

Об инженерном расчете сопротивления заземления типовых опор надземных трубопроводов

В.К. Слышалов, д-р техн. наук, Ю.В. Кандалов, В.Д. Лебедев, кандидаты техн. наук

Предлагаются математические модели заземлителей, позволяющие выполнить инженерный расчет заземлителей трубопроводных надземных систем. Оценивается погрешность приближенных формул, даются рекомендации по их применению.

Ключевые слова: сопротивление заземления, электрическая емкость, надземный трубопровод.

On Engineering Design of Grounding Resistance of Typical Supports of Elevated Pipelines

V.K. Slyshalov, Doctor of Engineering, Yu.V. Kandalov, V.D. Lebedev, Candidates of Engineering

The authors consider the mathematic models of grounding conductors for carrying out the engineering design of grounding conductors of elevated pipeline systems. The authors estimate the inaccuracy of the approximation formulas and give recommendations for their usage.

Key words: grounding resistance, electric capacity, elevated pipeline.

Сопротивление заземления является одним из основных элементов математической модели участка надземного трубопровода (НТ), определяющим совместно с продольными параметрами затухание импульсов тока и напряжения, распространяющихся по трубопроводу при грозовых разрядах, контактах с электрическими сетями промышленного назначения и других электромагнитных воздействиях. Выполненная в [1] разработка математической модели участка трубопровода и расчеты по ней выявили несоответствие в точности определения значений продольных параметров трубопровода (индуктивность, активное сопротивление), вычисляемых с учетом влияния земли, с результатами расчета поперечной проводимости, обусловленной фактором геометрии заземлителя и удельным

сопротивлением грунта. Ниже рассматриваются возможности создания математических моделей, обеспечивающих полноценный учет конструктивных и электрических свойств заземлителя опоры трубопровода при анализе его функционирования. На рис. 1 приведена конструкция заземлителя, являющегося типовым элементом при надземной прокладке газопроводов [1].

Согласно [2], величина заглубления опоры a (рис. 1) зависит от удельного сопротивления грунта в месте установки, т.е. опоры по трассе трубопровода имеют различную по длине подземную часть (заземлитель); кроме того, необязательным является наличие песчаной подушки.

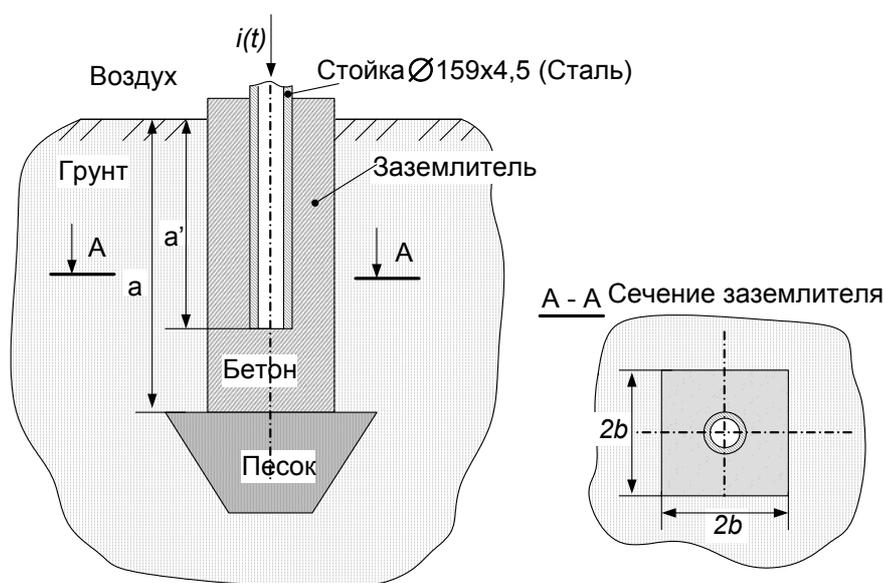


Рис. 1. Конструкция заземляемой части опоры трубопровода

Таким образом, непосредственный контакт с грунтом осуществляется за счет поверхности бетонного параллелепипеда переменной длины, зависящей от удельного сопротивления грунта. Поскольку задача о поле растекания тока с электрода в форме параллелепипеда не имеет элементарного решения, для инженерных расчетов сопротивления предлагается следующая методика:

1. Задача решается для однородного грунта, т.е. не учитывается наличие песчаной подушки.

2. Для грунтов с высоким удельным сопротивлением $\rho_r \gg \rho_b$ (удельное сопротивление бетона) считаем бетонный параллелепипед эквипотенциальным телом $\varphi_3 = \text{const}$.

3. Для грунтов с удельным сопротивлением $\rho_b \approx \rho_r$ заземлителем считаем стальную стойку, по которой ток вводится в параллелепипед с удельным сопротивлением $\rho_b = \rho_r$ и далее в грунт.

4. Основой всех расчетных соотношений являются формулы емкостей уединенных заземлителей двойной длины, находящихся в однородной неограниченной среде.

5. Используя аналогию между полем тока и электростатическим полем, с учетом границы раздела грунт-воздух для определения сопротивления заземления r_3 получаем формулу

$$\frac{1}{r_3} = \frac{1}{2} \frac{C}{\varepsilon_0 \varepsilon \rho_3}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость; C – емкость.

Погрешности получаемых по (1) результатов в силу приближенности данных по удельным сопротивлениям грунта, бетона и их распределений в соответствующих областях расчетного пространства дают надежную числовую оценку лишь в случаях гарантированной однородности грунта. Тем не менее оценки качественного плана, например, по длине заглубляемой части опоры, по величине емкостных токов и, соответственно, по виду частотной характеристики заземлителя и ряд других будут вполне надежными.

Расчеты по (1) для уменьшения объема вычислений целесообразно проводить используя при определении емкости аналитические формулы, соответствующие геометрическим аппроксимациям параллелепипеда. Выбор этих формул поясним на конкретном примере.

Пусть размеры заземленной части опоры равны: $a = 0,425$ м, $2b = 0,250$ м, $a' = 0,275$ м. Удельное сопротивление грунта в первом варианте расчета $\rho_{r1} = 500$ Ом·м (слегка влажный песок [3]), во втором варианте – $\rho_{r2} = 50$ Ом·м (увлажненный грунтовыми водами суглинок [3]).

Расчет емкости в первом варианте следует выполнить для параллелепипеда с раз-

мерами $2a \times 2b \times 2b$. Геометрическими аппроксимациями его являются вытянутый сфероид и цилиндр конечной длины. Формулы для емкости этих тел имеют следующий вид [4]:

- сфероид с полуосями a, r ($a > r$)

$$C_{\text{сф}} = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}}{\text{Arch} \frac{a}{r}}; \quad (2)$$

- цилиндр конечной длины $\ell = 2a$, радиуса r

$$C_{\text{ц}} = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot \ell \left[1,274 \frac{r}{\ell} + 0,654 \left(\frac{r}{\ell}\right)^{0,24} \right], \quad (3)$$

$$0 \leq \frac{\ell}{a} \leq 15, \quad |\delta| < 0,2\%.$$

Оценку емкости параллелепипеда с помощью формул (2), (3) выполняем вычисляя по каждой из них емкости вписанных в него и описанных около него тел, т.е. принимая $r = b$ для вписанных и $r = 2\sqrt{b}$ для описанных поверхностей. Искомая емкость параллелепипеда по найденным величинам $C_{\text{вп}}$ и $C_{\text{оп}}$ вычисляется как их среднее гармоническое значение [4]:

$$C_{\text{ср.г}} = \frac{2C_{\text{вп}}C_{\text{оп}}}{C_{\text{вп}} + C_{\text{оп}}}. \quad (4)$$

При вычислениях по (2)–(4) получены следующие результаты:

- сфероид

$$C_{\text{вп}} = 23,82 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad C_{\text{оп}} = 28,30 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad C_{\text{ср.г}} = 25,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

- цилиндр

$$C_{\text{вп}} = 28,38 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad C_{\text{оп}} = 33,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \quad C_{\text{ср.г}} = 30,88 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Для выбора рабочей формулы был выполнен численный расчет емкости параллелепипеда. С этой целью методом конечных элементов рассчитано электростатическое поле в системе электродов: параллелепипед с размерами $2a \times b \times b$ и потенциалом $\varphi_n = 1$ – концентричная с ним проводящая сфера радиуса $R \approx 20a$, имеющая потенциал $\varphi_c = 0$. Эта же задача для контроля была решена повторно с другими параметрами сетки. Полученное среднее гармоническое значение емкости составило $C_{\text{ср.г}} = 29,35 \cdot 10^{-12}$ Ф. Поэтому для практических расчетов следует рекомендовать аппроксимацию параллелепипеда цилиндром конечной длины и, соответственно, формулу (3). Значению емкости $30,88 \cdot 10^{-12}$ Ф, согласно (1), соответствует при $\rho_{r1} = 500$ Ом·м значение сопротивления заземления $r_{31} = 287$ Ом.

Методика моделирования и результаты расчетов одиночных заземлителей с помощью программ Comsol Multiphysics и Matlab представлены в [5].

Во втором варианте при $\rho_{r2} = 50$ Ом·м заземлителем является цилиндр с геометрическими параметрами $\ell = 2a' = 0,55$ м, $r = 0,08$ м, емкость которого, согласно формуле (3), равна

$C_{\text{ц}} = 18,07 \cdot 10^{-12}$ ф. Для сопротивления заземления по (1) получаем значение $r_{32} = 49$ Ом.

Заключение

Найденные расчетным путем значения сопротивления заземления следует рассматривать как ориентировочные, позволяющие найти величины потенциалов на трубопроводе при контакте с токоведущими элементами электрических цепей и грозовых разрядах, определить для этих режимов напряжения прикосновения и шага в электрическом поле заземлителя; ввести значения r_3 в математические модели волновых процессов в трубопроводах и таким образом получить оценочные характеристики электромагнитных процессов в надземных трубопроводах на стадии их проектирования.

Для трубопроводов, находящихся в эксплуатации, представляется целесообразным

проведение натуральных измерений сопротивлений заземления опор с последующим оформлением паспорта трассы.

Список литературы

1. **Кандалов Ю.В.** Расчет электромагнитных параметров надземных трубопроводных участков заземляющих систем и разработка математических моделей электромагнитных процессов в них // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 30–38.
2. **СНиП 2.02.01-83***. Основания зданий и сооружений; утв. Постановлением Госстроя СССР от 05.12.1983 N 311 (ред. от 01.07.1987). – 66 с.
3. **Карякин Р.Н.** Заземляющие устройства электроустановок: справочник. – М.: ЗАО «Энергосервис», 1998. – 373 с.
4. **Иоссель Ю.Я., Коганов Э.С., Струнский М.Г.** Расчет электрической емкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1981. – 288 с.
5. **Лебедев В.Д.** Компьютерное моделирование и исследование характеристик одиночных естественных заземлителей // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 27–32.

Слышалов Владимир Константинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры электрических систем,
телефон (4932) 26-99-21,
e-mail: zav_es@es.ispu.ru

Кандалов Юрий Владимирович,
Филиал ОАО «"СО ЕЭС" Ивановское РДУ»,
кандидат технических наук, начальник отдела сопровождения рынка,
телефоны: (4932) 34-99-25, 35-30-73,
e-mail: artyr_198353@mail.ru

Лебедев Владимир Дмитриевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,
телефон (4932) 26-99-53,
e-mail: vd_lebedev@mail.ru