

В. В. Ивонин

## Распределение потенциалов в плохо проводящих грунтах вокруг протяженных заземлителей

Статья посвящена исследованию распределения потенциалов в грунте с высоким удельным сопротивлением при попадании разряда молнии в протяженный заземлитель. Для получения экспериментальных данных по распределению потенциалов был создан высоковольтный полигон. Известно, что разряды молнии создают опасные условия как для человека, так и для электрооборудования энергосистем, поэтому при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать электромагнитные характеристики заземлителей под действием токов молний. Чтобы генерировать разряд, схожий по параметрам импульса с разрядом молнии, был создан генератор импульсных напряжений, собранный по схеме Аркадьева – Маркса. Потенциалы измерялись зондовой измерительной системой, разработанной ранее. Основная характеристика заземляющего устройства – это его сопротивление. На основе анализа литературы и экспериментальных данных показано, что сопротивление заземления может сильно отличаться при протекании больших импульсных токов молнии от значений стационарного сопротивления, измеренного на промышленной частоте или постоянном токе. Это явление вызвано процессами ионизации и искрообразования, возникающими в окружающем заземлитель грунте в результате протекания токов большой амплитуды. Сопротивление искровых каналов значительно меньше сопротивления грунта, в результате чего удельное сопротивление уменьшается и, как следствие, уменьшается полное сопротивление заземлителя. Для анализа влияния ионизации грунта и возникающих в грунтах искровых каналов на распределения потенциалов произведены расчеты потенциалов в грунтах с помощью метода конечных элементов. Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами расчета распределения потенциалов. Показано, что возникающие искровые каналы в грунтах существенно влияют на распределения потенциалов. Таким образом, при расчете шагового напряжения необходимо учитывать влияние искровых каналов.

**Ключевые слова:** заземление, протяженные заземлители, распределение потенциалов, ионизация грунта, искрообразования в грунте.

### Введение

Заземляющее устройство (ЗУ) – важная часть энергосистемы, используемая для защиты линий электропередач и оборудования подстанций от перенапряжений, вызванных токами молнии. Основная рабочая функция заземляющего устройства заключается в обеспечении достаточной для срабатывания релейной защиты проводимости цепи замыкания находящихся под рабочим напряжением частей электроустановки на заземленный корпус или землю [1]. Поэтому важнейшей характеристикой ЗУ является его проводимость или обратная ей величина – сопротивление, которое может сильно отличаться при протекании больших импульсных токов молнии от значений стационарного сопротивления, измеренного на промышленной частоте или постоянном токе. Это связано с ионизацией грунта вблизи электрода и образованием искровых каналов, что приводит к заметному снижению удельного сопротивления грунта  $\rho$ . При увеличении импульсного тока в грунте происходит ионизация и образуются искры, в результате чего сопротивление заземления уменьшается, а динамическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) становится нелинейной. Причиной ионизации является достаточно сильное электрическое поле проводимости  $E = \rho j$ , которое возникает при растекании импульсного тока с плотностью  $j$  с одиночного заземлителя. Ионизация в грунте, сопровождающаяся образованием искровых каналов, начинается при напряженности электрического поля  $E = 4–16$  кВ/см. Искровые каналы могут образоваться также в воздухе на поверхности грунта вблизи заземлителя. При растекании многокилоамперных токов (при ударах молнии или от мощных импульсных генераторов) могут образоваться протяженные искровые каналы длиной до 100 м, развивающиеся в виде скользящего разряда по поверхности грунта.

Сопротивление растеканию тока с заземлителя в землю формируется всей зоной растекания тока – объемом земли, начиная от поверхности заземлителя и до зоны, в которой электрический потенциал практически равен нулю. Электрозащитная функция ЗУ состоит в ограничении до допустимых пределов напряжения, под которое может попасть человек, прикоснувшийся к заземленному корпусу электроустановки во время замыкания фазы на корпус или землю.

Вопрос об обеспечении с помощью ЗУ электробезопасности при ударах молнии в ПУЭ и других нормативных документах в настоящее время не рассматривается, так как отсутствуют нормы на допустимое шаговое напряжение и допустимый ток по пути "нога – нога" при микросекундных воздействиях [2].

Однако исследование этих вопросов целесообразно в свете общей тенденции повышения уровня безопасности. В статье описаны экспериментальные исследования распределения потенциалов в грунте с высоким удельным сопротивлением вокруг протяженных заземлителей.

### Материалы и методы

Для проведения экспериментов на заземлителях, соизмеримых по размерам с заземлителями реальных объектов электроэнергетики, был создан высоковольтный полигон на месте бывшего песчаного карьера вблизи города Апатиты. Удельное сопротивление грунта на полигоне составило 1100 Ом·м. В качестве источника импульсов использовался генератор импульсных напряжений (ГИН), выполненный по схеме Аркадьева – Маркса. Питался ГИН от АИД-70, который был подключен к бензогенератору. ГИН состоял из шести ступеней, в результате выходное напряжение ГИН находилось в промежутке от 60 до 360 кВ. Заземляющее устройство генератора состояло из двух соединенных между собой контуров: внешнего квадрата со стороной 6 м и внутреннего со стороной 2,5 м. В качестве элементов ЗУ использовались стальные полосы шириной 50 мм и толщиной 4 мм. По углам внутреннего контура были вбиты вертикальные электроды диаметром 20 мм и длиной 1 м; сопротивление контура заземления составляло 66 Ом.

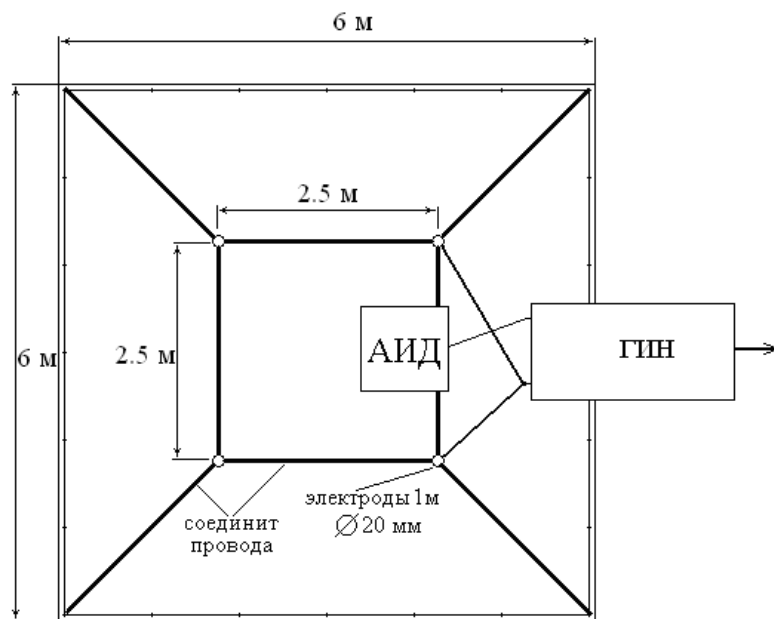


Рис. 1. Контур заземления генератора импульсных напряжений  
Fig. 1. Grounding of the Marx generator

Проводилось исследование распределения потенциалов вокруг протяженного электрода – стержня диаметром 12 мм и длиной 13,5 м. Импульс амплитудой 168 кВ и длительностью фронта 1 мкс генерировался в центр электрода. Потенциалы измерялись ранее разработанной зондовой системой [3] по двенадцати направлениям, как показано на рис. 2, для получения точной двухмерной картины распределения потенциалов.

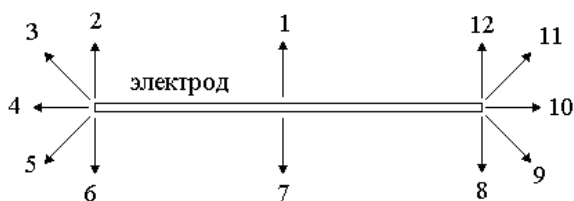


Рис. 2. Схема измерения потенциалов  
Fig. 2. The scheme of potentials' measurement

Основные требования, предъявляемые к зондам:

- 1) минимальные габариты, чтобы минимизировать влияние на распространение полей;
- 2) зонд должен иметь минимальное переходное сопротивление "грунт – зонд", которое не должно изменяться при перемещениях зонда. Это сопротивление входит в цепь делителя напряжения, подключаемого к зонду, при этом сопротивление делителя должно быть как минимум на порядок больше переходного сопротивления зонда. Полное сопротивление делителя составляло 215 кОм.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены осциллограммы генерируемого импульса напряжения  $U(t)$ , тока  $I(t)$  и кривая расчетного динамического сопротивления  $Z(t) = U(t)/I(t)$ ; длительность фронта импульса 0,5 мкс, длительность импульса до спада на половину амплитуды 10 мкс. Хорошо регистрируется начало резкого падения сопротивления

заземлителя практически сразу при достижении амплитудного значения напряжения 140 кВ. Уменьшение значения сопротивления связано с возникновением искровых каналов в грунте. Минимальное значение сопротивления всегда отстает от максимального значения тока. Эта задержка возрастает с увеличением влажности грунта. Процесс искрообразования начинается на нелинейной стадии растекания импульсного тока вблизи его максимума, когда  $dU/dI < 0$ , а сопротивление электрода в песке падает почти до минимума. Задержка процесса начала искрообразования от начала подачи импульса напряжения определяется временем развития ионизационно-перегревной неустойчивости во влажном песке [4; 5], которая больше времени развития ионизационно-перегревной неустойчивости в атмосферном воздухе. Более длительные времена задержки, видимо, связаны с тем, что в грунтах ток растекается по проводящим влажным участкам, поэтому необходимы значительные энергозатраты для прогрева воды (которая обладает большой теплоемкостью) и ее испарения.

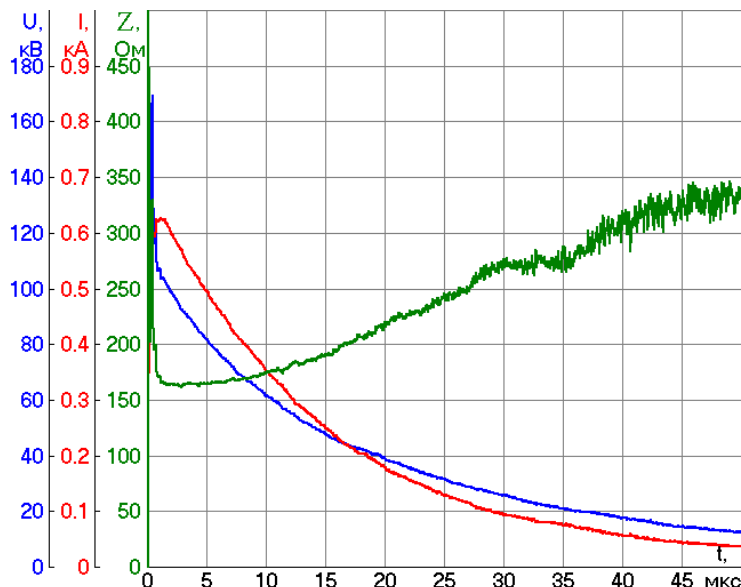


Рис. 3. Кривые напряжения, тока и расчетного динамического сопротивления  
Fig. 3. Oscillograms of voltage, pulse current, and dynamic resistance

На рис. 4 приведены эквипотенциальные линии, построенные по экспериментальным данным. Видно, что потенциалы распространяются несимметрично вокруг электрода.

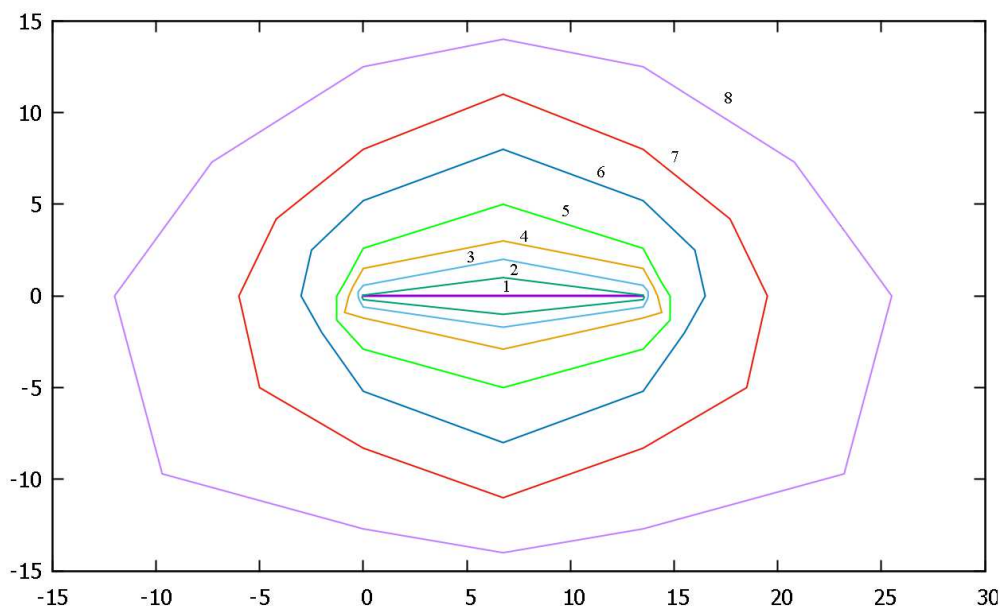


Рис. 4. Эквипотенциальные линии, построенные по экспериментальным данным  
Fig. 4. Equipotential lines derived from the experimental data

Одной из целей данной работы было исследование влияния образования искровых каналов в грунте на распределение потенциалов. Для этого необходимо сравнить полученные данные с результатами расчетов.

Для расчета использовался программный комплекс FEMM (Finite Element Method Magnetic), который решает уравнения Максвелла методом конечных элементов. На рис. 5 представлены эквипотенциальные линии, полученные в ходе расчетов.

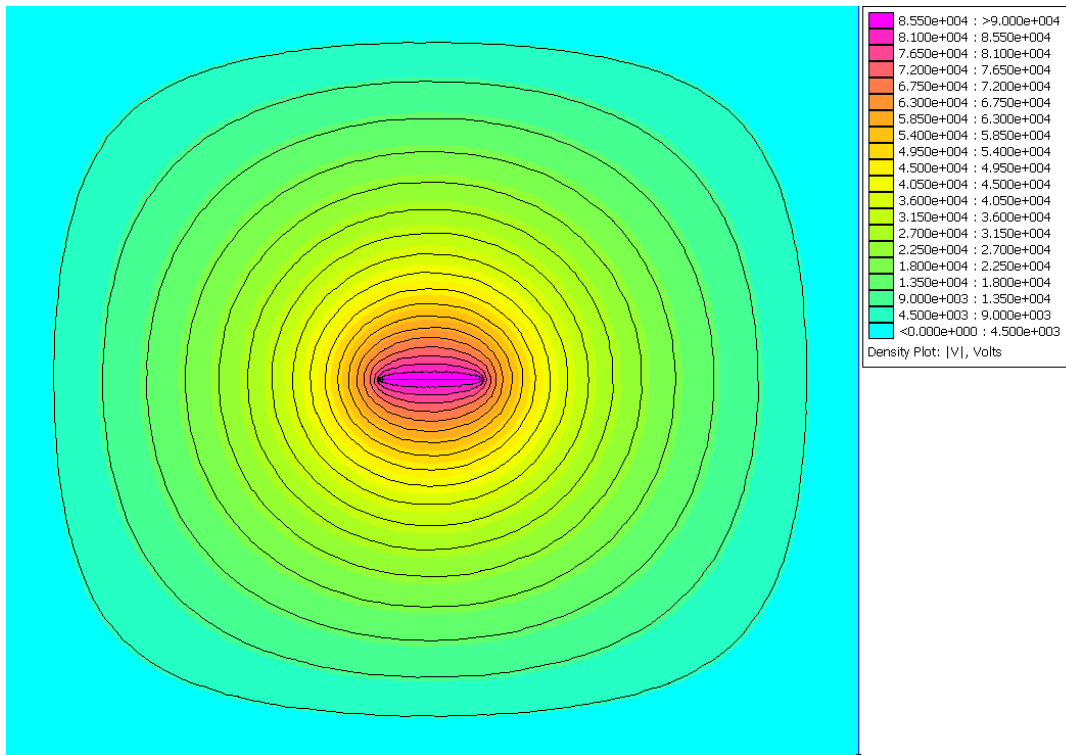


Рис. 5. Эквипотенциальные линии, построенные по расчетным данным  
Fig. 5. Equipotential lines derived from the calculated data

Для наглядного сравнения экспериментальных данных с расчетными были построены графики изменения потенциалов в зависимости от удаления от электрода (рис. 6). Для сравнения были выбраны направления измерения 1, 2, 4 (рис. 2).

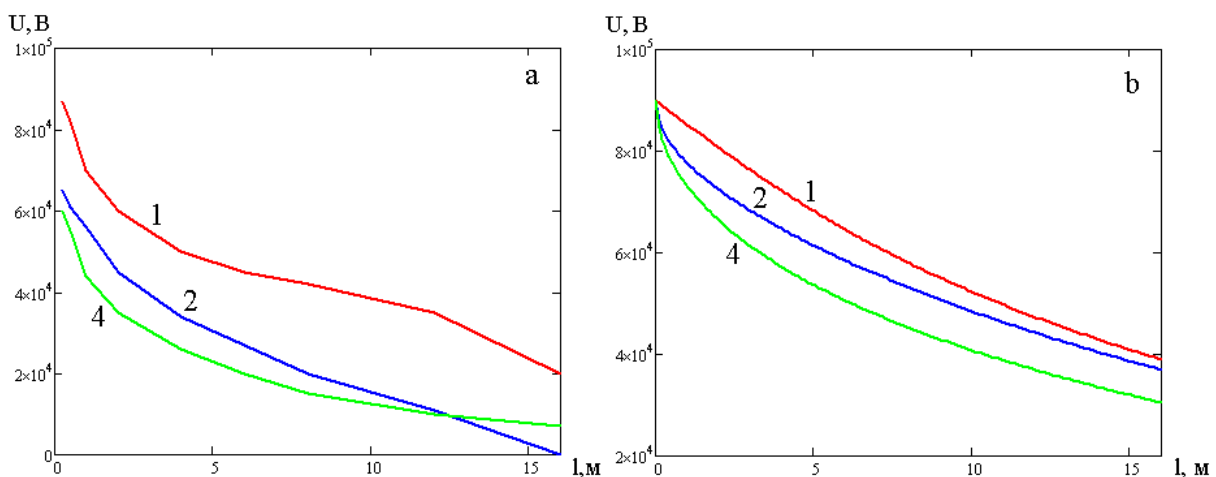


Рис. 6. Зависимость значения потенциала в грунте от расстояния до электрода:  
a – экспериментальные данные; b – расчетные данные  
Fig. 6. The dependence of the potential value in the soil on the distance to the electrode:  
a – experimental data; b – calculated data

Из полученных кривых можно сделать несколько выводов. Во-первых, значения потенциалов в эксперименте значительно ниже, чем расчетные данные. Это можно объяснить тем, что полигон располагался на скальной поверхности, поэтому грунт имел двухслойную структуру. В ходе эксперимента было измерено удельное сопротивление верхнего слоя грунта, при этом нижний слой имеет значение удельного сопротивления

на порядок больше, что в значительной степени и сказалось на измеренных значениях потенциалов. Для подтверждения данной теории необходимо провести более детальное зондирование грунта полигона. Несмотря на это, из рисунка видно, что значения потенциалов в ближней зоне (до 2 м), полученные в ходе эксперимента, схожи с расчетными данными. Это явление вызвано процессами ионизации и искрообразования, возникающими в окружающем заземлителе грунте в результате протекания токов большой амплитуды. Сопротивление искровых каналов значительно меньше сопротивления грунта, в результате чего удельное сопротивление уменьшается и, как следствие, уменьшается полное сопротивление заземлителя.

Во-вторых, из экспериментальных данных видно, что скорость падения потенциалов большая (до 4 м) и затем уменьшается. Это также объясняется образованием искровых каналов в грунтах в ближней зоне у электрода.

### **Заключение**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований распределения потенциалов в грунтах с высоким удельным сопротивлением вокруг протяженного заземлителя. Показано влияние возникающих в грунтах искровых каналов на значения потенциалов. В дальнейшем необходимо изучить влияние амплитуды напряжения приложенного импульса на радиус образующейся зоны искрообразования.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 16-38-00443.

### **Библиографический список**

1. Бургсдорф В. В., Якобс А. И. Заземляющие устройства электроустановок. М. : Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
2. Целебровский Ю. В. Заземляющие устройства как элемент молниезащиты. Вопросы, требующие решения : сб. докл. IV Междунар. конф. по молниезащите, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2014 г. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 121–128.
3. Данилин А. Н., Ивонин В. В. Зондовые измерения процессов растекания импульсных токов в увлажненном грунте // Труды КНЦ РАН. 2014. № 7 (26). С. 31–35. (Энергетика ; вып. 9).
4. Оптические исследования искровых каналов в грунте при растекании импульсного тока / В. В. Ивонин, А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, В. В. Колобов, В. Н. Селиванов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 50–53.
5. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading / L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, E. E. Son, B. V. Efimov, A. N. Danilin, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, V. V. Ivonin // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 285–201.

### **References**

1. Burgsdorf V. V., Yakobs A. I. Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok [The grounding of electrical devices]. M. : Energoatomizdat, 1987. 400 p.
2. Tselebrovskiy Yu. V. Zazemlyayushchie ustroystva kak element molniezaschity. Voprosy, trebuyushchie resheniya [Earthing device as an element of lightning protection. Issues to be solved] : sb. dokl. IV Mezhdunar. konf. po molniezaschite, Sankt-Peterburg, 27–29 maya 2014 g. SPb. : Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. P. 121–128.
3. Danilin A. N., Ivonin V. V. Zondovye izmereniya protsessov rastekaniya impulsnyh tokov v uvlazhnennom grunte [Probe measurements of pulse currents spreading processes in the moist soil] // Trudy KNTs RAN. 2014. N 7 (26). P. 31–35. (Energetika ; vyp. 9).
4. Opticheskie issledovaniya iskrovyyh kanalov v grunte pri rastekanii impulsnogo toka [Optical studies of spark channels in the soil during the spreading of the pulse current] / V. V. Ivonin, A. N. Danilin, B. V. Efimov, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, E. E. Son // Prikladnaya fizika. 2015. N 4. P. 50–53.
5. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading / L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, E. E. Son, B. V. Efimov, A. N. Danilin, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, V. V. Ivonin // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 285–201.

### **Сведения об авторе**

**Ивонин Виктор Владимирович** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, аспирант;  
e-mail: ivoninviktor@mail.ru

**Ivonin V. V.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Ph.D. Student;  
e-mail: ivoninviktor@mail.ru

V. V. Ivonin

### **Potentials' distribution in high resistivity soil around extended grounding electrodes**

The potential distribution in high resistivity soil around extended grounding electrodes has been described in the paper. The high-voltage polygon has been developed for experimental investigation. It is well known that direct or indirect lightning discharges could produce dangerous conditions for human body, as well as unwanted electromagnetic interferences among electrical and electronic systems. Therefore the electromagnetic characterization of earth electrodes under high pulse transient currents is an important highpoint in the design of a grounding system. The Marx generator was developed to generate impulse similar to lightning impulse. The potentials have been measured by the probe measurement system previously developed. Grounding resistance is the main characteristic of the grounding systems. From the literature analysis and experimental data it has been shown that steady state grounding resistance can differ from impulse grounding resistance. This phenomenon is caused by the ionization process and sparking occurring in the surrounding soil. Channel spark resistance is much less soil resistivity, therefore the soil resistivity and grounding resistance decrease. Calculations of potentials in the soil have been carried out using the finite element method. The experimental data have been compared with the results of the potential distribution calculation. It has been shown that the resulting spark channels in soils significantly affect the potential distribution. Accordingly, the sparking channels are to be considered while calculating the step voltage.

**Key words:** grounding, extended grounding electrodes, potential distribution, soil ionization, spark formation in soil.