

04;12

©1993 г.

ВЛИЯНИЕ МАКЕТА ЛАЗЕРНОЙ ИСКРЫ НА РАЗВИТИЕ И ОРИЕНТИРОВКУ ЛИДЕРНОГО ПРОЦЕССА В ДЛИННОМ ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

О.П.Иванов, Г.Д.Кадзев

Экспериментально показана возможность моделирования лазерной искры металлическим стержнем или цепочкой последовательно соединенных отрезков металлического стержня при электрическом пробое в длинном воздушном промежутке. Определены геометрические соотношения макета лазерной искры, обеспечивающие максимальное подобие ориентировки лидерного разряда процессу, наблюдаемому при оптическом пробое воздуха. Приведены результаты исследований влияния макета лазерной искры на ориентировку лидера и установлены основные закономерности его ориентировки по каналу лазерной искры.

Показано, что даже при относительно малом заполнении лазерной искры плазменными образованиями, составляющими не более 0.1 от общей длины канала искры, целесообразно использование оптического пробоя над вершиной стержневого молниеотвода, увеличивающего эффективную высоту молниеотвода на длину лазерной искры.

Разработка эффективных мероприятий по повышению надежности молниезащиты наземных сооружений предполагает управление ориентировкой молнии в разрядном промежутке облако-земля. Поэтому проблема ориентировки в воздушных промежутках длинной электрической искры, имеющей сходный с молнией характер развития, является предметом исследования целого ряда работ, опубликованных в настоящее время [1-3]. В работах теоретически и экспериментально обоснованы способы управления ориентировкой молнии, среди которых наиболее перспективным является активное управление с помощью интенсивного лазерного излучения, вызывающего оптический пробой воздуха (лазерную искру) [4,5].

Как показано в [4] на основании результатов исследований защитного действия одиночного стержневого молниеотвода, оптический пробой воздуха над вершиной молниеотвода эквивалентен увеличению высоты молниеотвода на длину лазерной искры, хотя и не сопровождается ориентировкой лидерного разряда на канал лазерной искры.

Непосредственное развитие траектории лидерного разряда по лазерной искре зафиксировано в [5], где было установлено, что вероятность прохождения электрического разряда по каналу лазерной искры и длина ориентированной части разряда определяются напряженностью элек-

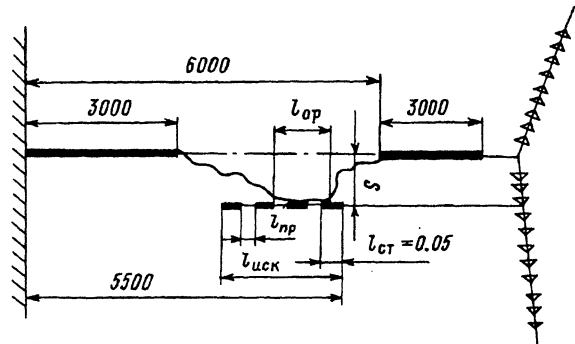


Рис. 1. Схема моделирования лазерной искры в длинном воздушном промежутке.

трического поля в промежутке, причем лазерная искра оказывает существенное влияние на ориентировку электрического разряда даже при относительно малом заполнении плазменными образованиями разрядного промежутка, когда суммарная протяженность видимых очагов оптического пробоя, расположенных в плотной части искры на расстоянии 3–5 см друг от друга, составляет не более 0.1 длины разрядного промежутка.

Следует отметить, что ограниченный ресурс работы лазера и высокая трудоемкость экспериментов с его использованием не позволяют установить достаточно полно закономерности влияния на ориентировку электрического разряда основных параметров лазерной искры, например ее общей длины и плотности заполнения канала лазерной искры плазменными образованиями. Однако, учитывая, что наблюдаемое в [5] развитие электрического разряда по лазерной искре, по-видимому, объясняется образованием столба воздуха с повышенной температурой и пониженным давлением при релаксации лазерной искры, закономерности влияния лазерной искры на развитие электрического разряда могут быть установлены при моделировании лазерной искры металлическим стержнем равной длины или цепочкой последовательно соединенных металлических стержней, моделирующих ее плазменные образования.

Влияние изолированных металлических тел на развитие лидерного процесса и разрядные характеристики воздушных промежутков типа стержень–плоскость и шар–плоскость было показано в работах [6,7], где снижение электрической прочности промежутка происходило в результате развития вблизи поверхности изолированного тела ионизационных процессов, являющихся источниками мощных стримеров, преобразуемых в лидерный канал. Таким образом, наличие в разрядном промежутке цепочки металлических тел, ориентированной вдоль оси промежутка, предопределяет завершение лидерного разряда в воздушном промежутке при напряжении существенно более низком, чем в однородном промежутке [7]. Соответственно ориентировка траектории лидерного разряда по цепочке проводящих изолированных тел в промежутке, так же как и плазменным образованиям лазерной искры, определяет возможность активного управления ориентировкой разряда в системе молниезащиты.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможности моделирования лазерной искры в разрядном промежутке и влияния ее основных параметров на ориентировку и развитие лидерного процесса.

Принятая в работе схема исследований аналогична используемой в [5] при оптическом пробое воздуха в разрядном промежутке. Поэтому моделирование процесса ориентировки лидерного разряда по лазерной искре обеспечивало максимальную сопоставимость результатов исследований с данными, полученными в работе [5].

Разрядный промежуток при исследованиях был образован высоковольтным электродом в виде стержня длиной 3 м и диаметром 0.05 м, подвешенным над заземленной поверхностью на высоте $H = 6$ м согласно схеме (рис. 1).

На поверхности земли соосно с высоковольтным электродом устанавливался подножник в виде вертикального стержня высотой 3 м, выполненного из металлического прутка диаметром 0.03 м.

Канал лазерной искры макетировался металлическим стержнем диаметром 0.005 м или пепочкой, составленной из отрезков стержня длиной 0.025 м, последовательно соединенных капроновой нитью с интервалом 0.025 или 0.05 м. Общая длина макета лазерной искры составляла 0.5, 1 или 1.5 м. При исследованиях макет лазерной искры располагался параллельно вертикальной оси воздушного разрядного промежутка таким образом, что независимо от общей длины макета его верхний конец находился на высоте 5.5 м от поверхности земли. Горизонтальное смещение S макета искры относительно высоковольтного электрода изменялось от 0 до 3 м.

К высоковольтному электроду подводился, как и в [4,5], импульс напряжения положительной полярности с длиной фронта $t_{фр} = 3500$ мкс.



Рис. 2. Типичная траектория лазерного разряда в промежутке с макетом лазерной искры.

Амплитуда импульса напряжения обеспечивала развитие завершеного лидерного разряда на стойку подложника с вероятностью около 0.95.

При исследованиях визуально и с помощью фотоаппарата фиксировалась траектория развития разряда. Типичная фотография траектории разряда приведена на рис. 2. Было установлено, что если при отсутствии макета лазерной искры отклонение траектории разряда равновероятно в любом направлении от вертикальной оси разрядного промежутка, то при наличии в промежутке макета искры наблюдалось отклонение траектории разряда в сторону макета при полном или частичном совпадении ее со стержнем макета. При этом ориентировка лидерного разряда на макет лазерной искры считалась состоявшейся при совпадении траектории разряда со стержнем макета на участке, превышающем 5% его длины.

Согласно результатам исследований (см. таблицу), при соосном расположении макета искры и высоковольтного электрода ($S = 0$) траектории практически всех наблюдаемых лидерных разрядов совпали с макетом лазерной искры независимо от варианта исполнения макета и его общей длины. При этом ориентированная вдоль макета часть траектории лидера равнялась длине макета $l_{иск}$.

При смещении макета искры относительно высоковольтного электрода на расстояние $S = 0.2$ м характер ориентировки разряда изменяется весьма незначительно. Так, вероятность ориентировки лидера по стержневому макету лазерной искры длиной $l_{иск} = 1.5$ м составляет $\Psi_{ор} = 0.99$ при $S = 0$, а при $S = 0.2$ м $\Psi_{ор} = 0.97$. Аналогично для цепочки из последовательно соединенных стержней с интервалом $l_{пр} = 0.025$ м зафиксировано $\Psi_{ор} = 0.98$ при $S = 0$ и $\Psi_{ор} = 0.95$ при $S = 0.2$ м.

Влияние длины макета искры $l_{иск}$ и его смещения S относительно высоковольтного электрода на вероятность ориентировки лидера по макету лазерной искры $\Psi_{ор}$ существенно возрастает при $S > 0.5$ м. Например, при $S = 0.5$ м вероятность ориентировки лидера по макету длиной $l_{иск} = 0.5$ м составила $\Psi_{ор} = 0.66$, что почти в 1.5 раза меньше, чем при длине макета, равной $l_{иск} = 1.5$ м ($\Psi_{ор} = 0.95$). Заметное уменьшение влияния стержневого макета лазерной искры длиной $l_{иск} = 1.5$ м отмечено только при смещении его на расстояние $S = 1.0$ м ($\Psi_{ор} = 0.69$). Практическое отсутствие влияния стержневого макета лазерной искры на ориентировку лидерного разряда зафиксировано при смещении макета длиной $l_{иск} = 1.5$ м на расстояние $S = 3$ м ($\Psi_{ор} = 0.02$), а макета длиной $l_{иск} = 0.5$ м — на расстояние $S = 2$ м ($\Psi_{ор} = 0.01$).

Влияние цепочки из последовательно соединенных отрезков металлического стержня при общей длине $l_{иск} = 1.5$ м зависит от длины промежутков $l_{пр}$ между стержнями. Так, согласно данным (см. таблицу), при $l_{пр} = 0.05$ м и $S = 0.4$ м вероятность ориентировки лидера на макет искры составляет $\Psi_{ор} = 0.6$, а при том же смещении S , но $l_{пр} = 0.025$ м $\Psi_{ор} = 0.16$, т.е. уменьшается более чем в 3.7 раза.

Наименьшее зафиксированное в работе влияние исследованных макетов искры в виде цепочки стержней на ориентировку лидерного разряда соответствует $S = 0.7$ м ($\Psi_{ор} = 0.003$) при $l_{пр} = 0.05$ м и $S = 1.6$ м ($\Psi_{ор} = 0.09$) при $l_{пр} = 0.025$ м.

На основании результатов исследований построены зависимости вероятности ориентировки лидера $\Psi_{ор}$ по каналу лазерной искры различной длины $l_{иск}$ от смещения макета искры относительно вертикальной оси разрядного промежутка S . Приведенные на рис. 3 зависимости

Результаты исследования ориентировки лидера на макет лазерной искры

Вариант выполнения макета лазерной искры	Длина макета лазерной искры $l_{иск}, \text{ м}$	Смещение макета лазерной искры $S, \text{ м}$	Число опытов n_0	Число ориентировок по лазерной искре $n_{ор}$	Средняя длина ориентированной части лидера $l_{ор}, \text{ м}$	Вероятность ориентировки лидера по искре $\Psi_{ор}$	
Стержень	0.5	0	50	47	0.475	0.94	
		0.2	50	43	0.475	0.86	
		0.5	50	33	0.475	0.66	
		1.0	100	43	0.45	0.43	
		1.5	100	8	0.45	0.08	
		2.0	100	2	0.4	0.02	
	1.0	0	50	48	0.95	0.96	
		0.2	50	47	0.95	0.94	
		0.5	50	46	0.95	0.92	
		1.0	100	55	0.8	0.55	
		1.5	100	29	0.8	0.29	
		2.0	100	14	0.7	0.14	
	1.5	0	100	99	1.425	0.99	
		0.2	100	97	1.425	0.97	
		0.5	100	96	1.425	0.96	
		1.0	100	69	1.35	0.69	
		1.5	100	52	0.9	0.52	
		2.0	100	31	0.6	0.31	
	Цепочка стержней; = 1.0	1.5	0	100	99	1.425	0.99
			0.2	100	93	1.2	0.93
			0.4	100	85	0.9	0.85
1.0			100	38	0.9	0.38	
1.5			100	10	0.6	0.1	
Цепочка стержней; = 0.5	1.5	0	100	93	1.275	0.93	
		0.4	100	42	1.05	0.42	
		0.7	100	3	0.75	0.03	

$\Psi_{ор} = f(S)$ позволяют сопоставить результаты макетных исследований с данными, полученными в [5] при оптическом пробое воздуха в разрядном промежутке (на рис. 3 обозначено звездочкой).

Так, при равной длине канала реальной искры и ее макета ($l_{иск} = 1.5 \text{ м}$) и одинаковом смещении относительно оси разрядного промежутка ($S = 1.2 \text{ м}$) ориентировка лидера по искре ($\Psi_{ор} = 0.28$) близка к вероятности ориентировки на макет, выполненный в виде цепочки металлических стержней при $l_{ст} = 0.025 \text{ м}$ и $l_{пр} = 0.025 \text{ м}$ ($\Psi_{ор} = 0.27$). Таким образом,

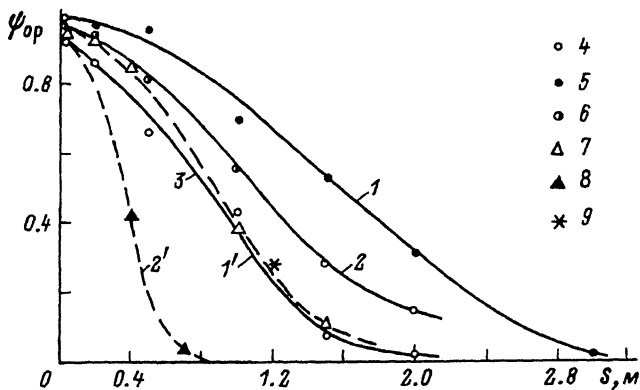


Рис. 3. Зависимость вероятности ориентировки $\Psi_{ор}$ лидерного разряда на макет лазерной искры от смещения S .

$l_{иск}$, м: 1,5 — 1,5; 2,4 — 1,0; 3,6 — 0,5;

$l_{пр}$, м: 1',7 — 0,05; 2',8 — 0,025; 9 — согласно [5]; 4-6 — стержневой макет; 7,8 — в виде цепочки.

моделирование оптического пробоя воздуха цепочкой последовательно соединенных металлических стержней при $l_{ст}/l_{пр} = 1$ обеспечивает наибольшее подобие исследуемого процесса реальной ориентировке лидерного разряда по каналу лазерной искры.

Необходимо отметить, что вероятность ориентировки лидера на металлический стержень длиной $l_{иск} = 0,5$ м ($\Psi_{ор} = 0,24$) примерно соответствует вероятности ориентировки лидера по каналу реальной лазерной искры длиной $l_{иск} = 1,5$ м ($\Psi_{ор} = 0,28$), наблюдаемой в [5], при одинаковом смещении лазерной искры и ее стержневого макета относительно высоковольтного электрода. При этом, учитывая суммарную протяженность плазменных образований в канале реальной лазерной искры, которая не превышала 0,1 от ее общей длины (т.е. составляла не более 0,15 м), можно утверждать, что эффективность управления ориентировкой лидерного разряда при оптическом пробое воздуха над вершиной молниеотвода выше, чем при увеличении его высоты металлическим стержнем. Установленный эффект объясняется тем, что в сильном электрическом поле разрядного промежутка с напряженностью порядка 4,5 кВ/см плазменные образования лазерной искры служат дополнительным источником мощных встречных стримеров, определяя направление развития лидера.

Для практической молниезащиты существенно, что даже при отсутствии непосредственной ориентировки лидерного разряда по каналу лазерной искры ориентировка лидера на вертикальный металлический стержень, установленный на заземленной поверхности соосно с высоковольтным электродом, практически совпадает с вероятностью ориентировки на макет молниеотвода, высота которого увеличена на длину лазерной искры [4].

В этой связи повышение эффективности молниеотвода при оптическом пробое воздуха над его вершиной эквивалентно увеличению высоты молниеотвода на величину, равную длине канала лазерной искры. Учитывая, что используемые в настоящее время оптические генераторы обеспечивают реализацию лазерной искры длиной несколько десятков метров с плотностью, значительно превышающей наблюдаемую в [4], а стоимость

строительства и эксплуатации молниеотводов примерно пропорциональна квадрату их высоты, отметим, что повышение надежности молниеотводов вышеуказанным способом является реально осуществимым и целесообразным.

Заключение

1. Экспериментально установлены основные закономерности ориентировки лидерного разряда по каналу лазерной искры при моделировании ее металлическим стержнем или цепочкой последовательно соединенных отрезков металлического стержня.

2. Показано, что при моделировании лазерной искры вероятности ориентировки лидерного разряда на макет и по каналу реальной искры практически совпадают при выполнении макета искры в виде цепочки последовательно соединенных металлических стержней с соотношением их длины $l_{ст}$ к длине изолирующих промежутков $l_{пр}$, равным $l_{ст}/l_{пр} = 1$, или в виде металлического стержня, длина которого равна $1/3$ длины реальной лазерной искры.

3. Установлена целесообразность оптического пробоя над вершиной стержневого молниеотвода, увеличивающего эффективную высоту молниеотвода на длину лазерной искры даже при относительно малом заполнении плазменными образованиями канала искры (не более 0.1 общей длины канала лазерной искры).

Список литературы

- [1] Александров Г.Н., Иванов В.Л., Базелян Э.М., Садылова Е.А. // Электричество. 1973. № 3. С. 38–42.
- [2] Курилов В.А. // Изв. вузов. Энергетика. 1978. № 11. С. 24–30.
- [3] Александров Г.Н., Кадзов Г.Д. // Электричество. 1987. № 2. С. 57–60.
- [4] Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кадзов Г.Д. и др. // Электричество. 1980. № 2. С. 47–49.
- [5] Александров Г.Н., Иванов О.Г., Иванов О.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 16. С. 19–23.
- [6] Понизовский А.З. Канд. дис. М., 1983. 218 с.
- [7] Анисимов Е.И., Богданов О.В., Гайворонский А.С. и др. // Электричество. 1988. № 11. С. 55–58.

С.-Петербургский государственный
университет

Поступило в Редакцию
15 декабря 1992 г.