

04:07

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИСКРЫ НА РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛИННОГО ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА

О.Г.Иванов, О.П.Иванов, Г.Д.Кадзов, Л.Н.Пагомов

Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251
(Поступило в Редакцию 28 мая 1993 г.)

В длинном воздушном промежутке типа стержень-стержень на заземленной поверхности экспериментально показано существенное влияние лазерной искры на развитие и ориентировку электрического разряда в диапазоне задержек оптического пробоя в воздухе от 1300 до 2500 мкс относительно начала нарастания импульса напряжения на высоковольтном электроде. Установлено, что при совместном воздействии лазерной искры и импульса высокого напряжения отрицательной полярности с длиной фронта 3500 мкс наблюдаемая ориентировка электрического разряда по каналу лазерной искры позволяет сократить предразрядное время в промежутке до 60% от среднего предразрядного времени в промежутке без лазерной искры даже при минимальной выходной энергии лазера (около 150 Дж), а также снизить разрядное напряжение до 70% от среднеразрядного.

Развитие электрического разряда в длинных воздушных промежутках при комбинированном воздействии высокого напряжения и интенсивного лазерного излучения, вызывающего оптический пробой воздуха (лазерную искру), является предметом исследования целого ряда опубликованных работ [1-4]. Это объясняется большим прикладным значением исследуемой проблемы, например, в области разработки и создания современных эффективных систем молниезащиты объектов различного назначения. В этой связи ориентировка электрического разряда по каналу лазерной искры является наиболее наглядной иллюстрацией влияния лазерного излучения на процесс развития разряда [1].

В работе [2] оптический пробой в разрядном промежутке приводил к резкому изменению направления развития электрического разряда при совпадении его траектории с каналом лазерной искры, причем величина прикладываемого к разрядному промежутку высокого напряжения заведомо не обеспечивала его электрического пробоя при отсутствии лазерного излучения.

Приведенные в [3] результаты исследований показали возможность управления ориентировкой электрического разряда даже без совпа-

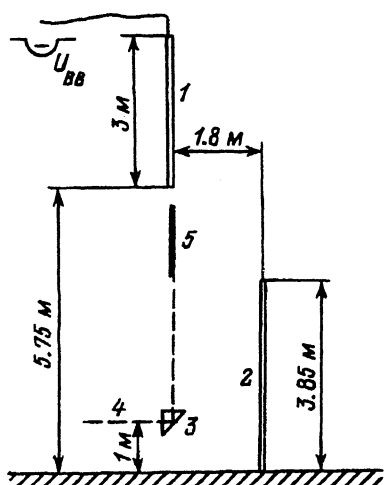


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — высоковольтный электрод; 2 — заземленный электрод; 3 — поворотная призма, совмещенная с фокусирующей линзой; 4 — нефокусированный лазерный луч; 5 — область лазерной искры.

дения его траектории с каналом лазерной искры, а продолженные в работе [4] исследования подтвердили перспективность использования лазерного излучения в системах молниезащиты заземленных объектов.

Наиболее благоприятные условия для ориентировки электрического разряда по каналу лазерной искры установлены в [4], где показано, что вероятность ориентировки разряда по искре существенно возрастает при приложении к длинному воздушному промежутку импульса напряжения отрицательной полярности с длиной фронта 3500 мкс и задержке среза высокого напряжения относительно момента создания оптического пробоя в промежутке на 100 мкс.

Следует отметить, однако, что для практического использования лазерной искры, в том числе при молниезащите, наряду с ориентировкой электрического разряда большое значение имеет влияние лазерного излучения на разрядные характеристики воздушных промежутков. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование зависимости предразрядного времени t_p в промежутке от момента создания в нем лазерной искры.

Исследования проводились на высоковольтном стенде наружных испытаний СПбГУ в воздушном промежутке типа стержень-стержень на заземленной плоскости.

В качестве источника высокого напряжения использовался каскад испытательных трансформаторов мощностью 4950 кВ·А, обеспечивающий на выходе импульс напряжения с длительностью фронта $t_f = 3500$ мкс и максимальной амплитудой $U_m = 2500$ кВ. Так как преобладающее количество наблюдаемых в природе молний имеют отрицательную полярность переносимого на землю заряда, то при испытаниях использовался импульс напряжения отрицательной полярности, который прикладывался к стержневому высоковольтному электроду согласно схеме (рис. 1).

Канал лазерной искры в воздушном промежутке создавался при оптическом пробое воздуха с помощью моноимпульсного неодимового лазера с выходной энергией 150 Дж при длительности импульса 50 нс и угловой расходимостью $3 \cdot 10^{-4}$. В разрядный промежуток световой пучок лазера выводился с помощью призмы полного внутреннего отраже-

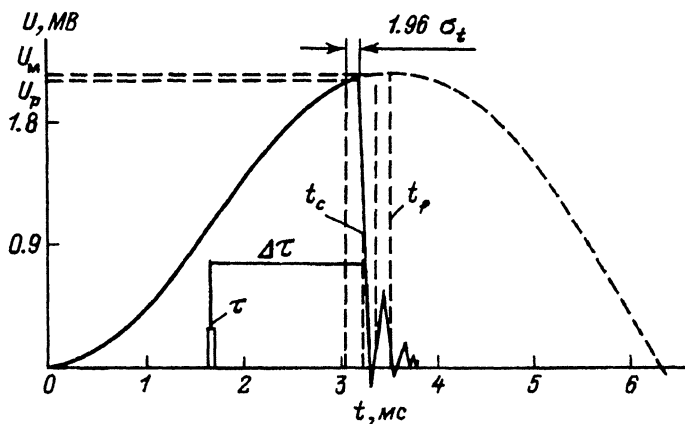


Рис. 2. Типичная осциллограмма импульса высокого напряжения и импульса синхронизации лазера.

ния, ориентирующей канал лазерной искры вертикально, параллельно оси высоковольтного электрода (рис. 1). При фокусировке лазерного луча линзой с фокусным расстоянием, равным 3 м, расстояние между отдельными очагами оптического пробоя воздуха составляло 3–5 см на протяжении 1.5–2.0 м. Верхняя и нижняя границы плотной части лазерной искры находилась на высоте 5.7 и 3.9 м соответственно.

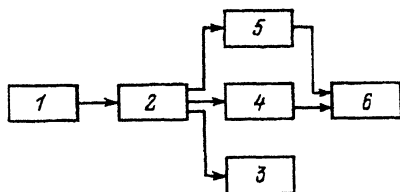
Оптический пробой в промежутке осуществлялся с временной задержкой τ относительно начала нарастания импульса напряжения на высоковольтном электроде (рис. 2). Синхронизация совместной работы высоковольтной и лазерной установок производилась в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 3.

Траектория развития электрического разряда в воздушном промежутке фиксировалась визуально и с помощью фотоаппарата. Характерные фотографии электрического разряда при воздействии лазерной искры и без нее представлены на рис. 4, а и б соответственно.

Исследование разрядных характеристик воздушного промежутка выполнялось следующим образом. Сначала в серии опытов определялись среднеразрядное напряжение U_p и среднее предразрядное время t_c в промежутке без воздействия лазерной искры. При этом амплитуда прикладываемого к высоковольтному электроду импульса напряжения U_m не изменялась и обеспечивала вероятность пробоя промежутка на уровне 0.97. Затем, исходя из установленной величины среднего предразрядного времени в промежутке без лазерной искры t_c и среднеквадратичного отклонения измеренной величины σ_{t_p} , выбиралась временная задержка момента создания оптического пробоя τ относительно начала нарастания импульса напряжения таким образом,

Рис. 3. Блок-схема синхронизации высоковольтной лазерной установки.

1 — затвор фотоаппарата, 2 — генератор Г5-56, 3 — блок запуска каскада трансформаторов, 4 — блок накачки лазера, 5 — активный лазерный затвор, 6 — лазер.



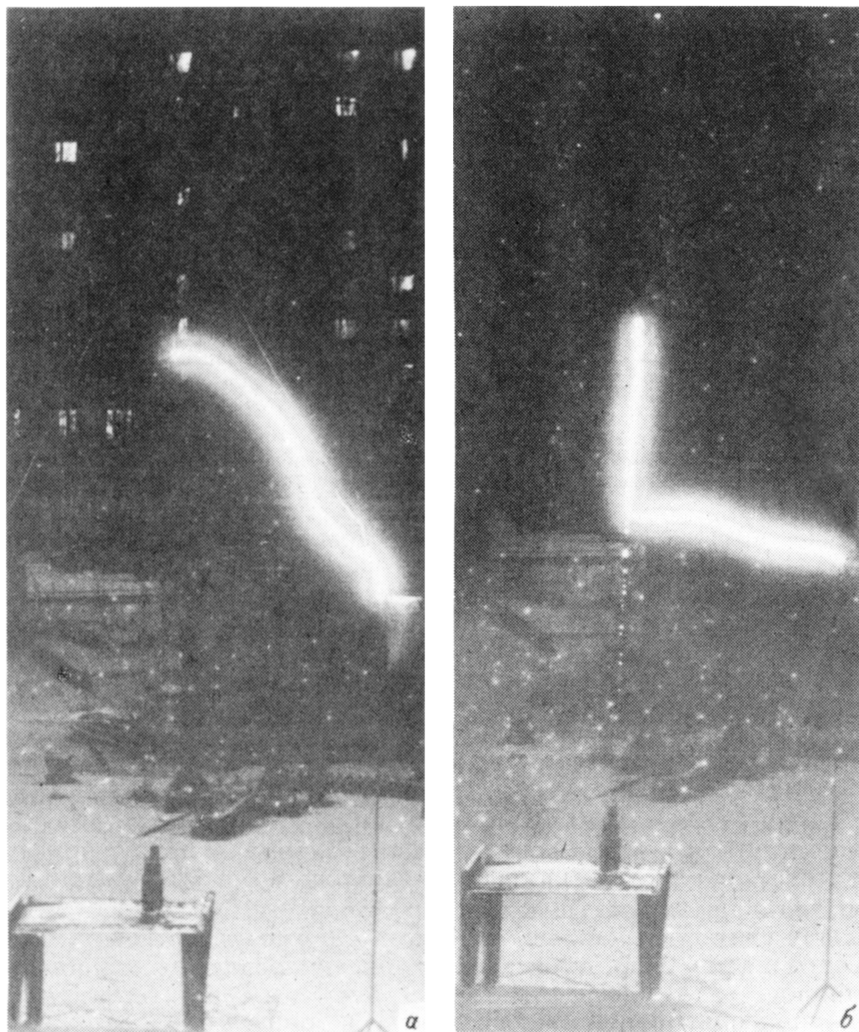


Рис. 4. Типичные фотографии электрического разряда без лазерной искры (а) и при воздействии лазерной искры (б).

что $\tau < t_c - 1.96\sigma_{t_p}$, и проводился основной объем исследований при совместном воздействии высокого напряжения и лазерной искры. При исследованиях кроме амплитуды разрядного напряжения U_p и предразрядного времени t_c с помощью цифрового осциллографа С9-8 фиксировалась временная задержка среза высокого напряжения относительно лазерной искры $\Delta\tau$ (рис. 2).

В результате исследований было установлено, что в воздушном промежутке без воздействия лазерной искры среднеразрядное напряжение составило величину $U_p = 1940$ кВ при $\sigma_{U_p} = 60$ кВ, а среднее предразрядное время $t_c = 3200$ мкс при $\sigma_{t_p} = 70$ мкс. Причем, как показали наблюдения, во всех проведенных опытах электрический разряд

в промежутке развивался по кратчайшему пути между вершиной заземленного металлического стержня и нижним концом высоковольтного электрода (рис. 4,а).

При совместном воздействии лазерной искры и высокого напряжения траектории электрического разряда изменяется и пробой развивается обязательно по каналу лазерной искры, замыкаясь на вершину заземленного электрода лишь в завершающейся стадии (рис. 4,б).

Необходимо отметить, что ориентировка электрического разряда по каналу лазерной искры была отмечена во всех опытах независимо от момента создания оптического пробоя в воздушном промежутке, однако разрядные характеристики воздушного промежутка при этом весьма существенно изменяются. Так, если лазерная искра создавалась через время τ относительно момента приложения к промежутку импульса высокого напряжения (рис. 2), то при $\tau = 2500$ мкс амплитуда разрядного напряжения составила $U_p = 1780$ кВ, а предразрядное время $t_c = 2510$ мкс; при $\tau = 1500$ мкс $U_p = 1440$ кВ и $t_p = 2000$ мкс. Таким образом, рассматриваемые параметры разрядных характеристик воздушного промежутка уменьшились относительно установленных в промежутке без лазерной искры даже с учетом разброса их в доверительных интервалах, нижние границы которых при надежности 0.95 оцениваются величинами $U_p = \langle U \rangle - 1.96\sigma_{t_p} \approx 1820$ кВ и $t_p = \langle t_p \rangle - 1.96\sigma_{t_p} \approx 3060$ мкс.

Кроме перечисленного выше момент создания лазерной искры в промежутке τ оказывает влияние на временную задержку $\Delta\tau$ среза высокого напряжения относительно оптического пробоя в воздухе. Например, при оптическом пробое в промежутке через время $\tau = 2500$ мкс после приложения к высоковольтному электроду импульса напряжения срез высокого напряжения, соответствующий завершению электрическому разряду в воздушном промежутке, наблюдается с задержкой $\Delta\tau \approx 10$ мкс относительно момента создания лазерной искры. При $\tau = 1700$ мкс время задержки $\Delta\tau$ составило 400 мкс, а при $\tau = 1300$ мкс — даже 600 мкс. При этом величина разрядного напряжения составила соответственно $U_p = 1780, 1690, 1360$ кВ.

Приведенные на рис. 5 зависимости $U_p = f(\tau)$ и $\Delta\tau = f(\tau)$ показывают, что влияние параметра τ на задержку среза высокого напряжения относительно лазерного импульса $\Delta\tau$ более значительно, чем

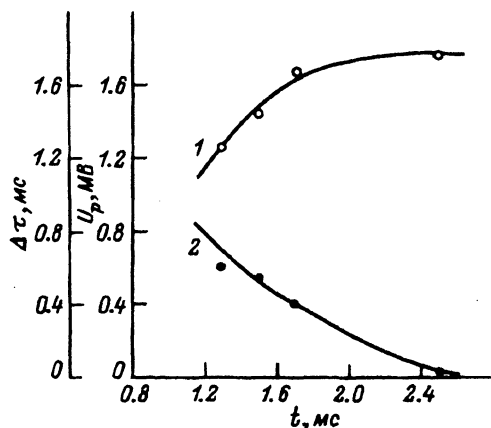


Рис. 5. Зависимость (1) разрядного напряжения в воздушном промежутке U_p и задержки среза высокого напряжения $\Delta\tau$ (2) от момента создания лазерной искры τ .

на величину разрядного напряжения U_p . Вероятно, это объясняется различными условиями формирования электрического разряда в промежутке, определяемыми моментом оптического пробоя τ . Так, при $\tau \approx t_p - 1.96\sigma_{t_p}$ высокой потенциал на высоковольтном электроде, близкий к среднеразрядному напряжению промежутка U_p , сразу после создания лазерной искры выносится по ее каналу в глубь разрядного промежутка, что приводит к практически мгновенному его полному перекрытию. Поэтому время $\Delta\tau$ весьма мало и при $\tau > 2500$ мкс составляет $\Delta\tau \approx 10$ мкс.

При $\tau \ll t_p$ амплитуда импульса напряжения на высоковольтном электроде и потенциал, выносимый по каналу лазерной искры, недостаточны как для развития завершеного электрического разряда с высоковольтного электрода, так и для электрического пробоя существенно более короткого промежутка между каналом лазерной искры и заземленным электродом. Поэтому электрический пробой происходит с задержкой относительно момента создания лазерной искры на время $\Delta\tau$, обеспечивающее преобразование лазерной искры под воздействием возрастающего высокого напряжения сначала в мощный стример, а затем в электропроводящий канал лидера. В результате этого потенциал высоковольтного электрода выносятся в глубь разрядного промежутка и завершённый электрический разряд, как и при $\tau \approx t_p$, происходит в промежутке при частичном прохождении траекторий разряда по лазерной искре, но при $U_p \ll U_{cp}$.

Таким образом, выполненные исследования показали, что оптический пробой в воздухе при длительности лазерного импульса около 50 нс и мощности излучения лазера порядка 150 Дж оказывает влияние на процесс завершеного электрического разряда даже через время $t = 2500$ мкс, т.е. период времени, превышающий в $5 \cdot 10^4$ раз длительность импульса, создающего лазерную искру. Кроме того, влияние лазерной искры на электрические характеристики воздушных промежутков (снижение разрядных напряжений и уменьшение предразрядных времен) подтверждает показанную в работах [3,4] возможность и перспективность использования лазерной искры при воздействии новых эффективных средств молниезащиты, а также использования лазерных разрядников, например, для ограничения перенапряжений в электроэнергетических установках и подстанциях СВН.

Выводы

1. В длинном воздушном промежутке типа стержень-стержень на заземленной поверхности при совместном воздействии лазерной искры и импульса высокого напряжения отрицательной полярности с длиной фронта $t_f = 3500$ мкс установлено, что наблюдаемая во всех опытах ориентировка электрического разряда по каналу лазерной искры позволяет при минимальной выходной энергии лазера 150 Дж даже сократить предразрядное время в промежутке до 60% от среднего предразрядного в промежутке без лазерной искры, а также снизить разрядное напряжение на 70% от среднеразрядного.

2. Экспериментально показано существенное влияние лазерной искры на механизм и ориентировку электрического разряда в диапазоне задержек оптического пробоя в воздухе τ от 1300 до 2500 мкс относительно начала нарастания импульса напряжения при временах запаз-

дывания пробоя относительно лазерной искры $\Delta\tau$, значительно превышающих длительность оптического импульса (около 50 нс) и составляющих, например, при $\tau = 1300$ мкс величину порядка $\Delta\tau = 600$ мкс.

3. Установленное в работе влияние лазерной искры на разрядные характеристики длинных воздушных промежутков определяет перспективность использования лазерной искры при создании новых средств молниезащиты или ограничителей перенапряжений в электроэнергетических установках сверхвысокого напряжения.

Список литературы

- [1] *Megumi Miki, Yoshinori Aihara, Takotishi Shindo.* // 7th Intern. Symposium on High Voltage Engineering. Dresden, 1991. P. 39-41.
 - [2] Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кадзев Г.Д., Патомов Л.Н. // ЖТФ. 1976. Т. 47. Вып. 10. С. 177.
 - [3] Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кадзев Г.Д. и др. // Электричество. 1980. № 2. С. 47-48.
 - [4] Александров Г.Н., Иванов О.Г., Иванов О.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 16. С. 19-23.
-