

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О.Н. Титаренко

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Учебно-методическое пособие
по выполнению расчетных заданий
по дисциплине для студентов направления подготовки: 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»
профилей «Электроснабжение», «Нетрадиционные
и возобновляемые источники энергии», «Электрические станции»

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 622.31.004:658.382 (075.8)

Т 45

Р е ц е н з е н т ы:

Е.В. Гусева - к.т.н., доцент, зав. кафедрой
«Электроэнергетические системы атомных станций»

Ю.И. Рясков - к.т.н., доцент кафедры
«Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети»

В.Г. Слюсаренко - к.т.н., доцент кафедры
«Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети»

Титаренко О.Н.

Т45 **Электробезопасность: учеб.-метод. пособие по выполнению расчетных заданий по дисциплине для студентов направления подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профилей «Электроснабжение», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Электрические станции» / О.Н.Титаренко. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 51 с.**

Изложены основные сведения о назначении и принцип действия защитного заземления и зануления.

Рассмотрены примеры расчета одиночных и сложных заземлителей, а также примеры расчета заземляющих устройств различных подстанций. Даны рекомендации по правильному выбору нулевых защитных проводников.

УДК 622.31.004:658.382 (075.8)

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Института ядерной энергии и промышленности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 10/16 от 19 октября 2016 г.

© Титаренко О.Н., 2018

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

ВВЕДЕНИЕ

В данном учебно-методическом пособии изложены основные сведения о назначении и принципе действия защитного заземления и зануления. В методических указаниях приведены примеры расчета одиночных, групповых и сложных заземлителей подстанций 6/0,4 кВ и 110/35/6 кВ, а также примеры расчета зануления.

Целью данного пособия является изучение методов расчета по определению сопротивления растеканию тока заземлителей, числа и геометрических размеров вертикальных и горизонтальных элементов, способов правильного размещения заземлителя на плане электроустановки, исходя из регламентированных Правилами устройства электроустановок величин допустимого сопротивления заземления; закрепление методов расчета, определение условий, при которых зануление надежно выполняет возложенные на него задачи – быстро отключает поврежденную установку от сети - и в то же время обеспечивает безопасность прикосновения человека к корпусу электроустановки в аварийный период.

РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом (вода, реки или моря и т.п.) металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, разряд молнии и т.п.).

Назначение защитного заземления – устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу ЭУ и другим нетоковедущим металлическим частям, случайно оказавшимся под напряжением.

Принцип действия защитного заземления – снижение до безопасных значений напряжения прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами.

Область применения защитного заземления: сети напряжением до 1000 В переменного тока – трехфазные трехпроводные с изолированной нейтралью, однофазные двухпроводные изолированные от земли, а также постоянного тока двухпроводные с изолированной средней точкой обмоток источника тока; сети напряжением выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтрали (рис. 1, а и б).

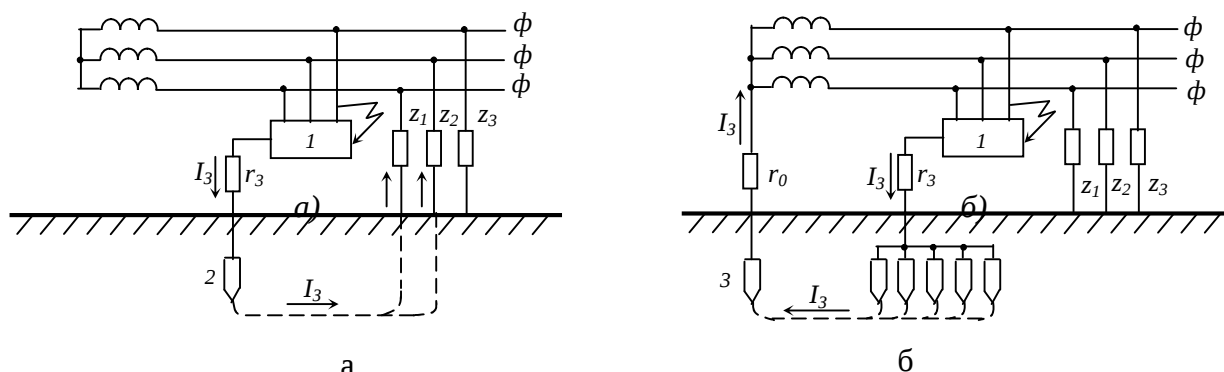


Рис. 1. Принципиальные схемы защитного заземления в сетях трехфазного тока:
а - в сети с изолированной нейтралью до 1000 В и выше; б - в сети с заземленной нейтралью выше 1000 В; 1 – заземленное оборудование; 2 – заземлитель защитного заземления; 3 – заземлитель рабочего заземления

Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя электродов, соединенных между собой и находящихся в непосредственном контакте с землей, и заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части электроустановки с заземлителем.

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляющего устройства оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносные и контурные (рис. 2, 3).

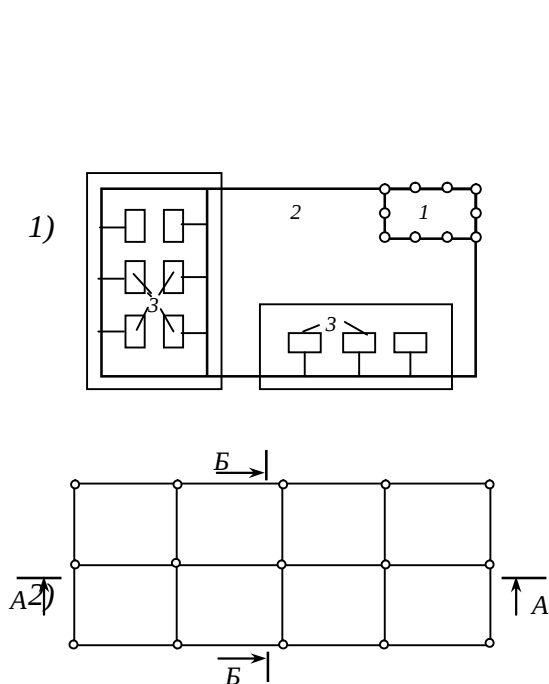


Рис. 2. Выносное заземляющее устройство:
1 – заземлитель, 2 – заземляющий проводник, 3 – заземляемое оборудование

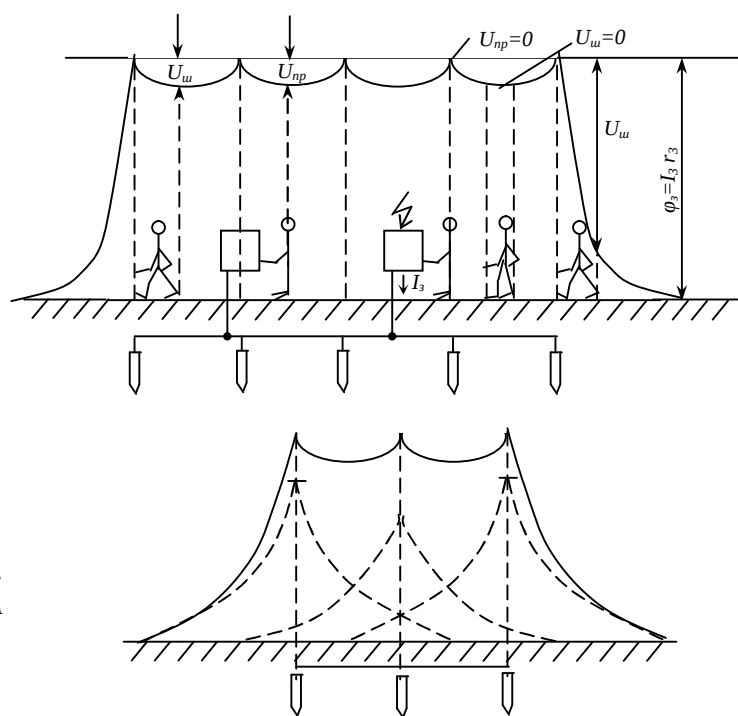


Рис. 3. Заземляющее устройство контурное:
1 – контурный заземлитель с вертикальными и горизонтальными электродами, 2 – заземляемое оборудование распределительного устройства (ЗРУ)

Заземлители бывают искусственные, предназначенные исключительно для заземления, и естественные – находящиеся в земле металлические предметы иного назначения.

Для искусственных заземлителей применяют обычно вертикальные и горизонтальные электроды. В качестве вертикальных электродов используют стальные трубы диаметром 5...6 см с толщиной стенки не менее 1,5 мм и угловую сталь с толщиной полок не менее 4 мм (обычно это угловая сталь от 40x40 до 60x60 мм) отрезками 2,5...3 м. Применяют также прутковую сталь диаметром не менее 10 мм, длиной до 10 м.

Для связи вертикальных электродов применяют горизонтальные электроды (полосовая сталь сечением не менее 4x12 мм и сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм).

Размещение электродов выполняют в соответствии с проектом.

В качестве естественных заземлителей могут использоваться проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубы (кроме трубопроводов горючих жидкостей и газов), отсадные трубы скважин, колодцев, шурфов; металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, свинцовые оболочки кабелей, проложенные в земле и т.п.

В качестве естественных заземлителей подстанций и РУ рекомендуется использовать заземлители опор отходящих линий электропередачи, соединенных с помощью грозозащитных тросов линий с заземляющим уст-

ройством подстанции ли РУ, а также железобетонные фундаменты элементов опор воздушных линий электропередачи.

При расчете заземлителей в однородной земле учитывается сопротивление верхнего слоя (слоя сезонных изменений, обусловленное промерзанием и высыханием грунта). Расчет производят способом, основанным на применении коэффициентов использования (табл. 1, 2, 3 приложения). Его выполняют как при простых, так и при сложных конструкциях групповых заземлителей.

При расчете заземлителей в многослойной земле принимают обычно двухслойную модель земли с удельными сопротивлениями верхнего и нижнего слоев ρ_1 и ρ_2 соответственно и толщиной (мощностью) верхнего слоя h_1 (рис. 4).

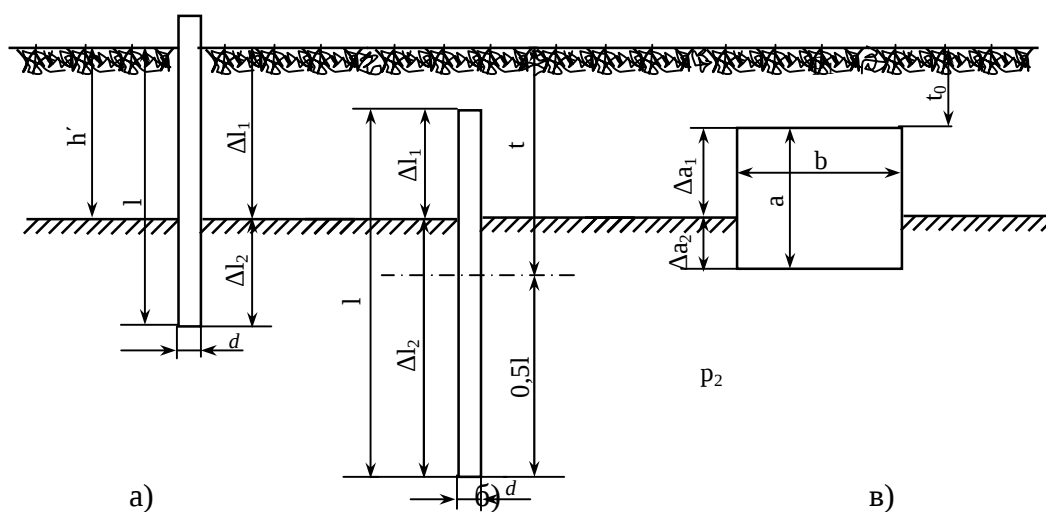


Рис. 4. Одиночные заземлители, размещенные в двухслойной земле:
а - вертикальный стержневой у поверхности земли; б - вертикальный стержневой в земле; в - пластинчатый в земле

Расчет проводится способом наведенных потенциалов. Такой расчет целесообразно применять для сложных групповых заземлителей, обычно в электроустановках напряжением 110 кВ и выше.

Расчет заземлителей как в однородной, так и в многослойной земле можно выполнить по допустимому сопротивлению растекания тока заземлителя или по допустимым напряжениям прикосновения и шага. Для электроустановок с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В и до 35 кВ включительно расчет заземлителя производится обычно по допустимому сопротивлению растекания.

Для ЭУ с эффективно заземленной нейтралью напряжением 110 кВ и выше заземлитель можно рассчитывать как по допустимому сопротивлению, так и по допустимым напряжениям прикосновения и шага. В обоих случаях потенциал заземляющего устройства при стекании с него тока за-

мыкания на землю не должен превышать 10 кВ, если возможен вынос потенциала за пределы зданий и внешних ограждений электроустановок.

1. Порядок расчета

1. Уточняют исходные данные.
2. Определяют расчетный ток замыкания на землю.
3. Вычисляют требуемое сопротивление заземляющего устройства.
4. Рассчитывают необходимое сопротивление растеканию тока искусственного заземлителя.
5. Выбирают тип заземлителя и составляют предварительную схему (проект) заземляющего устройства (размещают на плане установки принятые для сооружения заземлителя электроды и заземляющие проводники).
6. Уточняют параметры заземлителя.

2. Исходные данные для расчета

Для расчета заземления необходимы следующие сведения:

- характеристика электроустановки – тип установки, виды основного оборудования, рабочие напряжения, способы заземления нейтралей трансформаторов и т.п.;
- план электроустановки с указанием основных размеров и размещения оборудования;
- формы и размеры электродов, из которых предусмотрено соорудить проектируемый групповой заземлитель, а также предполагаемая глубина погружения в землю;
- данные измерений удельного сопротивления грунта на участке, где должен быть сооружен заземлитель; если земля принимается двухслойной, необходимы данные измерений удельного сопротивления обоих слоев земли и толщина верхнего слоя;
- данные о естественных заземлителях: какие сооружения могут быть использованы для этой цели и сопротивления их растеканию тока, полученные непосредственным измерением или расчетным путем;
- расчетный ток замыкания на землю, если ток неизвестен, его вычисляют (расчетный ток замыкания на землю должен быть определен для той из возможных схем сети в эксплуатации, при которой этот ток имеет наибольшее значение;
- расчетные значения допустимых U_{np} и $U_{ш}$ и время действия защиты, если расчет производится по допустимым напряжением прикосновения и шага.

3. Определение расчетного тока замыкания на землю

Током замыкания на землю называется ток, проходящий через место замыкания на землю, то есть место случайного электрического соединения токоведущей части непосредственно с землей или нетоковедущими проводящими конструкциями или предметами, не изолированными от земли.

В электросетях напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью обмоток источника тока, то есть с малым током замыкания на землю (сети до 35 кВ включительно) расчетный ток зависит от наличия в нейтрали аппаратов, компенсирующих емкостный ток сети.

Для сети с изолированной нейтралью без компенсирующих устройств это будет емкостный ток однофазного замыкания на землю, приближенно он может быть определен по формуле

$$I_3 = \frac{U}{350}(35l_{\text{кл}} + l_{\text{вл}}), \quad (1)$$

где U – линейное напряжение сети, кВ; $l_{\text{кл}}$ и $l_{\text{вл}}$ – длины электрически связанных кабельных и воздушных линий, км.

В установках с компенсацией емкостных токов в качестве расчетного тока принимают:

- 1) для заземляющих устройств, к которым присоединены компенсирующие аппараты, ток, равный 1,25 номинального тока этих аппаратов $I_{\text{ном}}$;
- 2) для установок с малыми токами замыкания на землю, то есть с изолированной нейтралью, допускается принимать ток срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий на землю. В этом случае ток замыкания на землю должен быть не менее 1,5 кратного тока срабатывания релейной защиты или трехкратного номинального тока предохранителя.

4. Определение требуемого правилами сопротивления заземляющего устройства

Наибольшие допустимые значения $R_{\text{з.у.}}$, установленные ПУЭ, составляют:

- а) для установок до 1000 В:
 - 10 Ом при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВА;
 - 4 Ом - во всех остальных случаях;
- б) для установок выше 1000 В:
 - 0,5 Ом при эффективно заземленной нейтрали (т.е. при больших токах замыкания на землю);
 - $250 / I_3 \leq 10$ Ом при изолированной нейтрали (т.е. при малых токах замыкания на землю) и условии, что заземлитель используется только для установок напряжением выше 1000 В;

- $125 / I_3 \leq 10$ Ом при изолированной нейтрали и условии, этот заземлитель используется одновременно для установок напряжением до 1000 В.

В этих выражениях I_3 – расчетный ток замыкания на землю, А.

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициентов использования, имея данные наибольших допустимых их значений, находят допустимое сопротивление заземлителя из выражения

$$\begin{aligned} U_{np\partial on} &= j_2 \cdot a_1 \cdot a_2; \\ U_{np\partial on} &= j_2 \cdot b_1 \cdot b_2, \end{aligned} \quad (2)$$

а также из выражения

$$j_3 = I_3 \cdot R_3 \leq \frac{U_{np.\partial on.}}{a_1 a_2},$$

где φ_3 – потенциал заземлителя, В; α_1 – коэффициент напряжения прикосновения; α_2 – коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек.

Заменив в первых двух уравнениях φ_3 его значением, получаем искомое сопротивление заземлителя, Ом:

По напряжению прикосновения

$$R_3 = \frac{U_{np.\partial on.}}{I_3 a_1 a_2};$$

по напряжению шага

$$R_3 = \frac{U_{ш.\partial on.}}{I_3 \beta_1 \beta_2}.$$

Меньшее значение R_3 и будет расчетным сопротивлением заземлителя.

Коэффициент напряжения прикосновения α_1 находится по таблице приложения или расчетным путем, например, для одиночного стержневого вертикального заземлителя:

$$a_1 = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}}, \quad (3)$$

где l – длина заземлителя, м; d – диаметр стержневого электрода, м.

Коэффициент напряжения прикосновения выбирается с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек,

$$a_2 = \frac{R_h}{R_h + R_{oc}}, \quad (4)$$

где $R_{оч}$ – сопротивление растеканию ног человека, его можно определить следующим образом: если площадь подошвы одной ноги принять равной

0,0225 м², то диаметр эквивалентного ей диска будет 0,17 м, а сопротивление растеканию тока составит

$$R_p = \frac{r}{2d} \approx r.$$

Полагая, что ступни ног отстоят одна от другой на расстоянии шага, получим искомое сопротивление растеканию основания:

$$R_{оч} = \frac{R_2}{2} \approx 1,5r, \quad (5)$$

по напряжению шага

$$R_3 = \frac{U_{ш\partial on}}{I_3 b_1 b_2}, \quad (6)$$

где β_1 – коэффициент шага.

Для одиночного стержневого вертикального заземлителя

$$B_{max} = \frac{\ell na - \ell nr}{\ell n 2\ell - \ell nr}, \quad (7)$$

где a – шаг человека, м; r – радиус стержневого электрода, м; l – длина электрода, м; β_2 – коэффициент напряжения шага, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$b_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_n};$$

$$b_2 = \frac{R_h}{R_h + 6r}. \quad (8)$$

При выборе коэффициентов α_2 и β_2 определяют, считая, что ρ – расчетное удельное сопротивление основания, на котором стоит человек (пола, гравийной засыпки или грунта), Ом·м; R_h – сопротивление тела человека, принимаемое равным 1000 Ом.

При расчетах сложного заземлителя в двухслойной земле (способ наведенных потенциалов) коэффициент α_1 находят из выражения

$$a_1 = \frac{M}{\left(\frac{\ell_B L_\Gamma}{a\sqrt{S}}\right)^{0,45}}, \quad (9)$$

или по упрощенной формуле

$$a_1 = \left(1,68 - \frac{0,68}{\rho_1/\rho_2}\right) \sqrt{\frac{S}{L_\Gamma L_B}}, \quad (10)$$

где M – параметр, зависящий от отношения удельных сопротивлений верхнего (ρ_1) и нижнего (ρ_2) слоев земли; L_B – длина вертикального электрода; L_H – суммарная длина горизонтальных электродов, м; S – площадь, занимаемая заземлителем, м².

Т а б л и ц а 1

$\frac{r_1}{r_2}$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
M	0,36	0,5	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,8	0,82

Коэффициент α_2 вычисляют по формуле

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_h + 1,5r_1}, \quad (11)$$

где ρ_1 – расчетное удельное сопротивление внешнего слоя земли Ом·м.

5. Определение требуемого сопротивления искусственного заземлителя

При использовании естественных заземлителей (предписывается ПУЭ) сопротивление искусственного заземлителя R_u , Ом, меньше требуемого R_z , Ом и равно

$$R_u = \frac{R_e R_z}{R_e - R_z}, \quad (12)$$

где R_e – сопротивление растеканию естественного заземлителя, Ом.

Сопротивления естественных заземлителей определяют непосредственно измерениями.

6. Уточнение параметров заземлителя

После составления предварительной схемы заземлителя и имеющихся данных о расчетных удельных сопротивлениях грунта вычисляют расчетное сопротивление этого заземлителя R и результат сравнивают с ранее определенным расчетным значением требуемого сопротивления искусственного заземлителя $R_{и}$.

Если значения R и $R_{и}$ совпадают или отличаются незначительно, значит все основные параметры принятого нами заземлителя – форма, размеры, размещение электродов в земле и один относительно другого – выбраны правильно и, следовательно, напряжения прикосновения и шага находятся в допустимых пределах.

При значительных расхождениях в значениях R и R_n необходимо внести поправки в предварительную схему заземлителя – изменить количество и размещение электродов, а иногда их размеры, площадь, занимаемую заземлителем, и прочее и вновь вычислить R .

Таким образом, вычисление R является поверочным и производится методом последовательного приближения.

После вычисления окончательного значения сопротивления искусственного заземлителя определяют сопротивление заземлителя в целом, то есть с учетом R_e

$$R_z = \frac{R \cdot R_e}{R + R_e}. \quad (13)$$

Для электроустановок с эффективно заземленной нейтралью вычисляют потенциал заземляющего устройства в аварийный период ϕ_{zy} , В, на основании выражения

$$j_{zy} = I_z R_{zy} = I_z R_z, \quad (14)$$

где I_z – ток замыкания на землю, а $R_{zy} \approx R_z$. Потенциал заземляющего устройства в аварийный период не должен превышать 10 кВ.

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициента использования значение R определяют в следующем порядке.

1. По предварительной схеме заземлителя, нанесенной на план установки, определяют длину и количество горизонтальных и вертикальных электродов, n .

2. По формулам (табл. 3 приложения) вычисляют расчетные сопротивления горизонтальных электродов (суммарное сопротивление) R_r и одного вертикального R_v .

3. По данным табл. 1 и 2 приложения находят коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов η_v и η_r .

4. Вычисляют расчетное сопротивление заземлителя R по уравнению

$$R = \frac{R_{\text{св}} R_z}{R_{\text{св}} h_z + R_z h_g \cdot n}. \quad (15)$$

Сопротивление заземлителей в виде горизонтальной сетки вычисляют по выражению (в соответствии с рис. 5)

$$R = A \frac{r}{\sqrt{S}} + \frac{r}{L_z + n l_g}, \quad (16)$$

где A – коэффициент, значение которого равно

$$A = 0,444 - 0,84 t_{\text{отн}} \quad \text{при } 0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,1$$

$$A = 0,385 - 0,25 t_{омн} \text{ при } 0,1 \leq t_{омн} \leq 0,5;$$

$t_{омн}$ – относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов

$$t_{омн} = \frac{l_e + t_e}{\sqrt{S}}, \quad (17)$$

где t_e – глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м; S – площадь, занимаемая заземлителем, м²; l_e – длина вертикального электрода, м.

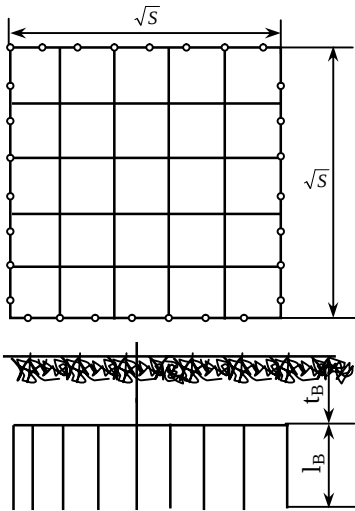


Рис. 5. Сложный заземлитель в однородной земле в виде квадратной горизонтальной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов (по периметру заземлителя)

К такому виду может быть приведен любой сложный заземлитель в виде горизонтальной сетки с различным расположением горизонтальных и примерно равномерным размещением вертикальных электродов (например, на рис.3). При этом, однако, должны быть определены площадь S , суммарная длина горизонтальных электродов L_G , количество и длина вертикальных электродов l_B , а также глубина заложения их в землю.

Если заземлитель представляет собой горизонтальную сетку без вертикальных электродов, то его сопротивление определяют с помощью формулы Олендорфа – Лорана:

$$R = 0,444 \frac{r}{\sqrt{S}} + \frac{r}{L_2}. \quad (18)$$

При расчете сложного заземлителя в двухслойной земле способом наведенных потенциалов значение R вычисляют в следующем порядке:

1. По предварительной схеме определяют площадь территории, занимаемой заземлителем, S м²; суммарную длину горизонтальных электродов L_G , м; количество n вертикальных электродов и их суммарную длину, м:

$$L_B = n \cdot l_B. \quad (19)$$

2. Составляют условную, расчетную модель заземлителя (рис. 5), представляющую собой горизонтальную квадратную сетку из взаимно пересекающихся полос с вертикальными электродами по периметру. Расчетная модель погружена в однородную землю с расчетным эквивалентным удельным сопротивлением ρ_3 Ом·м, при котором искомое R имеет то же значение, что и в принятой схеме заземлителя в двухслойной земле.

3. Вычисляют:

- а) длину одной стороны модели, равной $\sqrt{S}$;
- б) количество ячеек m по одной стороне модели:

$$m = \frac{L_2}{2\sqrt{S}} - 1. \quad (20)$$

Если m окажется дробным числом, его округляют до целых чисел, после чего уточняют значение L_2 , м:

$$L_2 = 2(m+1)\sqrt{S};$$

- в) длину стороны ячейки в модели, м:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}; \quad (21)$$

г) количество вертикальных электродов n , задавшись расстоянием «а», м, между ними, или, если известно расстояние – a , предварительно намечают размещение этих электродов в схеме модели. Обычно их размещают по периметру заземлителя, и в этом случае n или a вычисляют по формуле

$$n \cdot a = 4 \sqrt{S}; \quad (22)$$

- д) суммарную длину l_6 , м, вертикальных электродов n по формуле (19);
- е) относительную глубину погружения в землю вертикальных электродов $t_{отн}$ по формуле (17);

ж) относительную длину $l_{отн}$, м, верхней части вертикальных электродов заземлителя, то есть части, находящейся в верхнем слое земли:

$$l_{отн} = \frac{h_1 - t_6}{l_6}, \quad (23)$$

где h_1 – толщина верхнего слоя земли;

з) расчетное эквивалентное удельное сопротивление земли ρ_3 , Ом·м, для сложного заземлителя (горизонтальная сетка с вертикальными электродами) по формуле

$$r_3 = r_2 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^K,$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли соответственно, Ом·м; K – показатель степени при $0,1 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 1$,

$$K = 0,32 \left(1 + 0,26 \ln \frac{h_1}{l_d} \right), \quad (24)$$

при $1 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 10$

$$K = 0,43 \quad K = 0,43 \left(l_{отн} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_d} \right). \quad (25)$$

4. Вычисляют искомое расчетное сопротивление R , Ом, по формуле (16) или, если заземлитель не имеет вертикальных электродов, - по формуле (18).

Примеры расчетов

Пример 1. Определить сопротивление растеканию тока одиночных заземлителей: вертикального стержневого R_v и горизонтального полосового R_z . Их размеры и размещение в земле приведены на рис. 6. Удельное сопротивление грунта $\rho = 10^2$ Ом·м.

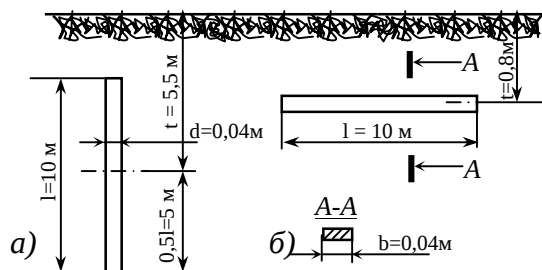


Рис. 6

Решение. Подставим данные в соответствующие формулы (приложение, табл. 3):

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \left(\ln \frac{2 \cdot 10}{0,04} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 5,5 + 10}{4 \cdot 5,5 - 10} \right) = 10,8 \text{ Ом.}$$

Для горизонтального электрода

$$R_z = \frac{r}{2\pi\ell} \ln \frac{\ell^2}{bt} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \ln \frac{10^2}{0,04 \cdot 0,8} = 12,8 \text{ Ом}.$$

Пример 2. Ток $I_3 = 30 \text{ А}$ стекает в землю через групповой заземлитель, состоящий из трех одинаковых полушаровых электродов радиусом $r = 0,5 \text{ м}$, размещенных в вершинах равностороннего треугольника (рис. 7). Определить φ_{zp} при расстояниях между центрами электродов, равных 2,5; 10; 40 м, ρ земли равно $120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (земля однородная).

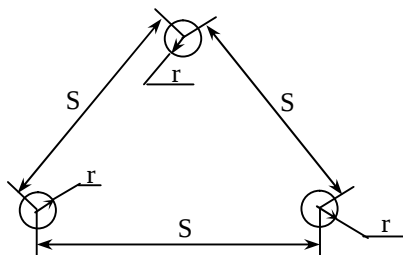


Рис. 7

Решение. Поскольку электроды одинаковы и находятся в одинаковых условиях, у них равны:

- сопротивление растеканию тока

$$R_0 = \frac{r}{2\pi \rho} = \frac{120}{2\pi \cdot 0,5} = 40 \text{ Ом};$$

- токи, стекающие в землю,

$$I_0 = \frac{I_3}{n} = \frac{30}{3} = 10 \text{ А};$$

- собственные потенциалы электродов

$$j_0 = I_0 R_0 = 10 \cdot 40 = 400 \text{ В}.$$

На основании уравнения

$$j_{zp} = j_0 + (n-1)j_n$$

потенциал группового заземлителя с учетом $j_n = \frac{j_0 r}{S-r}$ (потенциал, наведенный на первом электроде соседними)

$$j_{zp} = j_0 + (n-1)j_0 \frac{r}{S-r}.$$

Подставив значения $n = 3$ и $r = 0,5 \text{ м}$ и произведя преобразования, получим

$$j_{zp} = j_0 \frac{S+r}{S-r} = 400 \frac{S+0,5}{S-0,5}.$$

Искомые значения потенциалов группового заземлителя будут:

- при $S = 2,5$ м $\varphi_{zp} = 1,5$ $\varphi_0 = 600$ В;
- при $S = 10$ м $\varphi_{zp} = 1,1$ $\varphi_0 = 440$ В;
- при $S = 40$ м $\varphi_{zp} \approx \varphi_0 = 400$ В;

$$h_{zp} = \frac{\text{отношение действительной проводимости группового заземлителя}}{\text{наибольшая возможная его проводимость}} =$$

$$= \frac{\frac{1}{R_{zp}}}{\frac{1}{R_{\infty}}} = \frac{R_{\infty}}{R_{zp}} = \frac{I_3 \cdot R_{\infty}}{I_3 \cdot R_{zp}} = \frac{j_{\infty}}{j_{zp}}.$$

Пример 3. Определить коэффициент использования η_{zp} и сопротивление группового заземлителя R_{zp} , состоящего из 20 вертикальных стержневых электродов, расположенных в ряд на расстоянии $S = 2,5$ м один от другого, и горизонтальной соединительной стальной полосы. Длина стержневого электрода $l = 2,5$ м. Сопротивление растеканию электродов: вертикального стержневого $R_{\sigma} = 30,2$ Ом, горизонтального полосового $R_z = 3,86$ Ом.

Решение. Из табл. 1 и 2 находим для случая $\frac{S}{l} = 1$, $\eta_{\sigma} = 0,48$ и $\eta_z = 0,42$. Подставив данные в уравнения для h_{zp} , R_{zp} , получим

$$h_{zp} = \frac{R_{\sigma} h_z + R_z n h_{\sigma}}{R_{\sigma} + R_z n} = \frac{30,2 \cdot 0,42 + 3,86 \cdot 20 \cdot 0,48}{30,2 + 3,86 \cdot 20} = 0,46;$$

$$R_{zp} = \frac{R_{\sigma} R_z}{R_{\sigma} h_z + R_z n h_{\sigma}} = \frac{30,2 \cdot 3,86}{30,2 \cdot 0,42 + 3,86 \cdot 20 \cdot 0,48} = 2,34 \text{ Ом}.$$

Пример 4. Определить сопротивление сложного заземлителя в однородной земле, выполненного в виде сетки из горизонтальных и вертикальных стержневых электродов.

Дано: удельное сопротивление земли равно $\rho = 100$ Ом·м; размеры заземлителя указаны на рис. 8.

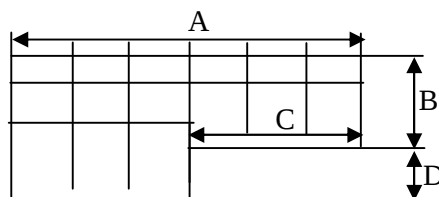


Рис. 8

$A = 24$ м; $B = 8$ м; $C = 12$ м; $D = 4$ м; длина вертикального электрода $l_B = 3$ м; глубина заложения заземлителя $t_B = 0,5$ м.

Решение. Искомое сопротивление заземлителя находится по формуле

$$R = A \frac{r}{\sqrt{S}} + \frac{r}{L_{\Gamma} + n\ell_B}.$$

Предварительно вычисляем неизвестные значения величин, входящих в эту формулу. Определяем площадь, занимаемую заземлителем.

$$S = A \cdot B + (A - C)D = 24 \cdot 8 + (24 - 12) \cdot 4 = 240 \text{ м}^2.$$

По формуле находим $t_{\text{отн}} = (l_B + t_B) / \sqrt{S} = (3 + 0,5) / \sqrt{240} = 0,23$ – относительная глубина погружения в землю.

Определяем коэффициент A .

$$\text{Поскольку } 0,1 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,5, \quad A = 0,385 - 0,25 t_{\text{отн}} = 0,385 - 0,25 \cdot 0,23 = 0,33.$$

По рисунку подсчитываем суммарную длину горизонтальных и количество вертикальных электродов.

$L_{\Gamma} = 3 \cdot 24 + 12 + 4 \cdot 12 + 3 \cdot 8 = 156$ м; $n = 25$ штук, учитывая, что расстояние между соседними вертикальными электродами будет не более 3 м.

Подставив в формулу полученные значения, найдем искомое сопротивление заземлителя:

$$R = A \frac{r}{\sqrt{S}} + \frac{r}{L_{\Gamma} + n\ell_B} = 0,33 \frac{100}{\sqrt{240}} + \frac{100}{156 + 25 \cdot 3} = 2,56 \text{ Ом}.$$

Т а б л и ц а 2

№	A	B	C	D	l_B	t_B	ρ
1/16	20	15	10	3	2,0	0,3	100
2/17	22	16	11	4	2,2	0,4	105
3/18	24	17	12	5	2,5	0,5	110
4/19	26	18	13	6	2,7	0,6	120
5/20	28	20	14	7	3,0	0,7	125
6/21	30	22	15	8	2,0	0,3	100
7/22	32	24	16	9	2,5	0,4	105
8/23	34	25	17	10	2,0	0,5	110
9/24	36	26	18	11	2,2	0,6	120
10/25	38	28	19	12	2,5	0,7	125
11/26	40	30	20	13	2,7	0,3	100
12/27	42	32	21	14	3,0	0,4	105
13/28	44	33	22	15	2,2	0,5	110
14/29	46	34	23	16	2,5	0,6	120
15/30	48	35	24	17	2,0	0,7	125

Пример 5. Определить коэффициент напряжения прикосновения α_1 и U_{np} при одиночном стержневом вертикальном заземлителе длиной $l = 3$ м и диаметром $d = 6$ см для двух случаев: человек касающийся заземленного оборудования, находится на расстоянии от оси заземлителя $x = 2$ м (положение 1 на рис. 9) и $x = 20$ м (положение 2). Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; ток, стекающий в землю через заземлитель, $I_3 = 10$ А.

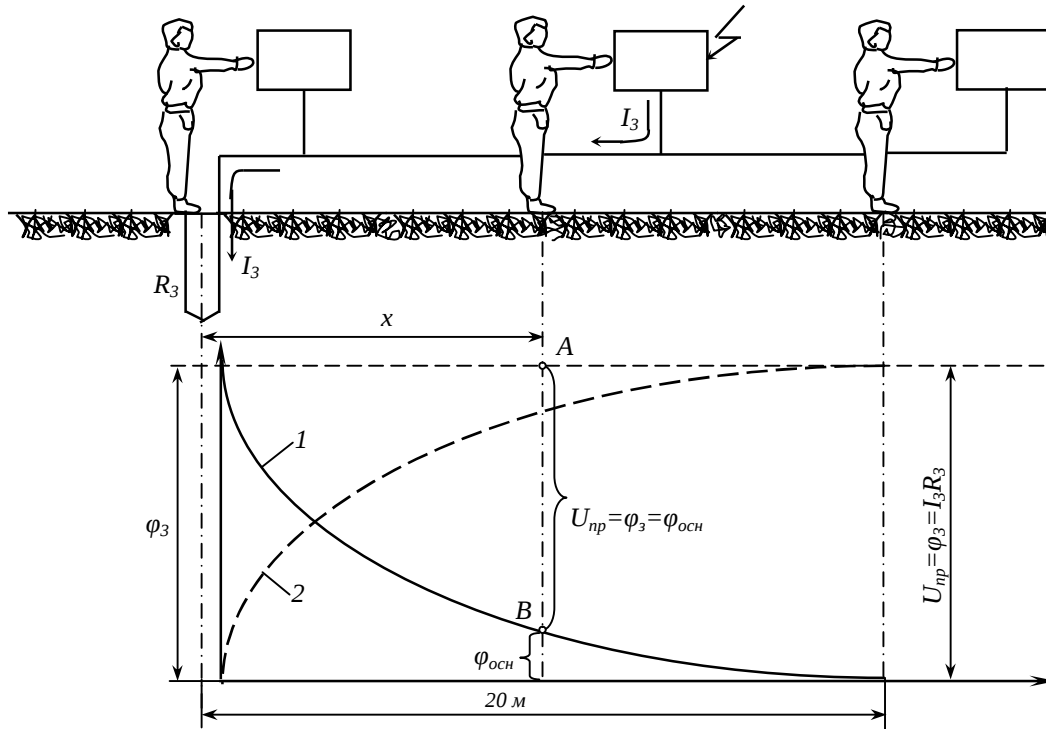


Рис. 9

Решение. 1. Находим потенциал заземлителя:

$$j_z = \frac{I_3 r}{2\rho l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{10 \cdot 100}{2\rho \cdot 3} \ln \frac{4 \cdot 3}{0,06} = 280 \text{ В}.$$

2. Вычисляем значения искомых коэффициентов α_1 и напряжения прикосновения U_{np} при $x = 2$ м:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}} = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{2^2 + 3^2} + 3}{2}}{\ln \frac{4 \cdot 3}{0,06}} = 0,772;$$

$$U_{np} = \varphi_3 \alpha_1 = 280 \cdot 0,772 = 216 \text{ В},$$

при $x = 20$ м

$$a_1 = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{20^2 + 3^2} + 3}{4 \cdot 3}}{\ln \frac{20}{0,06}} = 0,972; \quad U_{np} = \varphi_3 \alpha_1 = 280 \cdot 0,972 = 272 \text{ В.}$$

Пример 6.

Человек коснулся оборванного и лежащего на земле провода воздушной линии, находящейся под напряжением. Определим U_{np} , если длина участка провода, лежащего на земле, $l = 5$ м; расстояние от человека до этого участка $S = 3$ м; диаметр провода $2r = 0,01$ м; ток замыкания на землю $I_3 = 10$ А; $\rho = 10^2$ Ом·м; $R_n = 10^3$ Ом.

Решение. Расчетные формулы:

$$U_{np} = \varphi_3 \alpha_1 \quad \text{или} \quad U_{np} = \varphi_3 - \varphi_{осн}; \quad U_{пп} = \varphi_3 \alpha_1 \alpha_2 = (\varphi_3 - \varphi_{осн}) \alpha_2.$$

Рассмотрим провод, лежащий на земле, как протяженный заземлитель круглого сечения.

По уравнению $j_3 = \frac{I_3 r}{\rho l} \ln \frac{l}{d} = 440 \text{ В}$ определяем потенциал провода

$$j_3 = \frac{10 \cdot 10}{\rho \cdot 5} \ln \frac{5}{0,005} = 440 \text{ В.}$$

Определяем потенциал на поверхности земли в том месте, где стоит человек:

$$\varphi_{осн} = \frac{I_3 r}{2\rho \ell} \ln \frac{2x + \ell}{2x - \ell} = \frac{10 \cdot 10^2 2(2,5 + 3) + 5}{2\rho \cdot 5 \cdot 2(2,5 + 3) - 5} = 30 \text{ В.}$$

Коэффициент напряжения прикосновения

$$\alpha_2 = \frac{R_n}{R_n + 1,5r} = \frac{10^3}{10^3 + 1,5 \cdot 10^2} = 0,87.$$

Искомая величина напряжения прикосновения $U_{np} = (\varphi_3 - \varphi_{осн}) \alpha_2 = (440 - 30) \cdot 0,87 = 360 \text{ В.}$

Пример 7. Определить $U_{ш. \max}$ при одиночном стержневом заземлении длиной $l = 3$ м и диаметром $d = 6$ см (рис. 10 - напряжение шага при одиночном заземлителе).

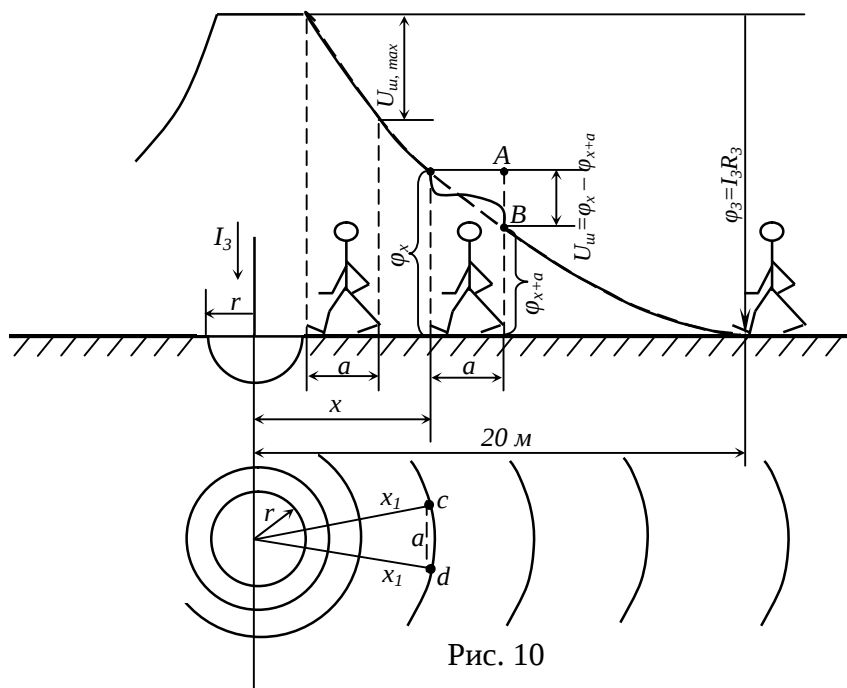


Рис. 10

Решение. Из уравнения $b_1 = \frac{\ln a - \ln r}{\ln 2\ell - \ln r} = \frac{U_{ш, max}}{j_3}$; $b_1 = \frac{\ln 80 - \ln 3}{\ln 600 - \ln 3} = 0,62$;

$$U_{ш, max} = \varphi_3 \beta_1 = 0,62 \varphi_3$$

где β_1 - коэффициент напряжения шага $\frac{b_1(j_x - j_{x+a})}{j_3} < 1$.

Пример 8.

Определить $U_{ш}$, если $\beta_1 = 0,62$; $\rho = 10^2$ Ом·м; $R_h = 10^3$ Ом; $R_H = r / 2a \approx 3r$.

Решение. Коэффициент напряжения шага β_2 , учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_H} = \frac{R_h}{R_h + 6r}; \quad \beta_2 = 10^3 / (10^3 + 6 \cdot 10^2) = 0,625;$$

$$U_{ш} = \varphi_3 \beta_1 \beta_2 = 0,62 \cdot 0,625 \varphi_3 \approx 0,39 \varphi_3,$$

где β_2 - коэффициент напряжения шага, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек.

Пример 9. Определить значение эквивалентного удельного сопротивления ρ_{Σ} двухслойной земли для сложного заземлителя. Дано: $\rho_1 = 200$ Ом·м; $\rho_2 = 40$ Ом·м; $h_1 = 1,8$ м; $a = 6$ м; $l_B = 3$ м; $t_B = 0,6$ м.

Решение. Определяем $r_3 = r_2 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^K$.

Находим отношение удельных сопротивлений: $\frac{r_1}{r_2} = \frac{200}{40} = 5$.

$$l_{\text{отн}} = \frac{h_1 - t_8}{l_6},$$

где $l_{\text{отн}}$ – относительная длина верхней части вертикального электрода; t_8 – глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода;

$$l_{\text{отн}} = \frac{1,8 - 0,6}{3} = 0,4.$$

Поскольку $1 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 10$, показатель степени K в уравнении (25) вычисляем, по формуле

$$K = 0,43 (l_{\text{отн}} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_B}) = 0,43(0,4 + 0,272 \ln \frac{6\sqrt{2}}{3}) = 0,294;$$

$\ln \rho_3 = \ln \rho_2 + K \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = \ln 40 + 0,294 \ln 5 = 4,16$, откуда искомое эквивалентное удельное сопротивление $\rho_3 = 64 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Определяем по таблице данные: $\left(\frac{r_1}{r_2} \right) = 5$; $\frac{a}{l_6} = \frac{6}{3} = 2$; $l_{\text{отн}} = 0,4$, находим в соответствующей графе таблицы $\left(\frac{r_1}{r_2} \right) = 1,54$, откуда $\rho_3 = 1,54$, $\rho_2 = 1,54 \cdot 40 = 620 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Пример 10.

Определить наибольшее значение коэффициента напряжения прикосновения α_1 для заземлителя в двухслойной земле в виде квадратной сетки со стороной $\sqrt{S}$ с квадратными клетками одинакового размера и равномерно размещенными по контуру заземлителя вертикальными электродами (рис. 11 - сложный заземлитель в двухслойной земле, в виде горизонтальной сетки с вертикальными электродами). Дано: $\sqrt{S} = 36 \text{ м}$; $\rho_1 = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\rho_2 = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $l_B = 3 \text{ м}$; $a = 6 \text{ м}$.

Решение. Определим α_1 по формуле (9). Находим отношение удельных сопротивлений: $\frac{r_1}{r_2} = \frac{20}{40} = 5$, и по цифровой зависимости, приведенной в задании, вычисляем по таблице параметр M , зависящий от удельных сопротивлений верхних и нижних слоев земли

$\frac{r_1}{r_2}$		0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0;
M	...	0,36	0,5	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,8	0,82.

$M = 0,75$ – для нашего случая. По рис. 7 вычисляем общую длину горизонтальных электродов

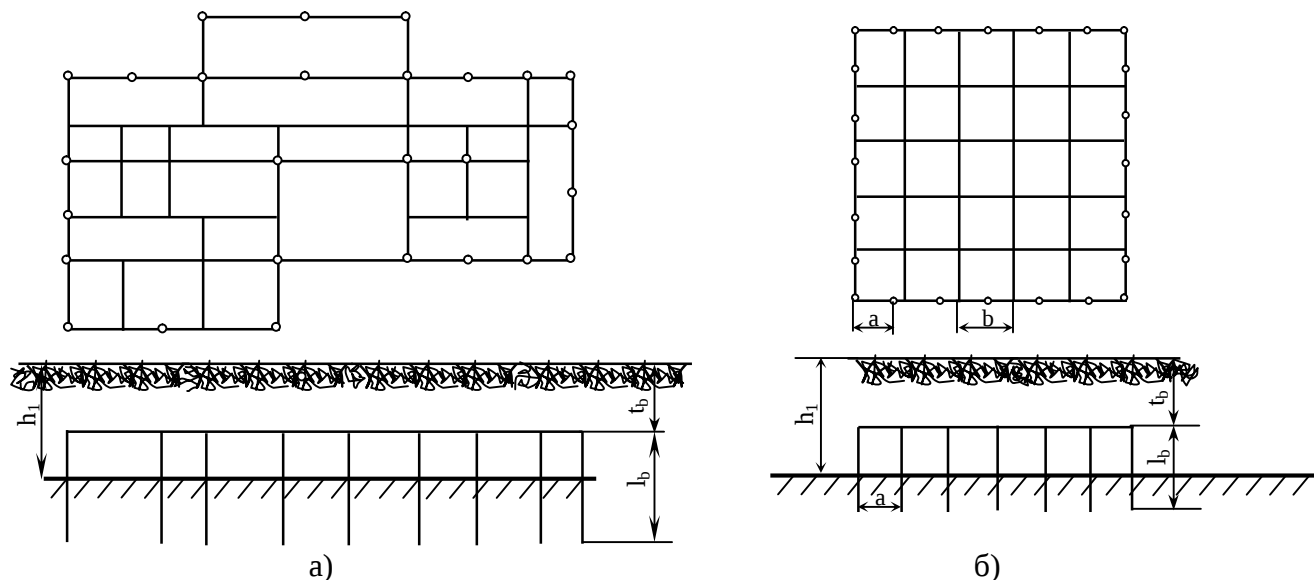


Рис. 11

$L_2 = 12 \cdot 36 = 432$ м. Подставив в выражение $\alpha_1 = \frac{M}{\left(\frac{\ell_B L_2}{a \sqrt{S}}\right)^{0,45}}$ значения

входящих в него величин, получаем искомый коэффициент прикосновения

$$\alpha_1 = a_1 = \frac{M}{\left(\frac{\ell_B L_2}{a \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{M}{\left(\frac{3 \cdot 342}{6 \cdot 36}\right)^{0,45}} = 0,31.$$

Определяем α_1 по формуле

$$a_1 = \left(1,68 - \frac{0,68}{\frac{r_1}{r_2}} \right) \sqrt{\frac{S}{L_2 L_8}}.$$

Подсчитываем по рис. 11 количество вертикальных электродов n или, располагая значениями длины одной стороны квадратной сетки $\sqrt{S} = 36$ м и расстояния между вертикальными электродами $a = 6$ м, вычисляем n как частное от деления длины периметра сетки на a :

$$n = 4n = 4 \frac{\sqrt{S}}{2} = 4 \frac{36}{6} = 24 \text{ шт.}$$

Затем находим общую длину вертикальных электродов:

$$L_B = n \cdot l_B = 243 = 72 \text{ м.}$$

Теперь по формуле (10) определяем

$$a_1 = \left(1,68 - \frac{0,68}{\frac{r_1}{r_2}} \right) \sqrt{\frac{S}{L_z L_B}} = \left(1,68 - \frac{0,68}{5} \right) \frac{36}{\sqrt{432 \cdot 72}} \approx 0,315.$$

Пример 11. Расчет заземлителя в однородной земле методом коэффициентов использования по допустимому сопротивлению.

Задание. Рассчитать заземлитель подстанции 6/0,4 кВ.

Исходные данные. Подстанция понижающая, имеет два трансформатора 6/0,4 кВ с заземленными нейтралями на стороне 0,4 кВ; размещена в отдельно стоящем одноэтажном кирпичном здании размеры которого в плане указаны на рис. 8 (а - план подстанции и предварительная схема заземлителя, б - окончательная схема заземлителя).

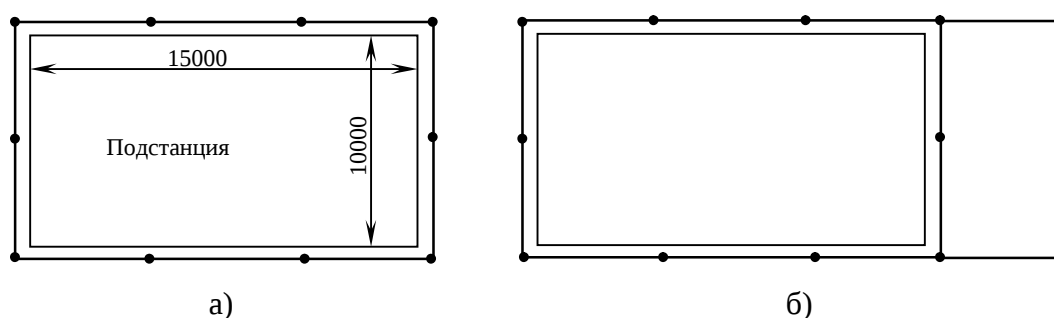


Рис. 12

В качестве естественного заземлителя будет использована металлическая технологическая конструкция, частично погруженная в землю; ее расчетное сопротивление растеканию тока (с учетом сезонных изменений) $R_e = 15 \text{ Ом}$. Ток замыкания на землю не известен, однако известна протяженность линий: кВ – кабельных $l_{\text{КЛ}} = 70 \text{ км}$, воздушных $l_{\text{ВЛ}} = 65 \text{ км}$. Заземлитель предполагается выполнить из вертикальных стержневых электродов длиной $l_B = 5 \text{ м}$, диаметром $d = 12 \text{ мм}$, верхние концы которых соединяются с помощью горизонтального электрода – стальной полосы суммарной длиной $L_z = 50 \text{ м}$, сечением ($a \times b$) $4 \times 40 \text{ мм}$, уложенной в землю на глубине $t_0 = 0,8 \text{ м}$.

Расчетные удельные сопротивления земли получены в результате измерений на участке, где предполагается сооружение заземлителя, и расчеты равны: для вертикального электрода длиной 5 м $\rho_{\text{расч.В}} = 120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; для горизонтального длиной 50 м $\rho_{\text{расч.В}} = 176 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Решение. Расчетный ток замыкания на землю на стороне 6 кВ определяем по формуле

$$I_3 = \frac{U}{350} (35I_{ВЛ} + I_{КЛ}) = \frac{6}{35} (35 \cdot 70 + 65) = 43 \text{ А}.$$

Требуемое сопротивление растеканию заземлителя, который принимаем общим для установок 6 и 0,4 кВ согласно требования ПУЭ,

$$R_3 = \frac{125}{I_3} = \frac{125}{43} = 2,9 \text{ Ом}$$

Требуемое сопротивление искусственного заземлителя

$$R_u = \frac{R_e R_3}{R_e - R_3} = \frac{15 \cdot 2,9}{15 - 2,9} = 3,6 \text{ Ом}$$

Тип заземлителя выбираем контурный, размещенный по периметру подстанции с ее основными размерами (рис. 12). Вертикальные электроды размещаем на расстоянии 5 м один от другого ($a = 5$ м). Уточняем параметры заземлителя путем поверочного расчета. Из предварительной схемы видно, что в принятом нами заземлителе суммарная длина горизонтального электрода $L_2 = 50$ м, а $n = 10$ шт.

Определяем расчетные сопротивления растеканию электродов, вертикального R_B и горизонтального R_Γ , по формулам, приведенным в таблицах 1 и 2 приложения:

$$R = \frac{r_{расч.В}}{2p\ell_B} \left(\ell_n \frac{2\ell_B}{d} + \frac{1}{2} \ell_n \frac{4t + \ell_B}{4t - \ell_B} \right) = \frac{120}{2p \cdot 5} \left(\ell_n \frac{2,5}{0,012} + \frac{1}{2} \ell_n \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 27,1 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{r_{расч.Г}}{2pL_\Gamma} \ell_n \frac{L_\Gamma^2}{0,5\ell bt} = \frac{176}{2p \cdot 50} \ell_n \frac{50^2}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 6,7 \text{ Ом}.$$

Имея в виду, что принятый нами заземлитель контурный и что $n = 10$ шт., а отношение $\frac{a}{l_g} = \frac{5}{5} = 1$, определяем по табл. 1 и 2 коэффициенты использования электродов заземлителя – вертикальных $\eta_g = 0,56$, горизонтального $\eta_2 = 0,34$.

Теперь находим сопротивление растеканию принятого нами группового заземлителя:

$$R_{zp} = \frac{R_g R_2}{R_g h_2 + R_2 n h_g} = \frac{27,1 \cdot 6,7}{27,1 \cdot 0,34 + 6,7 \cdot 10 \cdot 0,56} = 4,1 \text{ Ом}.$$

Это сопротивление оказывается больше, чем требуемое R_u (3,6 Ом), поэтому принимаем решение увеличить в контуре заземлителя количество

вертикальных электродов до 13 шт. Затем вновь по таблице находим коэффициенты использования η_B и η_r , принимая отношение $\frac{a}{l_g} = 1$, и вычисляем R . В этом случае $\eta_g = 0,53$ и $\eta_z = 0,31$, а сопротивление заземлителя растеканию тока

$$R = \frac{R_g R_z}{R_g h_z + R_z n h_g} = \frac{27,1 \cdot 6,7}{27,1 \cdot 0,31 + 6,7 \cdot 13 \cdot 0,53} = 3,33 \text{ Ом}.$$

Это сопротивление меньше требуемого, но так как разница между ними невелика (0,27 Ом) и она удовлетворяет условиям безопасности, принимаем этот результат как окончательный.

Итак, проектируемый заземлитель – контурный, состоит из 13 вертикальных стержневых электродов длиной 5 м и диаметром 12 мм и горизонтального электрода в виде стальной полосы длиной 70 м, сечением 4 х 40 мм, на глубине 0,8 м, глубина заложения электродов в земле $t = 0,8$ м.

Задание для самостоятельного выполнения. Произвести расчет заземления подстанции 6/0,4 кВ согласно варианту (табл. 2).

Необходимо рассчитать заземлитель подстанции в однородной земле методом коэффициентов использования по допустимому сопротивлению.

Исходные данные: подстанция понижающая, имеет два трансформатора 6/0,4 кВ с заземленными нейтралями со стороны 0,4 кВ, размещена в отдельно стоящем одноэтажном кирпичном здании.

Т а б л и ц а 3

№	Размеры подстанции, мм	Сопр. ест. заземл, Ом	Протяженность линий 6 кВ		Размеры вертикального электрода		Размеры горизонтального электрода, мм	Глубина заложения электродов, t_0 м	Расстояние между вертикальн. электродами, м
			КЛ км	ВЛ км	l м	d мм			
1	18000x12000	15	65	50	3	10	4x40	0,5	6
2	15000x10000	10	55	65	3	10	4x40	0,6	3
3	20000 x10000	12	50	68	5	12	4x40	0,8	4
4	15000x10000	15	65	50	3	10	4x40	0,5	5
5	20000 x12000	12	50	60	4	12	4x40	0,7	3
6	15000x12000	15	65	52	3	10	4x40	0,9	5
7	20000x14000	10	60	50	4	12	4x40	0,5	7
8	16000x12000	14	45	50	3	12	4x40	0,8	4
9	15000 x12000	12	50	55	5	10	4x40	0,5	6
10	18000x12000	10	65	50	3	12	4x40	0,7	3
11	20000 x12000	10	45	60	5	10	4x40	0,5	4
12	20000x17000	14	65	50	3	12	4x40	0,5	7
13	15000x12000	12	55	65	3	12	4x40	0,6	5

14	20000 x10000	10	50	68	5	10	4x40	0,8	5
15	15000x10000	15	65	55	3	12	4x40	0,5	3
16	20000 x10000	12	50	60	4	10	4x40	0,7	5
17	15000x12000	15	65	50	3	12	4x40	0,9	3
18	21000x14000	10	60	50	4	10	4x40	0,5	7
19	16000x12000	14	45	50	3	12	4x40	0,8	4
20	15000 x12000	12	50	55	5	12	4x40	0,5	3
21	18000x12000	10	65	50	3	10	4x40	0,7	6
22	12000 x20000	10	45	67	5	12	4x40	0,5	4
23	12000x10000	14	65	50	4	10	4x40	0,5	3
24	15000x15000	12	55	65	3	10	4x40	0,8	3
25	16000x8000	10	50	68	4	12	4x40	0,5	4
26	15000x9000	14	65	50	3	12	4x40	0,7	3
27	20000 x12000	12	50	60	5	10	4x40	0,5	4
28	20000 x15000	10	65	52	3	12	4x40	0,7	5
29	21000x14000	10	64	53	5	10	4x40	0,6	7
30	16000x12000	14	67	50	3	12	4x40	0,8	4

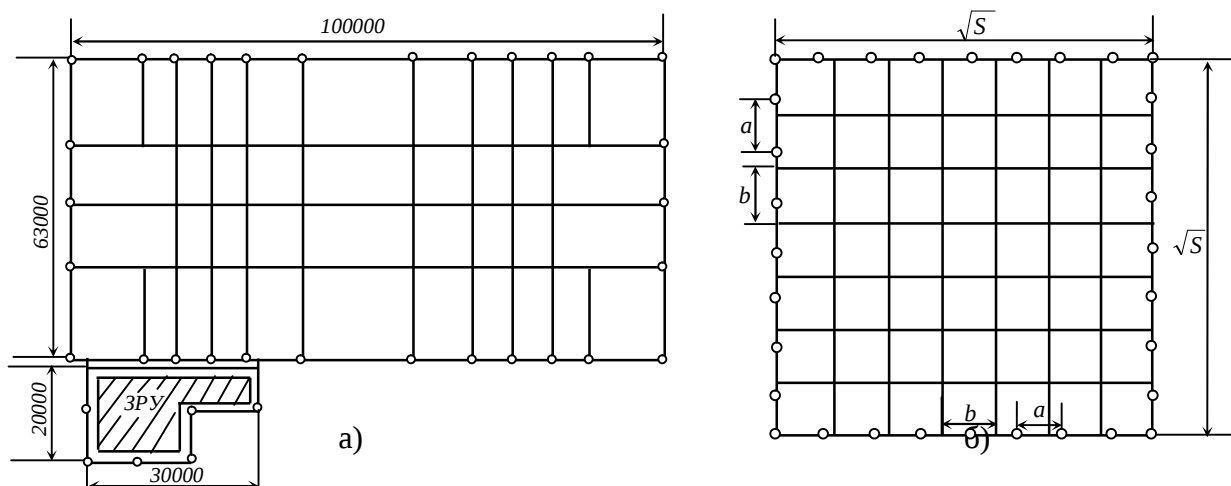
Пример 12.

Рис. 13

Необходимо рассчитать заземлитель подстанции 110/35/6 кВ (рис. 13: а - предварительная схема заземлителя; б - расчетная модель).

Исходные данные:

1. Подстанция понижающая, имеет два трансформатора 110/35/6 кВ с эффективно заземленной нейтралью со стороны 110 кВ. Для питания собственных нужд имеется трансформатор 6/0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью низшего напряжения; распределительные устройства 110 и 35 кВ открытого типа, 6 кВ закрытого типа.

2. Территория подстанции занимает площадь $S = 6300 \text{ м}^2$;

3. Заземлитель предполагается выполнить из горизонтальных полосовых электродов сечением 4 x 40 мм и вертикальных стержневых электродов длиной $l_b = 5$ м, диаметром $d = 12$ мм, глубина заложения электродов в земле $t = 0,8$ м.

4. Расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли $\rho_1 = 230$ Ом·м, $\rho_2 = 80$ Ом·м.

Мощность верхнего слоя земли $h_1 = 2,8$ м.

5. В качестве естественного заземлителя использовать систему тросопоры двух отходящих от подстанции воздушных линий электропередачи 110 кВ на металлических опорах с длиной пролета $l = 250$ м, каждая линия имеет стальной грозозащитный трос сечением $S = 50$ мм²; расчетное (с учетом сезонных колебаний) сопротивление заземления одной опоры $r_{on} = 12$ Ом; число опор с тросом от каждой линии больше 20; данные измерений сопротивления системы тросопоры отсутствуют.

6. Расчетный ток замыкания на землю на стороне 110 кВ составляет 5 кА, на стороне 35 кВ – 40 А на стороне 6 кВ – 30 А.

Решение. Сопротивление заземлителя растеканию тока R_3 , согласно требованиям ПУЭ, должно быть не более 0,5 Ом. Сопротивление естественного заземлителя для двух линий R_e определяется по формуле

$$R_e = \sqrt{\frac{r_{on} r_m}{n_m}}, \quad (26)$$

где r_{on} – расчетное, то есть наибольшее (с учетом сезонных колебаний) сопротивление заземления одной опоры, Ом; r_m – активное сопротивление троса на длине одного пролета, Ом; n_m – число тросов на опоре.

Для стального троса сечением S , мм², при длине пролета l , м, активное сопротивление, Ом,

$$r_m = \frac{0,15l}{S}, \quad (27)$$

$$R_e = \frac{1}{2} \sqrt{r_{on} \frac{0,15l}{Sn_T}} = \frac{1}{2} \sqrt{12 \frac{0,15 \cdot 250}{50 \cdot 1}} = 1,5 \text{ Ом}.$$

Требуемое сопротивление искусственного заземлителя R_u с учетом того, что $R_3 = 0,5$ Ом и $R_e = 1,5$ Ом:

$$R_u = \frac{1,50 \cdot 0,5}{1,50 - 0,5} = 0,75 \text{ Ом}.$$

Составляем предварительную схему заземлителя и наносим ее на план подстанции, приняв контурный (распределенный) тип заземлителя, то есть в виде сетки из горизонтальных полосовых и вертикальных стержневых (длиной $l_e = 5$ м) электродов. Вертикальные электроды размещаем по пе-

риметру заземлителя. По предварительной схеме определяем суммарную длину горизонтальных и количество вертикальных электродов: $L_z = 1310$ м; n - 36 шт.

Составляем расчетную модель заземлителя в виде квадратной сетки площадью $S = 6300 \text{ м}^2$. Длина одной стороны ее будет $\sqrt{S} = 80$ м. Количество ячеек (m) по одной стороне модели, согласно формуле, $m = \frac{L_z}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{1310}{2 \cdot 80} - 1 = 7,2$. Принимаем $m = 7$ (целое число), уточняем суммарную длину горизонтальных электродов $L_z = 2(m + 1)\sqrt{S} = 2(7 + 1)80 = 1280$ м. Длина стороны ячейки в модели, м,

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m} = \frac{80}{7} = 11,4 \text{ м}.$$

Расстояние между вертикальными электродами, согласно формуле, $na = 4\sqrt{S}$,

$$a = \frac{4\sqrt{S}}{n} = \frac{4 \cdot 80}{32} = 10 \text{ м}.$$

Суммарная длина вертикальных электродов по формуле $L_z = n \cdot l_B = 32 \cdot 5 = 160$ м.

Относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов (17)

$$t_{\text{отн}} = \frac{l_g + t_g}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,8}{80} = 0,0725.$$

Относительная длина

$$l_{\text{отн}} = \frac{h_1 - t_g}{l_g} = \frac{2,8 - 0,8}{5} = 0,4.$$

Находим значения $\frac{r_1}{r_2} = \frac{230}{80} = 2,87$. Поскольку $1 < \frac{r_1}{r_2} < 10$, значение K находим по формуле

$$K = 0,43(0,4 + 0,272 \ln \frac{10\sqrt{2}}{5}) = 0,294.$$

Определяем расчетное эквивалентное удельное сопротивление грунта ρ_z определяем по формуле

$$r_z = r_2 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^K = 80 \left(\frac{230}{80} \right)^{0,294} = 108 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Вычисляем расчетное сопротивление R рассматриваемого заземлителя по формуле. Предварительно находим коэффициент A по формуле (17), поскольку $0 < t_{\text{отн}} < 0,1$,

$$A = 0,444 - 0,84 t_{\text{отн}} = 0,444 - 0,84 \cdot 0,725 = 0,4,$$

$$R = A \frac{r_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{r_{\text{э}}}{L_{\Gamma} + L_B} = 0,4 \frac{108}{80} + \frac{108}{1280 + 160} = 0,62 \text{ Ом}.$$

Это значение R практически совпадает с требуемым сопротивлением искусственного заземлителя (0,75 Ом); некоторая разница допустима, тем более, что в данном случае она повышает условия электробезопасности.

Общее сопротивление заземлителя подстанции (с учетом сопротивления естественного заземлителя)

$$R_3 = \frac{R R_e}{R + R_e} = \frac{0,62 \cdot 1,5}{0,62 + 1,5} = 0,44 \text{ Ом}.$$

Определяем потенциал заземляющего устройства в аварийный период:

$$\varphi_{3y} = I_3 R_3 = 5000 \cdot 0,44 = 2200 \text{ В}.$$

Этот потенциал допустим, так как он менее 10 кВ.

Таким образом, искусственный заземлитель подстанции должен быть выполнен из горизонтальных пересекающихся полосовых электродов сечением 4х40 мм общей длиной не менее 1280 м и вертикальных стержневых в количестве не менее 32 шт. диаметром 12 мм длиной по 5 м, размещенных по периметру заземлителя по возможности равномерно, то есть на одинаковом расстоянии один от другого; глубина погружения электродов в землю 0,8 м. При этих условиях сопротивление R_u искусственного заземлителя в самое неблагоприятное время года не будет превышать 0,62 Ом, а сопротивление заземлителя подстанции в целом R_3 , то есть общее сопротивление искусственного и естественного заземлителей будет не более 0,5 Ом.

Задание для самостоятельного выполнения.

1. Произвести расчет заземления подстанции 110/35/6 кВ согласно варианту (табл. 4).

Рассчитать заземлитель в двухслойной земле методом наведенных потенциалов по допустимому сопротивлению подстанции 110/35/6 кВ, в качестве естественного заземлителя предполагается использовать систему трос – опоры двух подходящих к подстанции воздушных линий электропередачи 110 кВ на металлических опорах с длиной пролета $\ell = 250$ м; каждая линия имеет один стальной грозозащитный трос сечением $s = 50 \text{ мм}^2$; расчетное (с учетом сезонных колебаний) сопротивление заземления одной опоры $r_{\text{оп}} = 12 \text{ Ом}$; число опор с тросом на каждой линии больше 20; данные измерений сопротивления системы трос – опоры отсутствуют.

Т а б л и ц а 4

№ п/п	Территория подстанции, м ²	Горизон- тальный электрод, мм	Вертикальный электрод		Расчетное удельное сопротивле- ние земли		Мощность верхнего слоя земли, м	Расчетный ток замыкания на землю		
								110 кВ	35 кВ	6 кВ
			ℓ, м	d, мм	ρ ₁ , Ом·м	ρ ₂ , Ом·м		кА	А	А
1/16	6000	4 × 40	5	12	200	70	2,8	5	45	30
2/17	6500	4 × 40	5	12	250	80	2,8	5	45	30
3/18	7000	4 × 40	3	10	240	75	2,5	4	40	25
4/19	7500	4 × 40	3	10	180	60	2,5	4	40	25
5/20	8000	4 × 40	3	10	190	65	2,5	4	40	25
6/21	5500	4 × 40	5	12	200	80	2,8	5	45	25
7/22	5000	4 × 40	5	12	210	85	2,6	5	45	30
8/23	7200	4 × 40	4	12	240	75	2,6	4	40	30
9/24	8200	4 × 40	4	12	175	80	2,6	4	40	30
10/25	6700	4 × 40	4	12	200	80	2,6	4	40	25
11/26	5700	4 × 40	3	12	230	75	2,4	5	35	25
12/27	7800	4 × 40	3	12	195	80	2,4	5	35	25
13/28	5200	4 × 40	5	12	200	75	2,6	4	35	20
14/29	5500	4 × 40	5	12	210	85	2,6	4	35	20
15/30	6200	4 × 40	5	12	220	80	2,6	4	35	20

РАСЧЕТ ЗАНУЛЕНИЯ

Зануление – преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановки, могущих оказаться под напряжением с глухозаземленной нейтральной точкой обмотки источника тока в трехфазных сетях, с глухозаземленным выводом источника тока в однофазных сетях и с глухозаземленной средней точкой обмотки источника энергии в сетях постоянного тока.

Принципиальная схема системы зануления в трехфазных сетях показана на рис. 14. Проводник, обеспечивающий указанные соединения зануляемых частей ЭУ с глухозаземленной нейтральной точкой и средней точкой обмоток источников тока называется нулевым защитным проводником.

Принцип действия зануления - превращение замыкания на корпус в однофазное КЗ (т.е. замыкание между фазным и НЗП) с целью вызвать большой ток, способный обеспечить срабатывание защиты и тем самым автоматически отключить поврежденную электроустановку от питающей сети. Такой защитой могут быть плавкие предохранители или автоматы максимального тока, магнитные пускатели со встроенной тепловой защитой, контакторы в сочетании с тепловым реле, осуществляющие защиту от перегрузки; автоматы с комбинированными расцепителями, осуществляющие защиту одновременно от токов КЗ и перегрузки.

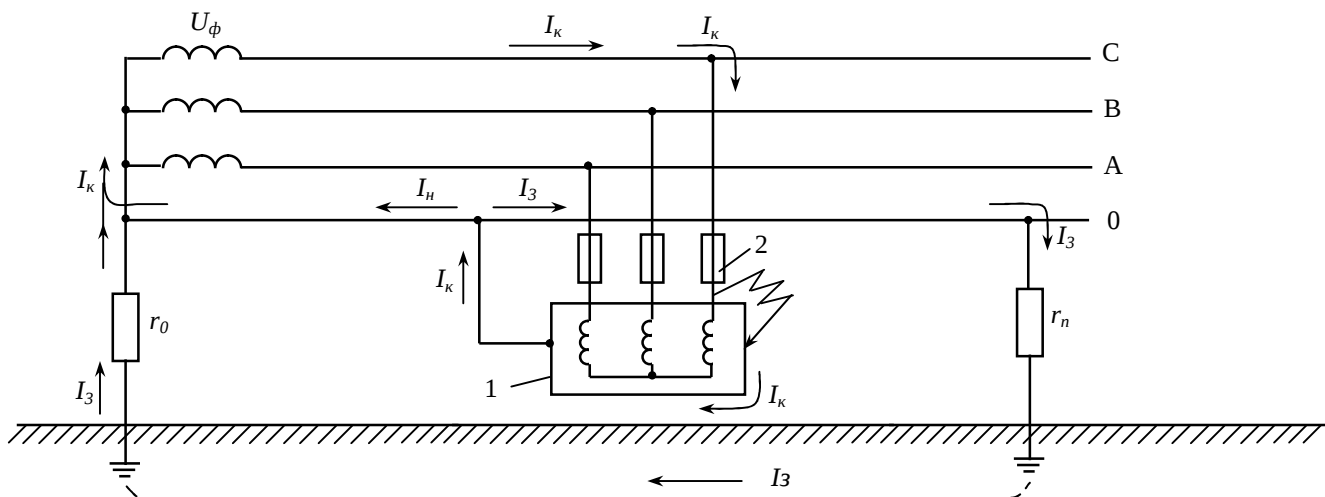


Рис. 14. Принципиальная схема зануления в трехфазной сети до 1000 В:

1 – корпус ЭУ; 2 – предохранители (аппараты защиты от токов КЗ); r_0 – сопротивление заземлений нейтрали обмотки источника тока; r_n – повторное заземление нулевого защитного проводника (НЗП); I_k – ток КЗ; I_n – часть тока КЗ, протекающего через НЗП; I_3 – часть тока КЗ, протекающего через землю

Кроме того, с момента возникновения замыкания на корпус и до момента отключения поврежденной ЭУ от сети проявляется защитное свойство зануления как заземление через НЗП, то есть заземление корпусов через НЗП снижает в аварийный период их напряжение относительно земли.

Таким образом, зануление осуществляет два защитных действия: быстрое автоматическое отключение поврежденной ЭУ от питающей сети и снижение напряжения зануленных металлических нетоковедущих частей, оказавшихся под напряжением относительно земли.

Область применения – трехфазные четырехпроводные сети до 1000 В с глухо заземленной нейтралью (сети 660/380, 380/220 и 220/127 В). Зануление применяется в трехпроводных сетях постоянного тока с глухозаземленной средней точкой обмотки источника энергии, а также в однофазных двухпроводных сетях переменного тока с глухозаземленным выводом обмотки источника тока.

Обоснование эффективности зануления как системы, обеспечивающей снижение напряжения зануленных металлических нетоковедущих частей относительно земли в аварийный период, заключается в следующем.

В сети с заземленной нейтралью при занулении (рис. 15) U_{ϕ} , В, разделится пропорционально сопротивлениям замыкания фазы на землю $r_{зм}$, Ом, и заземления нейтрали r_0 , Ом, благодаря чему U_{ϕ} , В, уменьшится и будет равно падению напряжения на сопротивлении заземления нейтрали:

$$U_k = I_3 \cdot r_0 = \frac{U r_0}{r_3 + r_0}, \quad (26)$$

где I_3 – ток замыкания на землю, А.

Как правило, сопротивление r_3 , которое оказывает грунт току при случайном замыкании фазы на землю, во много раз больше сопротивления специально выполненного заземления нейтрали r_0 . Поэтому U_k оказывается незначительным. Например, при $U_\phi = 220$ В; $r_0 = 4$ Ом; $r_3 = 100$ Ом; $U_k = 220 \cdot 4 / (4 + 100) = 8,5$ В.

Однако такая сеть без повторного заземления НЗП применяться не должна, так как таит опасность поражения током в случае обрыва НЗП. Поэтому правила устройства ЭУ требуют применения повторного НЗП, которое следует учитывать при выполнении значения U_k .

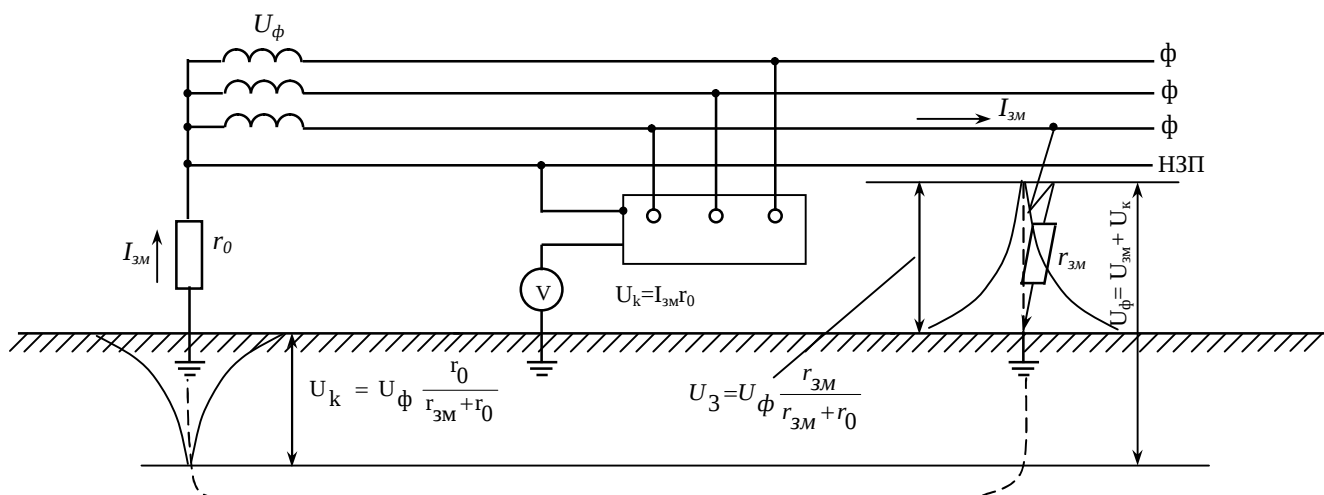


Рис. 15. Замыкание фазы на землю в трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью

При отсутствии повторного заземления НЗП с сопротивлением r_n , Ом (рис. 16), участок НЗП, находящийся за местом замыкания, и все присоединенные к нему корпуса окажутся под напряжением относительно земли U_n , В, равным

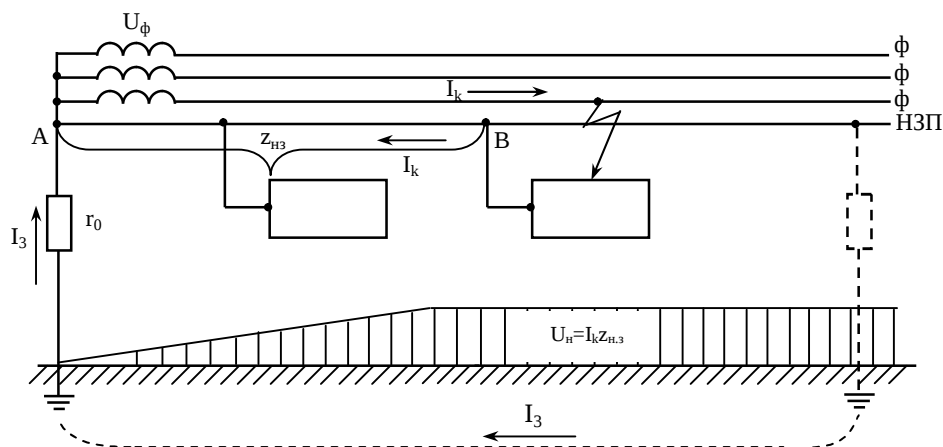


Рис. 16. Замыкание на корпус в сети, не имеющей повторного заземления НЗП

$$U_n = I_k r_{н.з.}, \quad (27)$$

где I_k – ток КЗ, приходящий по петле фаза-нуль, А; $z_{н.з.}$ – полное сопротивление участка НЗП, обтекаемого током I_k , Ом (т.е. участка АВ):

$$z_{н.з.} = \sqrt{R_{н.з.}^2 + x_{н.з.}^2},$$

где $R_{н.з.}$ и $x_{н.з.}$ – активное и индуктивное сопротивление НЗП (участка АВ), Ом.

На другом участке нулевого защитного проводника (ближе к источнику энергии) напряжение будет изменяться от U_n до 0 по прямой на линии (см. рис. 16).

Если для упрощения пренебречь сопротивлением обмоток источника тока и индуктивным сопротивлением петли фаза-нуль, а также считать, что фазный и нулевой защитный проводник обладают лишь активным сопротивлением R_ϕ , $R_{н.з.}$, Ом, то формула (27) примет вид

$$U_n = I_k R_{н.з.} = \frac{U_\phi}{R_\phi + R_{н.з.}} R_{н.з.} \quad (28)$$

Если принять $R_{н.з.} \leq 2R_\phi$, то $U_n \leq (2/3)U_\phi$. Например, в сети 380/220 В при $R_{н.з.} = 2R_\phi$ напряжение относительно земли и участка НЗП, находящегося за местом замыкания, $U_n \leq (2/3) \cdot 220 = 147$ В. Очевидно, при этом создается реальная угроза поражения людей электрическим током.

Если НЗП будет иметь повторное заземление сопротивлением r_n , Ом (рис. 4), то U_n снизится до значения, В,

$$U_n = I_3 r_n = \frac{U_{AB}}{r_n + r_0} r_n, \quad (29)$$

где I_3 – ток, стекающий в землю через сопротивление r_n , А; U_{AB} – падение напряжения НЗП на участке АВ.

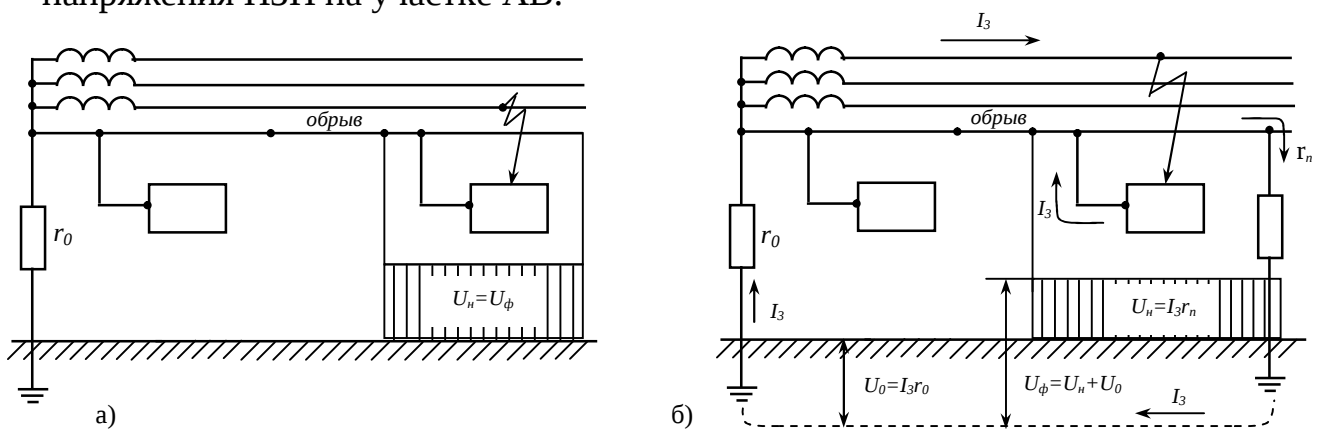


Рис. 17. Замыкание на корпус при обрыве НЗП:

а – сеть без повторного заземления НЗП; б – сеть с повторным заземлением НЗП

При ранее принятом допущении ($R_{н.з.} = 2R_{\phi}$) падение напряжения в фазном проводе составит $\frac{U_{\phi}}{3}$, а в НЗП $\frac{2U_{\phi}}{3}$. Тогда последнее выражение примет вид

$$U_n = \frac{2U_{\phi}}{3} \frac{r_n}{r_n + r_0}. \quad (30)$$

При одинаковых значениях r_0 и r_n получим $U_n = \frac{U_{\phi}}{3}$, то есть при $U_{\phi} = 220$ В $U_n = 74$ В. Это в два раза меньше, чем при отсутствии повторного заземления НЗП. При увеличении количества повторных заземлений U_n может быть до требуемых значений.

При случайном обрыве нулевого защитного проводника и замыкании фазы на корпус за местом обрыва (при отсутствии повторного заземления) напряжение относительно земли участка нулевого проводника за местом обрыва и всех присоединенных к нему корпусов, в том числе корпусов исправных установок, окажется близким по значению к фазному напряжению сети. Это напряжение будет существовать длительно, поскольку поврежденная установка автоматически не отключится и ее будет трудно обнаружить среди исправных установок, чтобы отключить вручную.

Если же нулевой защитный проводник будет иметь повторное заземление, то при обрыве его сохранится цепь тока I_3 . А, через землю, благодаря чему напряжение зануленных корпусов, В, находящихся за местом обрыва, снизится до U_n

$$U_n = I_3 r_n = \frac{U_{\phi} r_n}{r_0 + r_n}.$$

При этом, однако, корпуса установок, присоединенных к нулевому защитному проводнику до места обрыва, приобретут напряжение относительно земли, В:

$$U_0 = I_3 \cdot r_0 = \frac{U_{\phi} r_0}{r_3 + r_n},$$

где r_0 - сопротивление заземления нейтрали источника тока, Ом.

В частном наиболее благоприятном случае, когда $r_n = r_0$, все установки, присоединенные к нулевому защитному проводнику, как до места обрыва, так и после него, будут находиться под одинаковым напряжением:

$$U_n = U_0 = 0,5 U_{\phi}.$$

Во всех случаях $U_n + U_0 = U_{\phi}$ и, следовательно, напряжения между обоими участками нулевого защитного проводника или между корпусами, присоединенными к этим участкам, то есть напряжения до места обрыва и после него, в сумме будут равны фазному напряжению.

Итак, повторное заземление нулевого защитного проводника значительно уменьшает опасность поражения током, возникающую в результате обрыва нулевого проводника и замыкания фазы на корпус за местом обрыва, но не может устранить ее полностью, то есть не может обеспечить тех условий безопасности, которые существовали до обрыва. В связи с этим требуется тщательная прокладка нулевого защитного проводника, чтобы исключить возможность его обрыва; в нулевом защитном проводнике запрещается ставить выключатели, предохранители и другие приборы, способные нарушить его целостность.

Таким образом, назначение повторного заземления защитного проводника – снижение напряжения относительно земли зануленных конструкций в период замыкания фазы на корпус как при исправной схеме зануления, так и в случае обрыва нулевого защитного проводника. Без повторного заземления напряжение нулевого защитного проводника может достигать недопустимых значений, поэтому такая схема зануления применяться не должна.

Расчет зануления имеет целью определение условий, при которых оно надежно выполняет быстрое отключение поврежденной установки от сети и в то же время обеспечивает безопасность прикосновений человека к зануленному корпусу в аварийный период.

Таким образом, целью расчета зануления является определение сечения нулевого провода, удовлетворяющее условию срабатывания максимального токового запуска.

1. Расчет на отключающую способность

При замыкании фазы на корпус электроустановка автоматически отключается, если значения тока однофазного КЗ удовлетворяют условию

$$I_k \geq KI_{ном}, \quad (31)$$

где K – коэффициент кратности номинального тока $I_{ном}$, А, плавкой вставки предохранителя или уставки тока срабатывания автоматического выключателя, А.

Для защиты, осуществляемой автоматическим выключателем, имеющим только электромагнитный расцепитель (отсечку), то есть срабатывающим без выдержки времени, коэффициент кратности K принимается в пределах 1,25...1,4.

Если установка защищается плавкими предохранителями, время перегорания которых зависит, как правило, от тока (уменьшается с ростом тока), а также автоматическим выключателем с обратной зависимостью от тока, то в целях ускорения отключения принимают $K \geq 3$.

Расчетная величина тока КЗ определяется из выражения

$$I_k = \frac{U_\phi}{\left(\frac{z_m}{3} + z_{\phi, np.} + z_{н.з.} \right)}, \quad (32)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети, В; z_m – полное сопротивление обмоток трансформатора, Ом; $z_{\phi, np.}$ – полное сопротивление фазного проводника, Ом; $z_{н.з.}$ – полное сопротивление нулевого защитного проводника, Ом, или

$$I_k = \frac{U_\phi}{\frac{z_m}{3} + z_n}, \quad (33)$$

где $z_n = z_{\phi, np.} + z_{н.з.}$.

Если принять $\frac{z_m}{3} + z_{\phi, np.} = z_\phi$, то ток КЗ будет

$$I_k = \frac{U_\phi}{z_\phi + z_{н.з.}}, \quad (34)$$

где $z_\phi + z_{н.з.}$ – полное сопротивление петли фаза-нуль, Ом.

Например, если $z_\phi + z_{н.з.} = 0,2$ Ом, то ток КЗ в сетях 380/220 В $I_k = \frac{220}{0,2} = 1100$ А. Очевидно, что при таком токе защита должна сработать.

При более точных расчетах следует учитывать комплекс полного сопротивления петли фаза-нуль (z_n):

$$\underline{z}_n = \underline{z}_\phi + \underline{z}_{н.з.} + jx_n,$$

где $\underline{z}_{н.з.} = R_{н.з.} + jx_{н.з.}$; $\underline{z}_\phi = R_\phi + jx_\phi$, R_ϕ и $R_{н.з.}$ – активные сопротивления фазного и нулевого защитного проводников; x_ϕ и $x_{н.з.}$ – внутренние индуктивные сопротивления фазного и НЗП; x_n – индуктивное сопротивление петли фаза-нуль, тогда расчетная формула в действительной форме имеет вид

$$KI_{ном} \leq \frac{U_\phi}{z_T / 3 + \sqrt{(R_\phi + R_{н.з.})^2 + (x_\phi + x_{н.з.} + x_n)^2}}. \quad (35)$$

Сечение НЗП и его материал принимаются заранее, из условия, чтобы полная проводимость НЗП была менее 50 % полной проводимости фазного провода, т.е. $1/z_{н.з.} \leq 1/2z_\phi$ или $z_{н.з.} \leq 2 z_\phi$.

Это условие установлено ПУЭ, которое рекомендует применять в качестве НЗП неизолированные или изолированные проводники, а также различные металлоконструкции зданий, подкрановые пути, стальные трубы электропроводок, трубопроводы и т.п.

Рекомендуется использовать нулевые рабочие проводники (НРП) одновременно и как НЗП. При этом НРП должны обладать достаточной проводимостью (не менее 50 % проводимости фазного провода) и не должны иметь предохранителей и выпрямителей.

Значения z_m , Ом, зависят от мощности трансформатора, напряжения и схемы соединения его обмоток, а также от конструктивного выполнения трансформатора. При расчетах зануления z_m берется из таблицы.

Расчетные значения полных сопротивлений z_m , Ом, обмоток сухих трансформаторов при вторичном напряжении 400/230 В приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения обмоток	$\frac{z_m}{3}$, Ом	Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения обмоток	$\frac{z_m}{3}$, Ом
160	Δ/Y_H	0,055	560	Y/Y_H	0,0434
180	Y/Y_H	0,151	630	Δ/Y_H	0,014
250	Δ/Y_H	0,0354	750	Y/Y_H	0,0364
320	Y/Y_H	0,0847	1000	Δ/Y_H	0,009
400	Δ/Y_H	0,022			

Приближенные значения расчетных полных сопротивлений z_m , Ом, обмоток масляных трансформаторов приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	Z_m , Ом, при схеме соединения обмоток	
		Y/Y_H	Δ/Y_H и Y/Z_H
25	6 – 10	3,110	0,906
40	6 – 10	1,949	0,562
63	6 – 10	1,237	0,360
	20 – 35	1,136	0,407
100	6 – 10	0,799	0,226
	20 – 35	0,764	0,327
160	6 – 10	0,312	0,090
	20 – 35	0,478	0,203
250	6 – 10	0,305	0,130
400	6 – 10	0,195	0,056
	20 – 35	0,191	-
630	6 – 10	0,129	0,042
	20 – 35	0,121	-
1000	6 – 10	0,054	0,017
	20 – 35	0,051	0,020

Примечание. Значения R_ϕ и $R_{н.з.}$, Ом, для проводников из цветных металлов (медь, алюминий) определяется по известным данным: сечению S , мм², длине l , м, и материалу проводников.

Допустимые токовые нагрузки на кабели с алюминиевыми жилами или пластмассовой изоляцией, в свинцовой, полихлорвиниловой и резиновой оболочках, бронированные и небронированные в А приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Сечение токо-проводящей жилы в мм ²	Кабели и провода									
	Одно-жильные в воздухе	двужильные		трехжильные						
		в возд.	в земле	в возд.	в земле	в траншее при количестве кабелей				
						2	3	4	5	6
2,5	23	21	34	19	29	27	26	25	25	25
4	31	29	42	27	38	35	34	33	33	32
6	38	38	55	32	46	43	41	40	40	39
10	60	55	80	42	70	65	63	61	60	59
16	75	70	105	60	90	84	81	78	77	76
25	105	90	35	75	115	107	104	100	99	98
35	130	105	130	90	140	130	126	122	120	119
50	165	135	205	110	175	163	156	152	150	149
70	210	165	245	140	210	195	189	183	180	178
95	250	200	295	170	255	237	230	228	219	217
120	295	230	340	200	295	274	265	257	254	250
150	340	270	390	235	335	312	302	291	288	285
185	390	310	440	270	385	358	347	335	331	327
240	465	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Активные и индуктивные сопротивления стальных проводников при переменном токе (50 Гц), Ом/км, приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Размеры или диа- метр се- чения, мм	Сечени- емм ²	г ₀	х ₀	г ₀	х ₀	г ₀	х ₀	г ₀	х ₀
		При ожидаемой плотности тока в проводнике, А/мм ²							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
Полоса прямоугольного сечения									
20 x 4	80	5,24	3,14	4,30	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30 x 4	120	3,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30 x 5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	-	-
40 x 4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50 x 4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
50 x 5	250	2,10	1,26	1,60	0,97	1,28	0,77	-	-
60 x 5	300	1,77	1,06	1,34	0,80	1,08	0,65	-	-
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	8,2	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	3,84	5,3	3,2
10	78,54	7,2	4,32	5,4	3,24	4,2	2,52	-	-
12	113,1	5,6	3,36	4,0	2,40	-	-	-	-
14	150,9	4,55	2,73	3,2	1,92	-	-	-	-
16	201,1	3,721	3,23	2,7	1,6	-	-	-	-

Для стальных проводников внутреннее индуктивное сопротивление оказывается достаточно большим и его определяют с помощью таблиц, например, табл. 3. В этом случае также необходимо знать профиль и сечение проводника, его длину и ожидаемое значение тока I_k . Значение x_n , Ом, может быть определено по известной из теоретических основ электротехники формул для индуктивного сопротивления двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра d , м:

$$x_n = \omega L = \omega \frac{\mu_r \mu_0}{\rho} \ell \ln \frac{2D}{d}; \quad (36)$$

где ω - угловая скорость, рад/с; L - индуктивность линии, Гн; μ_r - относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 - магнитная постоянная, Гн/м, $\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7}$; ℓ - длина линии, м; D - расстояние между проводами линии, м.

Для линии длиной l км, проложенной в воздушной среде ($\mu_r = 1$) при частоте $f = 50$ Гц ($\omega = 314$ рад/с) формула (36) принимает вид, Ом/км,

$$x_n = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\rho} 10^3 \ln \frac{2D}{d} = 0,1256 \ln \frac{2D}{d}. \quad (37)$$

Из этого выражения видно, что внешнее индуктивное сопротивление зависит от расстояния между проводами D и их диаметром d . Однако, поскольку диаметр изменяется в незначительных пределах, влияние его также незначительно и, следовательно, x зависит в основном от D (с увеличением расстояния растет сопротивление). Поэтому в цепях уменьшение внешнего индуктивного сопротивления петли фаза-нуль НЗП необходимо прокладывать совместно с фазными проводниками или в непосредственной близости от них.

При малых значениях D , соизмеримых с d , сопротивление x_n незначительно (не более 0,1 Ом/км) и им можно пренебречь.

В практических расчетах обычно принимают $x_n = 0,6$ Ом/км, что соответствует расстоянию между проводами 70...100 мм (примерно). Такие расстояния бывают на воздушных линиях электропередачи от нулевого провода до наиболее удаленного фазного.

2. Расчет сопротивления заземления нейтрали

Сопротивление заземления нейтрали источника r_0 , Ом, должно быть таким, чтобы в случае замыкания какой-либо фазы на землю через сопротивление $r_{зм}$, Ом, напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшись к зануленному корпусу или к НЗП непосредственно, не превышало допустимого напряжения прикосновения $U_{np \text{ доп}}$, В, то есть

$$U_k a_1 a_2 \leq U_{np \text{ доп}};$$

где $U_k = I_3 r_0$ - напряжение зануленного корпуса (НЗП) относительно земли, В; I_3 - ток замыкания на землю, А; α_1 и α_2 - коэффициент напряжения прикосновения.

При рассмотрении наиболее тяжелого случая, когда α_1 и α_2 равны единице, а в сети отсутствуют повторные заземления НЗП,

$$U_{\text{прдоп}} \geq I_3 r_0 = U_\phi \frac{r_0}{r_0 + r_{\text{зм}}},$$

откуда

$$r_0 \leq r_{\text{зм}} \frac{U_{\text{прдоп}}}{U_\phi - U_{\text{прдоп}}}. \quad (38)$$

Обычно принимают $r_{\text{зм}} = 20$ Ом, меньшие значения маловероятны. Поскольку при замыкании фазы на землю сеть при занулении от источника питания автоматически, как правило, не отключается и зануленные корпуса будут длительно находиться под напряжением U_k (до устранения повреждения или отключения вручную сети, либо поврежденных фаз от источника питания), принимаем длительно допустимое напряжение прикосновения

$$U_{\text{прдоп}} = 36 \text{ В.}$$

При этих условиях получим наибольшие допустимые значения сопротивления заземления нейтрали r_0 : 7,9 Ом для сети 220/127 В; 3,9 Ом для сети 380/220 В; 2,1 Ом для сети 660/380 В.

3. Расчет сопротивления повторного заземления нулевого защитного проводника

При замыкании фазы на зануленный корпус (рис. 5) НЗП на участке за ближайшим к месту замыкания повторным заземлением (т.е. за точкой А на рис. 5), а также зануленное оборудование, присоединенное к этому участку проводника, оказываются под некоторым напряжением относительно земли U_n . Наибольшее значение этого напряжения, В,

$$U_{n \text{ max}} = \frac{I_3 r_n}{n}, \quad (39)$$

где I_3 – часть тока однофазного КЗ, стекающего в землю через повторные заземления НЗП, А; r_n – сопротивление одного повторного заземления НЗП (принимаем, что все повторные заземления обладают одинаковыми сопротивлениями), Ом; n – количество повторных заземлений НЗП.

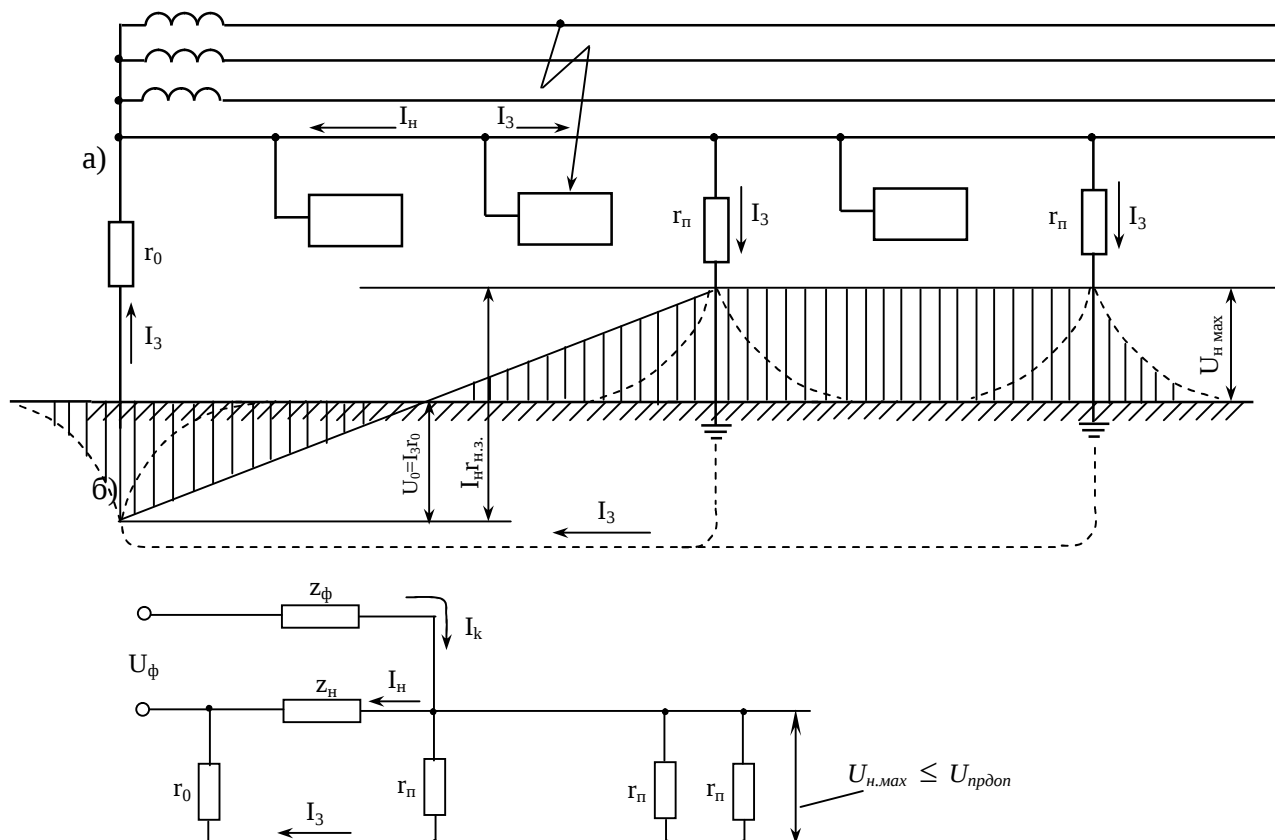


Рис. 18. К расчету повторного заземления НЗП:
а – замыкание фазы на корпус; б – схема замещения

Это напряжение существует до момента отключения защиты поврежденной установки, то есть кратковременно. Однако значение $U_{H \max}$ может быть достаточно большим и представлять опасность для людей даже при кратковременном его существовании. Кроме того, при отказе или задержке защиты (из-за неисправности автоматического выключателя, завышенных уставок, а также при несоответствующих плавких вставках предохранителей и т.п.) это напряжение может существовать длительно.

В целях устранения возникшей при этом опасности поражения людей необходимо, чтобы $U_{H \max} \leq U_{nр. доп}$. Очевидно, что это условие будет выполнено при определенном значении r_n , которое может быть найдено из схемы замещения (см. рис. 18,б):

$$U_{nр. доп} \geq U_{H \max} \quad U_{nр. доп} \geq U_{H \max} = \frac{I_3 r_n}{n} = \frac{I_H z_{H.з}}{(r_0 + \frac{r_n}{n})n};$$

$$r_n \leq n r_0 \frac{U_{nр. доп}}{I_H z_{H.з} - U_{nр. доп}}, \quad (40)$$

где I_n - часть тока однофазного КЗ, проходящего по НЗП от места замыкания фазы на корпус до нейтральной точки источника тока, А; $z_{н.з}$ - полное сопротивление участка НЗП, по которому проходит ток I_n , Ом. Это сопротивление находят по формуле

$$z_{н.з} = \sqrt{R_{н.з}^2 + (x_{н.з} + 0,5x_n)^2}, \quad (41)$$

где $R_{н.з}$ и $x_{н.з}$ - активное и индуктивное сопротивления НЗП, Ом; x_n - внешнее индуктивное сопротивление петли фаза-нуль, Ом.

Если допустить, что $I_n = I_k$, то искомое сопротивление повторного заземления НЗП

$$z_n \leq nr_0 \frac{U_{нр.дон}}{I_k z_{н.з} - U_{нр.дон}}. \quad (42)$$

В простейшем случае, когда $X_{нз} = X_n = 0$, и с учетом того, что $I_k Z_{нз} = \frac{2U_\phi}{3}$, уравнение (17) примет вид

$$r_n \leq nr_0 \frac{U_{нр.дон}}{\frac{2U_\phi}{3} - U_{нр.дон}}, \quad (43)$$

общее всех повторных заземлений НЗП каждой воздушной линии 20, 10 и 5 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 600 В источника трехфазного тока.

Как указывалось, действующие ПУЭ предусматривают повторные заземления лишь нулевых рабочих проводов воздушных линий, которые используются одновременно и как нулевые защитные проводники. При этом в любое время года сопротивление растеканию заземлителей должно быть не более:

- каждого из повторных заземлений нулевого проводника - 60, 30 и 15 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220 и 38 В источника однофазного тока;

- общее всех повторных заземлений нулевого провода каждой воздушной линии – 20, 10 и 5 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источнике трехфазного тока или 127, 220 и 380 В источника однофазного тока.

При удельном электрическом сопротивлении земли ρ , превышающем 100 Ом·м, допускается увеличивать указанные значения сопротивлений до $\rho/100$, но не более чем в 10 раз.

Примеры расчетов

Задача 1. Определить активное сопротивление $R_{н.з}$ стальной полосы прямоугольного сечения $S = 40 \times 4$ мм, длиной $l = 0,2$ км, используемой в качестве нулевого защитного проводника электродвигателя. Номинальный ток плавких вставок предохранителей, защищающих электродвигатель, $I_{ном} = 125$ А, коэффициент кратности тока $\kappa = 3$.

Решение. Ожидаемый ток КЗ $I_{\kappa} \geq \kappa I_{ном} = 125 \cdot 3 = 375$ А, ожидаемая плотность тока в стальной полосе $j = I_{\kappa} / S = 375 / (40 \cdot 4) = 2$ А/мм².

По табл. 2.3 находим для полосы сечением 40×4 мм при $j = 2$ А/мм² $r_0 = 1,54$ Ом/км.

Тогда искомое активное сопротивление полосы $R_{н.з} = r_0 l = 1,54 \cdot 0,2 = 0,308$ Ом.

Задача 2.

Определить внутреннее индуктивное сопротивление стальной полосы 40×4 мм, длиной $0,2$ км при условиях, указанных в задаче 1.

Решение. Ожидаемые значения $I_{\kappa} = 375$ А, $j = 2$ А/мм² (см. решение задачи 1). Находим для полосы сечением 40×4 мм при $j = 2$ А/мм² $x_{н.з} = x_{60} l = 0,92 \cdot 0,2 = 0,184$ Ом.

Задача 3. Определить внешнее индуктивное сопротивление x_n петли фаза-нуль для трех случаев:

1. Расстояние между фазным и нулевым проводами $D = 1$ см (в качестве НПЗ используется четвертая жила или алюминиевая отключка кабеля, или стальная труба, в которой проложены фазные провода, и т.п.).

2. $D = 60$ см.

3. $D = 300$ см.

Диаметры обоих проводов одинаковы ($d = 1,4$ см), частота 50 Гц.

Решение. По формуле $x_n = 0,1256 \ln \frac{2D}{d}$. Находим:

1) при $D = 1$ см $x_n = 0,1256 \ln \frac{2}{1,4} = 0,038$ Ом/км;

2) при $D = 60$ см $x_n = 0,1256 \ln \frac{120}{1,4} = 0,56$ Ом/км;

3) при $D = 300$ см $x_n = 0,1256 \ln \frac{600}{1,4} = 0,76$ Ом/км.

Задача 4. Проверить, обеспечена ли отключающая способность зануления в сети, показанной на рис.6, при том, что нулевой защитный провод-

ник – стальная полоса сечением 40х4 мм. Линия 380/220 В с медными проводами питается от трансформатора ТСЗ-63/10 со схемой соединения обмоток «треугольник»/«звезда». Тип электродвигателей - 4А160М2У3. Коэффициент кратности тока $\kappa = 1,25$, $\frac{I_n}{I_{ном}} = 7$, $\cos \varphi = 0,92$

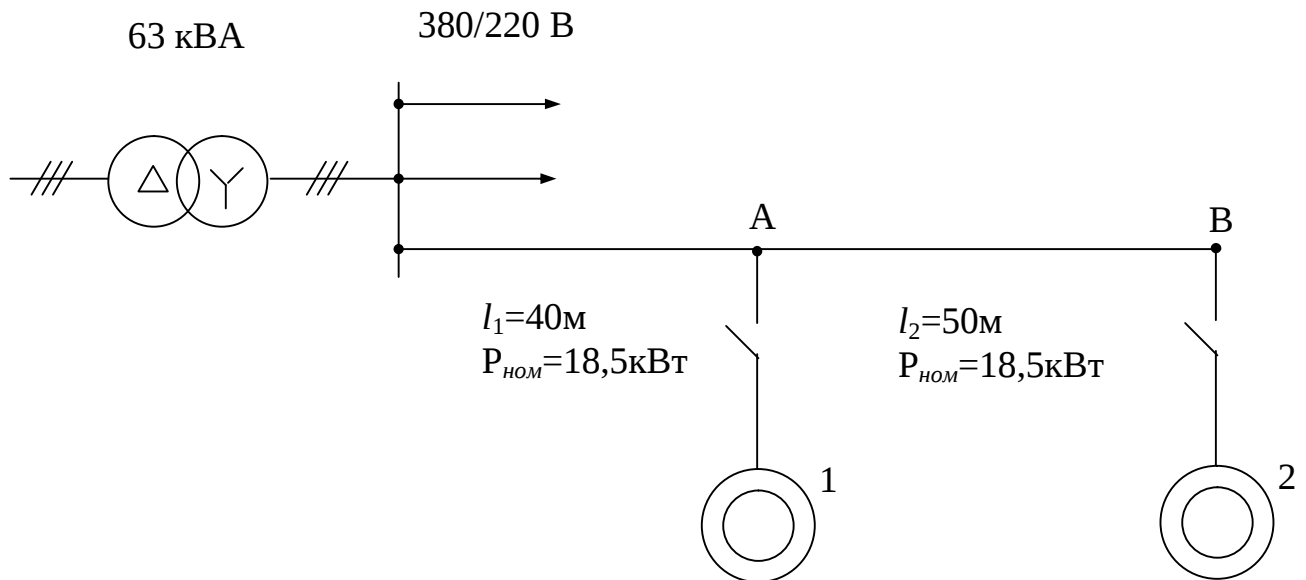


Рис. 19. Схема сети к задаче 4

Решение. 1. Определяем номинальный ток одного двигателя

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi} = \frac{18500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,92} = 30,6 \text{ А}.$$

Пусковой ток двигателя

$$I_{пуск} = n \cdot I_{ном} = 7 \cdot 30,6 = 214 \text{ А},$$

где $n = I_n/I_{ном} = 7$ – кратность пускового тока двигателя

Для защиты двигателей выбираем автоматический выключатель А 3710Б, у которого ток срабатывания электромагнитного расцепителя составляет 250 А.

Условие выбора выключателя – $I_{ср.расц} = 250 \text{ А} > I_n = 214 \text{ А}$.

1. Выбираем сечения кабелей, по которым питаются двигатели, по экономической плотности тока

$$S = \frac{I_p}{j} = \frac{2 \cdot 30,6}{1,4} = 47 \text{ мм}^2,$$

$j = 1,4 \text{ А/мм}^2$ – экономическая плотность тока для кабелей с резиновой изоляцией с медными жилами при продолжительности нагрузки более 3000 часов в год.

Выбираем медный кабель 3х50 мм².

2. Произведем проверку условий срабатывания при замыкании на корпус электродвигателей.

Наименьшее допустимое значение $I_{кз}$ для обоих двигателей

$$I_{кз} = 1,25 \cdot 250 = 312,5 \text{ А},$$

где $\kappa = 1,25$ – коэффициент кратности защиты.

3. Находим сопротивление трансформатора при $S = 63$ кВА из табл. 2.2 $Z_m = 0,37 \text{ Ом}$.

4. Определяем сопротивление фазного и нулевого проводников на участке от трансформатора до второго электродвигателя на участке линии $l_1 + l_2 = 40 + 50 = 90$ м, поскольку в нашем случае ток короткого замыкания на корпусе второго электродвигателя меньший, чем на корпусе первого электродвигателя:

$$R_{\phi 2} = \frac{r(l_1 + l_2)}{S} = \frac{0,018 \cdot 90}{50} = 0,03 \text{ Ом};$$

поскольку фазный провод медный, принимаем $x_\phi = 0$.

Для НЗП используем стальную полосу 40х4 мм.

5. Определяем плотность тока в стальной полосе

$$j_{cn} = \frac{I_{кз}}{40 \cdot 4} = \frac{312,5}{40 \cdot 4} = 2 \text{ А/мм}^2.$$

По табл. 2.4 определяем для стальной полосы 40 х 4 при $j = 2 \text{ А/мм}^2$

$$r_0 = 1,54 \text{ Ом/км}, \quad x_0 = 0,92 \text{ Ом/км}.$$

Активное сопротивление полосы

$$R_{нз2} = r_0 \cdot (l_1 + l_2) = 1,54 \cdot 0,09 = 0,139 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление полосы

$$X_{нз2} = x_0 \cdot (l_1 + l_2) = 0,92 \cdot 0,09 = 0,0828 \text{ Ом}.$$

Т.к. $x_n = 0,6 \text{ Ом/км}$, тогда $X_{n2} = x_n \cdot (l_1 + l_2) = 0,6 \cdot 0,09 = 0,054 \text{ Ом}$.

6. Находим по формуле $I_\kappa = \frac{U_\phi}{\frac{Z_m}{3} + \sqrt{(R_\phi + R_{н.з})^2 + (x_\phi + x_{н.з} + x_n)^2}}$ действительное значение тока однофазного короткого замыкания, проходящего по

петле фаза-нуль при замыкании фазы на корпус второго двигателя:

$$I_{\kappa 2} = \frac{220}{0,37/3 + \sqrt{(0,03 + 0,139)^2 + (0,0828 + 0,054)^2}} = 378 \text{ А}.$$

Вывод. Действительное значение тока однофазного короткого замыкания составляет 378 А, что превышает допустимый по условиям срабатывания защиты ток 312,5А, значит нулевой защитный проводник выбран

правильно, то есть отключающая способность системы зануления обеспечена.

Задание для самостоятельного выполнения.

Произвести расчет зануления согласно варианту (табл. 9).

Т а б л и ц а 9

№ вари- анта	Трансформа- торы	Электродвигатели 3-хфазные				К-во эл. дв., шт.	Расстояния между потре- бит., м		Коэфф. кратности
		Типы элек- тродвигате- лей	$P_{ном},$ кВт	$\cos$ φ	$\frac{I_n}{I_{ном}}$		l_1	$l_2 = l_3$	
$n = 3000$ об/мин (синхр.)									
1	ТС3-25/10	4АМ132S8K	2,2	0,86	7,5	2	80	100	3,0
2	ТС3-25/10	4АМ132М8K	3,0	0,71	6,0	3	100	80	3,0
3	ТС3-40/10	4АМ132S6K	3,0	0,76	7,0	3	70	70	1,25
4	ТС3-40/10	4АМ132МА6K	4,0	0,81	7,0	2	60	80	3,0
5	ТС3-63/10	4АМ132SAK	5,5	0,86	7,5	3	60	70	1,25
6	ТС3-63/10	4АМ132SB2K	7,5	0,86	7,5	2	40	50	1,25
7	ТС3-63/10	4АМ160М4K	11,0	0,9	7,5	2	30	40	1,25
8	ТС3-100/10	4АМ1602Ж	15,0	0,9	7,0	2	60	50	1,25
9	ТС3-63/10	4АМ160М2Ж	18,5	0,92	7,0	3	40	50	1,25
10	ТС3-100/10	4АМ1802Ж	22,0	0,89	7,5	2	50	50	3,0
11	ТС3-160/10	4АМ180М2Ж	30,0	0,89	7,5	2	100	80	1,25
12	ТС3-250/10	4АМ132МБ6K	5,5	0,8	7,0	2	80	60	1,25
13	ТС3-250/10	4АМ160М4K	14,0	0,87	7,5	2	60	60	3,0
14	ТС3-400/10	4АМ1804Ж	19,0	0,88	7,0	2	100	80	1,25
15	ТС3-400/10	4АМ180М4Ж	30,0	0,89	6,5	2	60	60	1,25
16	ТС3-25/10	4АМ132S8K	2,2	0,86	7,5	3	60	70	3,0
17	ТС3-40/10	4АМ132S6K	3,0	0,76	6,5	3	80	90	1,25
18	ТС3-160/10	4АМ180М2Ж	22,0	0,89	7,5	2	80	60	1,25
19	ТС3-250/10	4АМ160М4K	14,0	0,87	7,5	2	60	60	1,25
20	ТС3-63/10	4АМ160М4K	11,0	0,9	7,0	3	30	40	1,25
21	ТС3-40/10	4АМ132S6K	3,0	0,76	7,0	2	80	60	1,25
22	ТС3-25/10	4АМ132S8K	2,2	0,86	7,5	3	80	40	3,0
23	ТС3-63/10	4АМ160М4K	11,0	0,9	7,5	2	70	50	1,25
24	ТС3-160/10	4АМ180М2Ж	30,0	0,89	7,5	2	100	80	1,25
25	ТС3-63/10	4АМ160М4K	11,0	0,9	7,0	2	50	40	1,25
26	ТС3-160/10	4АМ132S8K	2,2	0,86	7,5	3	80	40	3,0
27	ТС3-100/10	4АМ160М4K	14,0	0,87	7,5	2	60	60	1,25
28	ТС3-250/10	4АМ160М4K	22,0	0,89	7,5	2	80	60	1,25
29	ТС3-25/10	4АМ132МБ6K	5,5	0,8	7,0	2	80	60	1,25
30	ТС3-40/10	4АМ160М2Ж	18,5	0,92	7,0	3	40	50	3,0

Приложения

Т а б л и ц а 1

**Коэффициенты использования η_v вертикальных заземлителей
из труб или уголков без учета влияния полосы связи**

Отношение расстояния между трубами (уголками) к их длине	При размещении в ряд		При размещении по контуру	
	Число труб (уголков)	η_v	Число труб (уголков)	η_v
1	2	0,84 – 0,87	4	0,66 – 0,72
	3	0,76 – 0,8	6	0,58 – 0,65
	5	0,67 – 0,72	10	0,52 – 0,58
	10	0,56 – 0,62	20	0,44 – 0,50
	15	0,51 – 0,56	40	0,38 – 0,44
	20	0,47 – 0,5	60	0,36 – 0,42
2	2	0,9 – 0,52	4	0,76 – 0,8
	3	0,85 – 0,88	6	0,71 – 0,75
	5	0,79 – 0,83	10	0,66 – 0,71
	10	0,72 – 0,77	20	0,61 – 0,66
	15	0,66 – 0,73	40	0,55 – 0,61
	20	0,65 – 0,7	60	0,52 – 0,58
3	2	0,93 – 0,95	4	0,84 – 0,86
	3	0,9 – 0,92	6	0,78 – 0,82
	5	0,85 – 0,88	10	0,74 – 0,73
	10	0,79 – 0,83	20	0,68 – 0,73
	15	0,76 – 0,8	40	0,64 – 0,69
	20	0,74 – 0,79	60	0,62 – 0,67

Т а б л и ц а 2

Коэффициент использования η_z соединительной полосы горизонтальных заземлителей из труб или уголков

Отношение расстояний между заземлителями к их длине	Число труб или уголков заземлителя					
	4	8	10	20	30	50
При расположении полосы в ряду труб или уголков						
1	0,77	0,67	0,62	0,42	0,31	0,21
2	0,89	0,79	0,75	0,56	0,46	0,36
3	0,92	0,85	0,82	0,68	0,58	0,49
При расположении полосы по контуру труб или уголков						
1	0,45	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21
2	0,55	0,43	0,4	0,32	0,3	0,28
3	0,7	0,6	0,56	0,45	0,41	0,37

Т а б л и ц а 3

Приближенные вычисления удельных сопротивлений грунтов

Грунт	Удельное сопротивление, 10^2 Ом·м	
	Возможные пределы колебаний	При влажности 10...12 % к массе грунта
Песок	1 – 4	7
Супесок	1,5 – 4	3
Суглинок	0,4 – 1,5	1
Глина	0,08 – 0,7	0,4
Чернозем	0,09 – 5,3	2,0
Речная вода	10,0	-
Морская вода	0,002 – 0,01	-

Т а б л и ц а 4

Значения расчетных климатических коэффициентов сопротивления грунта

Характер грунта	Глубина заложения, м	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3
Суглинок	0,8 – 3,8	2,0	1,5	1,4
Садовая земля до глубины 0,6 м, ниже – слой глины	0 – 3	-	1,32	1,2
Гравий с примесью глины	0 – 2	1,3	1,2	1,1
Ниже – глина				
Известняк	0 – 2	2,5	1,51	1,2
Гравий с примесью песка	0 – 2	1,5	1,3	1,2
Торф	0 – 2	1,4	1,1	1,0
Песок	0 – 2	2,4	1,56	1,2
Глина	0 – 2	2,4	1,36	1,2

К выбору аппаратов защиты. В качестве аппаратов защиты применяются автоматические выключатели или плавкие предохранители.

Выбор автоматов производится:

- по напряжению установки $U_{уст} \leq U_n$;
- по роду тока и его значению $I_p \leq I_n$;
- по коммутационной способности $I_{1\phi}(I_{3\phi}) \leq I_{откл}$,

где $U_{уст}$ – напряжение на установке, В; U_n – номинальное напряжение автомата, В; I_p – рабочий ток установки, А; I_n – номинальный ток автомата, А; $I_{1\phi}$ – ток однофазного короткого замыкания, кА; $I_{3\phi}$ – ток трехфазного короткого замыкания, кА.

Определение уставок автоматов производят, исходя из следующих условий.

Номинальный ток теплового, электромагнитного или комбинированного расцепителя проверяется по максимальному кратковременному пиковому току линии

$$I_{\text{ср.эл}} \geq I_{\text{пик}} \cdot k,$$

где k – кратность пикового тока относительно уставки.

Выбор предохранителей производится:

- по напряжению $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{н}}$;
- по току предохранителя $I_p \leq I_{\text{н}}$;
- по току отключения $I_{1\phi}(I_{3\phi}) \leq I_{\text{откл}}$.

Для инерционных предохранителей номинальный ток плавкой вставки определяется по длительному расчетному току линии. Для безинерционных предохранителей номинальный ток плавкой вставки определяется по следующим условиям: $I_{\text{вст}} \geq I_p$; $I_{\text{вст}} \geq \frac{I_{\text{пик}}}{k}$.

Т а б л и ц а 5

Технические данные предохранителей с закрытыми патронами

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Предельный ток отключения, кА	
		предохранителя	плавкой вставки	380 В	220 В
НПН2-60	380	60	6, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60	10	-
ПН2-100	380	100	30, 40, 50, 80, 100	100	100
ПН2-250	380	250	80, 100, 120, 150, 200, 250	100	100
ПН2-400	220	400	200, 250, 315, 355, 400	40	60
ПН2-600	220	600	300, 400, 500, 600	25	40
ПР-2	380	1000	600, 700, 850, 1000	20	20

Т а б л и ц а 6

Технические данные автоматических выключателей серии А 3000

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Ток уставки расцепителя, А	Предельный ток отключения, кА
A3160	50	220	15 - 50	2,5 – 4,5
A3110	100	380	15 - 100	2,5 – 10
A3120	200	380	15 - 100	18
A3130	200	380	100 - 200	14 – 25
A3140	600	380	250 - 600	32 – 40
A3710Б - A3740Б	160 - 630	440 - 660	250 - 600	40 - 60

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник / Р.К. Борисов и др. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.: ил.
2. Электробезопасность, теория и практика: учебник для вузов / П.А. Долин, В.Т. Ведмедев и др. – М.: МЭИ, 2012. – 280 с.
3. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок. Справочник. – СПб.: Политехника, 2015. – 400с.
4. Чекулаев В.Е., Горожанкина Е.Н. Охрана труда и электробезопасность. – М.: ФГБОУ, 2012. – 304 с.
4. Правила устройства электроустановок. – 7-е издание. – Омега-Л, 2016. – 272 с.

Учебное издание

Титаренко Оксана Николаевна

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

*Учебно-методическое пособие
по выполнению расчетных заданий*

В авторской редакции

Изд. № 104/17. Объем 3,25 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»