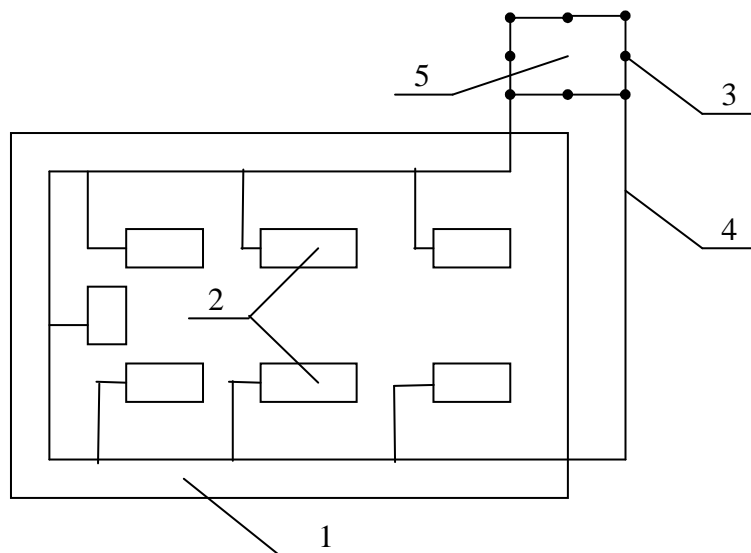


Рис. 3.12. Выносное заземляющее устройство:  
1 – производственное помещение; 2 – заземляемое оборудование;  
3 – вертикальные заземлители; 4 – заземляющие проводники;  
5 – выносное заземляющее устройство

Основной недостаток выносного заземляющего устройства – отдаленность заземлителя от заземляемого оборудования (рис. 3.12), вследствие чего на всей территории помещения коэффициент прикосновения  $\alpha$  будет равен единице. Поэтому заземляющее устройство выносного типа применяется в установках до 1000 В при малых токах замыкания.

Защитному заземлению, согласно ПУЭ, подлежат:

- электрооборудование, размещенное на станках, машинах и механизмах;
- металлические корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников, переносных электроприемников, пусковых реостатов и т.п.;

- приводы разъединителей, отделителей и выключателей и т.п.;
- металлические каркасы щитов управления, распределительные шкафы, если в них установлено электрооборудование напряжением выше 42 В переменного тока или выше 110 В постоянного тока;
- оболочки и броня силовых и контрольных кабелей, кабельные конструкции и соединительные муфты, опорные конструкции шинопроводов;
- железобетонные и металлические опоры воздушных линий электропередач, на которых установлены трансформаторы, разъединители, предохранители и другие аппараты, а также арматура этих опор.

Защитное заземление на судах водного транспорта, выполняемое по правилам Регистра, или на других объектах, не связанных с землей в период эксплуатации, обладает таким же принципом действия и защитными функциями, но имеет особенности и специфику в конструктивном исполнении [4, с. 154].

### **Виды заземлений**

Специалистам электротехнических профессий следует знать, что в соответствии с выполняемыми функциями различают следующие пять видов заземлений, применяемых на производствах и на судах водного транспорта:

- защитное заземление (рассмотрено в § 3.11);
- рабочее заземление;
- заземление для устранения радиопомех;
- заземление для снятия электростатических зарядов;
- заземление грозозащиты.

Рабочее заземление – преднамеренное соединение с землей (корпусом судна) одной или нескольких точек электрической сети, например, нейтральных точек обмоток трансформаторов, генераторов, а также заземление фазного проводника при использовании земли (корпуса судна) в качестве обратного провода. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надежной работы электроустановки в нормальных и аварийных условиях.

При использовании постоянно действующего рабочего заземления необходимо соблюдать следующего требования:

- обеспечить надежность контактов в соединениях и непрерывность электрической цепи по всей ее длине;
- предупредить возможность появления электрической коррозии в местах контакта двух разных металлов, образующих электролитическую пару (медь-сталь, медь-алюминий и



другие легкие сплавы), путем защиты от проникновения сырости при помощи полуды или наплавки специальных накладок;

- устранить возможность прохождения тока по валопроводам и подшипникам машин, трубопроводам путем создания соответствующей изоляции.

В цепях рабочих заземлений рекомендуется устанавливать коммутационную аппаратуру (выключатели, разъединители и др.) для быстрого и удобного отключения “земли” от всей сети или отдельного участка, например, при измерении сопротивления изоляции или в других случаях. Поэтому совмещать рабочее заземление с защитным, в котором установка выключателей или другой аппаратуры не допускается, запрещено.

Заземление для устранения радиопомех в транслирующих устройствах и заземление для снятия электростатических зарядов, возникающих на поверхностях оборудования, приборов или на рабочих местах, выполняются отдельно или совместно при небольших величинах потенциалов и токов стекания.

Заземление грозозащиты, предназначенное для защиты от непосредственного грозового разряда (прямого удара молнии) и для защиты от опасных потенциалов на металлических частях зданий (судна), вызванных индуктированными перенапряжениями, выполняют отдельно от защитного и рабочего заземлений. В противном случае высокие потенциалы, возникающие в грозозащитном заземлении при разряде молнии, перенесутся на проводники, заземлители и корпуса ЭУ [4, с.157 –162.]

### **3.9. ЗАНУЛЕНИЕ**

*Занулением* называется преднамеренное соединение нетоковедущих металлических корпусов электроустановок с нулевым защитным проводником. Предназначено оно для устранения опасности поражения человека током путем быстрого автоматического отключения поврежденной ЭУ, корпус которой оказался под напряжением. Напряжение на корпусе или на других частях ЭУ может возникнуть при замыкании на корпус фазного проводника с поврежденной изоляцией или в результате падения оголенного провода, находящегося под напряжением.

Зануление применяется в трехфазных четырехпроводных сетях с глухозаземленной нейтралью преимущественно при напряжениях 660/380, 380/220, 220/127 В, а также в трехпроводных сетях постоянного тока с глухозаземленной средней точкой обмотки источника тока, и в однофазных двухпроводных сетях переменного тока с глухозаземленным нулевым проводником.

Занулению подлежат те же металлические нетоковедущие корпуса (части), которые подлежат и заземлению, а именно: корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, переносных электроприемников, светильников, металлические оболочки кабелей, трубы электропроводки и т.п.

Зануление, как и защитное заземление, должно выполняться в следующих случаях:

- в помещениях без повышенной опасности I класса при напряжении электропроводок 380 В и выше переменного и 440 В и выше постоянного тока;
- в помещениях с повышенной опасностью II класса и особо опасных помещениях III класса, а также в нарушениях установки при напряжениях, превышающих 42 В переменного и 110 В постоянного тока;
- во взрывоопасных помещениях и зонах, независимо от величины напряжения ЭУ и рода тока.

Рассмотрим действие зануления и назначение отдельных элементов схемы (рис. 3.13).

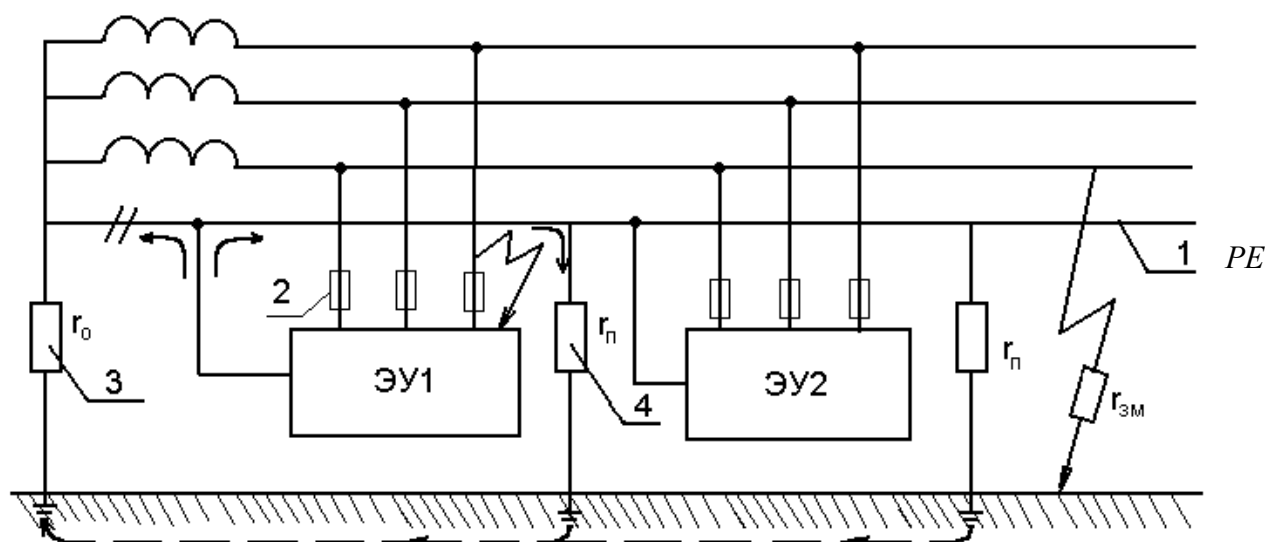


Рис. 3.13. Принципиальная схема зануления:  
 1 – нулевой защитный проводник PE; 2 – аппараты защиты (предохранители);  
 3 – глухозамкнутая нейтраль; 4 – повторное заземление

Нулевой защитный проводник (НЗП) - PE предназначен для соединения зануляемых корпусов ЭУ1 и ЭУ2 с глухозамкнутой нейтралью вторичных обмоток трансформатора и создания тока однофазного короткого замыкания, необходимого для отключения установки. В нулевом защитном проводнике, выполняемом из непрерывного провода с малым сопротивлением  $r_{нзп} 0,2 \text{ Ом}$ , запрещается устанавливать выключатели, предохранители или другие приборы, способные нарушить его целостность.

Следует отличать нулевой защитный проводник  $PE$  от нулевого рабочего проводника  $N$ , который является частью цепи тока и по которому проходит рабочий ток. Нулевой рабочий проводник можно использовать одновременно и как нулевой защитный  $PEN$ . В этом случае нулевой рабочий проводник должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к нулевым защитным проводникам. В нулевом рабочем проводнике, если он не используется одновременно как нулевой защитный, допускается устанавливать предохранители или выключатели. Аппараты защиты от токов короткого замыкания (предохранители, автоматические выключатели и т.п.) в схеме зануления предназначены для быстрого (время срабатывания не более 0,2 с) отключения поврежденной установки от питающей сети при появлении тока короткого замыкания  $I_{кз}$ .

Глухозаземленная нейтраль с сопротивлением  $r_0$  предназначена для срабатывания зануления при обрыве нулевого защитного проводника, (например, в указанном на рис. 3.13 месте) для снижения напряжения на зануленных корпусах ЭУ1 и ЭУ2 и на нулевом защитном проводнике до безопасного значения при замыкании фазного проводника на землю. Повторное заземление с сопротивлением  $r_n$  предназначено для срабатывания зануления при обрыве нулевого защитного проводника (рис. 3.13), а также для снижения опасности поражения на последующих корпусах ЭУ, присоединенных к нулевому защитному проводнику ЭУ2 (рис. 3.14) в период замыкания фазного проводника на корпус предыдущей ЭУ1. В этом случае за повторным заземлением ЭУ1 напряжение на НЗП, а следовательно, на подсоединенных к нему корпусах ЭУ, становится равным нулю. Повторное заземление необходимо устанавливать после каждой ЭУ, на которой возможно замыкание фазы на корпус, а также в протяженных сетях через каждые 200 м. Оно, как и глухозаземленная нейтраль, снижает напряжение на зануленных корпусах относительно земли в случае замыкания фазного проводника на землю.

Рассмотрим это обстоятельство. При замыкании фазного проводника на землю в сети с изолированной нейтралью и без повторного заземления нулевого защитного проводника земля приобретает потенциал замкнутой фазы. В этом случае между незаземленными корпусами ЭУ1 и ЭУ2, имеющими нулевой потенциал, и землей в месте замыкания возникает напряжение  $U_k$ , близкое по значению к фазному напряжению сети  $U_\phi$ ,  $U_k \approx U_\phi$ . Оно будет существовать до отключения всей сети вручную или до ликвидации замыкания на землю, т.к. токовая защита при этом повреждении в схеме с изолированной нейтралью не срабатывает. Указанное положение весьма опасно.

В сети с заземленной нейтралью при замыкании фазного проводника на землю будет совершенно иное, практически безопасное положение. В этом случае фазное напряжение  $U_\phi$

разделится пропорционально сопротивлениям замыкания проводника на землю  $r_{3M}$  и заземление нейтрали  $r_o$  (рис. 3.13), благодаря чему напряжение  $U_k$  на корпусах ЭУ1 и ЭУ2 уменьшится и будет равно падению напряжения  $U_o$  на сопротивлении нейтрали  $r_o$ :  $U_k = U_o$ ;  $U_o = I_{3M} r_o$ , где  $I_{3M}$  – ток замыкания на землю определяется по формуле  $I_{3M} = U_\phi / r_{3M} + r_o$ , А. Тогда напряжение на корпусах электроустановок ЭУ1 и ЭУ2

$$U_k = \frac{U_\phi r_o}{r_{3M} + r_o}, \text{ В.} \quad (3.6)$$

Как правило, сопротивление  $r_{3M}$ , которое оказывает грунт току при случайном замыкании фазы на землю, во много раз больше сопротивления специально выполненного заземления нейтрали  $r_o$ , поэтому  $U_k$  оказывается незначительным.

*Пример 7.* Напряжение фазное  $U_\phi = 220$  В. Сопротивление глухозаземленной нейтрали  $r_o = 4$  Ом, сопротивление замыкания фазного проводника на землю принимаем  $r_{3M} = 200$  Ом. Необходимо определить напряжение  $U_k$  при замыкании фазного проводника на землю в схеме зануления с глухозаземленной нейтралью.

Решение. Напряжение на зануленном корпусе определится по формуле (3.6)

$$U_k = \frac{U_\phi r_o}{(r_{3M} + r_o)} = \frac{220 \cdot 4}{200 + 4} = 4,3 \text{ В.}$$

Согласно ПУЭ и “Правил техники безопасности”, не допускается в одной и той же сети применение разных технических средств защиты к однотипным ЭУ. Например, корпуса электрических машин, станков или других электромеханизмов должны иметь либо защитное заземление, либо зануление, либо использовать и то и другое одновременно. В последнем

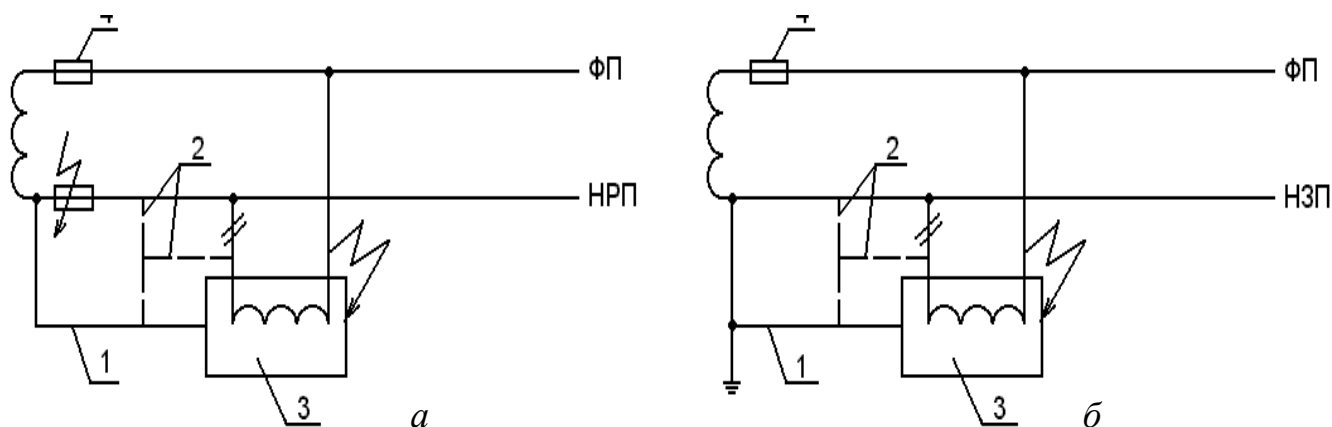


Рис. 3.14. Зануление переносных электроприемников в однофазных двухпроводных сетях:  
 а – с нулевым рабочим проводником; б – с нулевым защитным проводником; 1,2 – правильное и неправильное соединения соответственно; 3 – переносной электроприемник; 4 – предохранитель от токов короткого замыкания; 5 – сгоревший предохранитель; // - обрыв проводника

случае при заземлении и занулении одного и того же корпуса улучшаются условия безопасности, т.к. создается дополнительное заземление нулевого защитного проводника. Основной технической защитой становится зануление, а заземление – дополнительной.

Зануление металлических корпусов переносных электроприемников в однофазных двухпроводных сетях осуществляется специальной жилой, соединяющей корпус электроприемника, (например, сверлильного устройства) с нулевым рабочим или нулевым защитным проводником, как показано на рис. 3.14.

### **3.10. ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ**

*Защитным отключением* называется быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение ЭУ при возникновении в ней опасности поражения человека электрическим током. Такая опасность появляется при замыкании фазного проводника на корпус ЭУ, при снижении сопротивления изоляции сети, а также в случае прикосновения человека непосредственно к корпусу, находящемуся под напряжением. Если при прикосновении человека к корпусу оборудования или к фазному проводнику напряжение прикосновения превысит длительно допустимое значение, то необходим быстрый разрыв цепи тока через человека, т.е. отключение соответствующего участка цепи.

Область применения устройства защитного отключения (УЗО) практически ничем не ограничена и может применяться при любых напряжениях и с любым режимом нейтрали. Преимущественно УЗО получило распространение в сетях до 1000 В на установках с высокой степенью опасности при случайном прикосновении людей к токоведущим частям, где применение защитного заземления или зануления затруднено по техническим или другим причинам (плохо проводящий скальный грунт; большая стесненность оборудования, расположенного под основанием помещения и др.). Используется УЗО в лабораторных установках, на испытательных стендах, в передвижных устройствах, в ручных переносных электрических машинах. Защитное отключение может быть применено как единственная защитная мера и как основная мера защиты совместно с дополнительным защитным заземлением или занулением.

Защитное отключение, применяемое как основная мера, должно удовлетворять следующим требованиям:

- высокое быстродействие; время срабатывания УЗО  $\tau = 0,02 - 0,05$ с;
- высокая чувствительность;
- селективность действия;
- самоконтроль неисправности;

- высокая надежность.

По принципу действия выделяют следующие типы УЗО:

- прямого действия:
  - реагирующее на напряжение корпуса ЭУ  $U_K$ ;
  - реагирующее на ток замыкания на корпус  $I_K$ .
- непрямого действия:
  - реагирующее на напряжение нулевой последовательности  $U_0$ ;
  - реагирующее на ток нулевой последовательности  $I_0$ ;
  - реагирующее на оперативный ток  $I_{оп}$ .

Рассмотрим действие перечисленных типов УЗО.

### 3.10.1. УЗО, реагирующее на напряжение корпуса ЭУ

Рассматриваемый тип защитного отключения может применяться в сетях всех напряжений, независимо от режима нейтрали, когда система защитного заземления или зануления малонадежна или недостаточно эффективна. Например, в случае заземления корпусов ЭУ в сети с глухозаземленной нейтралью или при занулении корпусов в протяженных линиях, где возможны обрывы нулевого защитного проводника или повторного заземления.

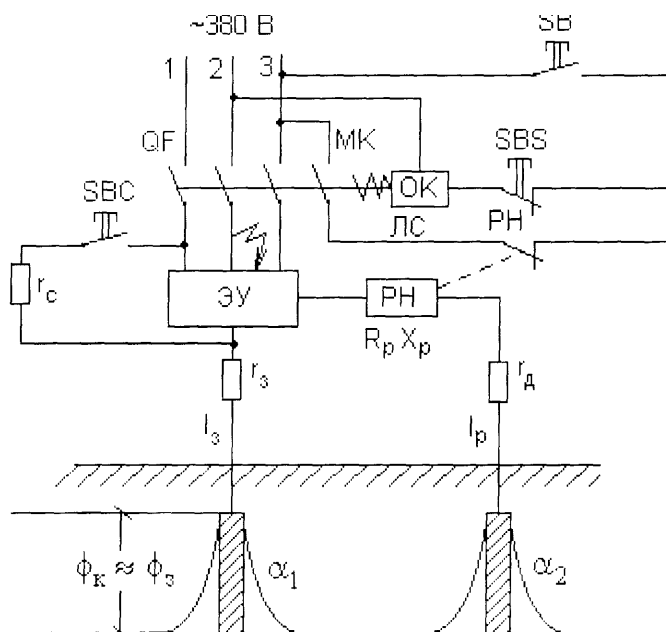


Рис. 3.15. Схема защитного отключения, реагирующего на напряжение корпуса ЭУ:

$r_3$  – сопротивление защитного заземления ЭУ; РН – реле напряжения с сопротивлениями  $R_p$  и  $X_p$ ;  $r_d$  – сопротивление дополнительного заземления; ОК – отключающая катушка с пружиной; МК – дополнительный механический; SB – «Пуск»; SBS – кнопка «Стоп»; SBC – кнопка самоконтроля УЗО;  $r_c$  – сопротивление линии самоконтроля; QF – автоматический выключатель; ЛС – линия самоподпитки;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты прикосновения

Рассмотрим схему защитного отключения, реагирующего на напряжение корпуса и применяемую в трехфазных сетях (рис. 3.15).

Основные положения в работе схемы защитного отключения, представленной на рис. 3.15, следующие:

- Пуск в работу ЭУ. Нажимается кнопка «Пуск» SB. Отключающая катушка ОК встает под напряжение 380 В от фазных проводников 2 и 3, втягивается шток катушки, сжимается пружина и замыкаются все четыре контакта в автоматическом выключателе QF. Получив питание ЭУ, включается в работу. Кнопка SB отпускается. ОК получает питание через дополнительный механический контакт МК и линию самоподпитки ЛС.
- Замыкание фазного проводника 2 на корпус ЭУ. Ток из корпуса стекает в землю через основное защитное заземление  $r_3$  и дополнительное заземление  $r_d$ , в расщелку которого установлено реле напряжения РН. При этом разомкнется нормально замкнутый контакт РН. Отключающая катушка ОК отключится. Механическая пружина разомкнет все контакты QF. Произойдет останов ЭУ.
- Проверка исправности УЗО. В режиме самоконтроля ЭУ выводится на холостой ход. Нажимается кнопка «самоконтроль» SBC, корпус ЭУ встает под напряжение фазного проводника 1 через дополнительное сопротивление  $r_c$ . Далее совершается операция, описанная в предыдущем положении, и при отсутствии дефектов в схеме УЗО отключается ЭУ. Если при наличии дефекта в схеме защитного отключения электроустановка остается в работе, то необходимо найти и устранить дефект.
- Отключение электроустановки происходит нажатием кнопки «Стоп» SBS, что приводит к обесточиванию катушки ОК, размыканию соединительных контактов выключателя QF механической пружиной и отключению электропривода. При замыкании фазного проводника на заземленный корпус вначале проявляется защитное свойство заземления, снижающее потенциал корпуса до некоторого уровня.  $\varphi_k = I_3 r_3$ .

Если  $\varphi_k$  превысит допустимое значение  $\varphi_{k \text{ доп}}$ , сработает УЗО и поврежденная установка будет отключена от сети. Допустимый потенциал на корпусе  $\varphi_{k \text{ доп}}$  есть такой потенциал, при котором напряжение прикосновения не превышает допустимого значения, т.е.  $\varphi_{k \text{ доп}} < U_{\text{пр доп}}$ . Напряжение срабатывания реле должно быть меньше  $U_{\text{пр доп}}$ , поскольку потенциал корпуса  $\varphi_{k \text{ доп}}$  оказывается приложенным не только к активному  $R_p$  и индуктивному  $X_p$  сопротивлениям обмотки реле напряжения (РН), но и к последовательно соединенному с ним сопротивлению дополнительного заземления  $r_d$ .

Напряжение срабатывания реле в действительной форме находится по формуле:

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{пр доп}} \sqrt{R^2 + X_p^2}}{\alpha_1 \alpha_2 \sqrt{(R_p + r_d)^2 + X_p^2}}, \text{ В.} \quad (3.7)$$

Из этого уравнения при известных параметрах  $R_p$ ,  $X_p$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , а также при  $U_{\text{пр доп}}$  определяется значение  $r_d$ , при котором происходит срабатывание защиты. Преимуществом УЗО, реагирующего на напряжение корпуса, является простота схемы. Недостатки заключаются в необходимости монтажа дополнительного заземления и отсутствии селективности в случае присоединения нескольких корпусов к одному заземлителю.

### 3.10.2. УЗО, реагирующее на ток замыкания на корпус

Такой тип защитного отключения применяется в электросхемах, независимо от напряжения питающей сети или режима ее нейтрали на установках, корпуса которых изолированы от земли, а следовательно, и один от другого. В этом случае защита работает селективно, отключая лишь поврежденную установку. К таким установкам относятся: ручной электрифицированный инструмент; испытательные стенды; передвижные установки и т. п.

Схема защитного отключения, реагирующего на ток замыкания на корпус, приведена на рис. 3.16, где в качестве датчика устанавливается реле тока РТ в расщелку заземляющего проводника с сопротивлением  $r_3$ . Остальные элементы и их действия соответствуют схеме на рис. 3.15.

При замыкании фазного проводника 2 на корпус ЭУ ток, стекающий в землю через заземляющий проводник, если он превышает уставку, вызовет срабатывание реле тока и произойдет отключение установки. Ток уставки должен быть равен току срабатывания, который обеспечивает условия безопасности и при котором напряжение прикосновения не превышает допустимого значения, т.е.  $I_{\text{ус}} = I_{\text{ср}}$ .

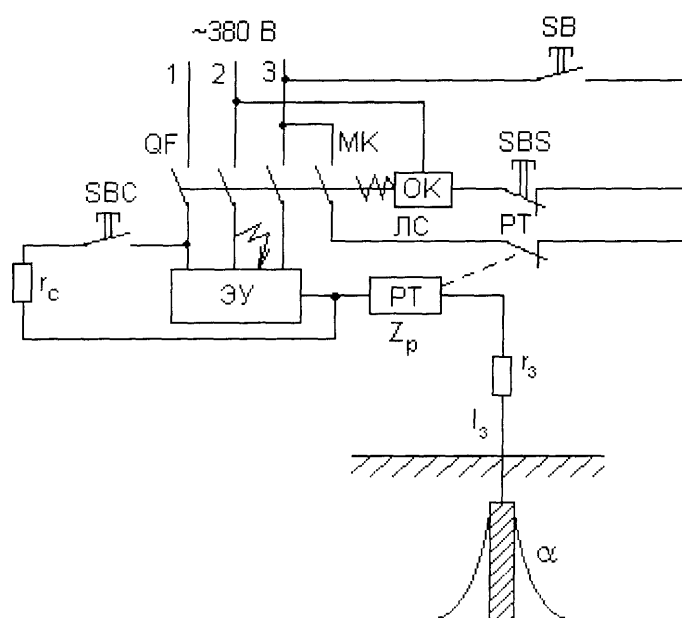


Рис. 3.16. Схема защитного отключения, реагирующего на ток замыкания на корпус: РТ – реле тока; Z – полное сопротивление РТ



Ток срабатывания реле  $I_{\text{ср}} = U_{\text{пр. доп}} \alpha / Z_p + r_3$ , А. Если принять коэффициент прикосновения  $\alpha = 1$ , то получим

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{пр доп}}}{Z_p + r_3}, \text{ А.} \quad (3.8)$$

Преимуществами рассмотренного УЗО являются: простота конструкции; отсутствие дополнительного заземления; надежность срабатывания, особенно при больших токах, проходящих через реле; возможность селективного отключения поврежденной установки. Недостаток указанного устройства - отказ в работе при обрыве заземляющего проводника.

### **3.10.3. УЗО, реагирующее на напряжение нулевой последовательности**

Этот тип защитного отключения применяется в трехфазных трехпроводных сетях преимущественно до 1000 В с изолированной нейтралью малой протяженности, обладающих высоким сопротивлением изоляции и небольшой емкостью относительно земли.

Назначение УЗО, реагирующих на напряжение нулевой последовательности, - устранение опасности поражения человека током при глухом замыкании одной или двух фаз на землю, а также при замыкании фазного проводника на заземленный корпус.

Принцип действия - быстрое отключение сети от источника при возникновении напряжения нулевой последовательности  $U_0$ , которое образуется в случае несимметрии проводимостей проводников относительно земли выше некоторого значения. При равенстве проводимостей фазных проводников относительно земли  $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y$  напряжение нулевой последовательности равно нулю,  $U_0 = 0$ . Если эти проводимости не равны между собой, что возможно в результате несимметричного ухудшения сопротивления изоляции или при замыкании фазного проводника на землю, напряжение нулевой последовательности тем больше, чем больше несимметрия. Наибольшая несимметрия возникает при глухом замыкании на землю, когда  $U_0$  достигает фазного напряжения,  $U_0 = U_{\text{ф}}$ .

Принципиальная схема устройства представлена на рис. 3.17. Датчиком служит фильтр напряжения нулевой последовательности, состоящий из трех конденсаторов, соединенных в звезду. Реле напряжения, включенное между нулевой точкой фильтра и землей, срабатывает, когда напряжение нулевой последовательности, т. е. напряжение между нейтральной точкой источника тока и землей  $U_0$ , достигает значения, при котором напряжение на зажимах реле становится равным напряжению срабатывания  $U_{\text{ср}}$  или превышает его. При этом происходит отключение сети от источника.

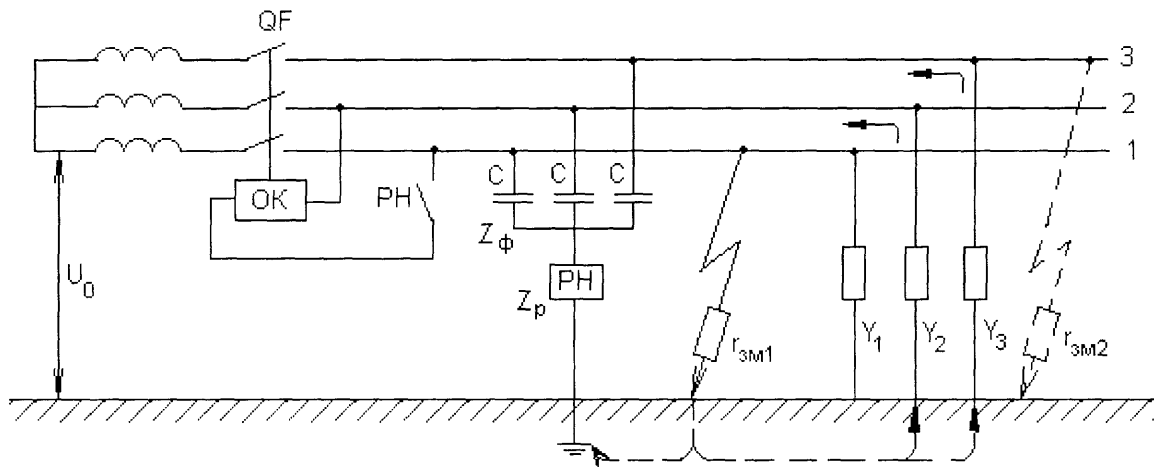


Рис. 3.17. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на напряжение нулевой последовательности:  
 $U_0$  – напряжение нулевой последовательности;  $C_{1,2,3}$  – конденсаторы, фильтр напряжения  $U_0$ ;  
 РН – реле напряжения; ОК – отключающая катушка; QF – автоматический выключатель;  
 $Y_1, Y_2, Y_3$  – полная проводимость фазных проводников 1, 2, 3;  $r_{3m1}, r_{3m2}$  – сопротивления замыкания  
 на землю проводника 1 и 2 соответственно;  $Z_p$  – полное сопротивление РН;  
 $Z_\phi$  – полное сопротивление фильтра

Если произойдет замыкание фазного проводника 1 на землю или замыкание на заземленный корпус ЭУ с малым значением сопротивления замыкания  $r_{3m1}$ , то напряжение нулевой последовательности будет близким к фазному,  $U_0 \approx U_\phi$ . Если на землю замкнулись два фазных проводника 1 и 3 с сопротивлениями замыкания  $r_{3m1}$  и  $r_{3m3}$  соответственно, то напряжение нулевой последовательности будет равным половине фазного, т. е.  $U_0 = 0,5U_\phi$ . Это значение  $U_0$  принимается за уставку  $U_{уст}$ , при которой происходит отключение сети, следовательно,  $U_{уст} = U_0 = 0,5U_\phi$ .

Напряжение срабатывания реле  $U_{ср}$  должно быть меньше напряжения уставки  $U_{уст}$ , т. к. к обмотке реле, обладающей сопротивлением  $Z_p$ , прикладывается лишь часть  $U_0$ . Другая часть напряжения  $U_0$  прикладывается к сопротивлению фильтра  $Z_\phi$ . Таким образом, получаем выражение для  $U_{ср}$ :

$$U_{ср} = \frac{0,5U_\phi Z_p}{Z_p + Z_\phi}, \text{ В.} \quad (3.9)$$

Преимуществом рассмотренной схемы, реагирующей на напряжение нулевой последовательности, является простота схемы и надежность срабатывания при глухих замыканиях на землю, независимо от сопротивления изоляции и емкости сети. К недостаткам схемы отно-

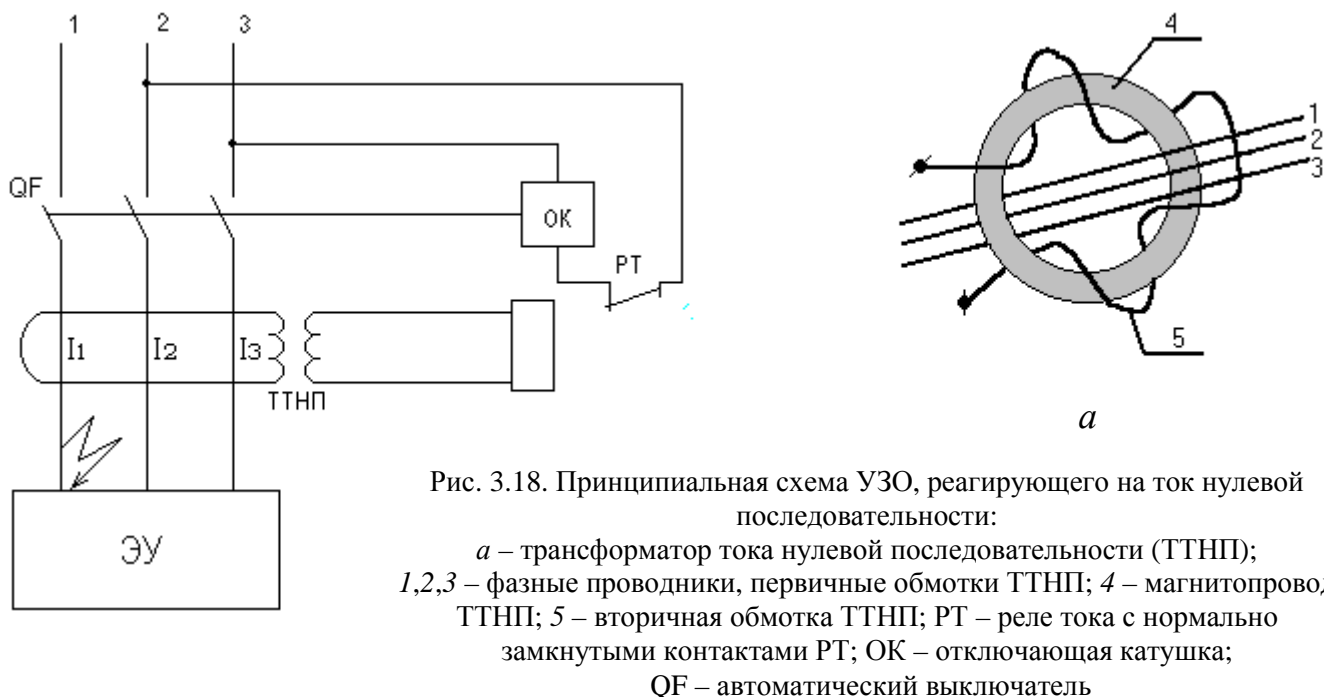
сятся: абсолютная нечувствительность к симметричному снижению сопротивления изоляции проводников; непригодность применения в сетях с глухозаземленной нейтралью; отсутствие самоконтроля исправности устройства.

В реальных схемах УЗО по напряжению нулевой последовательности в качестве датчиков, кроме конденсаторов, могут использоваться другие типы фильтров: лампы накаливания, вольтметры, резисторы, газонаполненные лампы и др.

### 3.10.4. УЗО, реагирующее на ток нулевой последовательности

Устройство защитного отключения, реагирующее на ток нулевой последовательности, применяется в сетях с любым напряжением как с заземленной так и с изолированной нейтралью. Назначение УЗО этого типа – обеспечение безопасности человека в случае прикосновения к заземлённому или зануленному корпусу при замыкании на него фазного проводника. Следовательно, это устройство может служить дополнительной защитой к защитному заземлению или занулению, а также в качестве самостоятельной защиты взамен заземления или зануления.

Принцип действия – быстрое отключение ( $\tau \leq 0,05\text{с}$ ) участка сети или ЭУ, если ток нулевой последовательности превысит некоторое значение, при котором напряжение прикосновения к пробитому корпусу ЭУ имеет наибольшее предельно допустимое значение  $U_{\text{пр. доп}}$ . Принципиальная схема приведена на рис. 3.18.



Датчиком в схеме защитного отключения этого типа служит трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), магнитопровод которого  $4$  охватывает все проводники  $1, 2, 3$ , играющие в этом случае роль первичных одновитковых обмоток трансформатора. В результате магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе ТТНП  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  в проводниках  $1, 2$  и  $3$ , складываются, а суммарный поток приводит к возникновению тока во вторичной обмотке ТТНП,  $5$ , которая замыкается через обмотку реле тока РТ.

Если проводимость фазных проводников относительно земли одинакова, то сумма токов, проходящих по разным проводникам сети, равна нулю:  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ . Следовательно, во вторичной обмотке не будет наводиться ЭДС и ток в цепи РТ будет равен нулю,  $I_p = 0$ . Если в результате замыкания проводника на корпус (землю) или несимметричного снижения изоляции проводников и прикосновения человека к корпусу, находящемуся под напряжением, возникает несимметрия проводимостей фаз относительно земли, то приведенные выше равенства нарушаются и возникает ток нулевой последовательности  $I_0$ . В результате во вторичной катушке ТТНП и в катушке РТ потечет ток  $I_p$ , равный  $I_p = I_0 / K$ , где  $K$  – коэффициент трансформации ТТНП (отношение первичного тока ко вторичному).

Ток  $I_p$ , достигнув значения тока срабатывания (тока уставки), вызовет отключение поврежденной установки от сети. Уставкой для случая прикосновения человека к корпусу ЭУ, находящейся под напряжением, будет такое значение тока нулевой последовательности  $I_{0y}$ , при котором напряжение прикосновения не превышает  $U_{\text{пр. доп}}$ :  $I_{0y} = U_{\text{пр. доп}} / R_h$ . Например, защитное устройство ЗОУП-25 при номинальном токе нагрузки  $25$  А имеет ток уставки  $10$  мА, время срабатывания не более  $0,05$  с.

Преимуществами УЗО, реагирующих на ток нулевой последовательности, являются: возможность применения в сетях разных напряжений с различными режимами нейтрали; способность обеспечить безопасность человека при прикосновении не только к корпусу, оказавшемуся под напряжением, но и к фазному проводнику сети; высокая степень надежности работы, особенно при отсутствии защитного заземления или зануления корпусов ЭУ.

Недостатки схем защиты на токе нулевой последовательности следующие: нечувствительность к симметричным снижениям сопротивления изоляции проводников; сложность конструкции устройства и отсутствие самоконтроля неисправностей в схеме защиты.

### **3.10.5. УЗО, реагирующее на оперативный ток**

Устройство защитного отключения, реагирующее на оперативный постоянный ток, применяется в сетях до  $1000$  В с изолированной нейтралью. При этом корпуса ЭУ могут быть заземлены или изолированы от земли. В сети с заземленной нейтралью эти схемы не

применяются из-за шунтирования сопротивления изоляции проводников малым сопротивлением заземления нейтрали, вследствие чего оперативный постоянный ток замыкается через это заземление. По этой же причине сети, в которых применяются рассматриваемые схемы, должны быть небольшой протяжённости.

Назначение УЗО, реагирующего на оперативный ток, – защита человека, прикоснувшегося к токоведущей части, от поражения током, а также осуществление непрерывного контроля сопротивления изоляции сети. Оно может служить дополнительной мерой защиты ЭУ к защитному заземлению.

Принцип действия – быстрое отключение сети ( $\tau \leq 0,05$  с) от источника тока при снижении сопротивления ее изоляции относительно земли ниже некоторого предела, при котором напряжение прикосновения достигает длительного допустимого значения  $U_{пр. доп}$ . Принципиальная схема этого устройства приведена на рис. 3.19. Датчиком в схеме служит реле тока РТ с малым током срабатывания (несколько миллиампер).

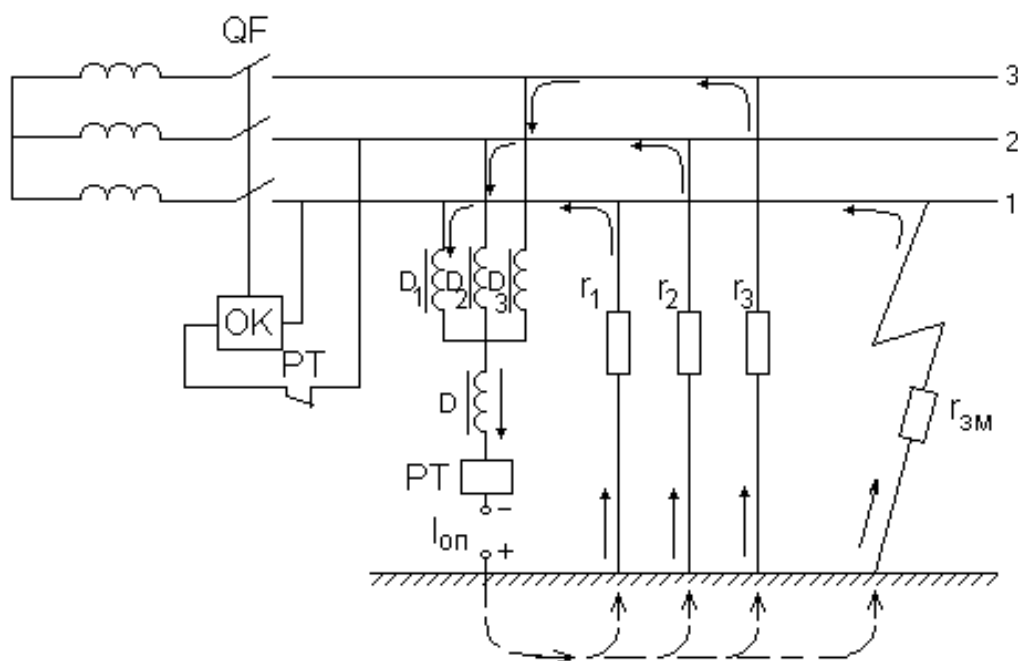


Рис. 3.19. Принципиальная схема УЗО, реагирующая на оперативный постоянный ток:

$D_1, D_2, D_3$  – трехфазный дроссель;  $D$  – однофазный дроссель; РТ – реле тока;  $I_{оп}$  – оперативный постоянный ток;  $r_1, r_2, r_3$  – активные сопротивления изоляции;  $r_{ЗМ}$  – сопротивление замыкания фазного проводника  $I$ ; ОК – отключающая катушка; QF – автоматический выключатель

Трехфазный дроссель  $D_1, D_2,$  и  $D_3$  предназначен для получения нулевой точки сети. Однофазный дроссель  $D$  необходим для ограничения утечки в землю переменного тока, которому он оказывает большое индуктивное сопротивление. Оперативный постоянный ток  $I_{оп}$

от постороннего источника проходит по замкнутому контуру (рис. 3.19). Значение этого тока зависит от напряжения источника постоянного тока  $U_{ист}$  и от общего сопротивления цепи:

$$I_{оп} = \frac{U_{ист}}{R_{д} + r_{э}}, \quad (3.10)$$

где  $R_{д}$  – суммарное активное сопротивление дросселей и реле тока, Ом;  $r_{э}$  – эквивалентное активное сопротивление изоляции проводников ( $r_1, r_2, r_3$ ) и замыкания фазы на землю  $r_{зм}$ , Ом.

$$r_{э} = \frac{r_{из} r_{зм}}{r_{из} + r_{зм}}, \quad (3.11)$$

где  $r_{из}$  – активное сопротивление изоляции трехфазных проводников 1, 2, 3, определяемое по формуле

$$r_{из} = \frac{1}{1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3}. \quad (3.12)$$

При нормальном режиме работы сети сопротивления  $r_{э}$  велико, поэтому ток  $I_{оп}$  незначительный. В случае снижения сопротивления изоляции одной (или двух, трех) фазы в результате ее замыкания на землю  $r_{зм}$  или на корпус или прикосновения к ней человека, сопротивление  $r_{э}$  уменьшается, а ток  $I_{оп}$  возрастает и, если он превысит ток срабатывания реле РТ, произойдет отключение сети от источника питания.

Ток срабатывания  $I_{ср}$  определяется выражением (3.10), в котором надо заменить  $r_{э}$  на сопротивление уставки  $r_{уст}$ :

$$I_{ср} = \frac{U_{ист}}{R_{д} + r_{уст}}, \quad (3.13)$$

где  $r_{уст}$  по аналогии с формулой (3.11) определяется так:

$$r_{уст} = \frac{r R_h}{r + R_h}, \quad (3.14)$$

$R_h$  – сопротивление тела человека, Ом. Уставка не зависит от степени несимметрии сопротивлений изоляции фазных проводников.

Преимущества УЗО, реагирующих на оперативный постоянный ток: высокая степень безопасности из-за малой величины тока, проходящего через человека; возможность осуществить самоконтроль неисправностей, т.к. при обрыве цепей в схеме реле тока ЭУ обесточивается и отключается.

Недостатки этих устройств: сложность конструкции; необходимость наличия источника постоянного тока; низкая эффективность действия в протяженных сетях, поскольку они не контролируют значения емкостного сопротивления сети относительно земли.

## **Глава 4. БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Согласно “Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей” и “Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей”, на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) все работы могут проводиться либо со снятием напряжения при пофазном ремонте на отключенной линии, либо без снятия напряжения (под напряжением) при кратковременных восстановительных работах по устранению неисправностей, которые могут привести к аварии.

Рассмотрим условия возникновения повышенной опасности, и определим технические меры, обеспечивающие безопасность работ на воздушных линиях ЛЭП, выполняемых как со снятием напряжения, так и под напряжением.

### **4.1. БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ НА ФАЗНОМ ПРОВОДНИКЕ СО СНЯТИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Если на воздушной линии (ВЛ) электропередачи проводится ремонт отключенного фазного проводника, то два других фазных проводника остаются в работе и обеспечивают электроснабжение потребителей. При этом методе выполняются различные работы как на ВЛ, так и на подстанциях: ремонт или замена опор, проводников, подвесок, изоляторов, выключателей и др. При пофазном ремонте персонал, работающий на отключенном проводнике, находится в условиях повышенной опасности по следующим причинам:

- наведение электростатического потенциала на отключенном проводнике электрическим полем от других действующих проводников;
- действие продольной ЭДС, наведенной магнитным полем, находящихся в работе проводников;
- близкое расположение действующих проводников под рабочим напряжением (расстояние от 1 до 10 м в зависимости от напряжения);
- возникновение электрической дуги от емкостного тока при наложении и снятии переносных заземлений.

Рассмотрим каждый из этих случаев.

### Наведение электростатического потенциала

В схеме наведения электростатического потенциала на отключенном фазном проводнике (рис. 4.1).

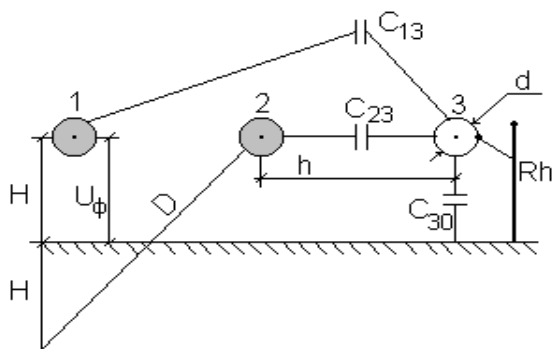


Рис. 4.1. Принципиальная схема наведения электростатического потенциала на отключенном проводнике:

$1, 2$  – проводник в работе;  $3$  – проводник отключен;  $C_{13}, C_{23}$  – взаимные емкости проводников, ф/м;  $C_{30}$  – емкость проводника  $3$  относительно земли, ф/м;  $H$  – расстояние проводника  $1$  до земли и зеркального отражения, м;  $D$  – расстояние проводника  $2$  до зеркального отражения, м;  $h$  – расстояние между проводниками, м;  $R_h$  – сопротивление человека, Ом

Электростатический потенциал  $\varphi_{ст}$ , наводимый на фазном проводнике  $3$  от проводников  $1$  и  $2$ , находящихся под напряжением  $U_\phi$ , можно определить по следующей формуле:

$$\varphi_{ст} = \frac{C_{13}}{C_{23} + C_{30}} U_\phi, \text{ В}, \quad (4.1)$$

где выражение  $K = C_{13} / (C_{23} + C_{30})$  – есть коэффициент емкостной связи, который определяется конструктивными параметрами ВЛ по формуле

$$K = \frac{\ln D / h}{\ln 2H / r}, \quad (4.2)$$

где  $D, h, H$  и  $r = d/2$  – конструктивные параметры, указанные на рис. 4.1. Тогда потенциал  $\varphi_{ст}$  на отключенном проводнике  $3$  определится из выражения

$$\varphi_{ст} = KU_\phi, \text{ В}. \quad (4.3)$$

*Пример 8.* Определить электростатический потенциал отключенного проводника ВЛ 35 кВ с горизонтальным расположением проводников.

Дано: проводники диаметром 12 мм (радиус  $r = 6$  мм), средняя высота подвеса и проводников над землей  $H = 7$  м, расстояние  $D$  от проводника  $2$  до зеркального отражения проводника  $1$  принимается  $2H$ , т.е.  $D = 14$  м (рис. 4.1), расстояние между проводниками  $h = 4$  м.

Решение. Определим коэффициент емкостной связи по формуле (4.2)



$$K = \frac{\ln D/h}{\ln 2H/r} = \frac{\ln 14/4}{\ln 14/0,006} = 0,162.$$

Найдем значение наведенного электростатического потенциала на отключенном проводнике по формуле (4.3)

$$\varphi_{ст} = KU_{\phi} = 0,162 \cdot \frac{35}{\sqrt{3}} = 3,28 \text{ кВ.}$$

Прикосновение к проводнику, находящемуся под электростатическим потенциалом, приводит к поражению человека электрическим током. При этом степень опасности зависит не от значения потенциала, а от значения тока, который будет проходить через человека  $I_h$  и который зависит в свою очередь от напряжения прикосновения  $U_{пр}$ . В случае прикосновения человека к незаземленному проводнику, как на рис. 4.1, напряжение прикосновения определяется по следующей формуле:

$$U_{пр} = U_{\phi} \omega C_{a,b} l R_h, \text{ В,} \quad (4.4)$$

где  $C_{a,b}$  – взаимная емкость проводников, ф/м;  $l$  – длина проводника, км;  $\omega$  – угловая частота переменного тока, Гц;  $R_h$  – сопротивление тела человека, Ом.

Ток, проходящий через человека, выразится так:

$$I_h = U_{пр} / R_h \text{ или } I_h = U_{\phi} \omega C_{a,b} l, \text{ А.} \quad (4.5)$$

Из выражений (4.4) и (4.5) видно, что опасность поражения человека в рассматриваемом случае зависит от фазного напряжения сети, взаимных емкостей проводников, определяемых конструктивными параметрами, а также от протяженности сети и не зависит от величины электростатического потенциала, наведенного на отключенном проводнике.

*Пример 9.* На отключенном и незаземленном проводнике линии 35 кВ наводится электростатический потенциал  $\varphi_3 = 3,28$  кВ (см. пример 8). Человек прикоснулся к этому проводнику. Определить  $U_{пр}$  и  $I_h$  для двух случаев: при  $l = 100$  км и  $l = 0,05$  км.

Дано:  $C_{a,b} = 1,1 \cdot 10^{-9}$  ф/км;  $R_h = 1000$  Ом.

Решение. Используя формулы (4.4) и (4.5), находим:

- при  $l = 100$  км  $U_{пр} = U_{\phi} \omega C_{a,b} R_h = \frac{35}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 1000 = 700$  В.

$$I_h = U_{пр} / R_h = 700 / 1000 = 0,7 \text{ А} = 700 \text{ мА.}$$

Следовательно, в данном случае прикосновение является смертельным, т.к.  $I_h > 100$  мА,

- при  $l = 0,05$  км  $U_{пр} = U_{\phi} \omega C_{a,b} l R_h = \frac{35}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,05 \cdot 1000 = 0,35$  В.

$$I_h = U_{пр} / R_h = 0,35 / 1000 = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 0,35 \text{ мА.}$$

В этом случае прикосновение человека является безопасным, т.к.  $I_h$  меньше порогового осязаемого тока, равного 0,6 мА, несмотря на то, что наведенный потенциал очень высок – 3,28 кВ. После прикосновения человека этот потенциал снизится до  $U_{пр} = 0,35$  В.

### Действие продольной ЭДС

Токи, проходящие по оставшимся в работе проводникам ВЛ образуют вокруг них переменное магнитное поле, часть силовых линий которого пересекает третий отключенный проводник и наводит на нем ЭДС взаимной индукции. Отключенный проводник можно рассматривать как разомкнутую вторичную обмотку однофазного трансформатора. Напряжение на концах вторичной обмотки есть наведенная продольная ЭДС.

Схема, имитирующая возникновение продольной ЭДС, представлена на рис. 4.2.

Продольная ЭДС, наведенная магнитным полем обоих рабочих проводников при условии равенства их взаимных индуктивностей, что достигается перекрещиванием проводников на опорах, определяется выражением

$$E_{\text{прод}} = \omega M l I, \text{ В}, \quad (4.6)$$

где  $M$  – взаимная магнитная индуктивность, Гн/км;  $l$  – длина проводников, км;  $I$  – ток в действующих проводниках, А.

*Пример 10.* Определить продольную

ЭДС, наводимую на отключенном проводнике линии 35 кВ длиной 100 км.

Дано:  $M = 10^{-3}$  Гн/км, индуцирующий ток в действующих проводниках в нормальном режиме  $I = 350$  А.

Решение. Из формулы (4.6) находим

$$E_{\text{прод}} = \omega M l I = 314 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 350 = 1000 \text{ В}.$$

Распределение потенциала продольной ЭДС, наведенной на отключенном проводнике, показано на рис. 4.3.

Из рис. 4.3 видно, что потенциал  $E_{\text{прод}}$  отключенного проводника, обусловленный электромагнитным влиянием находящихся в работе проводников, изменяется по закону прямой линии, достигая максимального значения  $E_{\text{прод}}/2$  по концам и имея нулевое значение в середине длины проводника  $l$  в точке  $A$ .

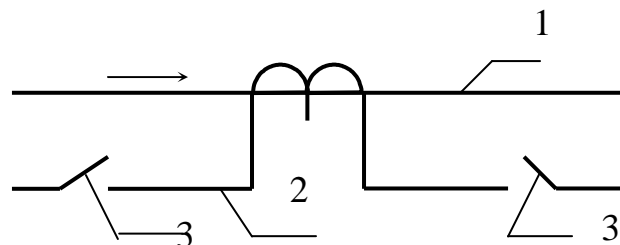


Рис. 4.2. Схема возникновения продольной ЭДС на отключенном проводнике:  
1 – действующий проводник – первичная обмотка трансформатора; 2 – отключенный проводник – вторичная обмотка трансформатора; 3 – линейные разъединители

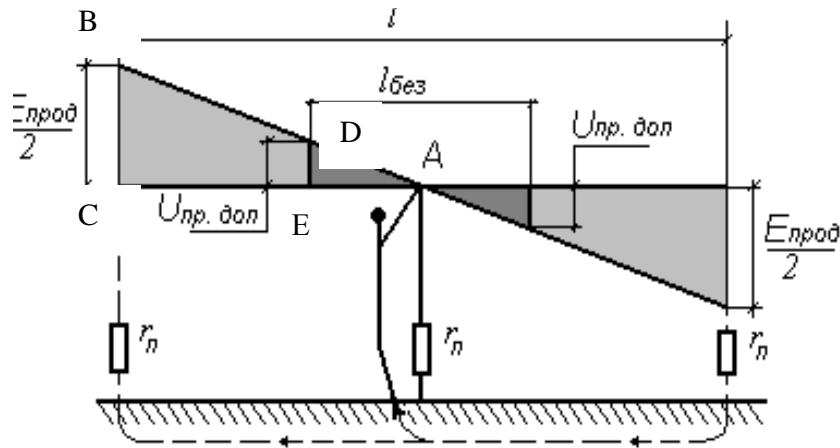


Рис. 4.3. Распределение потенциала продольной ЭДС на отключенном проводнике:  $l$  – длина отключенного проводника, км;  $l_{без}$  – длина безопасного участка;  $U_{пр. доп}$  – допустимое напряжение прикосновения, В;  $r_{п}$  – сопротивление переносного заземления, Ом;  $R_h$  – сопротивление тела человека, Ом.

Из подобия треугольников  $\triangle ABC$  и  $\triangle ADE$  рис. (4.3), зная величину допустимого напряжения прикосновения  $U_{пр. доп}$ , нетрудно определить длину безопасного участка  $l_{без}$ , при работе на котором протекающий через человека ток будет иметь допустимое значение:

$$l_{без} = \frac{2U_{пр доп}l}{E_{прод}}. \quad (4.7)$$

Безопасная зона работы может быть смещена от середины в любую сторону постановкой в соответствующем месте переносного заземления  $r_{п}$ .

Не допускается постановка переносных заземлений по концам проводника (на рис. 4.3 показаны штриховой линией). В этом случае в земле образуется контур тока, обусловленный ЭДС (рис. 4.3), и возникает опасность поражения током ремонтного персонала. Кроме того, происходит высушивание почвы вокруг заземлителей, а следовательно, повышение их сопротивлений.

Рассмотренные в § 4.1 случаи позволяют сделать следующий вывод: для защиты от опасности поражения человека током при работах на ВЛ ЛЭП с учетом как электростатического, так и электромагнитного влияния, отключенный проводник необходимо заземлить лишь в одном месте – месте производства работ.

## 4.2. БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ НА ФАЗНОМ ПРОВОДНИКЕ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Метод разработан в СССР в годы Великой Отечественной войны, когда бесперебойное снабжение электроэнергией промышленных предприятий имело особое стратегическое значение. После этого ремонт ВЛ электропередачи 35 и 110 кВ производился без их отключения, т.е. под напряжением. В последующие годы этот метод непрерывно совершенствовался в целях повышения производительности труда и безопасности работ. Расширялась и область применения его в сторону более высоких и более низких напряжений.

Главная особенность метода заключается в полной изоляции персонала, выполняющего ремонтные работы, от земли, в результате чего работающие могут безопасно прикасаться неизолированным инструментом или голыми руками к проводникам линии, находящимся под рабочим напряжением.

Под напряжением на воздушных линиях производятся следующие работы: осмотр или замену проводников на отдельных участках линии; ремонт проводников в любом месте пролета (установка шунтов, бандажей и ремонтных муфт), установку контрольно-измерительной аппаратуры и подобные им работы.

Принципиальная схема работы на ВЛ под напряжением показана на рис. 4.4.

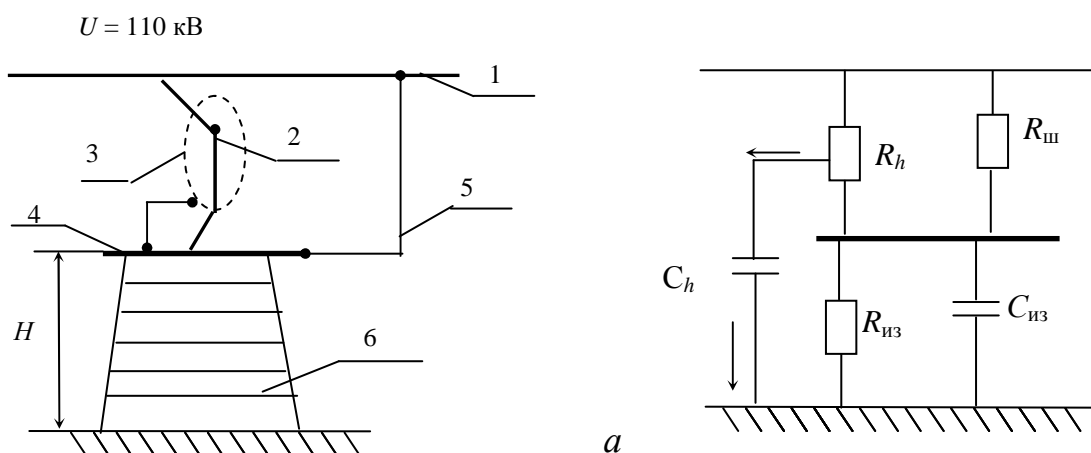


Рис. 4.4. Принципиальная схема работы на воздушной линии под напряжением:

а – эквивалентная схема;

$R_h, R_{ш}, R_{из}$  – активные сопротивления человека, шунтирующего проводника и изолирующего устройства;  $C_h, C_{из}$  – емкости человека и изолирующего устройства; 1 – фазный проводник под напряжением 110 кВ; 2 – человек, работающий на воздушной линии; 3 – изолирующий костюм с заземлением; 4 – металлический лист; 5 – шунтирующий проводник; 6 – изолирующее устройство

Метод основан на выравнивании потенциалов фазного проводника, на котором производится работа, и основания, на котором стоит человек. Осуществляется метод установкой металлического листа 4 на изолирующее устройство 6 (рис. 4.4), выполненное из токонепро-

водящих материалов с сопротивлением  $R_{из}$  не менее 10 МОм. Перенос потенциала производится при помощи шунтирующего проводника 5, соединяемого зажимами с действующим проводником (под напряжением) и металлическим листом.

Операция по установке шунта и переноса потенциала на металлический лист выполняется производителем работ высокой квалификации с помощью изолирующей штанги в диэлектрических перчатках.

После выравнивания потенциалов на фазном проводнике и металлическом листе, на котором стоит человек, опасность поражения от активного тока устраняется полностью, т.к. напряжение прикосновения будет равно нулю. Однако остается опасность поражения от емкостного тока, проходящего через тело человека на землю, как показано на эквивалентной схеме на рис. 4.4.

Для защиты тела человека от воздействия емкостного поля действующих проводников необходимо выполнять работу в изолирующем костюме специального назначения.

Ток, проходящий через тело человека, в общем виде будет

$$I_h = U_{\phi} / Z_h, \text{ A}, \quad (4.8)$$

где  $Z_h = \sqrt{R_h^2 + (\frac{1}{\omega C_h})^2}$  - полное сопротивление тела человека в действительной форме. Поскольку после выравнивания потенциалов напряжение прикосновения равняется нулю, то проводимость тока через активное сопротивление тела человека  $R_h$  также будет равна нулю. Поэтому  $Z_h$  в формуле (4.8) становится равным емкостному сопротивлению тела человека относительно земли:

$Z_h = 1 / \omega C_h$ , а величина тока  $I_h$  будет равна:

$$I_h = U_{\phi} \omega C_h. \quad (4.9)$$

Из формулы (4.9) видно, что опасность поражения человека при работе на фазных проводниках воздушных линий, находящихся под напряжением, кроме действующего фазного напряжения  $U_{\phi}$  и частоты переменного тока  $\omega$ , будет зависеть от величины емкости собственного тела человека  $C_h$ , которая определяется следующей формулой

$$C_h = \frac{4\pi\epsilon_0 l_h}{\ln(\frac{4l_h^2(l_h + 4H)}{d_n^2(3l_h + 4H)})}, \text{ Ф}, \quad (4.10)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная тока;  $l$  – рост человека, м;  $d_h$  – средний диаметр тела человека, м;  $H$  – высота изолирующего устройства, м (расстояние человека над землей).

Пример. Определить значение емкости тела человека относительно земли.

Дано: Рост человека  $l = 1,7$  м, диаметр эквивалентного цилиндра тела человека  $d_h = 0,226$  м, высота изолирующего устройства  $H = 6$  м, напряжение на ЛЭП – 110 кВ.

Решение. Определим  $C_h$  по формуле (4.10):

$$C_h = \frac{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,7}{\ln\left(\frac{4 \cdot 2,89(1,7 + 4 \cdot 6)}{0,051(3 \cdot 1,7 + 4 \cdot 6)}\right)} = 36 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Из формулы (4.10) и приведенного примера видно, что емкость тела человека относительно земли зависит от его параметров  $l_h$  и  $d_h$ . Зная величину емкости  $C_h$ , можно определить величину емкостного тока, протекающего через человека, при работе на линии под напряжением, в нашем случае 110 кВ.

По формуле (4.9)  $I_h = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \omega C_h$  определим  $I_h = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 314 \cdot 36 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 = 0,71 \text{ мА.}$

Установившийся емкостной ток 0,71 мА является пороговым ощутимым током, длительно проходящим через человека, т. е. все время, пока он работает на линии под напряжением 110 кВ. Поэтому, для защиты человека от воздействия электрического поля ВЛ, т. е. для снижения емкостного тока, необходимо применять изолирующий костюм, изготовленный из токопроводящей ткани со специальной обувью. Защитный костюм должен быть электрически соединен (заземлен) с металлическим листом изолирующего устройства, как показано на рис. 4.4. Кроме того, существует опасность поражения человека, выполняющего работу на линии под напряжением и при выполнении указанных защитных технических мер.

Причиной поражения током может служить недостаточная электрическая прочность устройства, изолирующего человека от земли. Вследствие этого изоляция устройства может быть перекрыта напряжением проводников ВЛ. Электрическая прочность изолирующего устройства, т. е. его разрядное напряжение на поверхность, зависит от материала, качества и формы поверхности, но главным образом от общей длины всей поверхности: чем больше длина, тем выше разрядное напряжение. По условиям безопасности необходимо, чтобы изоляция изолирующего устройства и вспомогательных изолирующих приспособлений (тяг, захватов и т.п.) обладала разрядным напряжением, превышающим напряжение проводников линии в четыре раза.

Необходимо знать, что напряжение проводника относительно земли на месте работы может значительно превышать фазное напряжение линии в результате внутренних и атмосферных перенапряжений при грозовых разрядах.

### Библиографический список

1. **Долин П.А.** Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 424 с.
2. Охрана труда в электроустановках /Под ред. Б.А. Кнезевского.– М: Энергоатомиздат, 1983. 336 с.
3. **Манойлов В.Е.** Основы электробезопасности. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. 480 с.
4. **Солодовников Г.С.** Электробезопасность при работе на судах и под водой. – Л: Судостроение, 1971. 208 с.
5. Охрана труда в машиностроении /Под ред. Е.Я.Юдина, С.В.Белова.– М: Машиностроение, 1983. 432 с.
6. **Войников В.И.** Охране труда – государственную поддержку // Охрана труда и социальное страхование. 1995. №4. С.7-9.
7. **Пенесов А.Л.** Бизнес на крови // Охрана труда и социальное страхование. 2000. №1. С. 7-10.
8. **Васильчук М.П.** Анализ надзорной деятельности органов Госгортехнадзора России в 1995 году // Безопасность труда в промышленности. 1996. №3. С. 2-5.
9. **Степанов В.М.**/Травматизм при эксплуатации электроустановок //Безопасность жизнедеятельности. 2002. № 8 С. 6-14.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Глава 1. Воздействие электрического тока на человека</b> .....	3
1.1. Сведения об электротравматизме .....	3
1.2. Действие электрического тока на человека .....	4
1.3. Виды несчастных случаев, связанных с электрическим током .....	4
1.4. Параметры электрического тока, действующие на человека.....	5
1.4.1. Сила тока через человека $I_h$ .....	5
1.4.2. Сопротивление тела человека $R_h$ .....	6
1.4.3. Род тока: постоянный и переменный .....	8
1.4.4. Частота переменного тока $f$ .....	9
1.5. Растекание тока в земле .....	11
1.5.1. Растекание тока от полусферического заземлителя .....	12
1.5.2. Растекание тока от стержневого вертикального заземлителя.....	13
1.6. Напряжение шага $U_{ш}$ .....	14
1.6.1. Меры защиты от напряжения шага .....	16
1.7. Напряжение прикосновения $U_{пр}$ .....	17
1.7.1. Меры защиты от напряжения прикосновения и шага .....	18
<b>Глава 2. Анализ опасности поражения человека в электрических сетях</b> .....	20
2.1. Опасность поражения человека в однофазных двухпроводных сетях, изолированных от земли .....	23
2.2. Опасность поражения человека в трехфазных электрических сетях .....	25
2.2.1. Сеть с изолированной нейтралью .....	26
2.2.2. Сеть с глухозаземленной нейтралью.....	30
2.2.3. Двухфазное прикосновение человека к проводникам.....	31
2.3. Выбор режима нейтрали в трехфазных сетях .....	33
2.4. Классификация помещений по электрической опасности .....	34
<b>Глава 3. Меры защиты человека от поражения электрическим током</b> .....	36
3.1. Применение малых напряжений .....	37
3.2. Применение двойной изоляции.....	38
3.3. Контроль изоляции электрических проводников.....	39
3.4. Электрическое разделение сетей.....	42
3.5. Компенсация емкостных токов замыкания на землю .....	44
3.6. Защита от перетока высокого напряжения в цепь низкого напряжения.....	46
3.7. Выравнивание потенциала основания .....	48
3.8. Защитное заземление.....	49
3.9. Зануление.....	56
3.10. Защитное отключение .....	60
3.10.1. УЗО, реагирующее на напряжение корпуса ЭУ .....	61
3.10.2. УЗО, реагирующее на ток замыкания на корпус .....	63
3.10.3. УЗО, реагирующее на напряжение нулевой последовательности .....	64
3.10.4. УЗО, реагирующее на ток нулевой последовательности .....	66
3.10.5. УЗО, реагирующее на оперативный ток .....	67
<b>Глава 4. Безопасность работ на воздушных линиях электропередачи</b> .....	70
4.1. Безопасность работ на фазном проводнике со снятием напряжения .....	70
4.2. Безопасность работ на фазном проводнике под напряжением .....	75
<b>Библиографический список</b> .....	78
<b>Оглавление</b> .....	79