

Практическое занятие по теме:

«Электробезопасность»

СОДЕРЖАНИЕ

1. Оценка опасности поражения электротоком	4
1.1. Расчет возможных токов поражения	4
1.2. Нормирование напряжения прикосновения и токов через тело человека	10
2. Проектирование и расчет методов и средств обеспечения электробезопасности	12
3. Примеры решения задач по оценке электропоражения, проектирова- нию и расчету элементов и средств защиты от электрического тока	39
Литература	60
Приложение	61

Современное производство немыслимо без широкого применения электрической энергии. Способствуя повышению производительности труда и культуры производства, электрический ток в то же время представляет большую опасность для жизни и здоровья людей. В отличие от других источников энергии электрический ток невозможно обнаружить дистанционно, без приборов. Поэтому будущие инженеры, разработчики новой техники и организаторы производства должны уметь оценивать потенциальную опасность электропоражения, обоснованно выбирать и рассчитывать способы и средства обеспечения электробезопасности.

1. ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТОКОМ

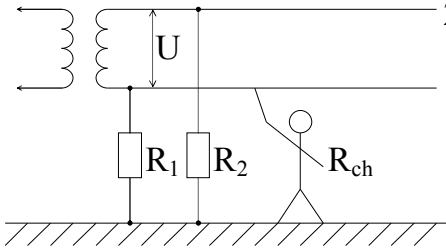
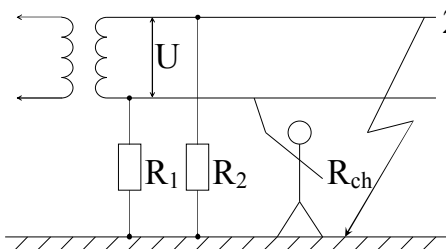
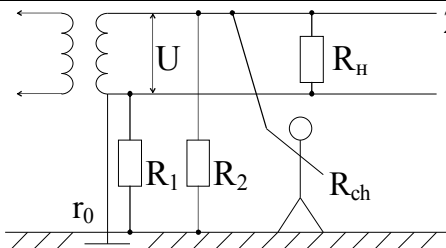
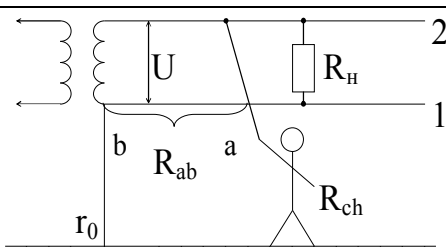
Оценка опасности поражения электротоком заключается в расчете максимально возможного тока, проходящего через тело работающего I_h , или напряжения прикосновения U_{np} и сравнении этих величин с предельно допустимыми значениями в зависимости от продолжительности воздействия этого тока или напряжения прикосновения. Оценка должна производиться как в нормальном режиме работы электроустановки, так и в аварийном. Под аварийным режимом понимается режим работы неисправной установки, при котором могут возникнуть опасные ситуации, приводящие к электротравмированию людей, взаимодействующих с установкой. Оценка опасности электропоражения позволяет определить необходимость применения способов и средств защиты, а фактические и предельно допустимые значения I_h и U_{np} служат исходными данными для их проектирования и расчёта.

1.1. Расчёт возможных токов поражения

Фактические значения I_h и U_{np} могут быть определены расчётным путём или экспериментально. Расчётные зависимости для определения I_h приведены в табл. 1.1, 1.2 и 1.3.

Таблица 1.1

Формулы для расчёта тока, проходящего через человека при прикосновении к проводнику в двухпроводных сетях переменного тока

№ п.п.	Характеристика сети	Схема включения человека в электрическую сеть	Формула для расчета тока
1	Изолированная от земли в нормальном режиме работы		$I_h = \frac{UR_1}{(R_1R_2 + R_1R_{ch} + R_2R_{ch})}$ При $R_1 = R_2 = R$: $I_h = \frac{U}{2R_{ch} + R}$
2	Изолированная от земли в аварийном режиме работы		$I_h = \frac{UR_1}{(R_1R_э + R_1R_{ch} + R_эR_{ch})}$ где $R_э = \frac{R_2r_{3м}}{R_2 + r_{3м}}$
3	С заземленным проводом (прикосновение к незаземленному проводу)		$I_h = \frac{U_{\phi}}{R_{ch} + r_0}$
4	С заземленным проводом (с прикосновением к заземленному проводу)		$I_h = \frac{U_{ab}}{R_{ch} + r_0} = \frac{I_{паб} R_{ab}}{R_{ch} + r_0}$

В табл. 1.1 приведены следующие обозначения: U – напряжение сети;

R_1, R_2 – сопротивления проводов относительно земли; r_0 – сопротивление заземления провода; r_{3M} – сопротивление замыкания провода на землю; R_{ch} – сопротивление в цепи тела человека; R_n – сопротивление нагрузки; R_{ab} – сопротивление провода на участке ab ; $I_{paб}$ – рабочий ток нагрузки.

При расчете I_h необходимо знать сопротивление в цепи человека R_{ch} , которое включает в себя сумму сопротивлений тела человека R_h , обуви $R_{об}$ и основания (пола или грунта), на котором стоит человек $R_{ос}$, т.е.

$$R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{ос}, \text{ Ом.} \quad (1.1)$$

Сопротивление тела человека R_h при напряжениях прикосновения $U_{np} \geq 50$ В принимается равным 1 кОм, а при $U_{np} < 50$ В – 6 кОм.

Сопротивление основания грунта равно:

если ступни ног расположены рядом

$$R_{ос} \approx 2,2\rho, \text{ Ом;}$$

если ступни ног отстоят одна от другой на расстоянии шага

$$R_{ос} \approx 1,5\rho, \text{ Ом,}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м.

Электрическое сопротивление основания $R_{ос}$, если человек стоит на грунте, зависит от вида и влажности грунта (прил., табл. 1); если человек стоит на полу – от материала и степени влажности пола (прил., табл. 2). Сопротивление обуви $R_{об}$ зависит от материала подошвы, влажности помещения и приложенного напряжения (прил., табл. 3).

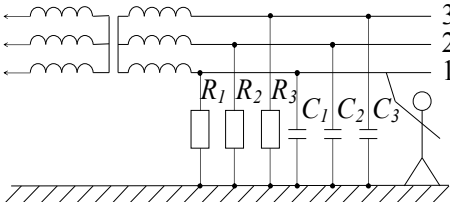
При высокой влажности обуви и грунта $R_{об}$ и $R_{ос}$ принимают равными нулю, а сопротивление в цепи человека R_{ch} равным сопротивлению тела человека (R_h).

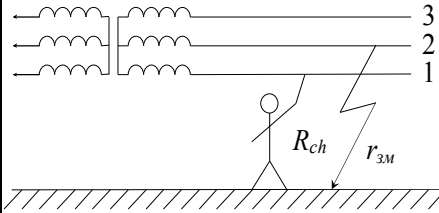
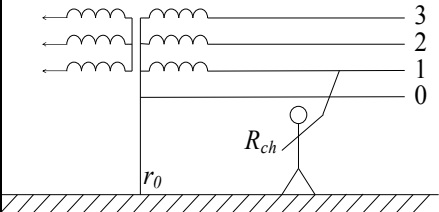
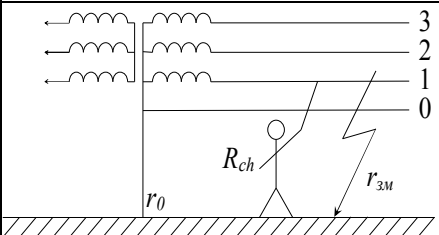
Для расчёта тока, проходящего через человека в случае прикосновения его к одной из фаз трёхфазных сетей, без учёта влияния систем защиты, контроля и авто-

матики можно воспользоваться формулами, указанными в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Формулы для расчета I_h , проходящего через человека, прикоснувшегося к фазному проводу трехфазных сетей

№ п.п.	Характеристика сети	Схема сети	Формула для расчета токов
1	2	3	4
1	Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы		При $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $C_1 = C_2 = C_3 = C$ $I_h = \frac{3U_\phi}{3R_{ch} + Z}$ или в действительном виде $I_h = \frac{U_\phi}{R_{ch} \sqrt{1 + \frac{R(R+6R_{ch})}{9R_{ch}^2(1+R^2\omega^2C^2)}}}.$ При $C_1 = C_2 = C_3 = C \rightarrow 0$ (в сетях небольшой протяженности) $Z \approx R$, тогда $I_h = \frac{3U_\phi}{3R_{ch} + R}$

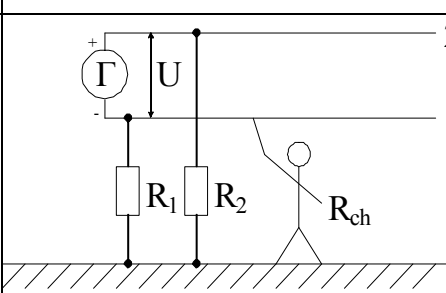
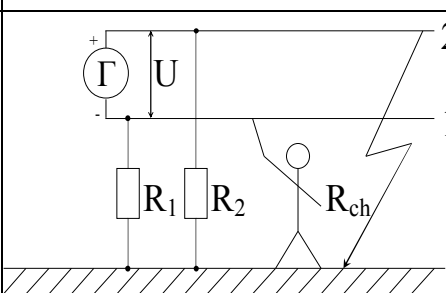
1	2	3	4
2	Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью при аварийном режиме работы (одна из фаз замкнута на землю через сопротивление замыкания r_{3M})		$I_h = \frac{U_{\text{л}}}{R_{ch} + r_{3M}};$ $U_{np} = U_{\text{л}}$
3	Четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью при нормальном режиме работы		$I_h = \frac{U_{\phi}}{R_{ch} + r_0} = \frac{U_{\phi}}{R_{ch}},$ так как $r_0 \ll R_{ch}$ $U_{np} = U_{\phi}$
4	Четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью при аварийном режиме работы (одна из фаз замкнута на землю)		$U_{\text{л}} > U_{np} > U_{\phi}$

Расчёт тока I_h в случае прикосновения человека, имеющего электрическую связь

с землёй, к токоведущим частям сетей постоянного тока можно производить по зависимостям, приведенным в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Формулы для расчета тока I_h , проходящего через человека, прикоснувшегося к проводу в сетях постоянного тока

№ п.п.	Характеристика сети	Схема сети	Формула для расчета токов
1	Двухпроводная сеть в нормальном режиме работы		В установившемся режиме: $I_h = \frac{UR_1}{R_{ch}(R_1 + R_2) + R_1 R_2}$ или $I_h = \frac{U}{2R_{ch} + R}$ при $R_1 = R_2 = R$
2	Двухпроводная сеть в аварийном режиме работы (провод 2 замкнут на землю через сопротивление замыкания $r_{зм}$)		В установившемся режиме при $r_{зм} \ll R_1, R_2, R_{ch}$ $I_h = \frac{U}{R_{ch}}$

В табл. 1.3 приведены следующие обозначения: Γ – генератор; U – напряжение источника питания (генератора); R – активное сопротивление провода относительно земли; R_{ch} – полное сопротивление в цепи человека; $r_{зм}$ – сопротивление замыкания проводов на землю.

1.2. Нормирование напряжения прикосновения и токов через тело человека

В табл. 1.4 и 1.5 представлены предельно допустимые напряжения U_{np} и токи I_h , проходящие через человека, соответственно при нормальном (неаварийном) и аварийном режимах работы электроустановок.

Таблица 1.4

Напряжения U_{np} и токи I_h , проходящие через человека при нормальном режиме работы электроустановки

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значения (нормальный режим)	
	U_{np} , В	I_h , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Примечание. Настоящие нормы соответствуют продолжительности воздействия тока на человека не более 10 мин в сутки. Для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (более 25°C) и влажности (более 75%), приведенные нормы должны быть уменьшены в три раза.

Напряжения U_{np} и токи I_h , проходящие через человека при аварийном режиме работы электроустановки

Род и частота тока	Нормируемая величина	Наибольшие допустимые значения при продолжительности воздействия, с											
		0,01–0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	более 1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Переменный, 50 Гц	$U_{np.доп}$, В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	42
	$I_{h.доп}$, мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
Переменный, 400 Гц	$U_{np.доп}$, В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	42
	$I_{h.доп}$, мА	650	500	500	330	250	200	170	140	30	110	100	8
Постоянный	$U_{np.доп}$, В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	50
	$I_{h.доп}$, мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

Для оценки опасности электропоражения может быть определена вероятность возникновения электротравмы в конкретных производственных условиях. Поражение человека электрическим током наступает при совпадении двух факторов: вероятности того, что при прикосновении к электроустановке человек попал под напряжение, $P(A)$, и вероятности того, что ток, проходящий через человека, превысит (с учётом времени воздействия) допустимое значение, $P(B)$.

Фактор B зависит от фактора A , поэтому вероятность поражения током $P = P(B/A)P(A)$.

Вероятность появления фактора A

$$P = P(G)P(D),$$

где $P(G)$ – вероятность прикосновения человека к электроустановке;

$P(D)$ – вероятность появления на установке напряжения.

Таким образом, вероятность поражения человека током:

$$P = P(G)P(D)P(B/A). \quad (1.2)$$

Это выражение позволяет количественно оценить опасность электропоражения для данного типа электроустановок, определить эффективные пути снижения электротравматизма.

Вероятность появления факторов G и D для конкретных типов электроустановок можно определить путем анализа надёжности и условий эксплуатации, хронометрии производственного процесса. При этом учитываются только те отказы (аварии)

в электроустановках, которые ведут к возникновению условий поражения.

Для нахождения вероятности реализации фактора B определяется ток, проходящий через тело человека, и его значение сравнивается с допустимым. От значения I_h зависят также выбор средств защиты и определение их характеристик.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

При выборе средств защиты работающих от электропоражения необходимо учитывать особенности производства и условия эксплуатации оборудования, потребляющего электрическую энергию. Это прежде всего степень энерговооруженности труда; разнообразие и количество технологического оборудования, электроинструмента, других энергетических установок; число работников не электротехнических специальностей, связанных с эксплуатацией электроустановок; необходимость постоянного контакта с токопроводящими металлическими частями, которые в случае повреждения изоляции могут оказаться под напряжением; наличие в ряде производств высоких температур, влажности и химически активной среды, отрицательно влияющих на изоляцию электроустановок, и многое другое.

Для обеспечения электробезопасности могут применяться следующие технические методы защиты: защитное заземление, зануление, защитное отключение, электрическое разделение сетей с помощью разделительных трансформаторов, малое (низкое) напряжение и др.

Защитное заземление представляет собой электрическое соединение с землей токопроводящих частей оборудования (например, металлических корпусов), которые могут оказаться под напряжением в результате нарушения изоляции токоведущих частей оборудования и по другим причинам (рис. 2.1). При наличии защитного заземления электробезопасность обеспечивается за счет снижения напряжения на заземленных частях (корпусе) до значения $U_k = I_3 R_3$ (где I_3 – ток,

протекающий через заземлитель; R_3 – сопротивление заземлителя) и выравнивания потенциалов между корпусом и землёй за счёт подъёма потенциала земли, возникшего в результате растекания в нём тока от заземлителя.

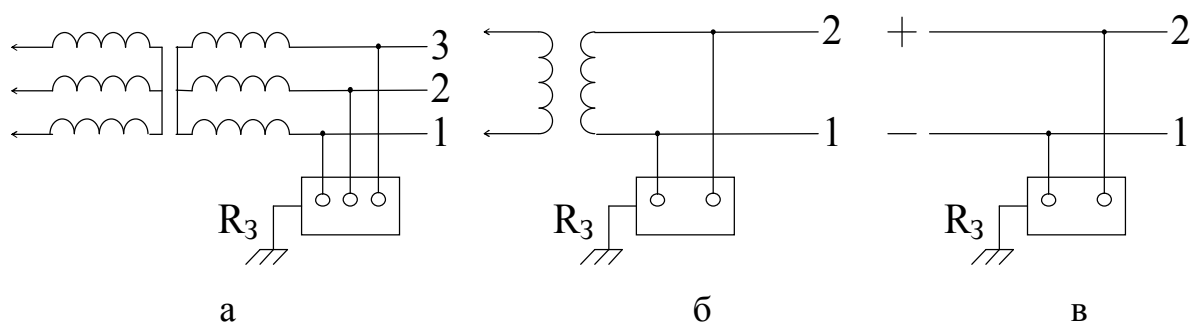


Рис. 2.1. Защитное заземление при электропитании электрической установки от трёхфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью (а), двухпроводной сети переменного (б) и постоянного (в) тока, изолированных от земли

В результате напряжение прикосновения (напряжение, действующее на человека, стоящего на земле и касающегося заземлённого корпуса) будет равно разности потенциалов на корпусе установки (потенциал рук φ_p) и на основании или земле (потенциал ног φ_n):

$$U_{np} = \varphi_p - \varphi_n = \varphi_p (1 - \varphi_n / \varphi_p).$$

Так как потенциал рук равен потенциалу на корпусе относительно земли, т.е.

$\varphi_p = I_3 R_3$, то напряжение прикосновения

$$U_{np} = I_3 R_3 \alpha_1,$$

где $\alpha_1 = (1 - \varphi_n / \varphi_p)$ – коэффициент напряжения прикосновения, зависящий от разности потенциалов на корпусе (или других заземленных частях) и основании (земле).

В связи с тем, что потенциал на поверхности грунта уменьшается в зависимости от расстояния до заземления (места стекания тока в землю) по гиперболическому закону (рис. 2.2), то по мере удаления от места заземления разность потен-

циалов между корпусом и основанием будет увеличиваться и в зоне электротехнической земли (расстояние, превышающее 15–20 м), где потенциал на основании (поверхности грунта) приблизительно равен нулю, станет равной напряжению на корпусе относительно земли. В этом случае коэффициент напряжения прикосновения $\alpha_I = 1$, а $U_{np} = U_k \alpha_I = I_3 R_3$.

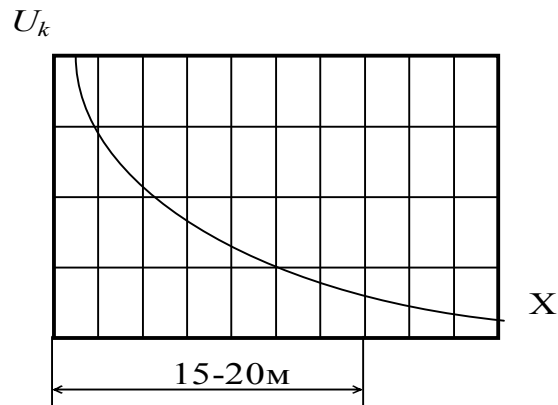


Рис. 2.2. Гиперболический закон распределения потенциала на поверхности грунта в зависимости от расстояния (X) до заземлителя

Зона, в пределах которой потенциал на поверхности грунта не равен нулю, называется зоной растекания тока.

Для того чтобы обеспечить достаточно безопасное значение напряжения прикосновения ($U_{np.дон} \leq 42$ В для 50 Гц и $t > 1$ с), необходимо, как видно из последнего выражения, уменьшить значение сопротивления заземляющего устройства R_3 , не превышающего 4 Ом, при максимальном значении $I_3 \leq 10$ А в сетях напряжением до 1000 В и мощности источника $P_{ист} > 100$ кВт·А.

Чтобы получить заземление, обеспечивающее безопасность электротехнического персонала, применяют сложные групповые заземлители.

Защитное заземление следует применять в электроустановках, питающихся от трёхфазных трёхпроводных сетей с изолированной нейтралью или двухпроводных сетей переменного и постоянного тока, изолированных от земли.

При выборе защитного заземления как технического способа обеспечения электробезопасности в каком-либо конкретном случае следует придерживаться следующих рекомендаций. Выносное заземляющее устройство следует устраивать, если невозможно разместить заземлитель на защищаемой территории; при высоком удельном электрическом сопротивлении грунта на этой территории и наличии на сравнительно небольшом удалении от нее мест с повышенной электрической проводимостью; при рассредоточенном размещении заземляемого оборудования и т.п.

При выносном заземлителе коэффициент напряжения прикосновения (α_1) близок или равен единице, поэтому этот тип заземляющего устройства следует применять при малых токах замыкания на землю I_3 , в частности в установках до 1 кВ, где потенциал заземлителя:

$$\gamma_3 = I_3 R_3 \leq \frac{U_{np.don}}{\alpha_2},$$

где $U_{np.don}$ – предельно допустимое напряжение прикосновения; R_3 – сопротивление заземляющего устройства;

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_{ch}},$$

где R_{ch} – полное сопротивление в цепи тела человека.

Контурное (распределённое) заземляющее устройство следует применять в случае, когда необходимо выровнять потенциал между защищаемой территорией и защищёнными частями оборудования и тем самым уменьшить напряжения прикосновения и шага до допустимых значений.

Для заземления электроустановок в первую очередь должны быть использованы естественные заземлители. Если при этом сопротивление заземляющих устройств или напряжение прикосновения имеют допустимые значения, а также обеспечиваются нормированные значения напряжения на заземляющем устройстве, то искусственные заземлители должны применяться лишь при необходимости снижения плотности токов, протекающих по естественным заземлителям.

В качестве естественных заземлителей могут использоваться проложенные в

земле водопроводные и другие металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газовых смесей); металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землёй; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле (кроме алюминиевых оболочек кабелей); заземлители опор воздушных линий, соединённые с заземляющим устройством электроустановки при помощи грозозащитного троса воздушной линии, если трос не изолирован от опор; нулевые провода воздушных линий до 1 кВ с повторными заземлителями при количестве воздушных линий не менее двух; рельсовые пути магистральных неэлектрифицированных дорог и др.

В электроустановках напряжением до 1 кВ в качестве заземлителя можно использовать железобетонные фундаменты зданий, если выполняется соотношение

$$S > S_0,$$

где $S_0, \text{м}^2$ – критический параметр (прил., табл. 4).

При конструктивном исполнении и размещении искусственных заземлителей следует придерживаться следующих рекомендаций. В качестве вертикальных электродов предпочтительно использовать стальные стержни диаметром 10–16 мм и длиной до 10 м, угловую сталь (от 40х40 до 60х60 мм) и, как исключение, стальные трубы диаметром 50–60 мм с толщиной стенок не менее 3,5 мм и длиной 2,5–3,0 м. Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного горизонтального электрода обычно применяют полосовую сталь шириной 10–20 мм и толщиной 4 мм, а также сталь круглого сечения диаметром 10–12 мм.

Наименьшие размеры стальных искусственных заземлителей следующие:

диаметр круглых (прутковых) заземлителей 10 мм для неоцинкованных и 6 мм для оцинкованных;

сечение прямоугольных заземлителей 48 мм;

толщина прямоугольных заземлителей 4 мм;

толщина полос угловой стали 4 мм.

Для установки вертикальных заземлителей предварительно роют траншеи

глубиной 0,7–0,8 м, после чего уголки или трубы заглубляют специальными механизмами – копрами, гидропрессами и т.п. Стальные стержни диаметром 10–12 мм и длиной 4–4,5 м ввёртывают в землю с помощью специальных приспособлений, а более длинные заглубляют вибраторами.

Проводимость заземляющих проводников в электроустановках до 1 кВ и выше с изолированной нейтралью должна быть не менее $1/3$ проводимости фазных проводников, а сечения – не менее указанных в приложении (табл. 5).

Каждая часть электроустановки, подлежащая заземлению, должна быть присоединена к сети заземления при помощи отдельного ответвления. Заземление переносных электроприёмников должно осуществляться специальной жилой, расположенной в одной оболочке с фазными жилами переносного провода. Сечение этой жилы должно быть равным сечению фазных проводников. Использование для этой цели нулевого рабочего проводника не допускается.

Для устройства заземления передвижных электроустановок используются инвентарные заземлители, входящие в комплект передвижной электроустановки. Они представляют собой стержни с зажимом трех типоразмеров: длиной 1180, 1500 и 2000 мм, при этом глубина погружения в землю составляет соответственно 580, 900 и 1400 мм. Наружный диаметр стержня 15 мм.

Расчёт заземлителей в электроустановках напряжением до 1 кВ выполняют с помощью коэффициента использования по допустимому сопротивлению заземлителя растеканию тока. При этом определяют количество, размеры и схемы размещения в земле электродов заземлителя и заземляющих проводников, при которых сопротивление заземляющего устройства растеканию тока или напряжение прикосновения при замыкании фазы на заземлённые части электроустановок не превышает допустимых значений.

Исходными данными для расчёта являются:

характеристика установки (тип, вид оборудования, рабочие напряжения, суммарная мощность генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, условия эксплуатации установки и т.п.);

данные о естественном заземлителе, в частности, измеренное сопротивление

конструкции растеканию тока, сведения о его конфигурации, размерах, материале и другие данные, необходимые для определения его сопротивления расчетным методом;

удельное электрическое сопротивление земли на участке размещения заземлителя и характеристика погодных условий во время измерений, признаки климатической зоны, в пределах которой сооружается заземлитель (прил., табл. 6);

вид, форма, размеры, материал электродов и заземляющих проводников, предназначенных для сооружения искусственного заземляющего устройства.

Расчёт заземляющего устройства выполняется в следующей последовательности:

1. Вначале определяют значение допустимого сопротивления заземляющего устройства $R_{з.дон}$, которое устанавливается в зависимости от напряжения сети и суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих эту сеть, а именно: 4 Ом в сетях с напряжением до 1 кВ и мощностью более 100 кВ·А и 10 Ом – в маломощных сетях (до 100 кВ·А).

Сопротивление заземляющего устройства, которое выполняется с соблюдением требований к напряжению прикосновения, определяют по допустимому напряжению на заземляющем устройстве и току замыкания на землю $I_з$, который в сетях до 1 кВ не превышает 10 А. При определении значения $U_{нр.дон}$ (табл. 1.4 и 1.5) в качестве расчётного времени воздействия следует принимать сумму времени действия защиты и полного времени отключения выключателя.

2. Если на территории проектируемого заземляющего устройства имеются естественные заземлители, которые можно использовать, то общее сопротивление заземляющего устройства $R_{з.у}$ будет складываться из сопротивления естественных и искусственных заземлителей, т.е.

$$R_{з.у} = \frac{1}{R_{ест}} + \frac{1}{R_{иск}} \leq R_{з.дон}.$$

Так как требуемое значение $R_{з.дон}$ может быть обеспечено только естественными заземлителями, то сначала необходимо выполнить расчёт сопротивления естественных

заземлителей и полученный результат сравнить с требуемым значением $R_{з.доп}$. Поэтому следующим этапом расчёта защитного заземления является расчёт сопротивления естественных заземлителей.

3. Сопротивление естественных заземлителей может быть рассчитано с помощью зависимостей, полученных и используемых для расчёта сопротивления искусственных заземлителей, аналогичных по форме и расположению в земле естественным. Эти зависимости представлены в приложении (табл. 8). Например, для расчета сопротивления горизонтально проложенного в земле металлического трубопровода можно использовать п.6 данной таблицы, согласно которому приближенно

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l^2}{dt} \right), \text{ Ом,}$$

где l , м – длина трубопровода;

d , м – его наружный диаметр;

t , м – глубина заложения в грунт (от поверхности земли до оси трубопровода).

Сопротивление железобетонных конструкций, расположенных в земле, также может быть приближенно определено из п. 3 (прил., табл. 8). При этом ρ следует умножить на коэффициент 1,8, учитывающий наличие бетонного слоя и его промерзание. С учётом этого сопротивление железобетонной стойки или сваи, погруженной в землю на глубину l , много большую их диаметра d :

$$R_c = \frac{0,9\rho}{\pi l} \ln \frac{4l}{d}, \text{ Ом.}$$

При прямоугольном поперечном сечении стойки или сваи со сторонами a и b эквивалентный диаметр $d = 2(a+b)/\pi$.

Сопротивление железобетонной плиты

$$R_{пл} = \frac{0,9\rho}{D},$$

где D , м – диаметр плиты.

Диаметр прямоугольной плиты со сторонами a и b

$$D = 2(a+b)/\pi.$$

Сопротивление растеканию тока железобетонных фундаментов:

$$R_{cp} = \frac{0,5 \rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}}, \text{ Ом}, \quad (2.1)$$

где $S, \text{ м}^2$ – площадь, ограниченная периметром здания на уровне поверхности земли;

$\rho_{\text{э}}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – эквивалентное сопротивление земли (прил., табл. 4).

Сопротивление растеканию тока свинцовой оболочки проложенного в земле кабеля определяется через модуль ее входного сопротивления:

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{с}} t h \gamma L, \text{ Ом},$$

$$\text{откуда } Z_{\text{с}} = \sqrt{Z_{np} r_n}, \text{ Ом},$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_{np}}{r_n}}, \text{ км}^{-1},$$

где $Z_{\text{с}}, \text{ Ом}$ – волновое сопротивление оболочки кабеля;

γ – постоянная распространения;

$L, \text{ км}$ – длина кабеля в земле;

Z_{np} – продольное сопротивление оболочки кабеля на длине 1 км:

$$Z_{np} = r_{np} + 0,05 + j 0,145 \lg \frac{0,356}{d \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{10f}{\rho}}}, \frac{\text{Ом}}{\text{км}},$$

здесь $r_{np}, \text{ Ом/км}$ – активное продольное сопротивление оболочки кабеля;

$d, \text{ м}$ – диаметр оболочки;

$f=50 \text{ Гц}$ – частота тока;

r_n – переходное сопротивление оболочки кабеля на землю на длине 1 км:

$$r_n = 0,366 \cdot 10^{-3} \rho [6 - \lg(dt)], \text{ Ом}\cdot\text{км},$$

где $t, \text{ м}$ – глубина заложения кабеля.

При нескольких рядом расположенных кабелях значение r_n следует умножить на коэффициент 1,2, при трех – на 1,4, при шести – на 1,5, при восьми кабелях – на 1,6.

Если сопротивление естественных заземлителей с учетом сопротивления заземляющих проводников не превышает требуемого значения сопротивления защитного заземления и выполняются указанные выше требования, расчёт заканчивается. Если же естественные заземлители отсутствуют или рассчитанное сопротивление их растеканию тока (либо измеренное) велико, то необходимо устраивать искусственные заземлители, которые подключают параллельно естественным. Поэтому следующим этапом расчёта защитного заземления является расчёт искусственных заземлителей.

4. Для заземления стационарных электроустановок наибольшее распространение получили групповые искусственные заземлители, размещенные в грунте на определенной глубине. Они представляют собой систему вертикальных электродов, параллельно соединенных горизонтальным проводником связи. Вертикальные электроды располагают в ряд или по контуру. Расстояние (a) между соседними вертикальными электродами (если позволяют размеры отведенной под заземлитель площадки) рекомендуется брать не менее 2,5 м. Для заземлителей, расположенных в ряд, отношение a к длине l вертикального электрода предпочтительно выбирать равным 2,3, а при расположении электродов по контуру – равным 3.

Вначале определяют сопротивление одиночного вертикального электрода с помощью соответствующих расчетных зависимостей, приведенных в приложении (табл.8). Например, если используют стальные стержни длиной l из угловой стали с шириной полки b , верхние концы которых находятся от поверхности на глубине t_0 , то сопротивление растеканию тока такого электрода $R_{y_{гл.ст}}$ определяют из п.4 (прил., табл.8), т.е.

$$R_{y_{гл.ст}} = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \text{ Ом.}$$

Удельное сопротивление земли ρ_n определяют экспериментально (прил.,

табл. 9), а расчётное ρ_1 – по формуле с учётом коэффициента сезонности ψ (прил., табл. 7):

$$\rho_1 = \rho_n \psi.$$

В приложении (табл. 9) приведены приближенные значения удельных электрических сопротивлений различных грунтов и воды.

Далее определяется ориентировочное количество вертикальных электродов n с некоторым избытком. Для этого находят произведение коэффициента использования вертикальных электродов η_e на их количество n по формуле (исходя из соотношения $R_{общ} = \frac{R_{эл}}{\eta_e n}$):

$$\eta_e n = \frac{R_e}{R_3},$$

а затем по приложению (табл. 10) определяют количество вертикальных электродов. Не указанные в таблице значения находят методом интерполяции. Полученные значения округляют в меньшую сторону до целых чисел.

Далее, зная ориентировочное количество электродов, с учетом схемы их размещения в грунте, находят длину горизонтального проводника связи L по формулам:

при расположении электродов в ряд

$$L = 1,05(n - 1)a, \text{ м},$$

при расположении электродов по контуру

$$L = 1,05na, \text{ м}.$$

Затем рассчитывают сопротивление растеканию тока горизонтального проводника связи (в виде стальной полосы шириной b), соединявшего концы вертикальных электродов (п. 6, прил., табл. 8):

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l^2}{dt} \right), \text{ Ом},$$

где ρ – расчётное удельное сопротивление земли с учетом коэффициента сезонности

(прил., табл. 7):

$$\rho = \rho_n \psi,$$

откуда ρ_n – удельное сопротивление земли, определяемое экспериментально (прил., табл. 9).

Результирующее сопротивление искусственного группового заземлителя R_u будет равно

$$R_u = \frac{R_{\epsilon} R_r}{R_{\epsilon} \eta_r + R_r \eta_{\epsilon} n}, \text{ Ом,}$$

где η_{ϵ} , η_r – коэффициенты использования вертикальных и горизонтальных электродов (прил., табл. 10 и 11).

При использовании естественного заземлителя (сопротивление которого равно R_l) допустимое сопротивление искусственного заземлителя $R_{u. \text{дон}}$ должно быть не более требуемого. С учётом допустимого значения сопротивления защитного заземления $R_{з. \text{дон}}$ его можно определить по формуле

$$R_{u. \text{дон}} = \frac{R_l R_{з. \text{дон}}}{R_{\epsilon} - R_{з. \text{дон}}}, \text{ Ом.}$$

Отличие рассчитанных сопротивлений от допустимых по экономическим соображениям не должно быть значительным.

Изменяя параметры заземления (количество электродов, их размеры и т.п.) и повторяя расчёт методом последовательного приближения, добиваются выполнения необходимых требований к сопротивлению проектируемого заземляющего устройства.

В передвижных электроустановках сопротивление одиночного заземлителя при использовании инвентарных заземлителей может быть рассчитано из п. 3 (прил., табл. 8), т.е.

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi l_n} \ln \left(\frac{4l_n}{d} \right), \text{ Ом,}$$

где ρ – удельное сопротивление земли с учётом сезонных изменений и степени увлажнения.

Инвентарные заземлители размещают в ряд или по контуру. При этом расстояние (a) между соседними электродами выбирают из условия $a/l_n = 1$ (реже $a/l_n = 2$). Затем находят произведение

$$\eta_{\text{э}} n = \frac{R_{\text{з}}}{R_{\text{з.треб}}},$$

где $R_{\text{з.треб}}$ – требуемое сопротивление заземлителя.

Затем по приложению (табл. 10) определяют необходимое количество электродов n .

Используя полученные данные, рассчитывают результирующее сопротивление заземлителя по формуле

$$R_{\text{з}} = \frac{R}{n \eta_{\text{з}}}, \text{ Ом.}$$

Значение $R_{\text{з}}$ должно удовлетворять условию

$$R_{\text{з}} = R_{\text{з.дон}} R_{\text{з.треб}}.$$

Сопротивление растеканию тока группового заземлителя, состоящего из $n_{\text{г}}$ горизонтальных полос шириной h и длиной l , параллельно уложенных в землю на определенную глубину, определяют по формуле

$$R_{\text{г}} = \frac{R_{\text{р}}}{n_{\text{г}} + \eta_{\text{г.н}}}, \text{ Ом,}$$

где $R_{\text{р}}$ – сопротивление растеканию тока одной полосы без учёта эффекта запираания;

$\eta_{\text{г.н}}$ – коэффициент использования горизонтальных полосовых электродов (прил., табл. 12).

Далее, исходя из размеров площадки для размещения заземлителя и с учётом экономически оптимальных решений, определяют методом последовательного приближения основные геометрические размеры заземлителя, число полос и глубину их

заложения в землю, при которых рассчитанное в итоге сопротивление R_u с учётом сопротивления заземляющих проводников окажется не более допустимого.

На практике могут применяться лучевые заземлители, которые выполняют из круглой или полосовой стали и укладывают в землю на глубину l в виде расходящихся из одного центра лучей. Лучи предпочтительнее располагать под равными углами от центра. Увеличение числа лучей до четырех нецелесообразно вследствие значительного уменьшения коэффициента использования η_l , значения которого приведены в приложении (табл.13).

Сопротивление растеканию тока лучевого заземлителя рассчитывают по формуле

$$R_u = \frac{R}{n_l + \eta_l}, \text{ Ом },$$

где R – сопротивление растеканию тока одного луча. Его определяют из п. 6 (прил., табл. 8) исходя из геометрических размеров, глубины заложения в землю, удельного сопротивления грунта;

n_l – число лучей.

В результате расчёта методом последовательных приближений получают геометрические размеры лучей и их количество, при которых сопротивление растеканию тока такого заземлителя с учётом сопротивления заземляющих проводников не превышает допустимой величины.

Зануление представляет собой преднамеренное электрическое соединение с неоднократно заземленным защитным проводником сети нетокопроводящих частей оборудования (например, металлического корпуса), которые могут оказаться под напряжением в результате замыкания электропитания на эти части или корпус (рис. 2.3).

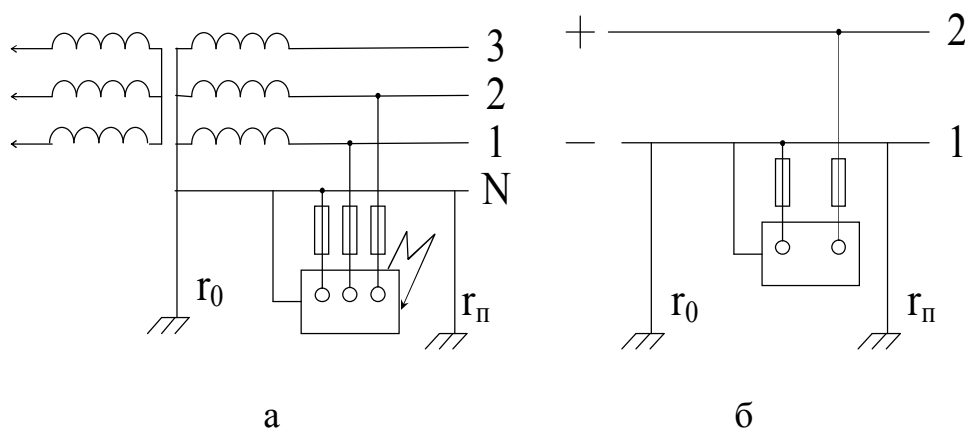


Рис. 2.3. Электрическая схема зануления:

а – в трёхфазной трёхпроводной сети с заземлённой нейтралью; б – в двухпроводной сети постоянного тока с заземлённым полюсом

При наличии зануления опасность электропоражения при прикосновении к зануленным частям (корпусу) оборудования и при замыкании на них питающего напряжения сети устраняется отключением оборудования от сети в результате срабатывания отключающего устройства (например, перегорание плавкой вставки предохранителя), вызванного большим током короткого замыкания. Так, при замыкании фазы 2 (рис. 2.3,а) на занулённый корпус установки образуется цепь короткого замыкания второй фазы, а возникший большой ток в этой цепи приведёт к перегоранию плавкой вставки и отключит поврежденную установку от сети.

Так как плавкие предохранители и автоматические выключатели с тепловой защитой срабатывают в течение нескольких секунд, то для снижения напряжения, действующего на человека в течение этого времени, обязательно применение повторного заземления защитного проводника ($r_{повт}$). При этом напряжение прикосновения уменьшится до значения:

$$U_{пр} = I_{r.повт} r_{повт} \alpha_1,$$

где $I_{r.повт}$ – ток, протекающий через повторное заземление $r_{повт}$.

Зануление применяется в электроустановках, питающихся от трёхфазных четырёхпроводных сетей с заземлённой нейтралью, с заземленным выводом (проводом) или полюсом в двухпроводных сетях, соответственно переменного и постоянного тока (рис. 2.3, б). В этих случаях применение защитного заземления без зануления не

допускается.

Защитное заземление или зануление электроустановок следует выполнять в следующих случаях:

при номинальных напряжениях электропитания 380 В и выше переменного тока, 440 В и выше постоянного тока – во всех случаях (кроме случаев, оговоренных ниже);

при номинальных напряжениях электропитания, равных и выше 42 В переменного тока, равных и выше 110 В постоянного тока – в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и при наружных условиях эксплуатации оборудования;

при всех напряжениях переменного и постоянного тока во взрывоопасных зонах (помещениях).

При выборе в качестве технического способа обеспечения электробезопасности зануления необходимо произвести его расчёт. Расчёт зануления производится с целью определения условий, при которых оно надежно и быстро отключит повреждённую электроустановку от сети и одновременно обеспечит безопасность прикосновения человека к зануленным частям установки в аварийный период (при замыкании фазы на корпус электроустановки или нулевой защитный проводник).

В связи с этим для определения зануления необходимо рассчитать:

отключающую способность;

заземление нейтрали, исходя из условий безопасности при замыкании фазы на землю;

повторные заземлители нулевого защитного проводника для обеспечения безопасности при замыкании фазы на корпус электроустановки.

Расчёт на отключающую способность заключается в расчёте тока короткого замыкания $I_{кз}$, величина которого определяется проводимостью фазных и нулевых защитных проводников и достаточна для срабатывания устройства отключения установки (предохранитель, электромагнитный расцепитель и т.п.) от сети, т.е.

$$I_{кз} \geq k \cdot I_n, \quad (2.2)$$

где k – коэффициент кратности номинального тока: $k = 3$ для плавкой вставки

предохранителя ($k = 4$ во взрывоопасных зонах); $k = 1,4$ для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А;

I_n – номинальный ток срабатывания устройства защиты (плавкой вставки предохранителя или электромагнитного расцепителя), который определяется исходя из потребляемой мощности установки:

$$I_n = k_n \frac{N_y}{U}, \quad (2.3)$$

где $k_n = 1,1$ – коэффициент надежности;

U – напряжение питания установки.

В приложении (табл. 14) приведены значения номинальных токов некоторых типовых предохранителей для сетей с напряжением 220 и 380 В.

Ток однофазного короткого замыкания без учёта тока, протекающего через землю, величина которого незначительна, может быть определен по формуле

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi} A}{\left(\frac{Z_m}{3} \right) + Z_n}, \quad (2.4)$$

где Z_m и Z_n – модули полного сопротивления обмоток источника питания (трансформатора, генератора) и полного сопротивления петли «фаза-нуль», Ом. Причём

$$Z_n = \sqrt{\left(R_{\phi} + R_{нз} \right)^2 + \left(x_{\phi} + x_{нз} + x_n \right)^2},$$

где R_{ϕ} и $R_{нз}$ – активные сопротивления фазного и нулевого защитных проводников, Ом;

x_{ϕ} и $x_{нз}$ – внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого защитных проводников, Ом;

x_n , Ом – внешнее индуктивное сопротивление петли «фаза-нуль».

Активное сопротивление петли «фаза-нуль» ($R_{\phi} + R_{нз}$) для проводников из цветных металлов определяют по формуле

$$R_{\phi} + R_{нз} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i \cdot l_i}{S_i},$$

где ρ_i – удельное сопротивление материала 1-го участка проводника (для меди $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, для алюминия $\rho = 0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$);

l_i , м – длина 1-го участка проводника, имеющего одинаковое поперечное сечение S_i , мм^2 , и выполненного из одного материала;

n – число первых участков, образующих цепь «фаза-нуль».

Внешнее индуктивное сопротивление x_n , а также активное сопротивление R фазного и нулевого защитных проводников из цветных металлов можно определить по погонному сопротивлению R и x_n и длине l_1^n , т.е.

$$R = R^l \mu x_n = x_n^l \cdot l.$$

В приложении (табл. 15) приведены значения погонного активного и внешнего индуктивного сопротивлений фазных и нулевых защитных проводников.

Внешнее индуктивное сопротивление x_n двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра d (м) можно определить по формуле

$$x_n = 2 f \mu l \left(\frac{2 D}{d} \right),$$

где f , Гц – частота тока;

l , м – длина линии;

D , м – расстояние между проводами линии;

μ – абсолютная магнитная проницаемость среды:

$$\mu = \mu_1 + \mu_0,$$

где μ_1 – относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная постоянная.

Для линий длиной 1 км, проложенных в воздушной среде, при частоте тока 50 Гц,

$$x_n^l = 0,1256 \ln \left(\frac{2D}{d} \right), \text{ Ом/км.}$$

В приближенных расчетах x_n принимают равным 0,3 Ом/км для внутренней проводки и 0,6 Ом/км для воздушных линий.

Активное R_c и внутреннее индуктивное x_n^l сопротивления 1 км стальных проводников, в частности нулевого защитного проводника, при некоторых значениях плотности тока частотой 50 Гц приведены в приложении (табл. 16). Предварительно необходимо выбрать профиль и сечение проводника, знать его длину и ожидаемое значение тока однофазного короткого замыкания $I_{кз}$. Сечение выбирают при условии, чтобы плотность тока $I_{кз} = 0,5 - 2,0 \text{ А/мм}^2$.

Внутреннее индуктивное погонное сопротивление медных и алюминиевых проводников сравнительно мало (около 0,0156 Ом/км), поэтому им можно пренебречь.

Модули полных сопротивлений обмоток трёхфазных трансформаторов $Z_{тр}$ при вторичных напряжениях 380/220 В указаны в приложении (в табл. 17 для масляных и в табл. 18 для сухих трансформаторов).

Рекомендуется применять силовые трансформаторы со схемами включения обмоток «треугольник – звезда» (Δ/Y_n) при мощности 400 кВ·А и выше и «звезда – зигзаг» (Y/Z_M) при мощности 250 кВ·А и ниже. Допускается устанавливать силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда – звезда» (Y/Y_n) независимо от мощности при условии соблюдения требований к отношению кратности тока однофазного короткого замыкания номинальному току устройств максимальной токовой защиты.

После расчета тока однофазного короткого замыкания проверяют выполнение условия

$$I_{кз} \geq kI_n$$

для выбранного средства автоматической защиты. Если это условие не выполняется, то необходимо увеличить сечение проводников, и в первую очередь нулевого защитного проводника.

Расчёт заземления нейтрали источника питания и повторных заземлений нулевого провода выполняется аналогично расчету защитного заземления электроустановок. При этом сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединяются нейтрали источников питания (трансформаторов), а также каждого повторного заземлителя, не должно превышать значений, указанных в приложении (табл. 19). Эти сопротивления должны обеспечиваться использованием естественных заземлений и повторных заземлений нулевого проводника воздушных линий напряжением до 1 кВ при числе отходящих линий не менее двух.

При размещении электроустановок, подлежащих занулению вне зданий, расстояние электроустановки до ближайшего заземлителя повторного заземления нулевого провода воздушной линии или до заземлителя нейтрали должно быть не более 100 м.

Защитное отключение. В зависимости от входного сигнала (уставки) устройства защитного отключения (УЗО) делятся на типы, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли; ток замыкания на землю; напряжение нулевой последовательности; ток нулевой последовательности; оперативный ток и т.д.

УЗО, предназначенные для отключения электроустановок при прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением, должны иметь такие характеристики, чтобы при их использовании ток, протекающий через человека I_h (или U_{np}), и продолжительность воздействия тока τ в интервале до 1 с не превышали допустимых значений (табл. 1.5). Исходя из этого условия, требуемое время срабатывания τ_c УЗО может быть определено либо по графику (рис. 2.4), либо по данным приложения (табл. 23).

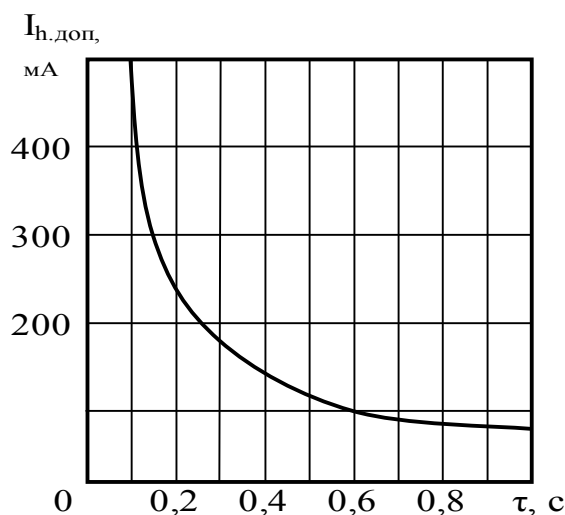


Рис. 2.4. График зависимости $I_{h,доп}$ от продолжительности воздействия тока

Выбор уставки производится исходя из условий обеспечения безопасности с помощью расчётных зависимостей, связывающих входной сигнал УЗО с параметрами электрической сети и тела человека. Рассчитанные величины уставок следует скорректировать до рекомендуемых значений.

Для сетей с глухозаземлённой нейтралью стандартные значения уставок составляют 0,002, 0,006, 0,01, 0,02, 0,03, 0,1, 0,3, 0,5, 1 А (для селективных УЗО ещё 2 и 5 А).

Для сетей с изолированной нейтралью при выборе уставки следует пользоваться следующими рекомендациями. Для селективных УЗО рекомендуются следующие значения уставок: при напряжении сети до 1000 В – 0,025 А и свыше 1000 В – 0,3, 0,5, 0,75, 1,5 А.

В устройствах, реагирующих на ток нулевой последовательности, датчиком является трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП). Наибольшее распространение получила конструкция датчика с магнитопроводом тороидальной формы. Первичными обмотками трансформатора служат фазные проводники, пропущенные через окно магнитопровода; вторичная обмотка равномерно расположена на магнитопроводе и нагружена на входное сопротивление преобразователя.

При замыкании на заземленный корпус входной ток ТТНП:

$$I_{ex} = \frac{I_h R_h}{R_3 \alpha_1 \alpha_2} = \frac{U}{R_3 \alpha_1 \alpha_2}.$$

Уставка УЗО в этом случае должна удовлетворять соотношению

$$I_y \leq \frac{U_{np.\dot{don}}}{R_3 \alpha_1 \alpha_2}$$

или

$$I_y \leq \frac{I_{h.\dot{don}} R_h}{R_3 \alpha_1 \alpha_2},$$

где $U_{np.\dot{don}}$ и $I_{h.\dot{don}}$ — предельно допустимые напряжения прикосновения и ток через тело человека в зависимости от времени его воздействия (табл. 1.5).

В худшем по условиям поражения случае $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, тогда

$$I_y = \frac{U_{np.\dot{don}}}{Z_p + R_3} \quad \text{или} \quad I_y \leq \frac{I_{h.\dot{don}} R_h}{R_3 \alpha_1 \alpha_2}.$$

Эти соотношения позволяют определить уставку и быстродействие УЗО по заданному сопротивлению R_3 или по известным характеристикам УЗО найти необходимое сопротивление заземляющего устройства. При замыкании фазы на зануленный корпус ток уставки:

$$I_y \leq I_{кз}.$$

Совместное применение зануления и защитного отключения позволяет снизить требования к сопротивлению петли «фаза-нуль» и к коэффициенту фазности номинального тока автомата защиты.

Устройства с уставкой 10 мА обеспечивают высокую вероятность защиты как при прямом, так и при косвенном прикосновении человека к токоведущим частям. Устройства с уставкой 300, 500 и 1000 мА эффективны только при замыкании на заземлённый (или занулённый) корпус.

В приложении (табл. 20) приведены характеристики выпускаемых промышленностью УЗО, реагирующих на ток нулевой последовательности.

Рекомендуемая схема включения УЗО представлена на рис. 2.5. Такое подключение трёхфазной нагрузки H_1 позволяет максимально использовать эффективность УЗО и дает возможность подключать в зоне защиты однофазные нагрузки H_2 . Фазные и нулевой рабочий проводники образуют первичную обмотку ТТНП. При такой схеме проявляются одновременно защитные свойства зануления и защитного отключения.

УЗО на токе нулевой последовательности используется в сетях любого напряжения с различным режимом нейтрали с целью защиты человека как в случае прикосновения к корпусу электроустановки, оказавшемуся под напряжением, так и при прикосновении непосредственно к фазе сети.

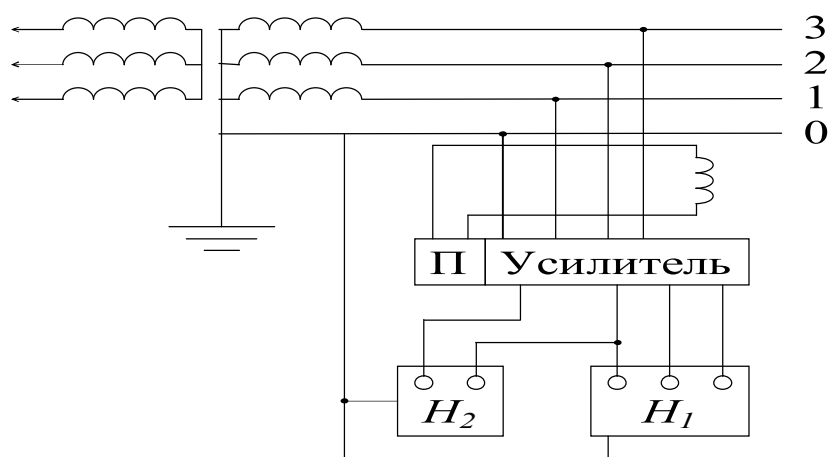


Рис. 2.5. Рекомендуемая схема включения УЗО:

H_1 – трёхфазный потребитель; H_2 – однофазный потребитель

Устройства, реагирующие на потенциал корпуса, рекомендуется применять в сетях всех напряжений независимо от режима нейтрали, когда система защитного заземления или зануления малонадежна или недостаточно эффективна. Вместе с тем из-за неселективности работы устройств этого типа использование таких УЗО ограничивается установками с индивидуальными заземлениями (например, передвижные электроустановки) (рис. 2.6).

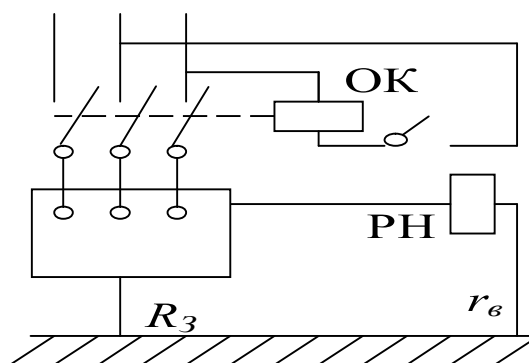


Рис. 2.6. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на потенциал корпуса:

R_3 – сопротивление защитного заземления; r_e – сопротивление вспомогательного заземления; ОК – отключающая катушка автоматического выключателя; РН – реле максимального напряжения

Расчет УЗО выполняется в следующей последовательности:

1. Определяется уставка $\phi_{уст}$, т.е. производится расчет допустимого значения потенциала на корпусе относительно земли, при котором напряжение прикосновения не превысит допустимое:

$$\phi_{уст} \leq \frac{U_{пр. доп}}{\alpha_1 \alpha_2},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты напряжения прикосновения.

2. Рассчитывается напряжение срабатывания $U_{ср} PH$, которое должно быть меньше $\phi_{уст}$ и $U_{пр. доп}$:

$$U_{ср} = \frac{U_{пр. доп} Z_p}{\alpha_1 \alpha_2 (Z_p + r_e)}, \quad (2.5)$$

где Z_p — полное сопротивление реле.

При известных данных $PH (U_{ср}, Z_p)$ для $U_{пр. доп}$ из этого же соотношения можно рассчитать сопротивление вспомогательного заземления.

По величине U_{cp} выбирают тип реле (прил., табл. 21).

Устройство, реагирующее на ток замыкания на землю (рис. 2.7), рекомендуется применять в установках, корпуса которых изолированы от земли и между которыми нет электрической связи. Это – ручной электрифицированный инструмент, передвижные установки и т.д. Напряжение питающей сети и режим нейтрали могут быть любыми.

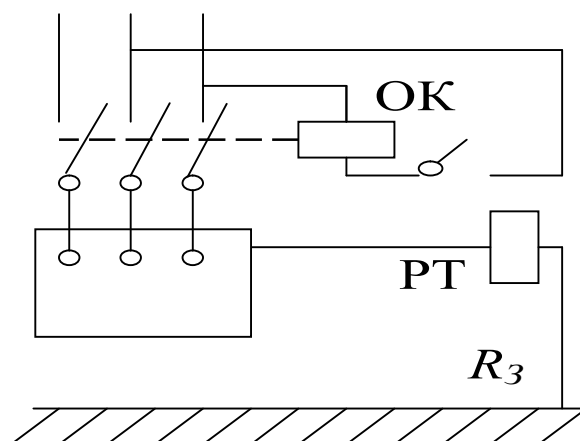


Рис. 2.7. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на ток замыкания на землю:
 R_3 – заземление корпуса; ОК – отключающая катушка автоматического выключателя;
 РТ – реле тока

При расчёте данного типа УЗО вначале, исходя из условий безопасности, рассчитывают уставку, т.е. допустимое значение тока, проходящего через заземляющий проводник:

$$I_y = \frac{U_{np. доп}}{Z_p + R_3}.$$

Уставка реле для схемы с включением обмотки реле в рассечку зануляющего проводника

$$I_y = K_3 I_{кз}, \quad (2.6)$$

где $K_3 = (0,5 - 0,7)$ – коэффициент запаса;

$I_{кз}$ – максимальный ток короткого замыкания.

Затем определяют ток срабатывания РТ, который должен быть равен току устав-
ки $I_{уст}$ (т.е. $I_{ср} = I_{уст}$), и выбирают тип реле (прил., табл. 22).

Устройства, реагирующие на оперативный ток (рис. 2.8), можно применять в се-
тях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью. При этом корпуса защищае-
мого оборудования могут быть как заземлены, так и изолированы от земли.

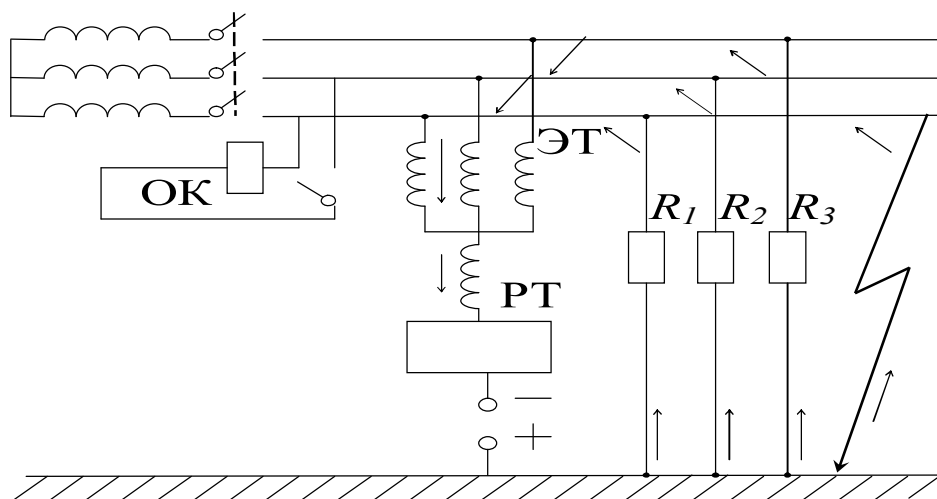


Рис. 2.8. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на оперативный постоянный ток:
ОК – отключающая катушка; РТ – реле с малым током срабатывания; ЭТ – трёхфаз-
ный дроссель (для получения нулевой точки)

В данном УЗО уставкой является эквивалентное R_3 , зависящее от активного со-
противления изоляции проводов (R_1, R_2, R_3) и замыкания на землю $r_{зм}$:

$$R_{уст} \geq R_3,$$

$$\text{откуда } R_3 = \frac{Rr_{зм}}{R + r_{зм}},$$

где R – активное сопротивление изоляции фазных проводов по отношению к земле:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}};$$

$$R_{уст} \geq \frac{RR_h}{R + R_h}.$$

Уставка не зависит от степени несимметрии сопротивлений изоляции фаз. Ток срабатывания РТ определяется зависимостью:

$$I_{cp} \geq \frac{U_{уст}}{R_{РТ} + R_{уст}},$$

где $U_{уст}$, В – напряжение источника постоянного тока;

$R_{РТ}$ – сопротивление реле тока.

Наиболее часто применяются следующие УЗО (прил., табл. 23): вентильные (УАКИ-380, УАКИ-660); на токе нулевой последовательности (С-881, С-901, ИЭ-9801, РУД-024 и ЗОУП-25); комбинированные на постоянном токе и токе замыкания на землю (С-904, ИЭ-9802); на напряжении нулевой последовательности и постоянном оперативном токе (С-899, ИЭ-9806).

Защитное отключение рекомендуется применять в качестве основной дополнительной меры защиты, если электробезопасность не может быть обеспечена путём устройства защитного заземления или зануления, а также в случаях, когда устройство заземления или зануления трудновыполнимо или экономически нецелесообразно.

Устройства защитного отключения могут применяться в сетях любого напряжения с любым режимом нейтрали. Чаще всего УЗО используются в электроустановках напряжением до 1 кВ, когда высока вероятность случайного контакта людей с токоведущими частями, в передвижных электроустановках, в электрифицированном инструменте и др.

Электрическое разделение сетей применяется в электроустановках и сетях напряжением до 1 кВ, эксплуатирующихся в условиях повышенной опасности (передвижные установки, ручной электрифицированный инструмент и т.п.).

Малые напряжения применяются в условиях высокой опасности электропоражения.

Напряжение до 12 В следует применять для питания ручных переносных ламп в особо опасных помещениях при особо неблагоприятных условиях; в стеснённых условиях при соприкосновении работающих с металлическими поверхностями, напри-

мер, при работе в металлической емкости, сидя или лежа в кабельном колодце, в смотровой яме, на токопроводящем полу и т.п.

Напряжение до 42 В применяется в помещениях с повышенной опасностью, особенно опасных и вне помещений, для питания ручного электрифицированного инструмента, переносных ручных ламп, светильников местного стационарного освещения с лампами накаливания, светильников общего освещения обычной конструкции с лампами накаливания, размещенных над полом на высоте менее 2,5 м.

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОЦЕНКЕ ЭЛЕКТРОПОРАЖЕНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЮ И РАСЧЁТУ ЭЛЕМЕНТОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Задача 1. Произвести оценку опасности электропоражения человека, оказавшегося в ситуации, указанной на рис. 3.1.

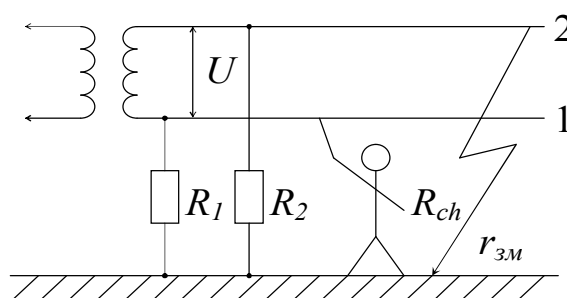


Рис. 3.1. Схема включения человека в электрическую сеть:

$$R_1 = R_2 = R = 200 \text{ кОм}; r_{3M} = 100 \text{ Ом}; U = 220 \text{ В}$$

Человек стоит на влажном песчаном грунте в обуви с кожаной подошвой.

Решение

Чтобы оценить, опасно ли такое прикосновение человека к токоведущим частям, необходимо знать ток, протекающий через человека I_h , или напряжение, действующее на него U_{np} , и сравнить эти значения с допустимыми.

Согласно п. 2 (табл. 1.1)

$$I_h = \frac{UR_1}{\left(R_1 R_{\text{э}} + R_1 R_{ch} + R_{\text{э}} R_{ch}\right)},$$

где $U = 220 \text{ В}$ – напряжение сети;

$R_1 = 200 \text{ кОм}$ – сопротивление изоляции проводов сети по отношению к земле;

R_{ch} – сопротивление в цепи человека (формула 1.1):

$$R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{ос},$$

откуда R_h (1 кОм) – сопротивление тела человека;

$R_{об}$ (0,5 кОм) – сопротивление обуви (прил., табл. 3);

$R_{ос}$ (1,6 кОм) – сопротивление основания (прил., табл. 1),

значит, $R_{ch} = 1 + 0,5 + 1,6 = 3,1 \text{ кОм}$;

$R_{\text{э}}$ – эквивалентное сопротивление согласно п. 2 (табл. 1.1):

$$R_{\text{э}} = \frac{R_2 r_{зм}}{R_2 + r_{зм}},$$

где $r_{зм}$ (100 Ом) – сопротивление замыкания провода на землю:

$$\text{значит, } R_{\text{э}} = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 100}{200 \cdot 10^3 + 100} \approx 100 \text{ Ом}.$$

Тогда

$$I_h = \frac{220 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3 \cdot 100 + 200 \cdot 10^3 \cdot 3,1 \cdot 10^3 + 100 \cdot 3,1 \cdot 10^3} \approx 0,07 \text{ А}.$$

Вывод. Предельно допустимое значение тока через человека при $t \geq 1 \text{ с}$ равно 6 мА (табл. 1.5), значит, прикосновение человека к проводу сети в данном случае опасно.

Задача 2. Рассчитать ток, проходящий через человека, стоящего на мокром полу в обуви с кожемитовой подошвой и касающегося заземленного корпуса установки, находящейся в аварийном режиме (рис. 3.2). Установка питается трехфазным напряжением от сети с изолированной нейтралью. Сделать вывод относительно опасности такого прикосновения.

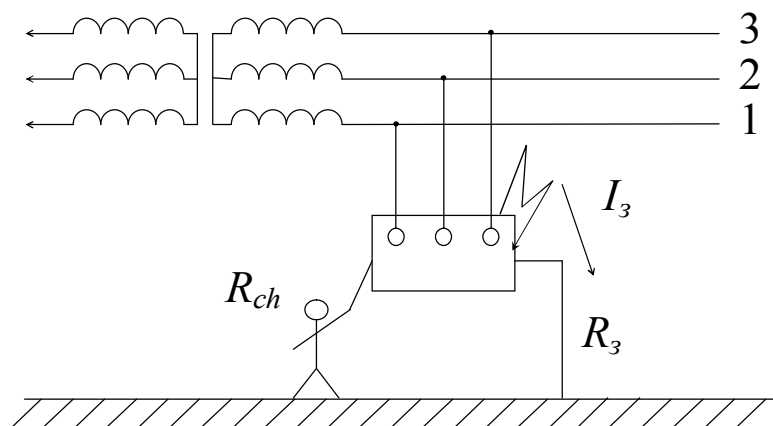


Рис. 3.2. Схема включения человека в электрическую цепь ($U = 380/220$ В)

Решение

1. Для определения тока через человека необходимо знать напряжение прикосновения (действующего в данной ситуации на человека):

$$U_{np} = I_3 R_3,$$

где I_3 – ток через заземлитель:

$$I_3 = \frac{3U_{\phi}}{3R_3 + R},$$

где R_3 – сопротивление заземлителя. Оно не должно превышать 4 Ом в сети с указанными напряжением и мощностью [1]; R – сопротивление изоляции. В нормальном режим работы сети сопротивление заземлителя не должно опускаться ниже 500 кОм [1].

2. Ток через человека

$$I_h = \frac{U_{np}}{R_{ch}},$$

где $R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{oc}$;

$R_{o\delta} = 0,5 \text{ кОм}$ (прил., табл. 3);

$R_{oc} = 0,1 \text{ кОм}$,

значит, $R_{ch} = 1 + 0,1 + 0,5 = 1,6 \text{ кОм}$.

Вывод. Так как предельно допустимый ток при продолжительном воздействии (более 1 с) в заданных условиях равен 6 мА, то человеку опасность поражения током не угрожает.

Задача 3. Сравнить опасность электропоражения персонала при прикосновении к поврежденной (пробой фазы на корпус) заземленной электроустановке при питании ее от трёхфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью и от трёхфазной сети с изолированной нейтралью при следующих условиях: напряжение в сети $U = 380/220 \text{ В}$, сопротивление заземления нейтрали $r_0 = 4 \text{ Ом}$, сопротивление изоляции фазных проводов по отношению к земле $R = 500 \text{ кОм}$, сопротивление заземления установки $R_3 = 4 \text{ Ом}$. Сделать вывод об эффективности защитного заземления в сетях с различным режимом нейтрали заземленной и изолированной от земли.

Решение

1. Представим указанные условия схематично (рис. 3.3).

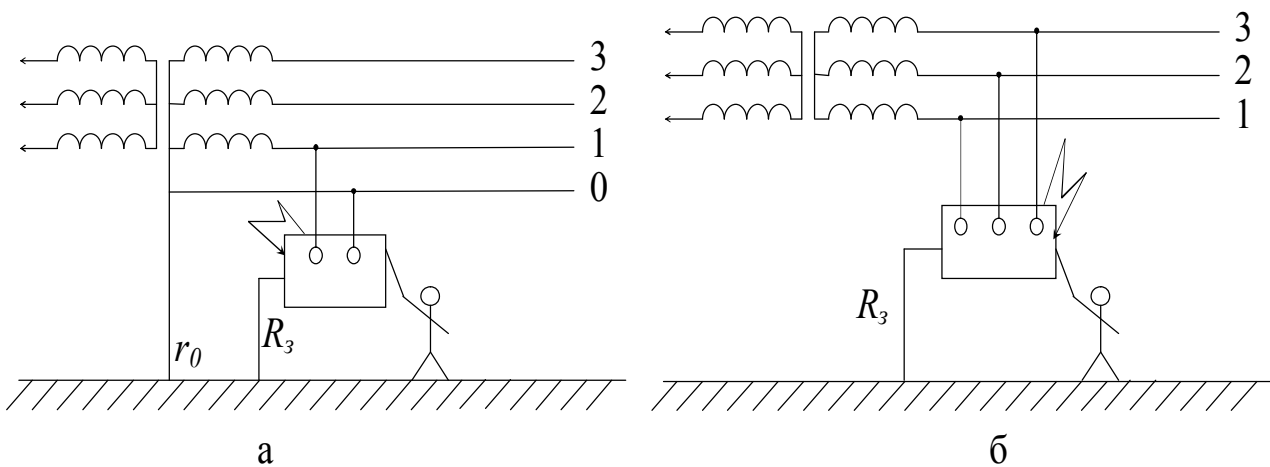


Рис. 3.3. Схема включения человека в электрическую цепь для различных цепей

2. Для сравнения степени опасности однофазного прикосновения в указанных случаях (а, б) необходимо знать значения тока, протекающего через человека, либо значения напряжений прикосновения, которые соответственно равны [1]:

для случая «а»

$$U_{np} = I_3 R_3 = \frac{U_{\phi}}{R_3 + r_0} R_3 = \frac{220}{4 + 4} \cdot 4 = 110 \text{ В};$$

для случая «б»

$$U_{np} = I_3 R_3 = \frac{3U_{\phi}}{3R_3 + Z} R_3 = \frac{3 \cdot 220}{3 + 4 + 500 \cdot 10^{-3}} \cdot 4 = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ В};$$

Вывод. Как видно из результатов расчёта, защитное заземление эффективно в сетях с изолированной нейтралью.

Задача 4. Подобрать типовое реле в УЗО, работающем на токе замыкания на землю, и используемое для обеспечения электробезопасности персонала в установке, питающейся от трёхфазной четырёхпроводной сети с заземлённой нейтралью.

Решение

Представим схему УЗО на токе замыкания на землю в указанных условиях (рис. 3.4).

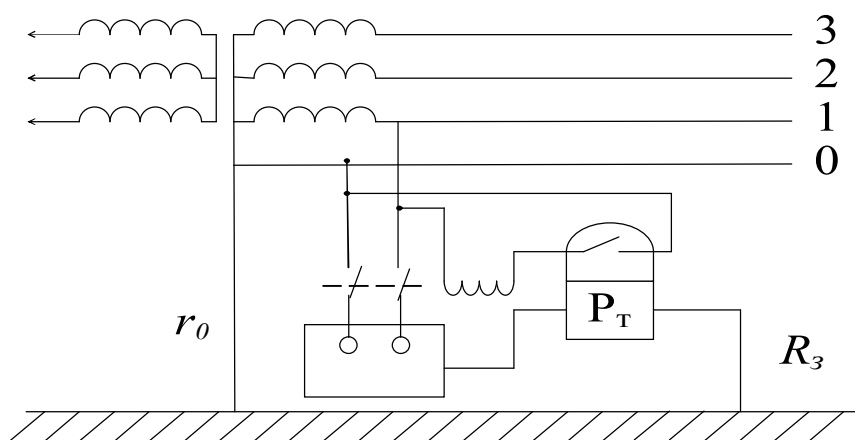


Рис. 3.4. Схема УЗО на токе замыкания на землю в указанных условиях:

$$U = 380/220 \text{ В}; Z_p = 32 \text{ Ом}; R_3 = 10 \text{ Ом}$$

Для подбора типового реле тока необходимо знать ток срабатывания реле (прил., табл. 22), который, согласно формуле (2.6), равен току уставки, т.е. $I_{cp} = I_{уст}$.

Ток уставки

$$I_y = \frac{U_{np.\dot{d}on}}{Z_p + R_3},$$

где $U_{np.\dot{d}on}$ – предельно допустимое напряжение прикосновения. При продолжительном воздействии тока (более 1 с) оно не должно превышать 42 В (табл. 1.5);

$Z_p = 32$ Ом – полное сопротивление обмотки реле;

$R_3 = 10$ Ом – сопротивление заземления.

Тогда

$$I_y = \frac{42}{42} = 1 \text{ А.}$$

Вывод. Согласно приложению (табл.22), подходящим для заданных условий будет реле типа РТ40/2 при параллельном соединении обмоток.

Задача 5. Определить вероятность возникновения электротравмы в указанных условиях (рис. 3.5): $U = 380/220$ В, человек стоит на влажном бетонном полу в обуви с кожаной подошвой. Помещение сырое.

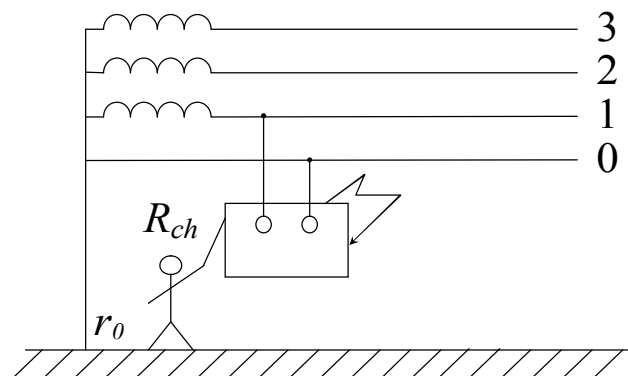


Рис. 3.5. Схема включения человека в электрическую цепь

Решение

Вероятность поражения человека током равна (формула 1.2):

$$P = P(G)P(D)P(B / A),$$

где $P(G)$ – вероятность прикосновения человека к электроустановке. Согласно условию, человек прикоснулся к установке, значит, $P(G) = 1$;

$P(D)$ – вероятность появления на установке напряжения. По условию задачи (рис. 3.5) напряжение пробито на корпус установки, значит, $P(D) = 1$;

$P(A)$ – вероятность того, что при прикосновении к корпусу человек попадёт под напряжение. На корпусе электроустановки, согласно условию задачи, имеется напряжение, значит, $P(A) = 1$;

$P(B)$ – вероятность того, что ток, проходящий через человека, превысит с учётом времени воздействия допустимое значение.

Предельно допустимое значение тока $I_{h.\text{дон}}$ при длительном воздействии (более 1 с), согласно табл. 1.5, равно 6 мА. Значение тока I_h в указанных условиях равно (табл. 1.1, п. 3):

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_3 + r_0},$$

где U_ϕ – фазное напряжение, 220 В; r_0 – сопротивление заземления нейтрали источника, согласно табл. 19 (прил.), равное 4 Ом.

R_{ch} – сопротивление в цепи человека:

$$R_{ch} = R_h + R_{об} + R_{ос},$$

где $R_h = 1$ кОм,

$R_{об} = 0,5$ кОм (прил., табл. 4),

$R_{ос} = 0,9$ кОм (прил., табл. 3).

Значит, $R_{ch} = 1 + 0,9 + 0,5 = 2,4$ кОм.

Тогда

$$I_h = \frac{220}{2,4 \cdot 10^3 + 4} = 91,5 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Так как такое значение $I_h = 91,5$ мА более чем в 10 раз превышает предельно допустимое значение тока $I_{h, \text{дон}}$, равное 6 мА, то $P(B) = 1$. Таким образом, $P = 1 \cdot 1 \cdot 1/1 = 1$.

Вывод. В указанных условиях вероятность поражения человека электротоком равна 1.

Задача 6. Определить необходимость проектирования искусственного заземлителя заземляющего устройства, если известно, что для защитного заземления можно использовать железобетонный фундамент корпуса размерами 5x10 м, в котором будет эксплуатироваться установка, питающаяся от трехфазной сети с изолированной нейтралью. $U = 220/127$ В; $P_c = 100$ кВ·А; мощность установки $N_y \approx 5$ кВт. Известно, что верхний слой грунта, с которым контактирует фундамент – пористый известняк толщиной 1,5 м; нижний слой состоит из мела.

Решение

1. Согласно методике расчёта заземляющего устройства, вначале необходимо определить значение допустимого сопротивления защитного заземления $R_{з, \text{дон}}$, которое должно быть не более 4 Ом, так как напряжение в сети до 1000 В, а мощность сети более 100 кВ·А.

2. Так как на территории проектируемого заземляющего устройства в качестве естественного заземлителя по условиям задачи можно использовать железобетонный фундамент корпуса, то необходимо рассчитать его сопротивление растеканию тока и сравнить с требуемым ($R_{з, \text{дон}}$).

Сопротивление растеканию тока железобетонных фундаментов рассчитывается по формуле

$$R_{cp} = \frac{0,5 \rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}},$$

где $S, \text{ м}^2$ – площадь, ограниченная периметром здания на уровне поверхности земли. Согласно условию, $S = 5 \cdot 10 = 50 \text{ м}^2$;

$\rho_{\text{э}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное эквивалентное электрическое сопротивление земли:

$$\rho_{\text{э}} = \rho_{1p} \left[1 - \exp \left(-\alpha h \sqrt{S} \right) \right] + \rho_{2p} \left[1 - \exp \left(-\frac{\beta \sqrt{S}}{h} \right) \right],$$

здесь ρ_{1p} и ρ_{2p} – соответственно удельное электрическое сопротивление верхнего и нижнего слоев земли: $\rho_{1p} = 180 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (с учётом коэффициента сезонности – прил., табл. 7) и $\rho_{2p} = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (прил., табл. 9); h – толщина верхнего слоя земли, согласно условию, 1,5 м; α, β – коэффициенты. Так как $\rho_{1p} > \rho_{2p}$, то $\alpha = 3,6$, а $\beta = 0,1$.

Подставив в формулу эти значения, найдем $\rho_{\text{э}}$:

$$\rho_{\text{э}} = 96,1 \left[1 - \exp \left(-3,6 \cdot 1,5 \sqrt{50} \right) \right] + 60 \left[1 - \exp \left(-\frac{0,1 \sqrt{50}}{1,5} \right) \right] = 97,4.$$

Теперь можно определить $R_{\text{ср}}$:

$$R_{\text{ср}} = \frac{0,5 \cdot 97,4}{\sqrt{50}} = 6,89 \text{ Ом}.$$

Вывод. Так как требуемое сопротивление заземляющего устройства $R_{\text{з.дон}} < 4 \text{ Ом}$, а естественный заземлитель обеспечит сопротивление растеканию тока лишь 6,9 Ом, то необходимо устройство ещё и искусственного заземлителя, сопротивление которого должно быть не больше значения, которое следует определить из соотношения

$$\frac{1}{R_{\text{зу}}} = \frac{1}{R_{\text{ест}}} + \frac{1}{R_{\text{иск}}} \leq R_{\text{з.дон}},$$

$$\text{т.е.} \quad \frac{1}{4} = \frac{1}{6,9} + \frac{1}{R_{\text{иск}}} \leq R_{\text{з.дон}}.$$

Отсюда $R_{\text{иск}} \approx 0,9 \text{ Ом}$.

Таким образом, искусственный заземлитель должен обеспечивать сопротивление не более 9 Ом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – М: Госэнергонадзор, 2000. – 606 с.
2. Михнюк Т.Ф. Безопасность жизнедеятельности. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 250 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Сопротивление опорной поверхности ног человека растеканию тока в зависимости от вида грунта

Материал	Сопротивление опорной поверхности ног, Ом, в зависимости от грунта	
	Сухой	Влажный
Асфальт, гравий, щебень	7200	3800
Вода на поверхности	—	30
Глина	200	40
Каменистый грунт	8500	5000
Лед, снег	$2 \cdot 10^6$	300
Мерзлый грунт	10^4	4000
Песок	8000	1600
Садовая земля	190	90
Скалистый грунт	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^4$
Суглинок	500	125
Супесок	1250	500
Торф	—	50
Чернозем	160	50

Таблица 2

Сопротивление опорной поверхности ног человека, стоящего на полу

Материал пола	Сопротивление опорной поверхности ног, кОм		
	Пол сухой	Пол влажный	Пол мокрый
1	2	3	4
Асфальт	2000	10	0,8
Бетон	200	0,9	0,1
Дерево	30	3,0	0,3

Окончание табл. 2

1	2	3	4
Земля	20	0,8	0,3
Кирпич	10	1,5	0,8
Ксилолит	100	10	0,5
Линолеум	1500	50	4,0
Металл	0,01	0	0
Метлахская плитка	25	2,0	0,3

Таблица 3

Сопротивление обуви протеканию тока

Материал подошвы	Сопротивление обуви, кОм, при напряжениях сети, В			
	до 65	127	220	выше 220
Помещение сухое				
Кожа	200	150	100	50
Кожимит	150	100	50	25
Резина	500	500	500	500
Помещение сырое				
Кожа	1,6	0,8	0,5	0,2
Кожимит	2,0	1,0	0,7	0,5
Резина	2,0	1,8	1,5	1,0

Таблица 4

Значение критического параметра S_0

$\rho_3, \text{Ом}\cdot\text{м}$	Линейное напряжение сети, В		
	220	380	660
≤ 1000	36,0	156,0	625,0
≥ 1000	$0,36 \cdot 10^4 \rho_3^2$	$1,56 \cdot 10^4 \rho_3^2$	$6,25 \cdot 10^4 \rho_3^2$

Обозначения в табл. 4: ρ_3 – удельное эквивалентное электрическое сопротивление земли, Ом·м:

$$\rho_{\Sigma} = \rho_{1p} \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha h}{\sqrt{S}} \right) \right] + \rho_{2p} \left[1 - \exp \left(-\frac{\beta \sqrt{S}}{h} \right) \right],$$

где ρ_{1p} и ρ_{2p} – соответственно удельное электрическое сопротивление верхнего и нижнего слоев земли, Ом·м;

α и β – безразмерные коэффициенты: $\alpha = 3,6$, $\beta = 0,1$, если $\rho_{1p} > \rho_{2p}$, и $\alpha = 110$, $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$, если $\rho_{1p} < \rho_{2p}$;

S – площадь, ограниченная периметром здания на уровне поверхности земли, м²;

h – толщина верхнего слоя земли, м.

Таблица 5

Минимальные размеры заземляющих и нулевых защитных проводников
в электроустановках до 1 кВ

Наименование	Материал				
	Медь	Алю- миний	Сталь		
			В зданиях	В наружных установках	В земле
1	2	3	4	5	6
Неизолированные про- водники: сечение, мм ² диаметр, мм	4 –	6 –	– 5	– 0	– 10
Изолированные прово- да: сечение, мм ²	1,5	2,5	–	–	–
Угловая сталь: толщина полки, мм	–	–	2	2,5	4
Полосовая сталь: сечение, мм ² толщина, мм	– –	– –	24 3	48 4	48 4

Окончание табл.5

1	2	3	4	5	6
Водогазопроводные трубы: толщина стенки, мм	—	—	2,5	2,5	2,5
Тонкостенные трубы (стальные): толщина стенки, мм	—	—	1,5	2,5	Не допускается

Таблица 6

Признаки климатических зон СНГ

Характеристика климатической зоны	Климатические зоны СНГ			
	I	II	III	IV
Средняя многолетняя низкая температура (январь), °С	–20 – –15	–14 – –10	–10 – 0	0 – +5
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °С	+16 – +18	+18 – +22	+22 – +24	+24 – +26
Среднегодовое количество осадков, см	40	50	50	30 – 50
Продолжительность заморозания вод, дни	190 – 170	150	100	0

Таблица 7

Коэффициент сезонности Ψ для однородной земли

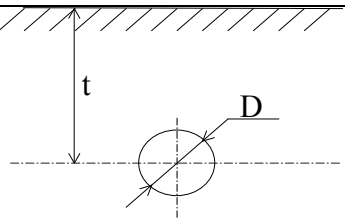
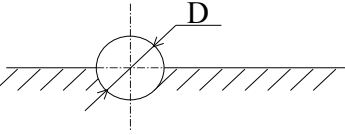
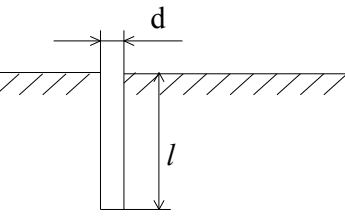
Климатическая зона	Влажность земли во время измерения ее сопротивления		
	повышенная	нормальная	малая
1	2	3	4
Вертикальный электрод длиной 3 м			
I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,5	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0
Вертикальный электрод длиной 5 м			
I	1,5	1,4	1,3
II	1,4	1,3	1,2

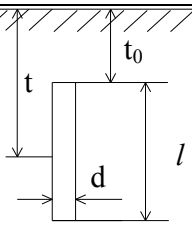
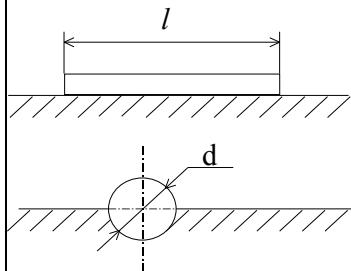
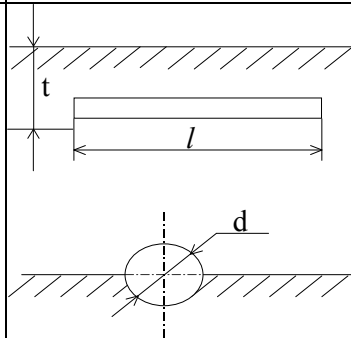
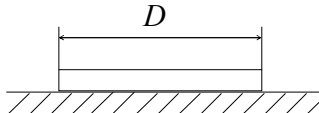
Окончание табл.7

1	2	3	4
III	1,3	1,2	1,1
IV	1,2	1,1	1,0
Горизонтальный электрод длиной 10 м			
I	9,3	5,5	4,1
II	5,9	3,5	2,6
III	4,2	2,5	2,0
IV	2,5	1,5	1,1
Горизонтальный электрод длиной 50 м			
I	7,2	4,5	3,6
II	4,8	3,0	2,4
III	3,2	2,0	1,6
IV	2,2	1,4	1,12

Таблица 8

Формулы для расчета сопротивления одиночных заземлителей
в однородном грунте

№ п.п.	Тип заземли- теля	Схема	Формула	Условия применения
1	2	3	4	5
1	Шаровой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi D} \left(1 + \frac{D}{4t} \right)$	$2t \gg D$
2	Полушаровой у поверхно- сти земли		$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	-
3	Стержневой круглого се- чения (труб- чатый) или уголковый у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{4l}{d} \right)$	$l \gg d$ Для уголка с шириной полки в $d=0,95b$

1	2	3	4	5
4	Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового в земле		$R_{\text{угл.ст.}} = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{b} + \frac{1}{2} \times \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$	$l \gg d$; $t_0 \gg 0,5b$ Для уголка с шириной полки в $d=0,95b$
5	Проложенный на поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель и т.д.)		$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left(\frac{2l}{d} \right)$	$l \gg d$ Для полосы шириной в $d = 0,5b$
6	Проложенный в земле (стержень, труба, полоса, кабель и т.д.)		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{dt}$	$l \gg d$; $t_0 \gg 4t$ Для полосы шириной в $d = 0,95b$
7	Круглая пластина на поверхности		$R = \frac{\rho}{2D}$	

Примечание. В табл. 8 ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м (1Ом·м – сопротивление куба с ребром длиной 1 м); D – диаметр пластины. Все размеры в метрах, при этом R будет выражено в Омах.

Приближенные значения ρ различных грунтов и воды

Вид грунта	Пределы измерений ρ , Ом·м	Рекомендуемые значения ρ для проектных расчетов, Ом·м
Кокс, коксовая мелочь	2 – 5	3
Торф	10 – 20	20
Садовая земля	20 – 60	40
Чернозем	10 – 50	50
Известняк пористый	150 – 200	80
Глины пластинчатые	3 – 80	80
Глины полутвердые	40 – 80	60
Мел	20 – 100	60
Суглинок пластинчатый (влажный)	5 – 40	30
Суглинок полутвердый (слабовлажный)	50 – 150	100
Пахотная земля, смешанный грунт	20 – 180	100
Почва	10 – 300	200
Супесь влажная (пластинчатая)	100 – 200	150
Супесь слабовлажная (твёрдая)	200 – 400	300
Известняк плотный	1000 – 2000	1500
Скальные породы	1000 – 3000	2000
Гравий	4000 – 7000	5000
Вода морская	0,2 – 1,0	–
Вода речная	10 – 100	–
Вода грунтовая	20 – 70	–

Коэффициенты использования η_e вертикальных электродов без учета
влияния полосы связи и их количества n

a/l	При размещении в ряд			При размещении по контуру		
	η_e	n	$\eta_e n$	η_e	n	$\eta_e n$
1	0,85	2,0	1,70	0,69	4,0	2,76
	0,78	3,0	2,34	0,61	6,0	3,66
	0,73	4,0	2,92	0,55	10	5,50
	0,70	5,0	3,50	0,47	20	9,40
	0,65	6,0	3,90	0,41	40	16,4
	0,59	10	5,90	0,39	60	23,4
	0,54	15	8,10	0,36	100	36,0
	0,48	20	9,60	—	—	—
2	0,91	2,0	1,82	0,78	4,0	3,12
	0,87	3,0	2,61	0,73	6,0	4,38
	0,83	4,0	3,32	0,68	10	6,80
	0,81	5,0	4,05	0,63	20	12,6
	0,77	6,0	4,62	0,58	40	23,2
	0,74	10	7,40	0,55	60	33,0
	0,70	15	10,50	0,52	100	52,0
	0,67	20	13,40	—	—	—
3	0,94	2,0	1,88	0,85	4,0	3,4
	0,91	3,0	2,73	0,80	6,0	4,8
	0,89	4,0	3,56	0,76	10	7,6
	0,87	5,0	4,35	0,71	20	14,2
	0,85	6,0	5,10	0,66	40	26,4
	0,81	10	8,10	0,64	60	38,4
	0,78	15	11,70	0,62	100	62,0
	0,76	20	15,20	—	—	—

Таблица 11

Коэффициенты использования η_z горизонтального полосового электрода, соединяющего вертикальные электроды

a/l	Количество вертикальных электродов											
	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60	70	100
при расположении электродов в ряд												
1	0,85	0,77	0,72	0,67	0,62	0,42	0,31	—	—	—	—	—
2	0,94	0,89	0,84	0,79	0,75	0,56	0,46	—	—	—	—	—
3	0,96	0,92	0,88	0,85	0,82	0,68	0,58	—	—	—	—	—
при расположении электродов по контуру												
1	—	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19
2	—	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,23
3	—	0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,39	0,37	0,36	0,35	0,33

Таблица 12

Коэффициенты использования $\eta_{z,n}$ параллельно уложенных горизонтальных полосовых электродов (b — 20 — 40 мм; t — 0,3 — 0,8 м)

Длина каждой полосы, мм	Число параллельных полос	Расстояние между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5,0	10,0	15,0
15	2	0,63	0,75	0,83	0,92	0,96
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
	20	0,16	0,27	0,39	0,57	0,64
25	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,78
	10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
	20	0,14	0,23	0,33	0,47	0,57
50	2	0,60	0,60	0,78	0,88	0,93
	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53
	20	0,12	0,19	0,25	0,36	0,44
75	5	0,31	0,38	0,45	0,53	0,58
	10	0,18	0,25	0,31	0,41	0,47
	20	0,11	0,16	0,22	0,31	0,38

Таблица 13

Коэффициенты использования η_l лучевых электродов ($t = 0,3 - 0,8$ м)

Длина луча, м	Число лучей							
	3				4			
	Диаметр проводника луча, см							
	1	2	3	4	1	2	3	4
2,5	0,76	0,74	0,72	0,71	0,63	0,61	0,59	0,58
5,0	0,78	0,76	0,74	0,73	0,67	0,65	0,63	0,62
10,0	0,81	0,79	0,77	0,76	0,70	0,69	0,67	0,66
15,0	0,82	0,80	0,78	0,77	0,72	0,70	0,68	0,67
30,0	0,84	0,82	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69

Таблица 14

Значения I_n для некоторых типов предохранителей

Тип предохра- теля	Номинальный ток плавкой вставки, А	Тип предохра- теля	Номинальный ток плавкой вставки, А
НПИ15	6, 10, 15	ПН2-250	80, 100, 120, 150
НПН 60М	20, 25, 35, 45, 60	ПН2-400	200, 250, 300, 350, 400
ПН2-100	30, 40, 50, 60, 80, 100	—	—

Таблица 15

Погонное активное и внешнее индуктивное сопротивления фазных и нулевых защитных проводников при частоте тока 50 Гц (Ом/км)

Пло- щадь се- чени я, м ²	Активное сопро- тивление провод- ников или жил ка- беля при 20°C		Индуктивное сопротивление алюминиевых и сталеалюми- невых проводов воздушных линий при среднем расстоя- нии между проводами, мм					Индуктивное сопро- тивление проводов и кабелей	
	мед- ных	алюминиевых и стале- алюминевых	800	1000	1500	2000	2500	провод проложен открыто	провод в трубах или кабель
10	1,64	3,14	—	—	—	—	—	0,31	0,07
16	1,2	1,96	0,374	0,389	0,411	0,48	0,442	0,29	0,07
25	0,74	1,27	0,362	0,376	0,398	0,407	0,417	0,27	0,06
35	0,54	0,91	0,349	0,364	0,388	0,404	0,412	0,26	0,06
50	0,39	0,63	0,339	0,354	0,377	0,395	0,409	0,25	0,06
70	0,28	0,45	0,329	0,343	0,367	0,385	0,399	0,24	0,06
95	0,2	0,33	0,318	0,332	0,355	0,374	0,389	0,23	0,06
120	0,158	0,27	0,315	0,325	0,349	0,368	0,382	0,22	0,06
150	0,123	0,21	0,311	0,315	0,344	0,36	0,374	0,21	0,06

Таблица 16

Погонное активное и внутреннее индуктивное сопротивление стальных проводников при частоте тока 50 Гц (Ом/км)

Размеры сечения, мм	Сечение, мм ²	R_c	X_c	R_c	X_c	R_c	X_c	R_c	X_c
		При ожидаемой плотности тока в проводнике, А/ мм ²							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
Полоса прямоугольного сечения									
20x4	80	5,24	3,14	4,20	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30x4	120	1,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30x5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	—	—
40x4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50x4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
Проводник круглого сечения									
5	19,63	17,0	10,2	14,4	8,65	12,4	7,45	10,7	6,4
6	28,27	13,7	8,20	11,2	6,70	9,4	5,65	8,0	4,8
8	50,27	9,60	5,75	7,5	4,50	6,4	3,46	5,3	3,2
10	78,54	7,20	4,32	5,4	3,24	4,2	2,52	—	—
12	113,1	5,60	3,36	4,0	2,40	—	—	—	—
14	150,9	4,55	2,73	3,2	1,92	—	—	—	—

Таблица 17

Приближенные значения полных сопротивлений $Z_{тр}$, Ом, обмоток масляных трехфазных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	$Z_{тр}$, Ом, при схеме соединения обмоток		Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	$Z_{тр}$, Ом, при схеме соединения обмоток	
		Y/Y_H	ΔY_H и Y/Z_H			Y/Y_H	ΔY_H и Y/Z_H
25	6 – 10	3,110	0,906	400	6 – 10	0,195	0,056
40	6 – 10	1,950	0,562	630	20 – 35	0,191	–
1	2	3	4	5	6	7	8
63	6 – 10	1,240	0,360	630	6 – 10	0,129	0,042
–	20 – 35	1,140	0,407	–	20 – 35	0,121	–
100	6 – 10	0,800	0,226	100	6 – 10	0,081	0,027
–	20 – 35	0,764	0,327	–	20 – 35	0,077	0,032
160	6 – 10	0,487	0,142	–	–	–	–
–	20 – 35	0,478	0,203	–	–	–	–
250	6 – 10	0,312	0,090	–	–	–	–
–	20 – 35	0,305	0,130	–	–	–	–

Таблица 18

Приближенное значение полных сопротивлений $Z_{тр}$, Ом, обмоток сухих трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения обмоток	$Z_{тр}$, Ом	Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения обмоток	$Z_{тр}$, Ом
160	Δ/Y_H	0,165	560	Y/Y_H	0,13
180	Y/Y_H	0,453	630	Δ/Y_H	0,042
250	Δ/Y_H	0,106	750	Y/Y_H	0,109
320	Y/Y_H	0,254	–	–	–
400	Δ/Y_H	0,066	–	–	–

Таблица 19

Сопротивления нейтрали источника питания и повторных заземлений
нулевого провода отходящих воздушных линий

Напря- жение, В	Сопротивление заземления нейтрали трансформатора, Ом		Сопротивление повторного за- земления нулевого провода, Ом	
	Эквивалентное (с учё- том использования есте- ственных заземлителей и повторных заземлений нулевого провода)	В том числе только ис- кусственных заземлите- лей	Эквивалентное сопротивление всех повторных заземлений	В том числе сопротивле- ние каждого повторного заземления
660/380	2	15	5	15
380/220	4	30	10	30
220/ 127	8	60	20	60

Таблица 20

Характеристика УЗО, реагирующих на ток нулевой последовательности
($f = 50\text{Гц}$)

Наименова- ние УЗО	Напря- жение сети, В	Характеристики об- служиваемой установ-		Уставка защиты (при однофазной утечке на зем- лю), мА	Время сраба- тывания за- щиты, с, не более
		Мощность, кВт, не бо- лее	Номи- нальный ток, А		
ИЭ-9813	380/220	—	10	10	0,05
ИЭ-9814	380/220	—	10	10	0,05
ЗОУП-25	380/220	—	25	10	0,05 – 0,1
ЗОУП-25П4	220/200	5	—	10	0,05
АЕ-2443	380/220	—	63	30, 100	0,1
РУД-05	380/220	—	100	30, 100	0,06
РУД-05-УЗ	380/220	—	100,250	30, 100, 300	0,06

Таблица 21

Некоторые типы реле напряжений

Тип реле	Напряжение срабатывания, В	Первый диапазон		Второй диапазон	
		Длительно допустимое напряжение, В	Полное сопротивление обмотки реле, Ом	Напряжение срабатывания, В	Полное сопротивление обмотки реле, Ом
РН53/60	15 – 60	33	660	30 – 60(66)	1400
РЧ53/60Д	15 – 60	110	1620	30 – 60(220)	4680
РН53/200	50 – 200	220	7120	100 –	15980
РН53/400	100 – 400	110	24700	200 –	57200

Таблица 22

Некоторые типы реле тока

Тип реле	Ток срабатывания реле при соединении катушек реле, А		Тип реле	Ток срабатывания реле при соединении обмоток, А	
	последовательно	параллельно		последовательно	параллельно
РТ40/0,2	0,05 – 1	0,1 – 0,2	РТ40/2	5 – 10	10 – 20
РТ40/0,6	0,15 – 0,3	0,3 – 0,6	РТ40/5	12,5 – 25,0	25 – 50
РТ40/2	0,5 – 1	1 – 2	РГ40/10	25 – 50	50 – 100
РТ40/6	1,5 – 3	3 – 6	РТ40/2	50 – 100	100 – 200
РТ40/10	2,5 – 3	5 – 10	—	—	—

Рабочие параметры некоторых типов УЗО

Тип УЗО	Напряжение сети, В	Переменный ток, Гц	Нейтраль	Мощность защищаемой установки, кВт	Ток нагрузки, А	Чувствительность (по току утечки фазы на землю), мА	Время срабатывания защиты, с
УАКИ-380	220/380	50	Изолированная	—	—	—	—
УАКИ-660	380/660	50	— // —	—	—	—	—
С-881	220	50	Заземленная	0,6	—	10	—
С-899	220	200	— // —	—	—	20	0,02
С-901	220/380	50	— // —	1,1/2,2	—	10	—
С-904	220/380	50	— // —	—	—	0,8	—
ИЭ-9801	220/380	50	— // —	2,2	—	1,0	0,05
ИЭ-9802	220/380	50	— // —	2,2/4	—	150	0,05
ИЭ-9806	220/380	200	— // —	2,2	—	30	0,05
ИЭ-9807	220/380	50	— // —	—	16 – 40	10	0,1
ЗОУП-25	220/380	50	— // —	—	25	10	0,05
РУД-024	220/380	50	— // —	—	25	20	0,025