

И.В. Нижевский, В.И. Нижевский, В.И. Гуль

## К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ С ПРИЕМЛЕМОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗНОСА ЭЛЕКТРОДОВ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

*Приведений анализ показав, що вимогу значної відстані рознесення електродів трьохелектродної схеми вимірювання проблематично забезпечити в районах з щільною забудовою території. Запропонована методика визначення власних і взаємних опорів в трьохелектродній схемі вимірювання при використанні властивості взаємозамінюваності функцій електродів. Новизна методики полягає в тому, що її реалізація не вимагає пошуку місця нульового потенціалу для потенціального електроду.*

*Приведенный анализ показал, что требование значительного расстояния разноса электродов трехэлектродной схемы измерения проблематично обеспечить в районах с плотной застройкой территории. Предложена методика определения собственных  $\alpha_{ii}$  и взаимных  $\alpha_{ik}$  сопротивлений в трехэлектродной схеме измерения при использовании свойства взаимозаменяемости функций электродов. Новизна методики состоит в том, что её реализация не требует поиска места нулевого потенциала для потенциального электрода.*

Измерения сопротивления растеканию заземлителей различных конфигураций и в послойно неоднородных (по удельному сопротивлению) грунтах рассматриваются во многих работах. Отметим, что объём и уровень освещения особенностей такого измерения, достаточные для настоящей разработки, приведён в работе В.В. Бургсдорфа и А.И. Якобса [1]. Ниже использованы отдельные фрагменты указанной работы.

Методы измерения электрических характеристик заземляющих устройств должны обеспечивать следующие основные требования: ошибки при измерении не должны превышать 10 %; малую трудоёмкость измерения, практически полную электробезопасность персонала, выполняющего измерения, а также лиц, случайно прикасающихся во время измерения к заземлённым частям электроустановки.

Дополнительное требование, относящееся к методу и используемым приборам, – максимально возможная помехозащищённость. Известные методы измерений и используемые приборы пока не свободны от ряда недостатков и лишь частично соответствуют всем этим требованиям.

Сопротивление заземляющего устройства по определению численно равно отношению потенциала на заземляющем устройстве (в месте ввода тока) к току, стекающему с него в землю. Реально экспериментальное определение сопротивления заземляющего устройства сводится, в конечном счете, к одновременному измерению на нем напряжения и стекающего в землю тока. Для этого используют схему "амперметра и вольтметра", которая состоит из постороннего источника ЭДС, амперметра, вспомогательного (токового) заземлителя, потенциального электрода и вольтметра. Токовый заземлитель в большинстве случаев выполняют из одного или нескольких вертикальных электродов длиной от 1 до 3 м либо используют какой-либо существующий заземлитель сравнительно небольших размеров, например трансформаторной подстанции напряжением 10/0,38 кВ; при этом, однако, обязательно отсоединяют все естественные заземлители, включая нулевые защитные провода ВЛ напряжением 0,38 кВ.

В качестве потенциального электрода применя-

ют одиночный вертикальный электрод длиной от 1 до 3 м (чем ниже удельное сопротивление поверхностного слоя земли, тем короче может быть потенциальный электрод). Цепь тока образована последовательно включенными источником ЭДС, амперметром, испытуемым заземляющим устройством, землей и токовым заземлителем. Вольтметр включают между испытуемым заземляющим устройством и потенциальным электродом.

Ориентировочно оценить ожидаемое сопротивление простого составного заземлителя можно известным путем, используя коэффициент использования  $\eta$ . Например, при расположении трех ( $n = 3$ ) однометровых электродов диаметром 1 см по контуру (взаимоудаление 0,5 м) в грунте ( $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) получаем  $R_{\text{системы}} = 36,55 \text{ Ом}$  ( $R_{\text{одного}} = 95,4 \text{ Ом}$ ;  $\eta = 0,87$ ); при  $n = 6$  и тех же электродах с равномерным шагом по контуру имеем  $\eta = 0,7$  и  $R_{\text{системы}} = 22,7 \text{ Ом}$ .

Собственно контурный заземлитель трансформаторной подстанции имеет максимальное сопротивление на данной площади  $S$  при расположении по периметру незаглубленного (поверхностного) горизонтального заземлителя, которое определяется как

$$R_{\text{макс}} = \left( 0,233 - 183 \lg \frac{d_0}{\sqrt{S}} \right) \frac{\rho_{\text{ЭР}}}{\sqrt{S}}, \quad (1)$$

где  $d_0$  – диаметр круглого электрода заземлителя. При  $S = 36 \text{ м}^2$ ,  $d_0 = 1 \text{ см}$  и  $\rho_{\text{ЭР}} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $R_{\text{макс}} = 7,82 \text{ Ом}$ .

Размещение вертикальных электродов по периметру (длина электрода  $l_{\text{в}}$ , шаг размещения  $a$ ) снижает сопротивление до  $R_{\text{макс}} \cdot \Delta$ , где  $\Delta$  ориентировочно составляет от 0,7 до 0,9 при изменении отношения  $a/l_{\text{в}}$  соответственно в пределах от 2 до 8.

Источник ЭДС создает ток  $I_{\text{и}}$  в цепи между заземлителем объекта ( $R_3$ ) и токовым электродом ( $R_{\text{т}}$ ). Ток в грунте в свою очередь определяет в окрестностях электродов потенциальное поле и любой третий электрод получит некоторый потенциал  $\varphi_{\text{п}}$ , причем такой электрод-заземлитель как бы увеличивает проводимость некоторого объема грунта и снижает сопротивление для части общего тока в цепи  $R_3 - R_{\text{т}}$ . В результате действие третьего заземлителя характеризуется его сопротивлением заземления  $R_{\text{п}} = \varphi_{\text{п}} I_{\text{п}}^{-1}$  и

влиянием тока  $I_n$  на ток источника  $I$  в сторону его увеличения и, как следствие, снижается  $R_x$  против случая отсутствия такого третьего электрода.

Предположим для упрощения, что потенциальный электрод на ток в цепи  $R_3 - R_T$  не влияет, т.е. его, как третий заземлитель, рассматриваем только с точки зрения получения потенциальным электродом некоторого потенциала  $\varphi_n$ .

При пренебрежении также падением напряжения в заземляющих проводниках потенциал заземляющего устройства в точке ввода тока  $\varphi_3$ , наводится измерительным током  $+I_n$ , выходящим из него в землю, и током  $-I_n$  входящим из земли в токовый заземлитель:

$$\varphi_3 = R_3 I_n - \alpha_{3,T} I_n, \quad (1)$$

где  $\alpha_{3,T}$  – взаимное сопротивление между испытуемым и токовым заземлителем, численно равное отношению потенциала  $\varphi_{3,T}$ , который был бы наведен током  $I_T$ , стекающим с токового заземлителя в землю, если бы второй полюс электрической цепи был бы удален на очень большое теоретически бесконечное расстояние от токового заземлителя:

$$\alpha_{3,T} = \varphi_{3,T} / I_T. \quad (2)$$

Поля токов  $+I_n$  и  $-I_n$  в месте размещения зонда определяют потенциал зонда  $\varphi_n$

$$\varphi_n = \alpha_{n,3} I_n - \alpha_{n,T} I_n, \quad (3)$$

где  $\alpha_{n,3}$  и  $\alpha_{n,T}$  – взаимные сопротивления соответственно между зондом и испытуемым заземлителем, зондом и токовым заземлителем.

Напряжение между заземлителем  $R_x$  и потенциальным электродом, измеряемое вольтметром, с учетом соотношений (2) и (3) равняется

$$U_n = \varphi_3 - \varphi_n = [(R_3 - \alpha_{3,T}) - (\alpha_{n,3} - \alpha_{n,T})] I_n = [R_3 + \delta(R_3)] I_n, \quad (4)$$

где  $\delta(R_3) = \alpha_{n,T} - \alpha_{3,T} - \alpha_{n,3}$  – абсолютная систематическая ошибка измерения.

Соответствие точности измерения  $R_3$  основному требованию (относительная ошибка измерения не выше 10 %) может быть достигнуто лишь при относительной систематической ошибке измерения  $\Delta R_3$ , заведомо меньшей 10 %. Действительно, общая относительная ошибка измерения складывается из  $\Delta R_3$  и погрешности, обусловленной неточностью измерительного прибора. Современные переносные измерительные приборы имеют класс не выше 2,5.

Класс, как известно, характеризует наибольшую абсолютную ошибку измерения, равную произведению значения класса на соответствующий предел измерения, деленный на 100.

Поэтому и действует известное правило: так выбирать предел измерения, чтобы отсчет производить вблизи правой границы шкалы. При этом относительная ошибка измерения все равно несколько превышает класс прибора.

Обычно предел измерения удается подобрать лишь так, чтобы отсчет приходился примерно на среднюю часть шкалы. В этом случае даже при равномерной шкале прибора относительная ошибка измерения превышает класс в 2 раза. Поэтому при классе прибора 2,5 обычная относительная ошибка измерения прибором составляет около 5 %, и на долю до-

пустимого  $\Delta(R_3)$  остается также лишь около 5 %. Следовательно, геометрию расположения токового заземлителя и зонда требуется выбрать такой, чтобы  $\Delta(R_3)$  не превышала 5 %.

Имеются два принципиально различных пути уменьшения  $\Delta(R_3)$ .

**Первый** состоит в уменьшении  $\alpha_{n,T}$ ,  $\alpha_{3,T}$  и  $\alpha_{n,3}$ . Достигнуть этого можно только увеличением расстояния между потенциальным электродом  $\Pi$ , токовым заземлителем  $T$  и испытуемым заземляющим устройством  $З$ . Расчеты показывают, что погрешность  $\Delta(R_3)$  меньшая 5 %, будет достигнута, если расстояния между  $\Pi$ ,  $T$  и  $З$  будут в 8 раз и более превышать размер большей стороны фигуры, образованной контуром заземлителя. Очевидно, что такой разнос потенциального электрода и токового заземлителя осуществить трудно, в особенности в случае заземлителя, имеющего в плане значительные размеры.

**Второй** путь заключается в подборе такого взаимного расположения  $\Pi$ ,  $T$  и  $З$ , при котором  $\Delta(R_3)$  теоретически должно равняться нулю, этот путь рассмотрен Ослоном А.Б. [2]. И в частном случае земли с однородным удельным сопротивлением не вызывает сомнений, что по мере удаления от заземлителя, имеющего любую конфигурацию, электрическое поле стекающего с него тока все больше приближается по форме к полю точечного источника, расположенного в геометрическом центре заземлителя. Так, поле тока простого вертикального заземлителя длиной  $l_b$  уже на расстоянии по горизонтали, равном  $4l_b$ , отличается всего на 1 % от поля тока точечного источника. Аналогичная картина для поля тока заземлителя в виде круглой пластины с диаметром  $D$  (идеализированное представление сложного заземлителя) наблюдается на расстоянии от центра заземлителя, равном  $2D$ . Это дает основание при расстояниях, превышающих  $4l_b$  для простых вертикальных заземлителей и  $2D$  для сложных заземлителей (здесь  $D$  – размер наибольшей диагонали заземлителя), использовать при расчете взаимных сопротивлений простейшую формулу для точечного источника тока  $T$  и точки  $M$ , расположенных на поверхности земли на расстоянии  $r_{MT}$  друг от друга:

$$\alpha_{MT} = \rho / 2\pi r_{MT}. \quad (5)$$

Примем, что электроды  $\Pi$  и  $T$  расположены друг от друга и от центра  $З$  на расстояниях, при которых для расчета их взаимных сопротивлений допустимо использовать формулу (5). Обозначим расстояния  $r_{\Pi,T}$ ,  $r_{3,T}$ ,  $r_{\Pi,3}$ , соответственно между  $\Pi$  и  $T$ ,  $З$  и  $T$ ,  $\Pi$  и  $З$  и запишем условие равенства нулю ошибки  $\delta(R_3)$ :

$$\begin{aligned} \delta(R_3) &= \alpha_{\Pi,T} - \alpha_{3,T} - \alpha_{\Pi,3} = \\ &= \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{\Pi,T}} - \frac{1}{r_{3,T}} - \frac{1}{r_{\Pi,3}} \right) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет геометрию расположения токового заземлителя и потенциального электрода, при которой погрешность измерения  $R_3$ , обусловленная взаимным влиянием  $З$ ,  $T$  и  $\Pi$ , равна нулю. Отметим три частных случая взаимного расположения  $З$ ,  $T$  и  $\Pi$ , удовлетворяющих уравнению (6).

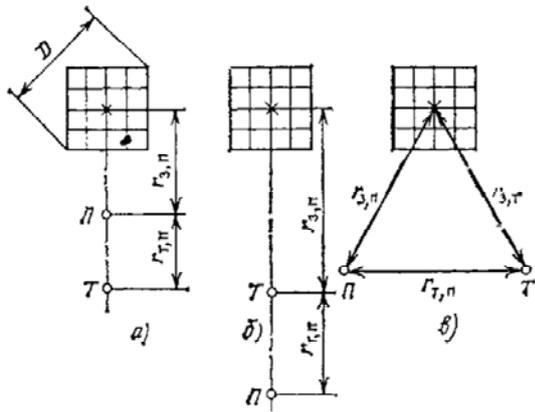


Рис. 1. Основные схемы взаимного расположения заземлителя  $Z$  и электродов  $T$  и  $P$ : а, б – однолучевые схемы; в – двухлучевая схема ( $x$  – центр заземлителя)

Первый случай (рис. 1,а):  $Z$ ,  $P$  и  $T$  расположены на одной прямой – однолучевая схема;  $r_{z,p} = 0,618 \cdot r_{z,t}$ ,  $r_{p,t} = 0,382 \cdot r_{z,t}$ .

Второй (рис. 1,б):  $Z$ ,  $T$  и  $P$  также расположены на одной прямой;  $r_{z,p} = 1,618 \cdot r_{z,t}$ ,  $r_{p,t} = 0,618 \cdot r_{z,t}$ .

Третий случай (рис. 1,в)  $Z$ ,  $T$  и  $P$  расположены в вершинах равнобедренного треугольника (двухлучевая схема);  $r_{z,t} = r_{z,p}$  и  $r_{p,t} = 0,5 \cdot r_{z,t}$ .

Многочисленные расчеты показали, что и при двухслойной электрической структуре земли погрешность измерения  $R_z$ , связанная с взаимным расположением  $Z$ ,  $T$  и  $P$ , не превышает 5 % при применении схем расположения измерительных электродов по рис. 1. Вместе с тем опыт использования схем расположения  $T$  и  $P$  в реальных условиях выявил нецелесообразность применения схемы по рис. 1,б из-за значительной длины измерительных проводов для подключения вольтметра, а также неудобства отмерять расстояние до  $T$  и  $P$  от геометрического центра сложного заземлителя.

Рассмотрение первого и второго путей получения приемлемой оценки сопротивления заземления некоторого объекта позволяет отметить как недостатки реализации этих путей следующее: требование значительного расстояния разнеса электродов трехэлектродной схемы измерения проблематично обеспечить в районах с плотной застройкой территории; направление разнеса электродов следует связывать с конфигурацией обследуемого заземлителя, т.е. трассами присоединенных кабелей, расположением системы трос-опоры приходящих к подстанции линий электропередачи, другими естественными заземлителями (канализация, глубокие скважины и т.п.), так как учет этих факторов затрудняет выбор направления разнеса. Увеличение разнеса электродов и использование длинных проводников сопровождается ростом наводок, в частности, в цепи измерения потенциала. Необходимы дополнительные меры по ограничению влияния таких наводок.

В связи с вышеизложенным предлагается **третий** путь, а именно определение собственных  $\alpha_{ii}$  и взаимных  $\alpha_{ik}$  сопротивлений в трехэлектродной схеме измерения при использовании свойства взаимозаменяемости функций электродов. Очевидно уже на примере выражения (4), что корректная оцифровка коэффици-

ентов  $\alpha_{ii}$  и  $\alpha_{ik}$  достаточна для желательного ограничения абсолютной систематической ошибки  $\delta(R_z)$ . Существенно, что реализация этого третьего пути не требует поиска места нулевого потенциала для потенциального электрода.

Рассмотрим теоретическую сторону для третьего пути.

Три электрически не связанных заземления (объекта) расположены (рис. 2) в точках 1, 2 и 3 на территории, собственные сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , взаимные  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  и  $R_{23}$ .

В отдельных опытах измеряем: приложенное от источника напряжение  $U$ , ток  $I$  и падения напряжения между точками (выводами заземлений).

При приложении напряжения  $U_{12} = U$  и протекающем в цепи токе  $I$  (вводимый ток в точку 1 обозначим  $I'$ , ток из точки 2 на источник  $I''$ ) измеряем напряжения  $U_{13}$  и  $U_{23}$ .

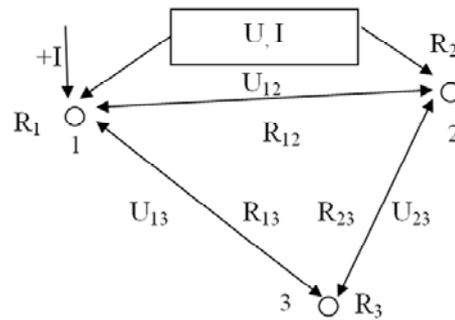


Рис. 2. Расположение заземлений на территории, их сопротивления и измеряемые напряжения

В отдельных точках (выводах заземлений) появляются потенциалы:  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и  $\phi_3$ . Потенциал  $\phi_3$  имеет знак либо по току  $I'$ , либо по току  $I''$  и рассматривается как сумма

$$\phi_3 = \phi_3' + \phi_3'' \quad (7)$$

для соответствующих токов влияния.

По уравнению Максвелла

$$\phi_3 = I' \cdot R_{13} + I'' \cdot R_{23} \quad (8)$$

причем токи  $I = I' = I''$ , но разных направлений. Примем как положительное направление для тока  $I'$ .

Появление потенциала  $\phi_3$  создает в заземлителе 3 ток  $I_3 = \phi_3 \cdot R_3^{-1}$ . В случае, когда  $U_{13} < U_{23}$ , ток  $I_3$  направлен как  $I'$  и  $R_{13} < R_{23}$ ; при  $U_{13} > U_{23}$  имеем  $R_{13} > R_{23}$  и направление тока  $I_3$  совпадает с  $I''$ .

Для группы по рис. 2 заземлений система уравнений Максвелла в случае  $U_{13} < U_{23}$  имеет вид:

$$\phi_1 = I' R_1 - I'' R_{12} - R_{13} I_3; \quad (9)$$

$$\phi_2 = I' R_{12} - I'' R_2 - R_{23} I_3; \quad (10)$$

$$\phi_3 = I' R_{13} - I'' R_{23}; \quad (11)$$

$$\phi_3' - \phi_3'' = U_{13} - U_{23}.$$

Поскольку

$$I_3 = \phi_3 R_3^{-1} = I(R_{13} - R_{23})R_3^{-1}, \quad (12)$$

тогда

$$\phi_1 = I R_1 - I R_{12} - I(R_{13} - R_{23})R_3^{-1}. \quad (13)$$

Измеряемое напряжение

$$U_{13} = \phi_1 - \phi_3 = I \left[ (R_1 - R_{12}) - R_{13} R_3^{-1} (R_{13} - R_{23}) - (R_{13} - R_{23}) \right] \quad (14)$$

и

$$\begin{aligned} R_{1-3\text{экв}} &= U_{13}I^{-1} = \\ &= (R_1 - R_{12}) - R_{13}R_3^{-1}(R_{13} - R_{23}) - (R_{13} - R_{23}) \end{aligned} \quad (15)$$

По аналогии рассуждения приводят к следующему выражению при  $U_{13} < U_{23}$  (или  $R_{13} < R_{23}$ ):

$$\begin{aligned} R_{2-3\text{экв}} &= U_{23}I^{-1} = \\ &= (R_2 - R_{12}) + R_{23}R_3^{-1}(R_{13} - R_{23}) - (R_{13} - R_{23}) \end{aligned} \quad (16)$$

Подключаем источник между точками 2 и 3, т.е. с некоторым током  $I$  и напряжением  $U$ . При условии (по данным измерений), когда  $U_{12} < U_{13}$  (или  $R_{13} < R_{12}$ ), получим:

$$\begin{aligned} R_{1-2\text{экв}} &= U_{12}I^{-1} = \\ &= (R_2 - R_{23}) + R_{12}R_1^{-1}(R_{12} - R_{13}) + (R_{12} - R_{13}) \end{aligned} \quad (17)$$

и

$$\begin{aligned} R_{1-3\text{экв}} &= U_{13}I^{-1} = \\ &= (R_3 - R_{23}) + R_{13}R_1^{-1}(R_{12} - R_{13}) + (R_{12} - R_{13}) \end{aligned} \quad (18)$$

Ввод источника (некоторые  $U$  и  $I$ ) между точками 1 и 3 и в случае  $U_{12} > U_{23}$  приводит к следующим выражениям связи для шести неизвестных ( $R_{ii}$  и  $R_{ik}$ ):

$$\begin{aligned} R_{1-2\text{экв}} &= U_{12}I^{-1} = \\ &= (R_1 - R_{13}) + R_{12}R_2^{-1}(R_{12} - R_{23}) + (R_{12} - R_{23}) \end{aligned} \quad (19)$$

и

$$\begin{aligned} R_{2-3\text{экв}} &= U_{23}I^{-1} = \\ &= (R_3 - R_{13}) - R_{23}R_2^{-1}(R_{12} - R_{23}) + (R_{12} - R_{23}) \end{aligned} \quad (20)$$

Необходимо рассмотреть выражение связи шести неизвестных для случая других неравенств по напряжениям  $U_{ik}$ .

Пусть в опыте ввода источника в точки 1 и 2 ( $U, I$ ) имеем  $U_{13} > U_{23}$ . Это приведет к изменению направления тока  $I_3$ , причем направление положительное принимается для точки ввода 1. Выражения (15) и (16) сохраняют свой вид, так как корректировка направления тока  $I_3$  происходит автоматически.

В опыте ввода тока источника в точки 2 и 3 и в случае  $U_{13} > U_{12}$  формулы (17) и (18) сохраняются также. То же следует отметить и для опыта с вводом источника в точки 1 и 3, когда получим по измерениям  $U_{23} > U_{12}$ , т.е. сохраняются выражения (19) и (20).

## ВЫВОДЫ

1. В работе впервые предложена методика определения собственных  $\alpha_{ii}$  и взаимных  $\alpha_{ik}$  сопротивлений в трехэлектродной схеме измерения при использовании свойства взаимозаменяемости функций электродов.

2. Новизна методики состоит в том, что её реализация не требует поиска места нулевого потенциала для потенциального электрода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
2. Ослон А.Б. Об измерении сопротивлений заземления // Электричество. – 1957. – № 2. – С. 56-58.
3. Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Итоги науки и техники. Электрические станции, сети и системы. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1966. – С. 65-184.

Поступила 20.09.2010

*Нижевский Илья Викторович*

*Нижевский Виктор Ильич, к.т.н.*

*Гуль Виктор Иванович, к.т.н., проф.*

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ"

кафедра "Передача электрической энергии"

тел. (0572) 707-69-77

*I.V. Nizhevskiy, V.I. Nizhevskiy, V.I. Gul*

**To the problem of measuring with acceptable error an object's grounding resistance under measuring circuit electrodes spacing limitations.**

The analysis presented shows that it is problematic to provide a requirement for considerable spacing between the electrodes in a three-electrode measuring circuit in compact planning areas. A technique for determination of intrinsic and mutual resistance in the three-electrode measuring circuit under application of the electrode functions interchangeability property is introduced. The novelty of the technique consists in absence of necessity to search a zero potential point for the voltage-operated electrode.

**Key words – three-electrode circuit, zero potential, property of interchangeability.**