

УДК 621.315

С. Л. Шишигин, д.т.н. – Вологодский государственный  
технический университет, г. Вологда;

А. Н. Новикова – ОАО «НИИПТ», Санкт-Петербург

## **РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ОПОР ВЛ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ГРИБОВИДНЫХ ПОДНОЖНИКОВ В НЕОДНОРОДНОМ ГРУНТЕ**

Железобетонные фундаменты опор ВЛ, состоящие из свай, анкерных плит, грибовидных подножников, в неагрессивных грунтах (без применения битумной обмазки), являются элементами схемы растекания тока разрядов молнии, поражающих ВЛ. В используемых железобетонных конструкциях применяют арматурные сетки высокой плотности. Толщина внешнего слоя бетона составляет 15–30 мм. В работе [1], опубликованной в 1968 г. и посвященной методике расчета сопротивления заземления ( $R_3$ ) железобетонных фундаментов, путем измерений  $R_3$  моделей грибовидного подножника в электролитической ванне было показано:

- $R_3$  решетчатого арматурного каркаса и сплошного проводящего тела, повторяющего его контуры, в пределах точности измерений равны;
- учет различия в проводимости бетонного слоя и окружающего грунта может увеличить  $R_3$  фундамента на 20 % при отношении удельных электрических сопротивлений бетона и грунта  $\rho_6/\rho_r = 10$ . При отношении  $\rho_6/\rho_r = 5$  поправка составит 10 %. При двукратном различии значений  $\rho_6$  и  $\rho_r$  – не более 4 %.

Однако в реальных условиях вследствие капиллярного подсоса влаги, значения удельного электрического сопротивления бетона и окружающего грунта близки. Даже в грунтах с большим значением  $\rho_r$  бетонный слой является увлажненным, поскольку в системе двух пористо-капиллярных сред (грунт–бетон) влага мигрирует в сторону бетона, размеры пор которого на порядки меньше, чем, например, песка.

В [1] была предложена инженерная методика расчета  $R_3$  железобетонных фундаментов опор через коэффициенты формы, полученные по результатам измерений  $R_3$  моделей фундаментов в электролитической ванне для одиночной сваи и грибовидного подножника, а также для фундаментов одностоечной и двухстоечной опоры, состоящих из этих элементов. Предложенная методика позволяла рассчитывать  $R_3$  железобетонных фундаментов для однородного грунта и для многослойного

грунта после расчета значения эквивалентного удельного сопротивления грунта ( $\rho_{\text{экр}}$ ) применительно к конкретной конструкции железобетонного фундамента.

По результатам многовариантных расчетов  $R_3$  в двухслойном грунте, при различных сочетаниях  $\rho$  слоев, были подготовлены номограммы для расчета  $\rho_{\text{экр}}$  для следующих конструкций заземляющих устройств (ЗУ): одного и двух вертикальных электродов; лучевого заземлителя; лучевого заземлителя с распределенными по лучам штырями. Номограммы, как справочный материал, вошли в Методические указания – «Типовой проект. Заземляющие устройства опор ВЛ 35–750 кВ» [2]. В этом документе номограммы для вертикального электрода предлагалось использовать также для «фундаментных заземлителей». Такая рекомендация обоснованна для фундаментов, состоящих из свай. Как будет показано ниже, для фундаментов, состоящих из грибовидных подножников, использование в расчетах  $R_3$  номограмм для вертикального электрода приводит в некоторых условиях к большему погрешностям, так как не учитывается влияние на  $R_3$  горизонтальной плиты – нижней части грибовидного подножника.

Отсутствие во введенных в действие в 1975 г. Методических указаниях [2] необходимых номограмм можно объяснить следующими причинами:

1. В период проведения работы [1] и при подготовке Методических указаний среди энергетиков существовало мнение: проводимость железобетонных фундаментов следует учитывать при разработке ЗУ опор только при значениях  $\rho_r \leq 300$  Ом·м. Соответствующая рекомендация была записана в «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ-IV, издание 1966 г. [3]).
2. По результатам измерений  $R_3$  в электролитической ванне сопротивление заземления сборного фундамента из четырех грибовидных подножников при однородном грунте с  $\rho_r = 300$  Ом·м составляет около 17 Ом, т. е. удовлетворяет требованиям ПУЭ. Имея эти результаты и номограмму для определения  $\rho_{\text{экр}}$  для вертикального электрода, можно было для фундамента из грибовидных подножников оценить значение  $\rho_r$ , при котором требуемое сопротивление опоры должно быть обеспечено только искусственным заземлителем.

В условиях, когда учет уменьшения  $R_3$  за счет влияния железобетонных фундаментов ограничивался  $\rho_r \leq 300$  Ом·м, отсутствие соответствующей номограммы для сложной по форме конструкции было оправданным. Однако в дальнейшем этот критерий был пересмотрен в сторону увеличения: в ПУЭ-V (1978 г.) до 500 Ом·м, а в ПУЭ-VII (2003 г.) до 1000 Ом·м. При этом вопрос о введении необходимых корректировок в Методические указания не ставился.

Ситуация обострилась, когда на ВЛ, проходящей в сложных условиях по грунтам (ВЛ 400 кВ ПС «Выборгская» – Госграница на двухцепных

башенных опорах, установленных на четырех грибовидных подножниках), возникли проблемы с грозоупорностью, отчасти из-за невыполнения проектных решений по устройству ЗУ. По результатам специальных геофизических исследований грунтов стало очевидным, что проблемы повышения грозоупорности могут быть решены только с использованием ограничителей перенапряжений (ОПН) [5]. Разработка и оптимизация схем грозозащиты с ОПН потребовала получения информации о сопротивлении заземления существующих ЗУ, т. е. фундаментов опор, и предлагаемых конструкций ЗУ. Первые оценки показали необходимость усовершенствования методики расчета  $R_3$  фундамента, состоящего из грибовидных подножников.

**Разработка расчетной модели.** Сопротивление ЗУ опоры, состоящего из системы железобетонных грибовидных подножников и искусственного заземлителя, может быть определено в результате расчета трехмерного электрического поля растекания тока, например, с использованием метода эквивалентных зарядов (ЭЗ). Основная задача – обоснование расчетной модели грибовидного подножника, состоящего из вертикальной стойки квадратного сечения и горизонтальной плиты (рис. 1). Размеры типовых железобетонных грибовидных подножников башенных опор даны ниже (табл. 1).

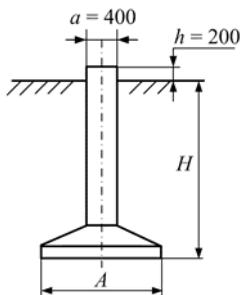


Рис. 1. Типовой железобетонный фундамент (грибовидный подножник)

В расчетах стойка грибовидного подножника, длина которой существенно превышает размеры поперечного сечения, заменяется стержнем с эквивалентным диаметром  $D = 1,18a$ , определяемым из условия равенства собственного сопротивления бесконечно длинных проводников квадратного и круглого сечения. При стороне квадрата, равной,  $a = 400$  мм,  $D = 470$  мм. Правомерность такого подхода подтверждают результаты сравнения расчетов [4] и измерений в электролитической

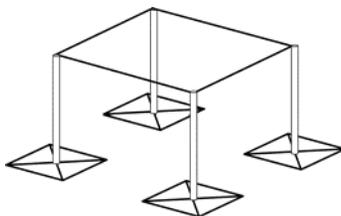
ванне [1] сопротивления свайных фундаментов одностоечной и двухстоечной опор.

Таблица 1

**Сопоставление результатов расчета сопротивления заземления типовых железобетонных подножников ( $R_{\text{н}}$ ) по методу ЭЗ, с использованием предлагаемой модели, и по инженерной методике при  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$**

Тип фундамента		Ф2	Ф3	Ф4	Ф5
Размеры, мм	<i>A</i>	1500	1800	2100	2400
	<i>H</i>	2500			3000
$k_f$ по [1, рис. 3]		0,31	0,28	0,26	0,27
$R_{\text{н}}$ , Ом	по [1]	12,4	11,2	10,4	9,0
	по методу ЭЗ с использованием модели	12,4	11,35	10,45	9,1

В качестве модели плиты подножника была принята конструкция из шести стержней, проложенных по ее периметру и двум диагоналям (рис. 2), полученная из условия совпадения сопротивления заземления расчетной модели с результатами измерений  $R_3$  в электролитической ванне.



**Рис. 2.** Расчетная модель фундамента опоры из четырех грибовидных подножников (диаметр вертикальных стержней  $D_{\text{в}} = 470 \text{ мм}$ , горизонтальных –  $D_{\text{г}} = 60 \text{ мм}$ )

Адекватность предложенной расчетной модели может быть проверена путем сопоставления результатов расчетов сопротивления ЗУ в однородном грунте, полученных по методу ЭЗ и по инженерной методике, основная расчетная формула которой для сопротивления фундамента  $R_{\text{ф}}$  имеет вид:

$$R_{\text{ф}} = k_f \cdot \rho / H, \quad (1)$$

где  $k_f$  – коэффициент формы;

$H$  – глубина заложения до основания подножника, м;  
 $\rho$  – удельное сопротивление однородного грунта, Ом·м.

Материал [1] позволяет выполнить две тестовые проверки, а именно.

*Одиночный грибовидный подножник* (см. табл. 1).

Различие между значениями  $R_{п}$ , полученными по двум методам, не превышает 2 %.

*Сборный фундамент из четырех подножников* (см. рис. 2).

Тип грибовидного подножника – ФЗ, основание опоры имеет размеры (3×3) м.

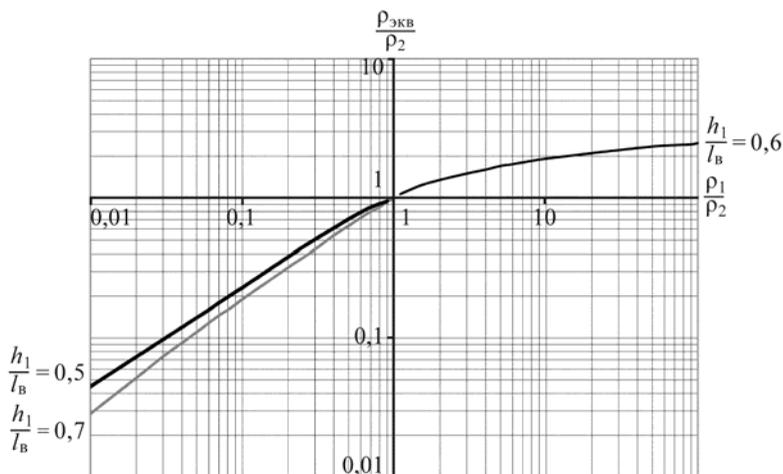
Результаты расчета  $R_{ф}$ :

- при использовании модели – 5,7 Ом;
- по инженерной методике – 5,6 Ом.

Расхождение составляет 2 %.

Таким образом, результаты расчетов сопротивления заземления одиночного грибовидного подножника и сборного фундамента из четырех подножников с использованием предложенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными [1], полученными физическим моделированием.

**Фундамент в неоднородном грунте.** Оценим погрешность использования для расчета  $R_{п}$  грибовидного подножника в неоднородном грунте номограммы для определения  $\rho_{эkv}$ , предназначенной для вертикального электрода длиной  $l_{в}$ , расположенного в двухслойном грунте с мощностью первого слоя, равной  $h_1$ . На рис. 3 дан фрагмент номограммы для  $h_1/l_{в} = 1,5/2,5 = 0,6$ .



**Рис. 3.** Фрагмент номограммы для определения эквивалентного удельного сопротивления двухслойного грунта для вертикального электрода

В табл. 2 даны результаты расчета значений сопротивления заземления грибовидного подножника типа ФЗ ( $R_{\text{п}}$ ) и сборного фундамента из четырех подножников ( $R_{\text{ф}}$ ). Проведен также расчет значения сопротивления заземления стойки ( $R_{\text{с}}$ ). Для этого элемента конструкции номограмма рис. 3 справедлива, а для подножника она используется по рекомендациям «Типового проекта», утвержденного в 1975 г.

Таблица 2

**Результаты расчета  $R_{\text{п}}$  грибовидного подножника типа ФЗ и фундамента из четырех подножников ( $R_{\text{ф}}$ ) в двухслойном грунте по двум методикам**

$\rho_{\text{г}}$ по слоям, Ом·м		Инженерная методика ( $\rho_{\text{экв}}$ по рис. 3)				Метод эквивалентных зарядов					
1	2	$\rho_{\text{экв}}$ , Ом·м	$R$ , Ом			стойка		подножник		фундамент	
			стойка ( $k_f=0,506$ )	подножник ( $k_f=0,28$ )	фундамент ( $k_f=0,14$ )	$\rho_{\text{экв}}$ , Ом·м	$R_{\text{с}}$ , Ом	$\rho_{\text{экв}}$ , Ом·м	$R_{\text{п}}$ , Ом	$\rho_{\text{экв}}$ , Ом·м	$R_{\text{ф}}$ , Ом
2000	200	390	79	44	22	330	60	250	29	240	14
200	2000	460	93	52	26	500	90	720	82	845	48

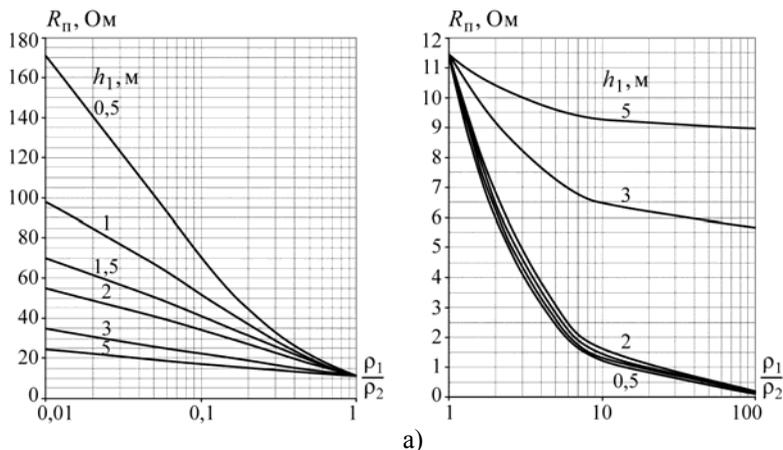
Расчеты проводились разными методами для двух вариантов двухслойной структуры грунта с мощностью первого слоя  $h_1 = 1,5$  м: по инженерной методике и по методу эквивалентных зарядов с использованием разработанной модели подножника.

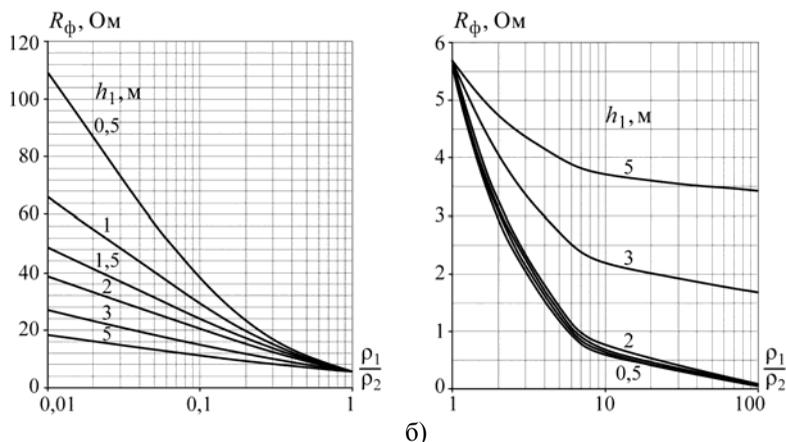
По результатам расчетов  $R_{\text{п}}$  и  $R_{\text{ф}}$ , полученным по инженерной методике, можно отметить следующее:

- в случае, когда подошва подножника (или четырех подножников) находится в слое лучшей проводимости, значения  $R_{\text{п}}$  и  $R_{\text{ф}}$  оказываются завышенными. При этом несколько выправляет положение использование экспериментально полученного именно для подножника (или четырех подножников) коэффициента формы: в данном случае завышение составляет около 50 %;
- при расположении подошвы в слое более высокого сопротивления и значительно ниже границы раздела слоев, стеканию тока с подошвы в слой низкого сопротивления препятствует поле токов, стекающих в этот слой со стойки опоры. В этом случае наличие подошвы мало влияет на сопротивление подножника: по табл. 2 видно, что значение  $R_{\text{п}}$ , полученное по методу ЭЗ, отличается от сопротивления стойки на 10 %. Неучет в инженерной методике качественного

изменения взаимодействия полей токов, стекающих с элементов подножника, приводит в данном случае к занижению значения  $R_{\Pi}$  более чем в 1,5, а  $R_{\Phi}$  – почти в 2 раза.

**Разработка номограммы для определения  $\rho_{\text{экв}}$  для фундамента из четырех грибовидных подножников в двухслойном грунте.** На рис. 4 представлены результаты расчета сопротивления заземления подножника типа ФЗ (рис. 4а) и фундамента из четырех подножников при расстоянии между их осями, равном  $(3 \times 3)$  м, (рис. 4б) в двухслойном грунте (с соотношением  $\rho_1 / \rho_2$  от 0,01 до 100) при изменении мощности первого слоя  $h_1$  от 0,5 до 5 м. Значение удельного сопротивления грунта первого слоя принято равным  $\rho_1 = 100$  Ом·м.





**Рис. 4.** Сопротивление заземления в двухслойном грунте (расчет по методу ЭЗ): а) грибовидного подножника; б) фундамента из четырех подножников

Зависимость  $R_3$  от  $\rho_1/\rho_2$  меняется от положения границы раздела слоев относительно подошвы подножников. Например, при изменении  $\rho_1/\rho_2$  от 0,01 до 10 значение  $R_\phi$  уменьшится в 100 раз при  $h_1 = 1,5$  м и только в 5 раз при  $h_1 = 5$  м.

В случае, когда мощность первого слоя достигает низа подошвы подножника и при этом  $\rho_1/\rho_2 > 1$  наблюдается резкое изменение значения сопротивления. Например, при  $\rho_1/\rho_2 = 10$  при увеличении  $h_1$  от 2 до 3 м значение  $R_\pi$  возрастает в 4, а  $R_\phi$  в 3 раза, в то время как при увеличении  $h_1$  от 1 до 2 м изменение сопротивления составляет около 20 %.

Из зависимостей рис. 4б может быть получена номограмма для определения  $\rho_{\text{ЭКВ}}$ , необходимая для расчета сопротивления заземления фундамента из грибовидных подножников в двухслойном грунте (рис. 5). Для этого используется формула

$$\rho_{\text{ЭКВ}}/\rho_2 = 0,01 \cdot R_{\rho_1=100} \cdot k_p \cdot H / k_f, \quad (2)$$

где  $R_{\rho_1=100}$  — сопротивление заземления фундамента при  $\rho_1 = 100$  Ом·м;

$k_p = \rho_1/\rho_2$ ;

$k_f$  — коэффициент формы по [1].



263	2,4	1400	5,75×3,68	0,64	2,3	0,112	4,0	1,3 (2,8)	455 (980)	20,4 (43,9)	18,6
	∞	350									
250	3,2	1340	6,33×3,98	0,63	2,5	0,110	2,0	1,5 (2,0)	1005 (1340)	44,2 (59,0)	38,4
	∞	670									
221	2,3	1200	5,75×3,68	0,64	2,3	0,112	1,8	1,2 (1,55)	804 (1038)	36,0 (46,5)	32,3
	∞	670									

\*  $B$  и  $C$  – расстояния между осями подножников.

Различия значений  $R_{\phi}$ , полученных по двум методикам, при использовании номограммы рис. 5 незначительны и находятся в пределах точности определения промежуточных параметров по графическим зависимостям. Однако следует отметить, что необходимо дополнить полученный более 30 лет назад справочный материал для определения  $k_f$  с учетом типоразмеров сборных фундаментов, применяемых в настоящее время.

## Выводы

1. Применимость разработанной модели железобетонного фундамента типа грибовидного подножника для расчетов сопротивления заземления опор ВЛ по методу эквивалентных зарядов обоснована сопоставлением с результатами физического моделирования – измерениями сопротивления моделей подножников в электролитической ванне.

2. Разработанная номограмма для определения эквивалентного удельного сопротивления двухслойного грунта для фундамента из четырех грибовидных подножников может быть использована в качестве недостающего справочного материала к «Типовому проекту. Заземляющие устройства опор ВЛ 35–750 кВ».

## Список литературы

1. Корсунцев А. В., Покровская К. И. Методика расчета сопротивлений заземления железобетонных фундаментов // Электрические станции, 1968, № 11.
2. Типовой проект. Заземляющие устройства опор ВЛ 35–750 кВ. № 3602-тм. – М.: Минэнерго, ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект», 1974.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-IV). – М.–Л.: Энергия, 1966.
4. Шишигин С. Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество, 2010, № 1.

5. *Новикова А. Н., Лубков А. Н., Шмараго О. В. и др.* Модернизация системы грозозащиты двухцепной ВЛ 400 кВ ПС «Выборгская» – Госграница с использованием ОПН // Известия НИИ постоянного тока, 2007, № 62.
6. *Новикова А. Н., Лубков А. Н., Шмараго О. В. и др.* Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств // Электрические станции, 2007, № 9.