

УДК 621.311

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

В лабораторных условиях исследовано возникновение искровых каналов во влажном грунте у электрода при растекании импульсного тока длительностью 5—100 мкс при амплитуде импульса напряжения 20—50 кВ. Разработана методика регистрации искровых каналов в объеме грунта. Впервые получены оптические изображения искровых каналов в грунте. Определены пороговые значения плотности тока и напряженности электрического поля при образовании плазменных каналов в зависимости от влажности грунта и длительности импульсного воздействия.

PACS: 52.80, 51.50.

Ключевые слова: заземление, молния, грунт, искрообразование, импульсный ток.

Введение

Исследования растекания импульсного тока с заземлителей в различных грунтах проводятся как в лабораториях, так и в полевых условиях достаточно давно, начиная с сороковых годов прошлого столетия [1—8].

При растекании больших импульсных токов в грунте как электрические свойства самого грунта, так и характеристики заземления могут существенно отличаться от величин, полученных при растекании слабого стационарного тока. Это связано с ионизацией грунта вблизи электрода и образованием искровых каналов, что приводит к заметному снижению удельного сопротивления грунта ρ [1—3]. 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 [4]. Ионизация в грунте, сопровождающаяся образованием искровых каналов, начинается при напряженности электрического поля $E = 4—16$ кВ/см [9—11]. Искровые каналы могут образоваться также в воздухе на поверхности грунта вблизи заземлителя, а при растекании многокилоамперных токов при ударах молнии или от мощных импульсных генераторов могут образоваться протяженные искровые каналы длиной до 100 м, развивающихся в виде скользящего разряда по поверхности грунта [12, 13]. Они регистрируются как с помощью скоростных камер, так и фотоаппаратами с открытым затвором. Однако образование искровых каналов непосредственно в объеме грунта до настоящего времени оптическими методами не зафиксировано из-за сложности регистрации в подобных условиях.

В данной работе предложена методика и разработана оптическая диагностика искровых каналов в объеме грунта. Впервые получены оптические изображения искровых каналов в объеме грунта вблизи электрода. Условия образования искровых каналов подтверждают предположения, высказанные нами ранее в работах [14, 15], что причиной образования искровых каналов на нелинейной стадии растекания импульсного тока в грунте является ионизационно-перегревная неустойчивость, возникающая при плотности тока на электроде больше критической ($j > j_c$).

Ивонин Виктор Владимирович, аспирант¹.
Данилин Аркадий Николаевич, зав. лабораторией¹.
Ефимов Борис Васильевич, директор¹.
Колобов Виталий Валентинович, вед. научный сотрудник¹.
Селиванов Василий Николаевич, зам. директора¹.
Василяк Леонид Михайлович, гл. научный сотрудник².
Ветчинин Сергей Петрович, ст. научный сотрудник².
Печеркин Владимир Яковлевич, ст. научный сотрудник².
Сон Эдуард Евгеньевич, зам. директора².

¹Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН.
Россия, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14.
Тел. (815) 557-95-29. E-mail: danilin@ien.kolasc.net.ru

²Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 29 июня 2015 г.

© Ивонин В. В., Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Селиванов В. Н., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е., 2015

Экспериментальная часть

Исследования проводились в оптически прозрачной диэлектрической емкости цилиндрической формы диаметром 30 см и высотой 50 см, наполненной влажным кварцевым песком. Внутренние стенки емкости были покрыты медной фольгой для создания заземленного экрана. На боковой поверхности в фольге имелось прямоугольное отверстие 20×13 см для оптической регистрации излучения искровых разрядов в песке цифровым фотоаппаратом через прозрачную стенку. Высоковольтный электрод располагался внутри емкости в толще песка и прислонялся к прозрачной стенке в окне заземленного экрана. Фотоаппарат устанавливался напротив окна на расстоянии 20 см от него.

Импульсы напряжения различной длительности с амплитудой $U_0 = 10\text{—}50$ кВ формировались с помощью генератора импульсного напряжения (ГИН) с ударной емкостью $C = 0,05$ мкФ. Длительность фронта импульса не превышала 200 нс. Длительность высоковольтного импульса τ могла изменяться с помощью формирующей RC-цепочки в диапазоне от нескольких микросекунд до сотен микросекунд. Импульсы тока и напряжения регистрировались 4-х каналным цифровым осциллографом Tektronix DPO 7054.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Оптическими методами были исследованы процессы искрообразования во влажном кварцевом песке с электродами шаровой формы, с электродами в виде дисков и с электродами в виде уголков. Процесс искрообразования при напряжении до 50 кВ удалось зафиксировать только на дисковых и угольковых электродах, вблизи которых электрическое поле резко неоднородно. На шаровых электродах диаметром 20 и 30 мм процесс искрообразования не удалось зафиксировать при различных амплитудах и длительностях импульсов напряжения, а также при различной влажности песка.

На рис. 1 показан типичный процесс образования искровых каналов в песке вблизи края дискового электрода диаметром 21,5 мм толщиной 1 мм, прислоненного к окну. Следует отметить, что наблюдаемые разряды не являются скользящими разрядами вдоль поверхности стекла, поскольку песок и стекло имеют примерно одинаковую диэлектрическую проницаемость. Эти разряды являются разрядами в песке вблизи поверхности стеклянного окна.

На рис. 2 показаны осциллограммы тока и напряжения, а также динамическое сопротивление заземления дискового электрода при напряжении

ГИН $U_0 = 30$ кВ и длительности импульса подаваемого напряжения $\tau = 50$ мкс. 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. Опыты с импульсами напряжения минимальной длительности показали, что процесс искрообразования при напряжении $U = 30$ кВ начинает развиваться при длительности импульса $\tau = 10$ мкс и происходит за время 2—4 мкс. При этом сопротивление заземления падает примерно в два раза.

Задержка процесса начала искрообразования от начала подачи импульса напряжения определяется временем развития ионизационно-перегревной неустойчивости [14, 15] во влажном песке, которая больше времени развития ионизационно-перегревной неустойчивости в атмосферном воздухе. Последнее связано с тем, что неустойчивость во влажном песке развивается при повышенном давлении в смеси воздуха с парами воды. С ростом и напряжения, и длительности импульса тока длина искровых каналов увеличивается. Также увеличивается яркость их свечения, которая носит факельный характер, что связано с повышением энерговклада в образующийся плазменный канал.

При увеличении длительности импульсов напряжения более 150 мкс динамическое сопротивление заземления выходит на минимальное значение, которое остается постоянным при дальнейшем увеличении длительности импульса.

На дисковом электроде толщиной 3 мм образования плазменных каналов также носит факельный характер, однако, плазменные каналы фиксируются при большей амплитуде напряжения и большей длительности импульсов. Ионизация на краях дисковых электродов носит многоискровой характер и наблюдается при плотностях тока $j > j_c$, где $j_c \sim 0,5$ А/см² — критическая плотность тока развития ионизационно-перегревной неустойчивости, полученная из данных по динамическим ВАХ во влажном песке [14, 15]. Критическое поле ионизации в неоднородном поле E_c лежит в диапазоне 8—15 кВ/см и зависит от влажности песка.

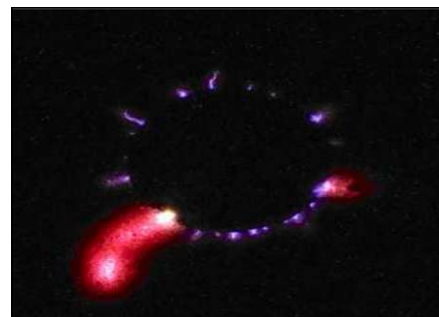


Рис. 1. Фотография искр в песке с дискового заземлителя. $U_0 = 30$ кВ, $\tau = 50$ мкс, влажность песка 10 %

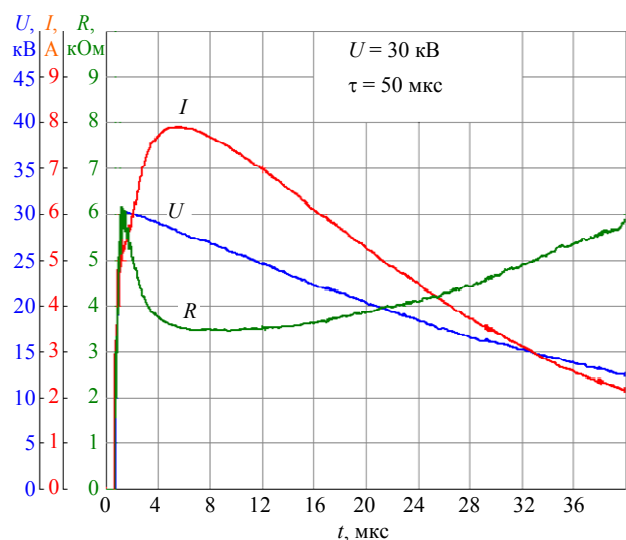


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока I , а также вычисленное динамическое сопротивление R . $U_0 = 30$ кВ, $\tau = 50$ мкс

Процессы искрообразования более выражены на заземлителях в виде уголков размером 35×35 мм с резко неоднородным электрическим полем на краях (рис. 3). Осциллограммы токов и напряжений на уголковых электродах при различных длительностях импульсов напряжения аналогичны осциллограммам на дисковых электродах. Процесс искрообразования начинается на электродах в местах с наибольшей плотностью тока, где максимальна неоднородность электрического поля. При влажности песка 10 % образование плазменных каналов носит факельный характер, как и на дисковых электродах. Однако, при влажности песка 20 % образуются контрагированные искровые каналы. При амплитуде импульсов напряжения $U = 30$ кВ светящиеся искровые каналы были зафиксированы при минимальной длительности импульсов напряжения $\tau = 5$ мкс. В этом случае максимум импульсов тока наблюдался на осциллограммах на первой микросекунде, что намного раньше, чем достигается минимум сопротивления для уголкового электрода. Плотности тока и напряженности электрического поля на остриях велики даже при сравнительно низких амплитудах прикладываемого импульса напряжения, и в этом случае начало искрообразования, практически, не имеет задержки. Интенсивность искрообразования, зафиксированная оптическими методами, повышается с увеличением напряжения. При увеличении длительности импульса напряжения образуются более яркие и более протяженные контрагированные искровые каналы. В резко неоднородном электрическом поле области ионизации вблизи поверхности электрода сильно локализованы, что при большой плотности тока $j \gg j_c$ приводит к существенному увеличению

энерговклада в канал разряда. Повышение влажности грунта, а также увеличение плотности тока способствуют росту скорости гибели электронов в канале разряда, что приводит к наблюдаемому увеличению контракции тока.

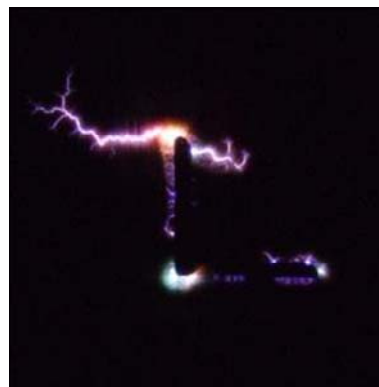


Рис. 3. Фотография искры в песке с уголкового заземлителя. $U_0 = 30$ кВ, влажность песка 20%, $\tau = 100$ мкс

Заключение

Оптическими методами с помощью фотокамеры с открытым затвором зафиксировано образование плазменных искровых каналов в грунте вблизи электрода. Впервые показано, что при превышении критической плотности импульсного тока, стекающего с электрода, образуются плазменные каналы, в результате чего динамическое сопротивление заземления резко падает.

Обнаружено, что во влажном песке в симметричных электродных системах с неоднородным электрическим полем формирование плазменных каналов наступает с задержкой 3—5 мкс и носит факельный характер. В несимметричных системах электродов в виде уголков с острыми краями образование искровых каналов происходит практически на фронте импульса напряжения и носит ярко выраженный контрагированный характер.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, грант 14-08-00573.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nor M. N. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. V. 48. No. 4. P. 826.
2. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения. — М: Энергия, 1978.
3. Базелян Э. М., Скобарихин Ю. В., Манасытов Р. Ф. // Известия академии наук. Серия энергетика. 2010. № 5. С. 33.
4. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001.
5. Uman M. A. The Art and Science of Lightning Protection. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

6. Mousa A. M. // IEEE Transactions on Power Delivery. 1994. V. 9. No. 3. P. 1669.
7. Chen Y., Chowdhuri P. // Proc. Inst. Elect. Eng. Generation Transm. Distrib. 2003. V. 150. No. 4. P. 420.
8. Sunde E. D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. — Van Nostrand Co., New York, NY, 1949.
9. Nor M. N., Haddad N. A., Griffiths H. // IEEE Trans. Power Delivery. 2006. V. 21. P. 353.
10. Yasuda Y., Kondo S., Hara T., et al. // IEEJ Transactions on Power and Energy. 2003. V. 123B. No. 6. P. 718.
11. Анненков В. З. // Электричество. 1993. № 12. С. 15.
12. Вилков Ю. В., Кравченко А. С., Саиткулов М. М. и др. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 75.
13. Базелян Э. М., Хлопов А. З., Шкилев А. В. // Электричество. 1992. № 9. С. 19.
14. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А. и др. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 825.
15. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 285201.

Optical investigations of spark channels in soil under spreading of pulse current

V. V. Ivonin¹, A. N. Danilin¹, B. V. Efimov¹, V. V. Kolobov¹, V. N. Selivanov¹,
L. M. Vasilyak², S. P. Vetchinin², V. Ya. Pecherkin², and E. E. Son²

¹Center for Physical and Technological Problems of Energy
in Northern Areas of the Kola Science Center of RAS,
14 Fersman str, Apatity, Murmansk Region, 184209, Russia
E-mail: danilin@ien.kolasc.net.ru

²Join Institute for High Temperatures of RAS
13/2 Izhorskaya str, Moscow, 15412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Received June 29, 2015

Laboratory experimental investigations of spark channels occurrence in wet soil at an electrode under spreading of pulse current lasting 5—100 microseconds with voltage pulse amplitude of 20—50 kV were carried out. Registration of spark channels in soil was developed. Optical images of spark channels in soil are for the first time obtained. Threshold values of current density and electric field strength at formation of plasma channels depending on humidity of soil and duration of pulse action are obtained.

PACS: 52.80, 51.50.

Keywords: grounding, lightning, soil, sparking, pulse current.

REFERENCES

1. M. N. Nor, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility **48**, 826 (2006).
2. E. Ya. Ryabkova, *Grounding in High Voltage Devices* (Energiya, Moscow, 1978) [in Russian].
3. E. M. Bazelyan, Yu. V. Skobarikhin, and R. F. Manasypov, Bull. Russ. Acad. Sci.: Energetics, No. 5, 33 (2010).
4. E. M. Bazelyan and Yu. P. Raizer, *Physics of Lightning and Lightning Protection* (Fizmatlit, Moscow, 2001) [in Russian].
5. M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection* (Cambridge : Cambridge University Press, 2008).
6. A. M. Mousa, IEEE Transactions on Power Delivery **9**, 1669 (1994).
7. Y. Chen and P. Chowdhuri, Proc. Inst. Elect. Eng. Generation Transm. Distrib. **150**, 420 (2003).
8. E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems* (Van Nostrand Co., New York, NY, 1949).
9. M. N. Nor, N. A. Haddad, and H. Griffiths, IEEE Trans. Power Delivery **21**, 353 (2006).
10. Y. Yasuda, S. Kondo, T. Hara, et al., IEEJ Transactions on Power and Energy **123B**, 718 (2003).
11. V. Z. Annenkov, Elektrichestvo, No. 12, 15 (1993).
12. Yu. V. Vilkov, A. S. Kravchenko, M. M. Saitkulov, et al., Instrum. Exp. Tech., No. 2, 75 (2009).
13. E. M. Bazelyan, A. Z. Khlopov, and A. V. Shkilev, Elektrichestvo, No. 9, 19 (1992).
14. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, et al., High Temperature **52**, 825 (2014).
15. L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 285201 (2015).

* * *